Klimaanpassung
[BESTKLIMA]
Remscheid.Solingen.Wuppertal

RWTH AACHEN UNIVERSITY

BESTKLIMA

Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

BERICHT

STADT REMSCHEID DER OBERBÜRGERMEISTER

Solingen

STADT WUPPERTAL

DAS BERGISCHE STÄDTEDREIECK

BESTKLIMA

Bericht: Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Bearbeitung

RWTH Aachen, Geographisches Institut,
Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie
Dr. Gunnar Ketzler, M.A.
Cathrin Werkmeister, M.Sc.
Dimitri Falk, M.Sc. (Kartographie)

Mitarbeit

Isabell Maras, M.Sc. (Bioklima)
Bastian Paas, M.Sc. (Messprogramm)
Dr. Timo Sachsen, M.A. (Messprogramm)
Arne Thiemann, B.Sc. (Grafik)

BESTKLIMA ist ein Kooperationsprojekt des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen und den Städten Remscheid, Solingen und Wuppertal sowie der Bergischen Struktur- und Wirtschaftsförderungsgesellschaft

Gefördert durch:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

NATIONALE KLIMASCHUTZ INITIATIVE

„DAS – Umsetzung der Regionalen KlimaAnpassungsstrategie im Bergischen Städtedreieck (BESTKLIMA)“
Förderkennzeichen 03 DAS 039

Stand: Juni 2018

Vorwort

Im Rahmen des BESTKLIMA-Projekts ("Entwicklung, Test und Evaluation eines Managementsystems, zur Umsetzung und Qualitätssicherung von Teilkonzepten Anpassung - am Beispiel der Regionalen KlimaAnpassungsstrategie im Bergischen Städtedreieck") soll das vorhandene Klimaschutzteilkonzept „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid“ gemeinsam mit regionalen Akteuren, speziell zusätzlich mit der Stadt Wuppertal, der Bergischen Entwicklungsagentur und weiteren Personen und Institutionen, umgesetzt werden. Dabei soll speziell auch ein übertragbares Qualitätsmanagement- und Evaluationssystem und auch ein Monitoring des städtischen bzw. regionalen Anpassungsfortschritts u.a. durch ein standardisiertes Berichtswesen und kontinuierliche Evaluationen entwickelt werden. Auch soll untersucht werden, wie die komplexen Anpassungsvorhaben auf stadtregionaler Ebene organisiert und gesteuert werden können.

Bei den verschiedenen Akteuren war – trotz bereits erfolgter gemeinsamer Teilprojekte – eine teils sehr unterschiedliche Ausgangslage in Bezug auf Daten zur aktuellen klimatischen Situation gegeben (insbesondere wegen teils nicht bzw. mit unterschiedlichem Erstellungsdatum oder unterschiedlichem Bearbeitungsumfang vorliegenden Klimaanalysen). Die für die Entwicklung bzw. Umsetzung einer gemeinsamen Anpassungsstrategie erforderliche Angleichung der Datenlage sollte durch eine klimatologische Zusatzuntersuchung beseitigt werden. Am 18.12.2015 wurde das Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie der RWTH Aachen (PGK) mit der entsprechenden Zusatzuntersuchung in Form des Teilprojekts „Siedlungsklimatische Modellierung“ im Rahmen des Projekts BESTKLIMA betraut.

Dem war ein Diskussionsprozess im Projekt BESTKLIMA vorausgegangen, in dem die Ausgangslage der drei beteiligten Städte für Prozesse der Klimaanpassung beschrieben, die noch vorhandenen Unterschiede herausgearbeitet und die genaue Ausgestaltung des Teilprojekts „Siedlungsklimatische Modellierung“ vor allem in Bezug auf den unterschiedlichen Informationsbedarf der Städte zu verschiedenen Aspekten der siedlungsklimatischen Situation geklärt wurde. Auch innerhalb des Teilprojekts war letztlich eine iterative Vorgehensweise erforderlich, bei der die Projektpartner und das Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie der RWTH Aachen prozessbegleitend die jeweils relevanten Fragestellungen im Rahmen der durch den Auftrag vorgegeben Möglichkeiten abstimmen. Bei Remscheid stand der Aspekt der Angleichung der Datengrundlagen vor allem vor dem Hintergrund einer fehlenden Klimaanalyse im Vordergrund, bei Solingen wurde der Bedarf vor allem an einer Evidenzbasis für anstehende Entscheidungen gesehen und in Wuppertal war

eine genauere Differenzierung bzw. Darstellung von flächenbezogenen Effekten spezieller Fragestellungen gewünscht. Von allen Städten wurde zudem jeweils ein Untersuchungsgebiet benannt, für das dann auch eine genauere Analyse speziell von Hot-Spots durchgeführt werden sollte.

Neben dem vorgesehenen Untersuchungsauftrag lag es auf der Hand, in dem Bericht zum Teilprojekt den inzwischen erweiterten Kenntnisstand zum Klimawandel – vor allen auch in Verbindung mit dem jüngsten IPCC-Bericht – aufzubereiten; durch die Ende 2016 veröffentlichten neuen Regionalisierungen und neuen Datenauswertungen für NRW (LANUV 2016 a und b) war dafür auch die Basis gegeben.

Der vorliegende Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen. Ein dazugehöriger Anhan-band enthält die fachlichen Hintergrundinformationen und spezielle Einzelergebnisse zu jedem Kapitel.

Aachen, den 27.6.2018

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ... 1-2

Abbildungsverzeichnis ... 1-6

Tabellenverzeichnis ... 1-9

Zusammenfassung ... 1-10

Einleitung ... 1-11

1 Methodik ... 1-14

1.1 Kaltluftmodellierungen ... 1-15

1.2 Messfahrten und Geostatistik – Hot Spots ... 1-19

1.2.1 Durchführung der Messkampagnen ... 1-19

1.2.2 Geostatistische Auswertung der Messkampagnen ... 1-21

1.3 Humanbiometeorologische Analysen ... 1-22

1.3.1 Humanbiometeorologische Analyse der Messdaten ... 1-23

1.3.2 Human-biometeorologische Befragung an den Messstandorten ... 1-24

1.3.3 Stadtteilbezogene Anwohner-Umfrage des ISB ... 1-25

2 Untersuchungsstandorte und klimatische Einordnung ... 2-14

2.1 Untersuchungsstandorte ... 2-1

2.1.1 Solingen-Ohligs ... 2-1

2.1.2 Remscheid-Ostbahnhofsviertel ... 2-2

2.1.3 Wuppertal-Arrenberg ... 2-4

2.2 Das Klima im Bergischen Land ... 2-6

3 Siedlungsklimatische Modellierung für die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal ... 3-1

3.1 Klimatologische Einordnung des Sommers 2016 im Bergischen Land ... 3-3

3.2 Siedlungsklimatische Modellierungen 3-9

3.2.1 Siedlungsklimatische Modellierung Gesamtgebiet 3-10

3.2.2 Siedlungsklimatische Modellierung Remscheid 3-18

3.2.3 Siedlungsklimatische Modellierung Solingen 3-64

3.2.4 Siedlungsklimatische Modellierung Wuppertal 3-98

3.3 Neueste Klimaszenarien für NRW 3-144

Glossar G-1

Quellen Q-1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Großräumige Lage und Höhenlage im Umfeld des Untersuchungsgebiets..... 1-17
Abb. 1-2: Großräumige Lage und Landnutzung im Umfeld des Untersuchungsgebiets 1-18
Abb. 1-3: Messstation 1-20
Abb. 1-4: Messfahrzeug 1-20
Abb. 1-5: Schematische Darstellung des Konzepts der geostatistischen Analysen 1-21
Abb. 2-1: Messstandorte in Solingen-Ohligs..... 2-2
Abb. 2-2: Messstandorte in Remscheid-Ostbahnhofsviertel..... 2-3
Abb. 2-3 Messstandorte in Wuppertal-Arrenberg..... 2-5
Abb. 3-1: Temperaturverlauf im Sommer 2016 und Messtermine..... 3-4
Abb. 3-2: Anzahl der heißen Tage im Untersuchungsgebiet 2001 - 2016 3-5
Abb. 3-3: Trend der heißen Tage für Wuppertal-Buchenhofen 3-6
Abb. 3-4: Trend und Projektion bzw. Daten für W-Buchenhofen..... 3-6
Abb. 3-5: Anzahl der Tropennächte im Untersuchungsgebiet 2001 - 2016 3-7
Abb. 3-6: Trend der Tropennächte für Düsseldorf..... 3-8
Abb. 3-7: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – frühe Nacht..... 3-14
Abb. 3-8a: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – späte Nacht 3-15
Abb. 3-8b: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – Abkühlung 3-16
Abb. 3-9: Auffälligkeiten der Kaltluftsituation im Untersuchungsgebiet..... 3-17
Abb. 3-10: Remscheid – Geländeverhältnisse..... 3-19
Abb. 3-11: Remscheid – Landnutzungsstruktur..... 3-20
Abb. 3-12: Remscheid – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht..... 3-21
Abb. 3-13: Remscheid – Kaltluftmerkmale in der späten Nacht 3-25
Abb. 3-14: Remscheid – Kaltluftüberströmungen und nächtliche Abkühlung 3-26
Abb. 3-15: Remscheid-Ostbahnhof – Gebäudedichte..... 3-29
Abb. 3-16: Remscheid-Ostbahnhof – Versiegelungsgrad 3-30
Abb. 3-17: Remscheid-Ostbahnhof – Wald-/Parkdichte..... 3-31
Abb. 3-18: Remscheid-Ostbahnhof – Grünflächendichte 3-32
Abb. 3-19: Remscheid-Ostbahnhof und Umgebung - Temperaturmodell..... 3-33
Abb. 3-20: Remscheid - Standorte der human-biometeorologischen Untersuchungen 3-36
Abb. 3-21: Remscheid – Ergebnisse der human-biometeorologischen Untersuchungen .. 3-37

Abb. 3-22: Remscheid – Ergebnisse der Passantenbefragung 3-38
Abb. 3-23: Tage mit Kaltluftüberströmung in Stöcken 3-39
Abb. 3-24: Klimafunktionskarte Remscheid 3-41
Abb. 3-25: Sonderuntersuchungsgebiet Borner Straße / Erdbeerfelder 3-46
Abb. 3-26: Sonderuntersuchungsgebiet Hohenhagen 3-49
Abb. 3-27: Sonderuntersuchungsgebiet Wolfstraße 3-52
Abb. 3-28: Sonderuntersuchungsgebiet Gleisdreieck 3-56
Abb. 3-29: Sonderuntersuchungsgebiet Großhülsberg 3-60
Abb. 3-30: Sonderuntersuchungsgebiet Ostbahnhof 3-63
Abb. 3-31: Solingen – Geländeverhältnisse 3-65
Abb. 3-32: Solingen – Landnutzungsstruktur 3-66
Abb. 3-33: Solingen – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht 3-68
Abb. 3-34: Solingen – Kaltluftmerkmale in der späten Nacht 3-69
Abb. 3-35a: Solingen-Ohligs – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht 3-71
Abb. 3-35b: Solingen – Kaltluftüberströmungen 3-72
Abb. 3-29: Son Abb. 3-36: Solingen-Ohligs – Gebäudedichte 3-75
Abb. 3-37: Solingen-Ohligs – Versiegelungsgrad 3-76
Abb. 3-38: Solingen-Ohligs – Wald-/Parkdichte 3-77
Abb. 3-39: Solingen-Ohligs – Grünflächendichte 3-78
Abb. 3-40: Solingen-Ohligs - Temperaturmodell 3-80
Abb. 3-41: Solingen: Temperaturmodell (nur Landnutzung) 3-82
Abb. 3-42: Solingen: Temperaturmodell (Geländehöhe und Landnutzung) 3-83
Abb. 3-43: Solingen: Temperaturmodell (nur Geländehöhe 3-84
Abb. 3-44: Solingen - Standorte der human-biometeorologischen Untersuchungen 3-86
Abb. 3-45: Solingen – Ergebnisse der human-biometeorologischen Untersuchungen 3-87
Abb. 3-46: Solingen – Ergebnisse der Passantenbefragung 3-88
Abb. 3-47 Solingen-Ohligs: Messfahrt am 23.6.2016 3-90
Abb. 3-47a: Solingen-Ohligs: Messfahrt am 23.6.2016 – Straßenabschnitte 3-91
Abb. 3-48: UTCI-Belastungswerte für Straßenabschnitte in Solingen 3-92
Abb. 3-49: Zusammenhang zwischen UTCI und Begrünungsgrad in Solingen 3-92
Abb. 3-50: INKAS-Modell Temperaturdifferenzen 3-96
Abb. 3-51: INKAS-Modell Temperatureffekt Versiegelungsgrad 3-97

Abb. 3-52: Wuppertal – Geländeverhältnisse. 3-100
Abb. 3-53: Wuppertal – Landnutzungsstruktur 3-101
Abb. 3-54: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht 3-106
Abb. 3-55: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der späten Nacht 3-108
Abb. 3-56: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht - Detail 3-109
Abb. 3-57: Wuppertal – Messpunkte in Arrenberg. 3-112
Abb. 3-58: Wuppertal – Gebäudedichte in Arrenberg 3-113
Abb. 3-59: Wuppertal – Versiegelungsgrad in Arrenberg. 3-114
Abb. 3-60: Wuppertal – Wald- und Parkdichte in Arrenberg 3-115
Abb. 3-61: Grünflächendichte – Messpunkte in Arrenberg 3-116
Abb. 3-62: Wuppertal – Arrenberg: Temperaturmodell in Belastungsklassen 3-119
Abb. 3-62a: Wuppertal – Arrenberg: Lage von Belastungsbereichen 3-120
Abb. 3-63: Wuppertal - Standorte der human-biometeorologischen Untersuchungen 3-122
Abb. 3-64: Wuppertal - bioklimatische Belastung an Extremstandorten 3-123
Abb. 3-65: Wuppertal – Ergebnisse der Passantenbefragung 3-124
Abb. 3-66: Kaltluftvolumenstromdichte in Wuppertal-Arrenberg 3-127
Abb. 3-67: Häufigkeit von Schwachwindstunden an Strahlungstagen (Uhrzeit = MEZ) ... 3-129
Abb. 3-68: Häufigkeit von Windrichtungen an Strahlungstagen (Uhrzeit = MEZ). 3-129
Abb. 3-69: Veränderung des Kaltlufteinflusses bei Begrünung statt Bebauung 3-132
Abb. 3-70: Wuppertal – ohne / mit Grünstreifen entlang der Wupper 3-136
Abb. 3-71: Wuppertal - Zunahme bzw. Abnahme des Kaltlufteinflusses 3-137
Abb. 3-72: Wuppertal - Zunahme bzw. Abnahme des Abkühlungseffekts 3-139
Abb. 3-73: Wuppertal – Kaltluftvolumenstrom 3 h nach Sonnenuntergang 3-140
Abb. 3-74: Klima-Zustand im Bergischen Städtedreieck 3-145
Abb. 3-75: Jahresmitteltemperatur in NRW im Zeitraum 1880-2015 3-146
Abb. 3-76: Beobachtete und projizierte mittlere jährliche Lufttemperaturen in NRW 3-147
Abb. 3-77: Beobachtete und projizierte Heiße Tage pro Jahr in NRW 3-148

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Eckdaten der human-biometeorologischen Messungen 1-24

Tab. 1-2 Eckdaten zur humanbiometeorologischen Befragung..... 1-25

Tab. 3-1: Anzahl der heißen Tage im Untersuchungsgebiet 1948 - 2016 3-5

Tab. 3-2: Anzahl der Tropennächte im Untersuchungsgebiet 1948 - 2016 3-8

Zusammenfassung

Mit der nun vorliegenden Untersuchung „Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung“ im Rahmen des BESTKLIMA-Projekts sollten vorhandene Unterschiede im Untersuchungsgebiet des Bergischen Städtedreiecks (Remscheid, Solingen und Wuppertal) in Bezug auf den Informationsstand zur aktuellen klimatischen Situation ausgeglichen und klimatologische Sonderfragen in den einzelnen Städten geklärt werden.

Es ergab sich dabei einerseits, dass vor dem Hintergrund der anstehenden Aufgaben im Rahmen der Klimaanpassung in allen drei Städten eine genauere Lokalisierung und Charakterisierung sowohl der lokalen Hitzeinseln als auch der relevanten Kaltluftströme für die Ermittlung von Handlungsbedarfen und die Beurteilung von Vorhaben sinnvoll ist. Eine entsprechende Bearbeitung wurde mit einem geostatistischen Modellansatz auf Basis von einzelnen Messfahrtdaten bzw. mit Berechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. Es ergaben sich aufgrund der Bebauungsstrukturen und aufgrund von Lagemerkmalen der einzelnen Untersuchungsgebiete deutliche Unterschiede in Intensität und Form lokaler Hitzeinseln.

Andererseits wurden jenseits davon verschiedene örtliche Besonderheiten deutlich, die teilweise ganz unbekannt waren bzw. teilweise zwar grundsätzlich bekannt aber bisher räumlich nicht klar zuzuordnen waren. Insbesondere gilt dies für die komplexen Strömungsverhältnisse der Kaltluftströme im sehr steilen und verwinkelten Einzugsgebiet der Wupper und für die markanten Unterschiede, die sich aus der Höhenlage der Städte jeweils für die Anpassung an den Klimawandel ergeben.

Durch intensive Auswertung der (bzw. der Durchführung zusätzlicher) Messungen und Modellrechnungen war es so zum Beispiel möglich, die komplizierte Strömungsdynamik der Kaltluft speziell im Untersuchungsgebiet Wuppertal-Arrenberg nachzuvollziehen bzw. Effekte möglicher Nutzungsänderungen in Wuppertal besser einschätzen zu können. Auch konnten so erstmals quantitative Grundlagen z.B. für die Klimafunktionskarte in Remscheid gelegt werden. In Solingen war es so möglich, die Temperatureffekte von Straßenbegrünung konkret vor Ort zu erfassen und dann auch direkt in einem Planungsworkshop einzubeziehen.

Einleitung

In Rahmen von Klimaanpassungskonzepten für Städte stellen die zu erwartenden Temperaturveränderungen innerhalb der Städte einen besonderen Themenbereich dar. Durch parallel zum Klimawandel stattfindende Veränderungen in den Städten können die durch den Klimawandel allgemein bedingten Erwärmungstendenzen verstärkt oder auch abgemildert werden. Hier kommt der Stadtplanung eine besondere Rolle zu.

Fachlich sind damit vor allem die thermischen Wirkungen bei Hitzewetterlagen adressiert, weil sehr hohe Temperaturen mit Einschränkungen der Leistungsfähigkeit und erheblichen gesundheitlichen Risiken verbunden sind (siehe Kap. 1.3). Entsprechend der üblichen Vorgehensweise bei Klimaanpassungsstudien stehen dabei insbesondere Gebiete bzw. Prozesse besonderer Hitzebelastung tagsüber bzw. besonderer Abkühlungseffekte nachts im Vordergrund.

Dieser Bericht ist so aufgebaut, dass den – wegen der unterschiedlichen Ausgangslage – teils sehr unterschiedlichen Einzeluntersuchungen für drei Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal ein gemeinsamer Rahmen gegeben wurde, der den fachlichen Gesamtzusammenhang abbildet und dabei auch der räumlichen Verflechtung innerhalb des Bergischen Städtedreiecks Rechnung trägt. Zunächst wird auf die Methodik näher eingegangen (Kap. 1). Im darauffolgenden Kapitel werden die Standorte von Teiluntersuchungen und der Untersuchungszeitraum eingeordnet (Kap. 2). Kernstück des Berichts sind die klimatologische Einordnung des Untersuchungszeitraums, die Ergebnisse der siedlungsklimatischen Modellierungen für die drei Projektstädte und deren Bedeutung für die Klimawandelanpassung sowie die Einordnung der Ergebnisse in aktuelle Analysen zum Stand des Klimawandels in Form einer Kurzauswertung der neuesten Regionalisierungen und Klimatrends, die Ende 2016 für NRW veröffentlicht wurden (Kap. 3.1., 3.2 und 3.3). Abschließend werden die zentralen Ergebnisse zusammengefasst (Kap. 4).

Neben diesem stark ergebnisbezogenen Berichtsband liegt ein Anhangband vor, der die fachlichen Erläuterungen zum Berichtsband enthält; darin können genauere Erläuterungen zu den angewandten Methoden, der Messtechnik und den Untersuchungsstandorten nachgelesen sowie Karten, Tabellen und Abbildungen zu weitergehenden Analysen eingesehen werden. Im Berichtstext sind bei Bedarf an den entsprechenden Stellen Verweise zu den jeweiligen Abschnitten im Anhang eingefügt. Er ist in die gleichen Kapitel wie der Berichtsband unterteilt. Einige spezielle Teiluntersuchungen, die gleichzeitig auch die Funktion eines Fachgutachtens haben können, sind in die Kapitel zu den entsprechenden Städten integriert aber auch unabhängig vom Bericht verwendbar.

Gegenstand dieses Berichts sind nur die Ergebnisse aus dem Teilprojekt siedlungsklimatische Modellierung des Projekts BESTKLIMA (sowie einer Aufbereitung aktueller Regionalisierungen der Klimawandelfolgen für NRW). Anhand der siedlungsklimatischen Modellierungen in den Projektstädten Solingen, Remscheid und Wuppertal können konkrete Aussagen zum gegenwärtigen bzw. zukünftig zu erwartenden Stadtklima in den jeweiligen Städten getroffen werden; es wurden eigene Mess- und Modelldaten erhoben und mittels anerkannter wissenschaftlicher Methoden ausgewertet.

Die Klimawandelbetroffenheit der Städte Solingen und Remscheid wurde für dieses Themenfeld auf Basis von Stadtstrukturdaten bereits bei der Erstellung der Anpassungsstrategie analysiert („Klimaschutzteilkonzept - Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid", ISB, 2013. Damit sollte herausgearbeitet werden, „… in welchen räumlichen Bereichen es durch das Zusammentreffen verschiedener Eigenschaften Anhaltspunkte dafür gibt, dass eine erhöhte Exposition, Sensitivität oder Betroffenheit gegenüber dem Klimawandel bestehen könnte. […]" Dabei wurden „…keine Prognosedaten aus Klimamodellen …" verwendet (Stadt Solingen, 2013). Basierend auf diesen Ergebnissen wurden im gegenwärtigen Projekt ergänzende Analysen und diese eben auch für das gesamte Bergische Städtedreieck durchgeführt. In Bezug auf allgemeine Merkmale des Stadtklimas vor Ort sei auf den Endbericht des Projekts „Klimaschutzteilkonzept - Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid" sowie auf die zusätzlich vorliegenden sonstigen Klimastudien für die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal verwiesen. Allgemeine Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Städte können u.a. dem LANUV-Fachbericht Nr. 74 (LANUV, 2016 a) entnommen werden.

Für den Kernauftrag dieses Teilprojekts „Siedlungsklimatische Modellierung" wurden – vom Projektablauf her –zuerst Kaltluftabflüsse und die mit ihnen verbundenen nächtlichen Abkühlungspotentiale für die betrachteten Städte und die großräumige Umgebung anhand von Landnutzungs- und Reliefdaten modelliert, um den Gesamtzusammenhang der Kaltluftbewegungen im Gebiet zu verstehen (Kap. 3.2.1). Auf Basis der Ergebnisse wurden Gebiete identifiziert, an denen diese speziellen Abkühlungseffekte vorliegen und solche, die von der Kaltluft nicht oder nur teilweise erfasst werden. Für die weiteren Analysen waren speziell auch letztere von Interesse, denn in diesen Gebieten können sich an Hitzetagen unterschiedlich intensive, mitunter massive Wärmeinseln ausbilden, so dass die Hitzebelastung dann aufgrund der fehlenden Abkühlung durch die nächtlichen Kaltluftabflüsse dort besonders hoch, und ebenso die gesundheitlichen Belastungen bzw. Beeinträchtigungen für die Stadtbevölkerung besonders groß sind. Für einige Fragestellungen wurden in einem zweiten Verfahrensschritt Detailmodellierungen lokaler Kaltlufteffekte vorgenommen.

Für die weiteren Untersuchungen zur Lokalisierung besonderer Problem- bzw. Entlastungsgebiete wurden folgende Stadtviertel/-gebiete als spezielle Untersuchungsgebiete zur exemplarischen Bearbeitung abgesprochen und die Ergebnisse in Kap. 3.2.2 bis Kap. 3.2.4 dokumentiert:

- Solingen-Ohligs,
- Remscheid-Ostbahnhofsviertel,
- Wuppertal-Arrenberg.

In diesen Stadtquartieren wurden meteorologische Messungen an besonders heißen Tagen im Sommer 2016 als Grundlage für eine geostatistische Temperaturmodellierung in Verbindung mit einem (human-) bioklimatischen Untersuchungsprogramm sowie eine hitzebezogene Anwohnerbefragung des ISB durchgeführt. Zusätzlich zu dieser HitzeuUmfrage wurden Passanten während der meteorologischen Messungen zu ihrem thermischen Komfort (von Mitarbeitern des PGK) befragt. Eine Datenauswertung der Anwohnerbefragung in Verbindung mit den meteorologischen Messdaten ist im Abschlussbericht des Gesamtprojekts BESTKLIMA enthalten.

Die planungsbezogenen Kapitel werden mit stichwortartigen Zusammenfassungen der wichtigsten Fachinhalte und Empfehlungen eingeleitet; dies dient dazu, die Kerninformationen möglichst leicht zugänglich zu machen. Die wichtigsten Fachbegriffe sind in einem Glossar erläutert.

1 Methodik

Es wurden für diese Untersuchung einerseits Klimamodellierungen zur klimatischen Situation in den drei Städten durchgeführt und andererseits Klimadaten, u.a. durch Punktmessungen, erfasst. Bei den Modellierungen handelt es sich um Kaltluftmodellierungen und um geostatistische Modellierungen. Der methodische Teilansatz für die Kaltluftmodellierungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes basiert auf einem zweistufigen Vorgehen: es wurden Kaltluftmodellierungen zunächst für das Gesamteinzugsgebiet der Wupper und dann für Detailstudien in Teilgebieten durchgeführt.

Als methodischer Ansatz zur Erfassung der klimatischen Situation in den speziellen Untersuchungsgebieten und deren Umgebung bei Hitzeereignissen wurde eine Kombination aus Klimamessungen (Punktmessungen und Messfahrten), einer darauf basierenden geostatistischen Modellierung sowie von begleitenden human-biometeorologischen Untersuchungen gewählt. Die Daten der Messfahrten wurden (ebenfalls während des gleichen Hitzeereignisses) im und in der Umgebung des Untersuchungsgebiets erfasst. Sie dienen vor allem einer geostatistischen Modellierung zum Erfassen des ortsspezifischen Zusammenhangs zwischen Lufttemperaturen und planerisch beeinflussbaren Stadtmerkmalen. Teils wurden auch Sonderauswertungen eigens erhobener Messdaten vorgenommen (Solingen: Wirkung von Straßenbäumen; Remscheid: temporäre Messstation zur Kaltluftsituation).

Der darüber hinausgehende kombinierte Ansatz aus meteorologischen Messungen bzw. geostatistischen Modellierungen und zusätzlichen Untersuchungen bietet auch die Möglichkeit des direkten Vergleichs von Messergebnissen an Referenzstandorten über eine Befragung mit den Erfahrungen betroffener Personen. Auf diese Weise kann die subjektive Wahrnehmung der Klimaelemente und der Stadtstrukturen durch die Stadtbevölkerung mit berücksichtigt werden sowie Rückschlüsse auf Auswirkungen eines Hitzetages auf die Gesundheit und das Wohlbefinden gezogen werden. Die Punktmessungen an Referenzstandorten erfolgten mit jeweils einem Paar mobiler Messstationen an je einem Standort mit vermutet besonders starker bzw. besonders schwacher Hitzebelastung während eines Hitzeereignisses. Neben der eigenen Passantenbefragung an den Messstandorten während der Hitzewetterlage (siehe Kap. 3.2.2., 3.2.3., 3.2.4 und Anhang) werden ausgewählte Befragungsergebnisse aus der vom ISB durchgeführten Hitze-umfrage von Anwohnern berücksichtigt und zusammen mit den identifizierten Hotspots betrachtet (siehe BESTKLIMA-Abschlussbericht).

Zusätzlich wurden Daten von Messstationen der öffentlichen Messnetze sowie Daten und Klimaprojektionen aus Literaturquellen analysiert um den aktuellen Stand klimatischer Veränderungen im Untersuchungsgebiet zu erfassen.

Für die praktische Arbeit in der Stadtplanung sollen die Kaltluftmodellierungen und die geostatistischen Analysen flächenhafte Informationen über Potentiale bei der Klimaanpassung liefern, die sich aus vorhandenen Klimaanalysen entweder nicht quantitativ, nicht bewertbar oder nicht flächenhaft ableiten lassen. Die Art und Weise der Datengewinnung und -aufbereitung ist darauf ausgelegt eben solche praktisch anwendbaren und nachvollziehbaren Informationen flächenhaft bereit zu stellen.

Die darüber hinaus durchgeführte Analyse des Klimas im Bergischen Land, der humanbiometeorologischen Situation in den konkreten Untersuchungsgebieten und der Daten über bereits stattgefundenen und noch zu erwartenden Klimawandel in der Region sollen zudem einen Bewertungsrahmen liefern, der die sinnvolle Zeitperspektive und Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen bewertbar machen soll. Denn in dem sehr stark gegliederten und differenzierten Raum des Bergischen Städtedreiecks ist die klimatische Ausgangslage auf sehr engem Raum oft sehr verschieden.

Auf Basis der bislang fehlenden flächendeckenden Darstellung von Klimainformationen und des klimawandelbezogenen Bewertungsrahmens können dann die praktischen Werkzeuge des BESTKLIMA-Gesamtprojekts wie z.B. der „Klima-Check in der Bauleitplanung“ sinnvoll eingesetzt werden.

In den vergangenen Jahren sind als Erweiterungen der klassischen Stadtklimaanalysen verschiedene weitere Untersuchungsansätze entwickelt worden, die auch für die Klimaanpassung sinnvoll einsetzbar sind; dazu gehört zum Beispiel die Erfassung und Bewertung der Kühlleistung von Böden. Gemeint ist damit die unterschiedliche Fähigkeit von Böden, Wärme in den Untergrund abzuleiten und damit einen Beitrag zur Abmilderung von Hitzebelastung zu liefern. In dem für dieses Projekt gegeben Rahmen war es nicht möglich, zusätzlich noch solche während der Projektlaufzeit oder kurz davor publizierte Ansätze zu integrieren; es sind aber keine Hinderungsgründe zu sehen, solche Untersuchungen nach und nach in die Anpassungsstrategien aufzunehmen.

1.1 Kaltluftmodellierungen

Lokale Kaltluft bildet sich normalerweise abends und nachts bei windschwacher und wolkenarmer Witterung („Strahlungswetterlage“) an größenordnungsmäßig einem Drittel aller (gerade auch heißer) Tage und kann dabei erhebliche Abkühlungsleistungen erbringen. Die Kalt-

luftmodellierungen zur Ermittlung dieser Abkühlungspotenziale und ihres Zusammenhangs im Gesamtgebiet wurden für das Einzugsgebiet der Wupper mit dem Kaltluftflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes für ein alle vermuteten räumlichen Wechselwirkungen umfassendes großes Gebiet zwischen Rheintal, Ruhrgebiet und Sauerland unter Verwendung der CORINE-Landnutzungsdaten und des ASTER-Geländemodells durchgeführt (siehe Abbildungen 1-1 und 1-2).

Aus der Auswertung dieser großräumigen Modellierung ergaben sich dann Detailfragen, die in höherer Auflösung für kleinere Teilgebiete nachmodelliert wurden. Hierbei wurde auf ALKIS-Landnutzungsinformationen bzw. das hoch aufgelöste Geländemodell DGM1 zurückgegriffen.

Die Outputdaten der Modellrechnungen wurden in Angaben zur Strömungsrichtung und -geschwindigkeit sowie in die Kaltluftmenge („Kaltluftvolumenstromdichte“) und die nächtliche Abkühlungsrate umgerechnet und –je nach Fragestellung – für einen Zeitpunkt in der frühen (3 h nach Sonnenuntergang) bzw. in der späten Nacht (8 h nach Sonnenuntergang) bearbeitet. Die Ergebnisse wurden dann jeweils im räumlichen Zusammenhang für planungsbezogene Fragestellungen analysiert (siehe Kap. 3.2.1 bzw. folgende); Details zur Methodik finden sich im Anhang (Kap. A.1.1).

Neben den allgemeinen Kaltluftanalysen für das Gesamtgebiet wurden noch zusätzliche Modellanalysen durchgeführt.

- Remscheid:
  - Kaltluftüberströmung in der Ortslage Stöcken
- Wuppertal:
  - Wirkung von Nutzungsalternativen von Industriebrachen in Langerfeld / Heckinghausen auf die Belüftungs- und Abkühlungssituation im Kernbereich von Wuppertal
  - Wirkung einer verstärkten Uferbegrünung an der Wupper auf die Belüftungs- und Abkühlungssituation im Kernbereich von Wuppertal

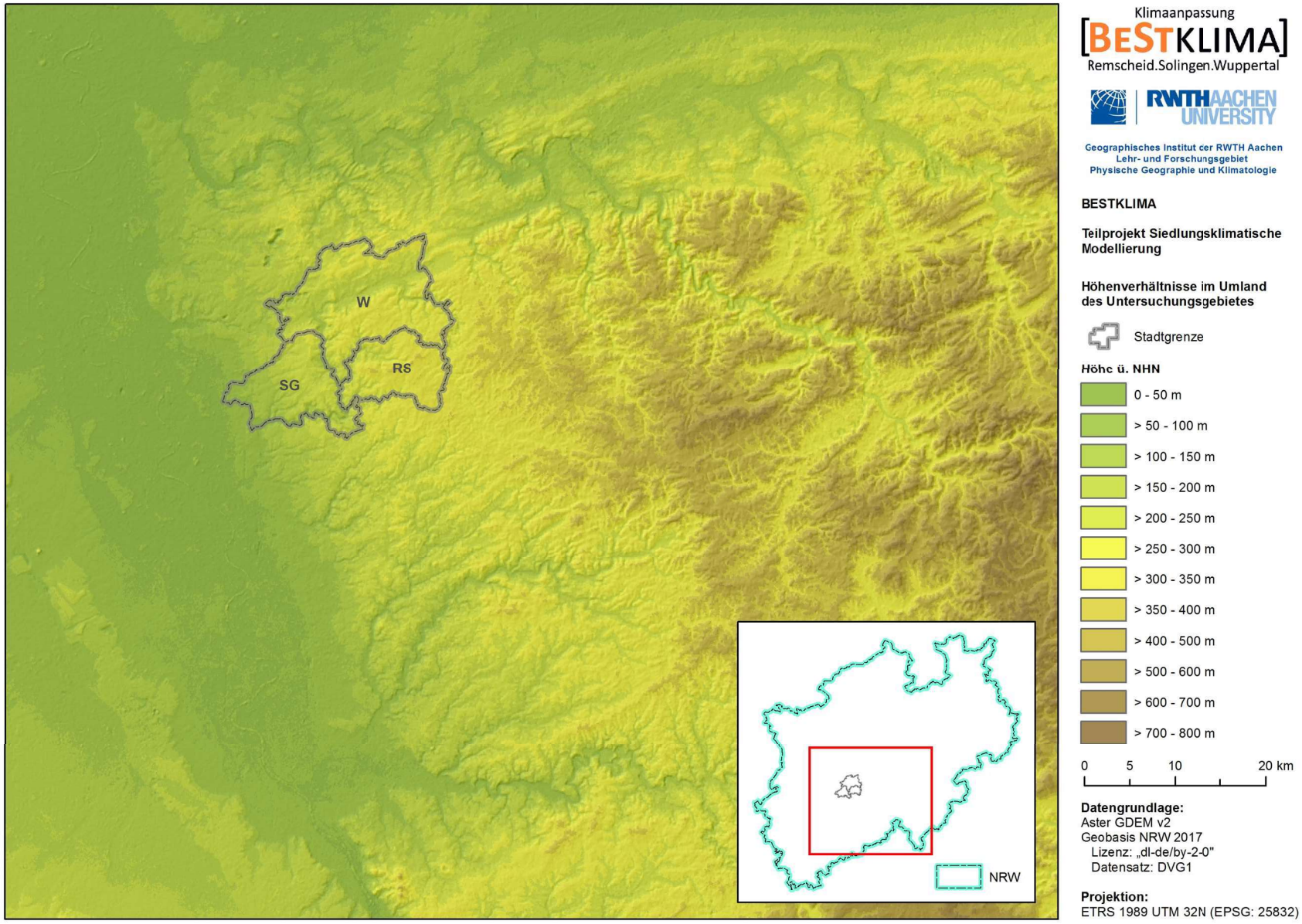


Abb. 1-1: Großräumige Lage und Höhenlage im Umfeld des Untersuchungsgebiets (RS – Remscheid, SG – Solingen, W – Wuppertal).

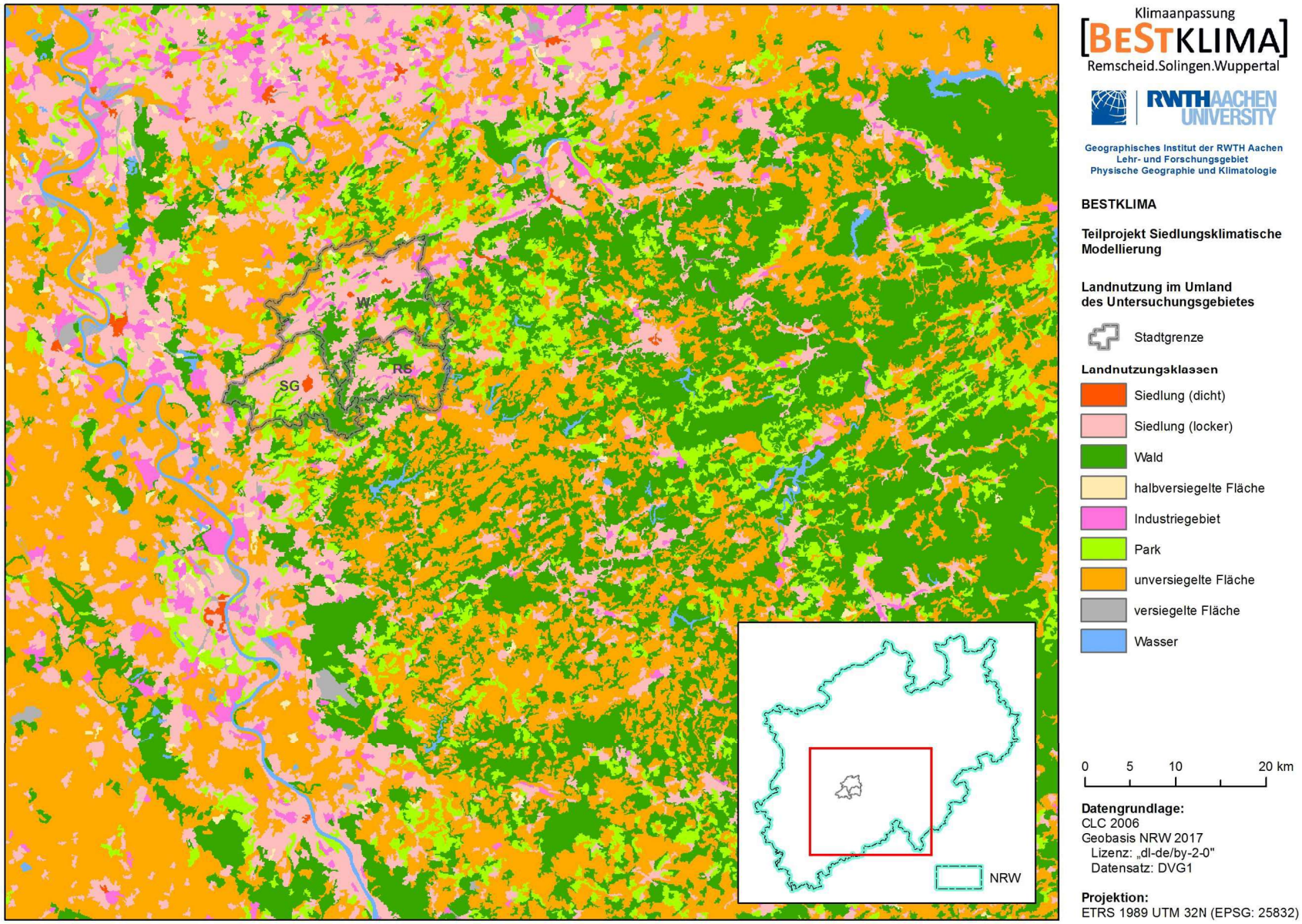


Abb. 1-2: Großräumige Lage und Landnutzung im Umfeld des Untersuchungsgebiets (RS – Remscheid, SG – Solingen, W – Wuppertal).

1.2 Messfahrten und Geostatistik – Hot Spots

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die Hitzebelastung in den Untersuchungsgebieten räumlich zu verorten und so belastungsbezogene Hot Spots ausfindig zu machen. Dies geschieht einerseits durch Messfahrten und andererseits durch eine geostatistische Analyse der Messfahrtdaten. Die Geostatistik dient dazu, den systematischen Zusammenhang zwischen planerisch beeinflussbaren Merkmalen und der Hitzebelastung zu erfassen und räumlich abzubilden.

1.2.1 Durchführung der Messkampagnen

Im Rahmen von jeweils einer Messkampagne an einem Sommertag (maximale Lufttemperatur ≥ 25 °C) bzw. Hitzetag (maximale Lufttemperatur ≥ 30 °C) in jeder Stadt wurden sowohl stationäre als auch mobile Messungen durchgeführt. Im Rahmen der stationären Messungen wurden am Messtag an zwei innerstädtischen Extremstandorten, einem begrünten und einem versiegelten Standort, im jeweiligen Stadtgebiet je eine automatische Wetterstationen betrieben (siehe Abb. 1-3). Dabei wurden die Klimaelemente Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlungsparameter sowie Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen. Genauere Details zur Messtechnik können dem Anhang zu diesem Bericht entnommen werden (siehe Anhang Kap. A1.2).

Die mobilen Messungen erfolgten in Form von Messfahrten entlang einer vorher festlegten Route durch das jeweilige Stadtgebiet. Dazu wurden mobile Sensoren zur Messung der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und der Strahlung an einem Fahrzeug montiert (siehe Abb. 1-4). Die Temperaturdaten wurden in Relativwerte zur nächstgelegenen Klimamessstation („Referenzstation“) bzw. für einige Auswertungen relativ zur Situation in Grünflächen am Stadtrand („Freilandtemperatur“) umgewandelt.

Neben den Messkampagnen für die Untersuchungsgebiete wurden noch folgende zusätzliche Messungen durchgeführt.

- Remscheid:
  - Betrieb der Messstation Borner Straße zur empirischen Absicherung der Kaltluftüberströmung in der Ortslage Stöcken



Abb. 1-3: Messstation (Foto: G. Ketzler).



Abb. 1-4: Messfahrzeug (Foto: G. Ketzler).

1.2.2 Geostatistische Auswertung der Messkampagnen

Zur Erfassung der räumlichen Struktur hitzebelasteter Gebiete (Hotspots) wurden die Messdaten der Messfahrten mittels geostatistischer Verfahren ausgewertet.
Bei der hier verwendeten Methode wurde die Temperatur relativ zur Freilandtemperatur verwendet. Diese Relativdaten der Temperatur wurden zusammen mit Flächennutzungsinformationen statistisch verarbeitet (multiple Landnutzungsregression). Das Ergebnis stellt die Temperaturverteilung über das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von den folgenden Merkmalen dar: Maß der baulichen Nutzung (Gebäudegrundfläche), Versiegelungsgrad, landwirtschaftliche Grün- und Ackerflächen und Wald bzw. innerstädtische Grünfläche. Details zu den Referenzstationen sowie Berechnungen können im Anhang im Kap. A1.2.2 nachgelesen werden.

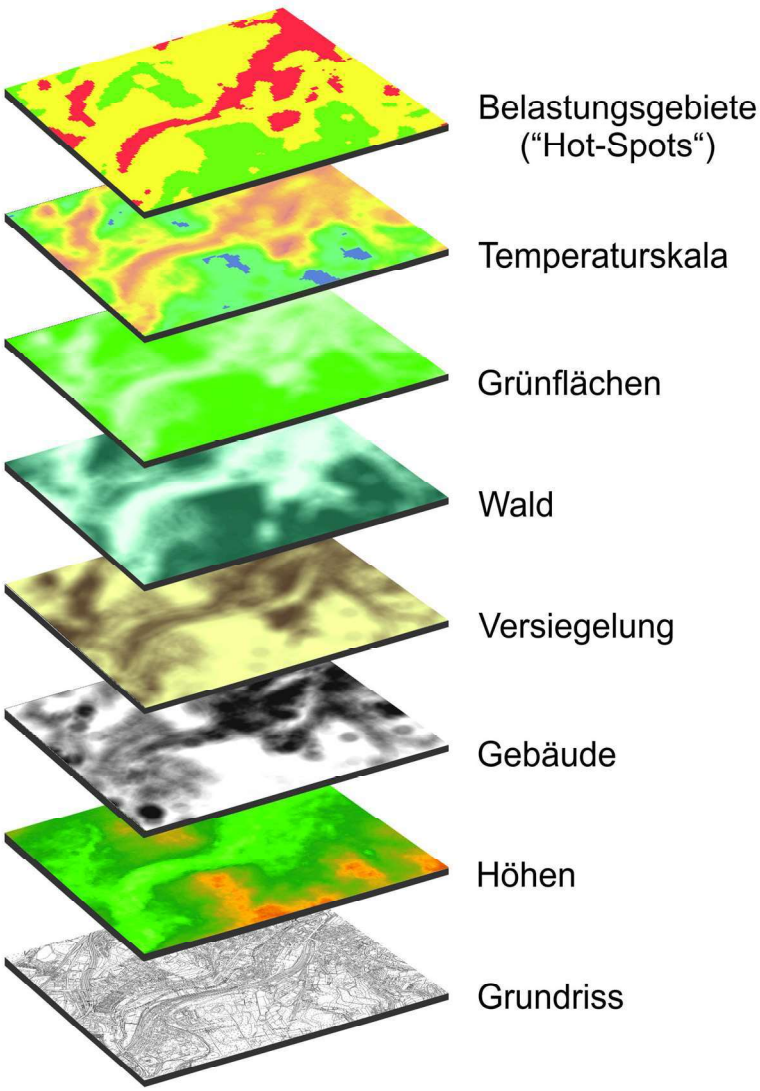


Abb. 1-5: Schematische Darstellung des Konzepts der geostatistischen Analysen (Grafik: H.-J. Ehrig).

Neben den geostatistischen Analysen für die Untersuchungsgebiete wurden noch Zusatzauswertungen durchgeführt.

- Solingen:
  - Analyse der Messfahrtdaten zu klimatischen Wirkungen von Straßenbäumen
- Remscheid:
  - Bewertung von geplanten Baugebieten
  - Lokalisierung von Hitzeinseln für eine vereinfachte Klimafunktionskarte

1.3 Humanbiometeorologische Analysen

„Die Human-Biometeorologie befasst sich (…) mit der Wirkung des Wetters auf den Menschen als einen natürlichen, physikalisch-chemischen Umweltfaktor. Hierbei lassen sich vier sogenannte Wirkungskomplexe unterscheiden: der thermische, der fotoaktinische, der luftchemische und der (…) neurotrope Wirkungskomplex“ (Hupfer & Kuttler 2005: 491).

In unserer human-biometeorologischen Analyse steht der thermische Wirkungskomplex im Vordergrund, um den Hitzestress an Sommertagen bzw. heißen Tagen Temperaturmaximum ≥ 25°C bzw. ≥ 30°C) zu bewerten. Mit Blick auf zunehmende Hitzeperioden und Hitzetage im Sommer im Zuge des Klimawandels im Zusammenspiel mit den Besonderheiten des Stadtklimas und dem Wachstum der Stadtbevölkerung gewinnen Analysen der Hitzebelastung im Sommer an Bedeutung. Daher wurde im Teilprojekt siedlungsklimatische Modellierung neben den geostatistischen Analysen auch eine human-biometeorologische Analyse der Messdaten durchgeführt.

Insbesondere der thermische und der luftchemische Wirkungskomplex überlagern sich in Städten, die gesundheitlichen Folgen addieren sich. Dabei ist vor allem festzuhalten, dass es viele Ähnlichkeiten zwischen dem räumlichen Verteilungsmuster der beiden Wirkungskomplexe gibt. Stadträume sind Gebiete sowohl veränderten Umsatzes der natürlichen Sonnenstrahlung in Form von Wärmeenergie („städtische Wärmeinsel“) als auch der Freisetzung künstlicher Luftbeimengungen („städtische Dunstglocke“). Insofern liefern viele Maßnahmen, die eine Reduzierung des Wärmeinseleffekts bewirken sollen, auch einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität.

Extreme Temperaturverhältnisse haben großen Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit, mit zunehmender Hitzebelastung wird speziell das Herz-Kreislauf-System vermehrt gefordert. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass Hitzewellen („Heat

Waves"; Gosling et al., 2014) für eine große Zahl von wetterbezogenen Todesfällen oder Erkrankungen verantwortlich gemacht werden. Dabei reicht die Spannweite von allgemeinen hitzebedingten Beschwerden und nachlassender Leistungsfähigkeit über Störungen der Thermoregulation bis hin zu lebensbedrohenden Hitzekrämpfen. Gefährdet sind überwiegend Personen mit Vorerkrankungen, ältere Menschen sowie Kleinkinder. Wie der Sommer 2003 gezeigt hat, können die Auswirkungen extremer sommerlicher Hitzeperioden immens sein (allein geschätzt 7.000 zusätzliche Todesfälle in Deutschland; EEA, 2005).

Neben Extremereignissen geben epidemiologische Untersuchungen für langzeitig aufgezeichnete Daten eine hohe Korrelation zwischen Mortalitätsrate und Temperatur im Hochsommer an. Allgemein wird geschätzt, dass von den etwa 10.000 Todesopfern aus den vergangenen 40 Jahren in Deutschland, die mit Wetterereignissen in Verbindung gebracht werden, mehr als 90 % auf Ereignisse wie Temperaturextreme zurückgeführt werden und nur weniger als 10 % auf Sturm- oder Überschwemmungsereignisse (Munich Re, 2012).

Eines der zentralen Ziele dieser Untersuchung ist es daher, die lokalen Belastungs- und Entlastungspotentiale durch Bioklimauntersuchungen an –in Bezug auf die Bandbreite der vor Ort vorhandenen Situation –innerstädtischen Extremstandorten zu erfassen. Dies dient insbesondere der Klärung der Frage, wie in Hitzeperioden kleinräumige Verbesserungen der Situation im Sinne von lokalen Klimaoasen wirken können.

1.3.1 Humanbiometeorologische Analyse der Messdaten

Auf Basis der in den drei Städten erhobenen mikrometeorologischen Daten erfolgt eine human-biometeorologische Auswertung. Verglichen werden dabei die Daten jeweils zweier Messstandorte pro Stadt, die sich durch einen sehr unterschiedlichen Versiegelungs- und Vegetationsgrad unterscheiden und damit innerstädtische Extremstandorte repräsentieren. Für die Beurteilung der Human-Biometeorologie wurden die notwendigen meteorologischen Parameter in einer Standardmesshöhe von 1.10 m an allen Standorten erfasst. Zur Bewertung des thermischen Komforts werden die beiden aktuelleren thermischen Bewertungsindizes PET und UTCI herangezogen (Erläuterungen hierzu: siehe Anhang). Vertiefende Informationen zu Bioklimaeffekten von Vegetation sind dem Anhang zu entnehmen. Die an den Messtagen bzw. an den Messstandorten unterschiedlichen Messbedingungen beeinflussen die Vergleichbarkeit der Daten und werden daher hier kurz dokumentiert. Während aller Messzeiträume herrschte eine windschwache sommerliche Strahlungswetterlage. Abgesehen von den –durch das jeweilige Nahumfeld verursachten – Unterschieden bei der Einstrahlung, gab es an den Stationsstandortpaaren jeweils auch Differenzen der mittleren Windgeschwindigkeiten. Vor allem in Remscheid und in Wuppertal waren diese so erheblich, dass

ein Effekt auf die Temperaturdifferenzen und vor allem die thermischen Indizes angenommen werden muss. In Remscheid ist dies vermutlich auf die offene Lage des Standorts in einer zur Hauptwindrichtung offenen Verflachung rund um das Ostbahnhofsgelände zurückzuführen; in Wuppertal ist ein deutlicher Düseneffekt zwischen den markanten Baukörpern in der Nahumgebung des Standorts wahrscheinlich.

Tab. 1-1: Eckdaten der human-biometeorologischen Messungen.

		Kernmesszeitraum	mittlere Windgeschwindigkeit	maximale Lufttemperatur
Remscheid	Begrünte Fläche	15:00h - 18:00h	0.2 ms^{-1}	30.7 °C
	Versiegelte Fläche	15:00h - 18:00h	1.1 ms^{-1}	30.9 °C
Solingen	Begrünte Fläche	15:00h - 18:00h	0.6 ms^{-1}	34.8 °C
	Versiegelte Fläche	15:00h - 18:00h	0.8 ms^{-1}	35.3 °C
Wuppertal	Begrünte Fläche	15:40h - 18:40h	0.7 ms^{-1}	33.1 °C
	Versiegelte Fläche	15:40h - 18:40h	1.6 ms^{-1}	33.9 °C

1.3.2 Human-biometeorologische Befragung an den Messstandorten

Neben der Berechnung von thermischen Indizes wurde die subjektive Wahrnehmung der Hitzebelastung durch die Bevölkerung an zwei lokalen Extremstandorten mittels Fragebogen erhoben. Der Ansatz aus Befragung und meteorologischen Messungen zur Ermittlung der Hitzebelastung an einem Sommertag bzw. Hitzetag ist eine bewährte Methode in der Human-Biometeorologie (Johansson et al. 2014). Der Fragebogen wurde in Anlehnung an den Fragebogen aus dem FuEco-Projekt zu Komfortbedingungen in städtischen Räumen (Maras et al. 2016) sowie an einen Fragebogen zur soziologischen und bioklimatischen Funktion städtischer Grünflächen aus einem Seminar am Geographischen Institut der RWTH Aachen (Paffen 2013) konzipiert. Zudem wurden einige Fragen aus der Hitzeumfrage des ISB übernommen, um einen Teil der Ergebnisse aus beiden Befragungen später vergleichen zu können.

Insgesamt wurden 76 Fragebögen ausgewertet (Tab. 1-2). Bei der Auswertung der einzelnen Fragestellungen wird die Anzahl der Befragten jeweils mit angegeben.

Tab. 1-2 Eckdaten zur humanbiometeorologischen Befragung.

Ort	Datum	Zeitraum	Befragte/h	Befragte an den Messstandorten	Befragte gesamt
Solingen-Ohligs	23.06.16	14:23-21:34 (ca. 7 h)	4,0	Park an der Wittenbergstraße: 20 Keldersstraße: 8	28
Remscheid-Ostbahnhofsviertel	14.09.16	15:10-17:50 (ca. 3 h)	2,3	Grünanlagen in Remscheid (Zuwegung Zum Kuckuck / Konsumterrassen): 3 Pirnaplatz: 4	7
Wuppertal-Arrenberg	25.08.16	15:05-20:34 (ca. 5,5 h)	7,5	Gutenbergplatz: 20 Robert-Daum-Platz: 21	41
Gesamt				Grünstandort: 43 versiegelter Standort: 33	N=76 (100%)

Der Stichprobenumfang in den jeweiligen Städten ist nicht allzu groß, für die humanbiometeorologische Teilfragestellung aber hinreichend. Denn die Eignung eines Stichprobenumfangs ist vor allem von der Untersuchungsfragestellung und somit von der Zielgruppe abhängig (Atteslander 2008: 264). In unserer Untersuchung stand das Wohlbefinden der Passanten an einem heißen Sommertag an zwei Extremstandorten im Vordergrund, wodurch die Zielgruppe eng definiert ist. Die Stichprobe in Remscheid ist hingegen auch für die human-biometeorologische Teilfragestellung zu gering, um aus den Ergebnissen repräsentative Aussagen treffen zu können.

Die Datenaufbereitung und -auswertung erfolgte in den Statistikprogrammen SPSS und MS Excel.

1.3.3 Stadtteilbezogene Anwohner-Umfrage des ISB

Das ISB hat im Projekt BESTKLIMA eine Hitzeumfrage bei Anwohnern der Untersuchungsgebiete durchgeführt, die im Zeitraum vom 15.06.16 – 03.07.16 stattfand. Ausgewählte Ergebnisse dieser Befragung werden mit den Ergebnissen unserer Analysen im Endbericht des Projekts BESTKLIMA verglichen. U.a. werden die identifizierten Hotspots in den jeweiligen Untersuchungsgebieten zusammen mit genannten Rückzugsorten aus der ISB-Umfrage betrachtet.

Die Auswertung ist derzeit noch nicht fertig gestellt (siehe BESTKLIMA-Endbericht).

2 Untersuchungsstandorte und klimatische Einordnung

Als Untersuchungsgebiete wurden in den drei Untersuchungsstädten Stadtgebiete ausgewählt, in denen sich den Kaltluftmodellierungen zufolge städtische Wärmeinseln im Sommer bilden können.

2.1 Untersuchungsstandorte

2.1.1 Solingen-Ohligs

Die Kaltluftmodellierungen (s. Kap. 3.3.) zeigen, dass sich sowohl im Stadtteil Ohligs als auch in der Innenstadt von Solingen intensivere lokale Wärmeinseln ausbilden können, die auch von lokaler Kaltluft nicht schnell aufgelöst werden. Da der Stadtteil Solingen-Ohligs sehr tief, am Rand der untersten Rheinterrassen, liegt, ist die Lufttemperatur durchschnittlich höher als in der hoch gelegenen Solinger Innenstadt. Aus diesen Gründen wurde der Stadtteil Solingen-Ohligs für die weiteren Untersuchungen in Solingen ausgewählt.

Als Messstandorte wurden in Ohligs der Park auf dem Grundstück der evangelischen Kirchengemeinde Ohligs (Standort Park an der Wittenbergstraße) sowie der Innenhof vor dem ehemaligen Rundbunker in der Keldersstraße (Standort Keldersstraße; Abb. 2-1:) gewählt. Diese liegen westlich des Solinger Hauptbahnhofs. Die Flächennutzungen in diesem Gebiet sind vielfältig. So finden sich neben Wohnbauflächen, gewerblichen Bauflächen, Misch- und Kerngebieten, Straßen- und Schienenwegen auch vereinzelt Sondergebiete und Grünflächen/-streifen vor (Stadt Solingen, 2005).

Für die Untersuchung ist neben der Flächennutzung in der Umgebung der Untersuchungsstandorte ebenso die Bebauungsstruktur wichtig, denn beides beeinflusst das Stadtklima sowie die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel und somit auch die thermische Belastung der Bevölkerung. Die Bebauung ist an beiden Untersuchungsstandorten gemischt und mehrgeschossig (ø 2-4 Geschosse): Am Parkstandort ist die Bauweise eher offen, am versiegelten Standort eher geschlossen.



Abb. 2-1: Messstandorte in Solingen-Ohligs (Fotos: B. Paas, G. Ketzler, R. Borger).

2.1.2 Remscheid-Ostbahnhofsviertel

Das Ostbahnhofsviertel, welches durch eine vielfältige Flächennutzungsstruktur (Siedlungsbereich, Gewerbe- und Einzelhandelsflächen, Straßen- und Schienenwege) gekennzeichnet ist, gehört zum Stadtbezirk Süd von Remscheid und war historisch gesehen ein Industriestandort (Stadt Remscheid, 2012). Gegenwärtig ist der nördliche Teil des Ostbahnhofsviertel immer noch durch Industrie und Gewerbe charakterisiert (ebd.: 33f).

Der Grünflächenanteil ist im betrachteten Gebiet nur gering, so liegt der Grünflächenanteil bspw. um den Untersuchungsstandortes herum bei <25 % (Stadt Remscheid, 2012: 37 f).

Insgesamt weist das betrachtete Stadtviertel einen hohen Versiegelungsgrad auf, z.T. von über 90 %. Die vorhandenen Grünzüge befinden sich größtenteils auf privatem Gelände (ebd.).

Der bemessene Grünstandort „Zuwegung Zum Kuckuck“ liegt nahe dem Intzeplatz und der Grünanlage „Zum Kuckuck“. Für den Messstandort auf einer versiegelten Fläche wurde der Pirnaplatz ausgewählt. Dieser liegt am Einkaufszentrum Brücken-Center. Beide Messstandorte sind in Abb. 2-2 eingezeichnet.



Abb. 2-2: Messstandorte in Remscheid-Ostbahnhofsviertel (Fotos: B. Paas, D. Falk, R. Borger).

2.1.3 Wuppertal-Arrenberg

Als Extremstandorte in Wuppertal-Arrenberg wurden der Grünstandort Gutenbergplatz und der versiegelte Standort Robert-Daum-Platz gewählt. Der Gutenbergplatz liegt im Untersuchungsquartier Arrenberg, das zum Stadtbezirk Elberfeld-West gehört und annähernd zentral in der Stadt Wuppertal liegt (Stadt Wuppertal, 2015). Dem Flächennutzungsplan (FNP) für die Stadt Wuppertal zufolge ist das Stadtquartier Arrenberg vor allem durch gemischte sowie gewerbliche Bauflächen gekennzeichnet. Darüber hinaus sind Sondergebiete (z.B. das Helios-Klinikum), einige Wohnbauflächen sowie Straßen- und Schienenwege vorzufinden. Bis 2030 will das „Klimaquartier Arrenberg“ als erstes Quartier einer deutschen Großstadt CO_2-neutral werden (Aufbruch am Arrenberg e.V., 2016). Eine Besonderheit des Grünstandorts ist die Lage an der Wupper (Stadt Wuppertal, 2009).

Die Bebauung in den Straßen um die Grünanlage herum ist im Süden geschlossen und mehrgeschossig (ø 3 Geschosse) (Simonsstraße südlich der Grünfläche) und im Osten eher offen (ø 3 Geschosse) (Pestalozzistraße). Im Norden grenzt die Grünanlage an die Wupper, dort befindet sich auch eine Haltestelle der Wuppertaler Schwebebahn. Westlich der Grünanlage befindet sich ein größerer freistehender Gebäudekomplex (ø 2,5 Geschosse) (Datengrundlage: Stadt Wuppertal, 2016a [LOD], Bezirksregierung Köln 2017, eigene Kartierung 2017).

Als versiegelter Untersuchungsstandort wurde der Robert-Daum-Platz gewählt. Die Bebauung um diesen Messstandort herum ist ebenfalls unterschiedlich: Nordwestlich und östlich des Messstandortes dicht, mehrstöckig und geschlossen (ø 4 Geschosse). Südlich des Robert-Daum-Platzes befindet sich ein großer, hoher Bürogebäudekomplex, die Bebauung ist hier eher offen strukturiert.

Die genauen Messstandorte sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Eine nähere Beschreibung der einzelnen Standorte ist im separaten Anhang zu finden (s. Kap. Untersuchungsgebiete und Messstandorte).



Abb. 2-3 Messstandorte in Wuppertal-Arrenberg (Fotos: Bastian Paas).

2.2 Das Klima im Bergischen Land

Das Klima in den Städten des Bergischen Landes ist insbesondere durch das Relief und geographische Lage am Rheinischen Schiefergebirge (siehe Abb. 1-1) sowie „im nordwestdeutschen Klimabereich mit maritimer Prägung, allgemein kühlen Sommern und relativ milden Wintern“ geprägt (Lohmeyer, 2000: 3ff). Darüber hinaus spielen hier Faktoren wie die Landnutzung (siehe Abb. 1-2) und stadtklimaprägende Faktoren, wie die Stadtgröße, Bebauungsstruktur und Emissionen eine Rolle, da Stadtgebiete hinsichtlich ihrer thermischen Belastung im Sommer untersucht wurden (Hupfer & Kuttler, 2005).

Prägende Faktoren für das lokale Klima in den Städten des Bergischen Städtedreiecks sind vor allem das sehr markante Relief in diesem Gebiet und die Landnutzung in ihrer Lage zum Relief. Demnach ist die Lufttemperatur in Remscheid tendenziell niedriger als in Solingen oder Wuppertal, da Remscheid im Vergleich zu den – tiefer gelegenen Teilen – der beiden anderen Städten deutlich höher gelegen ist und die Lufttemperatur um 0,6-1,0 K pro 100 Höhenmeter abnimmt.

Dabei ist insbesondere die Lage der innerstädtischen Verdichtungsbereiche von Bedeutung. In Remscheid liegt die Innenstadt in relativer Hochlage, die Stadtrandbereiche großflächig am Hang. In Solingen liegt die Innenstadt in Hochlage, das Nebenzentrum Ohligs hingegen in relativer Tieflage. Demgegenüber sind in Wuppertal die innerstädtischen Verdichtungsbereiche durchgehend in Tieflage, viele offene Siedlungsbereich in Hanglage, einige Nebenzentren in Hochlage. Dies bedeutet, dass gerade die am stärksten hitzegefährdeten Teile der drei Städte in puncto Höhe und damit in Bezug auf das Temperaturniveau stark unterschiedliche Bedingungen aufweisen.

Für Fragen der Klimaanpassung ist dies in besonderer Weise relevant. Das gegenwärtige Temperaturniveau gibt für die Klimaanpassung vor, wie weit die jeweiligen Städte im Erwärmungstrend des Klimawandels schon in ein Umfeld mit potentiell höherer bzw. häufigerer Hitzebelastung vorangeschritten sind. Es entsprechen dabei 200 m Höhenunterschied einem Temperatureffekt, der dem in NRW gemessenen Erwärmungstrend der letzten 100 Jahre entspricht (siehe Kap. 3.3). Für den zukünftig zu erwartenden weiteren Klimawandel bedeutet dies, dass der Handlungsdruck, den Erwärmungstrend in der Stadtplanung zu berücksichtigen, in Bezug auf die Stadtgebiete in Tieflage bereits größer ist als für die höher liegenden.

3 Siedlungsklimatische Modellierung für die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal

Hauptergebnisse

- Die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal und teils auch deren einzelne Ortslagen liegen aufgrund ihrer Höhenlage und anderer klimatischer Randbedingungen auf einem sehr unterschiedlichen thermischen Belastungsniveau;
- die Kuppenlagen sind dabei noch kaum von durch den Klimawandel bedingten Hitzeereignissen betroffen; hier wirkt sich die höhenbedingte Temperaturabnahme in Verbindung mit der guten Belüftung positiv aus, so dass auch bei relativ dichter Bebauung geringere bioklimatische Belastungen vorliegen;
- in den bebauten Tallagen ohne bzw. mit eingeschränktem Kaltlufteinfluss sind häufigere und intensivere Hitzeereignisse aber bereits heute ein Belastungsfaktor, während in Tallagen mit günstiger Kaltluftzufuhr die starke nächtliche Abkühlung für bioklimatische Entlastung sorgen kann; das untere Tal der Wupper weist nachts– und bei Hitzewetterlagen auch tagsüber - stellenweise auffällig niedrige Temperaturen auf, auf einigen Höhenrücken kommt es dabei auch zu Kaltluftüberströmungen;
- die Hanglagen nehmen eine Zwischenstellung ein: sie sind sowohl tagsüber wegen der Höhenlage als auch nachts wegen der Kaltluftzufuhr klimatisch weniger belastete Gebiete als die Tallagen, allerdings kann Bebauung an den Hängen die entlastende Zufuhr nächtlicher Kaltluft für die Tallagen behindern;
- im Einzelnen ist die Überlagerung von Geländeverhältnissen und Realnutzung sehr differenziert (siehe Detailbeschreibungen zu den Städten in Kap. 3.2.2 - 3.3.4);
- die klimatische Situation im Untersuchungszeitraum entsprach den im Zuge des Klimawandels bereits eingetretenen Erwärmungstendenzen bzw. den schon seit einigen Jahren prognostizierten Temperaturtrends.

Konsequenzen für die Planung

Bei der Beurteilung der klimatischen Effekte von Planungsvorhaben müssen die Geländeverhältnisse besonders sorgfältig überprüft werden, insbesondere

- ob aufgrund der höhenbedingten Temperaturabnahme allgemein ein eher höheres oder niedriges Temperatur- und dadurch höheres oder niedrigeres Belastungspotential bei sommerlichen Hitzewetterlagen vorliegt,

- ob aufgrund fortschreitender Erwärmungstendenzen in den nächsten Jahren schon ein höheres oder noch niedriges Temperaturniveau vorliegt,
- ob aufgrund der Lage im Gelände Kaltluftzufuhr gut oder nur eingeschränkt möglich ist,
- ob aufgrund der Merkmale des Vorhabens die Kaltluftzufuhr in empfindliche Bereiche unterhalb negativ beeinflusst werden kann,
- ob aufgrund der Merkmale des Vorhabens eine Verstärkung des Wärmeinseleffekts insgesamt oder lokal („Hot Spot“) erwartet werden kann.

In diesem Kapitel werden zunächst die klimatischen Eckdaten der Messkampagnen im Sommer 2016 eingeordnet (Kap. 3.1). Im Zentrum des Kapitels stehen die Ergebnisse der siedlungsklimatischen Modellierungen für das Gesamtgebiet und die einzelnen Städte: Remscheid, Solingen und Wuppertal (Kap. 3.2). Dann wird auf Grundlage der klimatischen Gegebenheiten der Untersuchungsgebiete auf bereits eingetretene und zukünftige Klimaänderungen eingegangen (Kap. 3.3).

Generell ist bei der Bewertung der Modellierungs- und Messergebnisse zu berücksichtigen, dass sich die betrachteten Städte bzw. teilweise auch die einzelnen Ortslagen aufgrund ihrer Höhenlage und anderer klimatischer Randbedingungen auf einem sehr unterschiedlichen Temperaturniveau befinden. Während die angrenzende Rheinebene auf einer Höhe von ca. 40 m ü. NHN liegt (Langenfeld), befindet sich in Solingen der Ortsteil Ohligs auf etwa 100 m ü. NHN und das Zentrum auf etwa 220 m ü. NHN, Wuppertal-Arrenberg und alle Innenstadtbereiche im Tal der Wupper auf etwa 150 m Ü. NHN, Lichtenplatz hingegen auf 350 m ü. NHN, und in Remscheid sind die tiefsten Lagen im Tal der Wupper bei etwa 110 m ü. NHN, die Innenstadt bei etwa 360 m ü. NHN (das Ostbahnhofsviertel bei etwa 310 m ü. NHN). Dies führt zu einem höhenbedingten Temperaturunterschied von ca. 2 - 3 K. In Bezug auf die derzeitigen Klimaprojektionen für NRW entspricht dies dem Unterschied zwischen dem Temperaturniveau von 2010 und 2070 bzw. 2090, d.h. das Zentrum von Remscheid wird vermutlich um das Jahr 2070 das Temperaturniveau erreichen, das Solingen-Ohligs heute schon aufweist.

3.1 Klimatologische Einordnung des Sommers 2016 im Bergischen Land

Hauptergebnisse

- Das Temperaturniveau des Sommers 2016 lag um ca. 1,4 K über dem langjährigen Mittel,
- die Zahl der heißen Tage (Tagesmaximum ≥ 30° C) bzw. der Tropennächte (nächtliches Temperaturminimum ≥ 20° C) lag über dem Niveau der Vorjahre,
- unter Berücksichtigung der festgestellten Erwärmungstrends der vergangenen Jahre entspricht das Temperaturniveau des Sommers 2016 aber insgesamt sehr wohl den im Zuge des Klimawandels zu erwartenden Temperaturzunahmen.

Konsequenzen für die Planung

- Die im Rahmen der Untersuchungen angetroffenen klimatischen Verhältnisse können als repräsentativ für ein frühes Stadium im Klimawandel angesehen und Planungsempfehlungen entsprechend abgeleitet werden,
- es ist daher nicht erforderlich, die Ergebnisse dieser Studie mit Korrekturwerten zu versehen, wie es der Fall wäre, wenn deutliche Abweichung von den Verhältnissen der letzten Jahre vorlägen.

Witterungsverlauf in Deutschland im Sommer 2016

Die Sommermonate Juni-August 2016 waren in Deutschland zum einen durch erhebliche Niederschläge und Gewitter Anfang Juni geprägt und zum anderen durch eine Hitzewelle Ende Juni (DWD 2016a) und einen insgesamt sonnigen, warmen, trockenen Juli (DWD 2016b). Der August war zum einen durch sehr frische Nächte im zweiten Augustdrittel geprägt und zum anderen durch eine weitere Hitzewelle Ende August (DWD 2016c). Die durchschnittliche Temperatur betrug in Nordrhein-Westfalen in den Sommermonaten Juni-August 2016 17,7 °C, welche vom vieljährigen Mittel der internationalen Referenzperiode (1961 - 1990) für Nordrhein-Westfalen (16,3 °C) um +1,4 °C abweicht. Heiße Tage traten im Untersuchungsgebiet am 23.06. sowie um den 20.7., den 26.8. und um den 13.9.2016 auf (DWD 2016d). Die Messtage am 23.06.16 in Solingen, am 19.7. (13.9.) in Remscheid sowie am 25.08.16 in Wuppertal liegen in diesen heißen Perioden (siehe Abb. 3-1).

Der Juni 2016 war zu Beginn durch Gewitter geprägt, die vor allem in Bayern und Baden-Württemberg erhebliche Niederschläge und Hochwasserprobleme mit sich brachten. Zur Schafskälte sanken die Temperaturen wieder deutlich, wohingegen Ende Juni eine erste kurze Hitzeepisode eintrat. Der Juli 2016 war insgesamt betrachtet „zu warm, etwas zu tro-

cken und durchschnittlich sonnig“ (DWD 2016b:1). „Mitteleuropa befand sich abwechselnd unter dem Einfluss von Hoch- und Tiefdruckgebieten. Zu Beginn wurde der Norden Deutschlands immer wieder von schwachen Tiefausläufern gestreift, im Süden dagegen dominierte meist der Keil des Azorenhochs. Ab der Monatsmitte sorgte Hoch ‚Burkhard‘ für hochsommerliche Temperaturen. In der letzten Dekade führten schwache Luftdruckgegensätze zu fast tropischen Verhältnissen mit teils extremer Schwüle und heftigen Gewittern“ (ebd). Im August gab es hingegen kaum Gewitter (DWD 2016c).

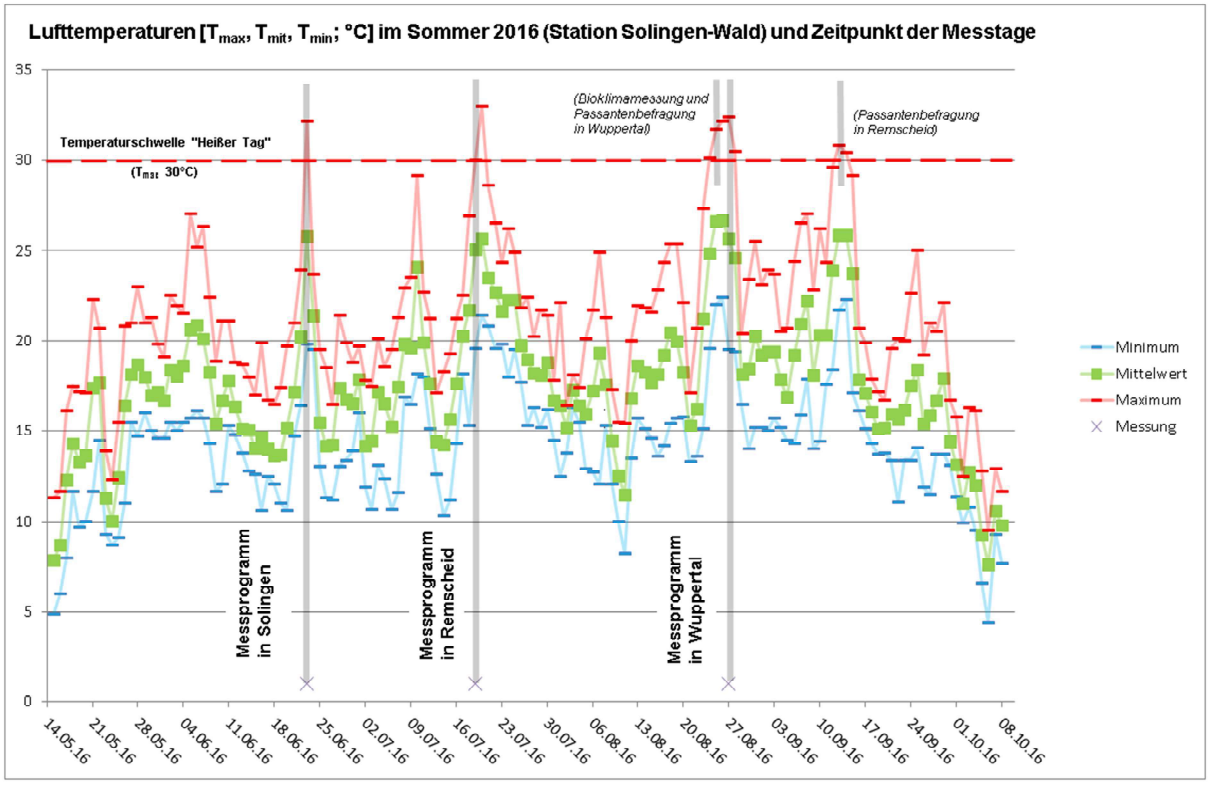


Abb. 3-1: Temperaturverlauf im Sommer 2016 und Messtermine.

Heiße Tage

Die Zahl der heißen Tage (Temperaturmaximum Tmax ≥ 30°C) wird üblicherweise zur Erfassung von Hitzeereignissen verwendet. Diese Größe wurde für den Untersuchungszeitraum, in der zeitlichen Entwicklung bzw. für die verschiedenen Orte untersucht.

Das Eintreten bzw. die Überschreitung des Schwellenwerts von T=30°C wurde im Jahr 2016 an den Stationen RS-Lennep (DWD, 2016e) an 7 Tagen, SG-Wald (LANUV, 2016c) an 10 Tagen und W-Bundesallee (Stadt Wuppertal, 2016) an 13 Tagen festgestellt. Auf Basis der Daten verschiedener Messstationen im Untersuchungsgebiet und der Umgebung mit unterschiedlichen Messzeiträumen (teils in der Vergangenheit) wurde aus den Temperaturdiffe-

renzen der Stationen zusätzlich zurückgerechnet, wie sich das Jahr 2016 im Vergleich zum Zeitraum 2001 - 2016 bzw. zum Zeitraum 1948 - 2000 darstellt (Abb. 3 - 2 und Tab. 3 - 1).

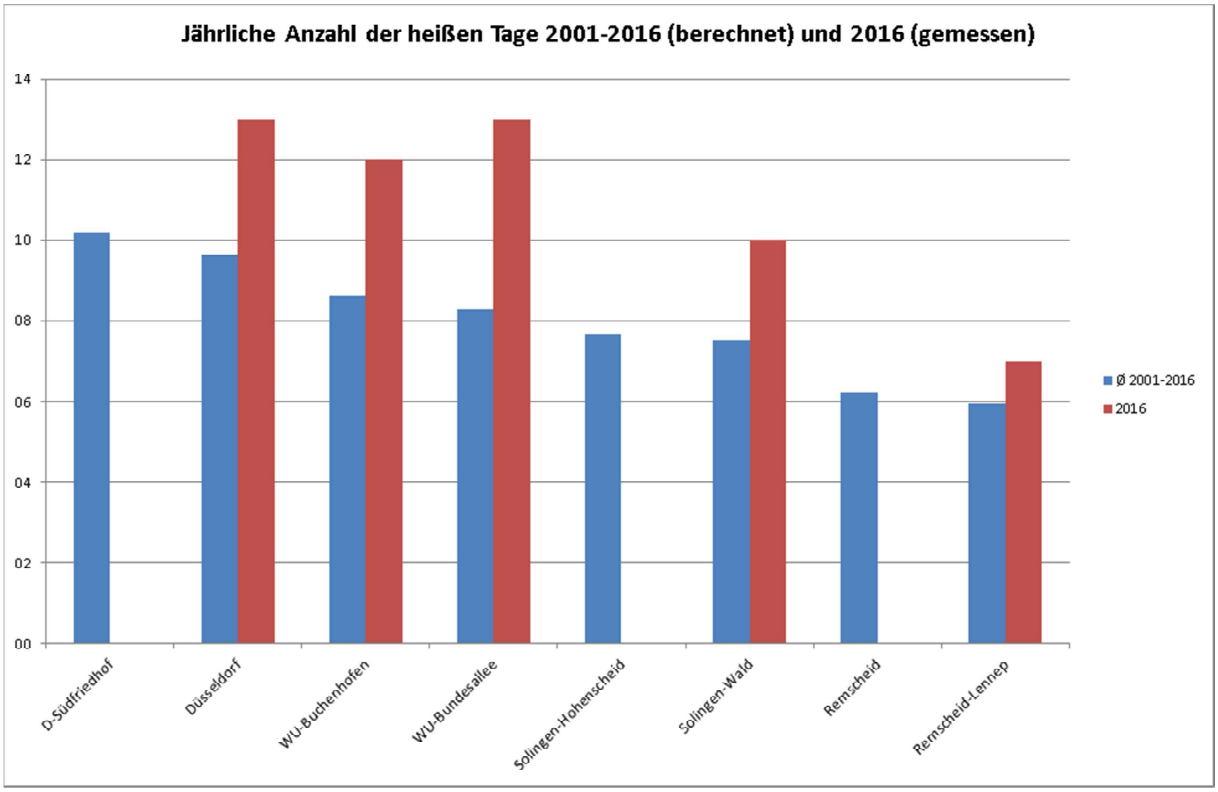


Abb. 3-2: Anzahl der heißen Tage im Untersuchungsgebiet 2001 - 2016 (nur ein Teil der Stationen war 2016 noch in Betrieb).

Tab. 3-1: Anzahl der heißen Tage im Untersuchungsgebiet 1948 - 2016.

Heiße Tage im Bergischen Land und Umgebung
Differenzen zu WU-Buchenhofen und berechnete Mittelwerte

heiße Tage ($T_{max} \geq 30°C$)	Differenz	Ø 1948-2000	Ø 2001-2016	2016
D-Südfriedhof (1948-1996)	1.6	6.9	10.2	
Düsseldorf (1969-2016)	1.0	6.3	9.6	13
WU-Buchenhofen (1948-2016)	0.0	5.3	8.6	12
WU-Bundesallee (2011-2016)	-0.3	5.0	8.3	13
Solingen-Hohenscheid (1948-198	-0.9	4.4	7.7	
Solingen-Wald (1998-2016)	-1.1	4.2	7.5	10
Remscheid (2005-2009)	-2.4	2.9	6.2	
Remscheid-Lennep (2011-2016)	-2.7	2.6	6.0	7

Aus der relativ langen Messreihe der Station W-Buchenhofen kann die Veränderung der Zahl der heißen Tage im zeitlichen Verlauf seit 1948 genau nachvollzogen werden; über den gesamten Zeitraum nimmt die Zahl bis heute um etwa 1 heißen Tag pro Dekade zu (vergl. Abb. 3 - 3 und Abb. 3 - 4). Ein Vergleich von aggregierten Zeitreihendaten bzw. von Klimaprojektionen mit den Messdaten vor Ort aus diesen Zeitschnitten zeigt, dass die Klimaprojektionen den in den letzten Jahren beobachteten Zunahmen der Zahl heißer Tage keineswegs widersprechen, sondern eher dahinter zurückbleiben.

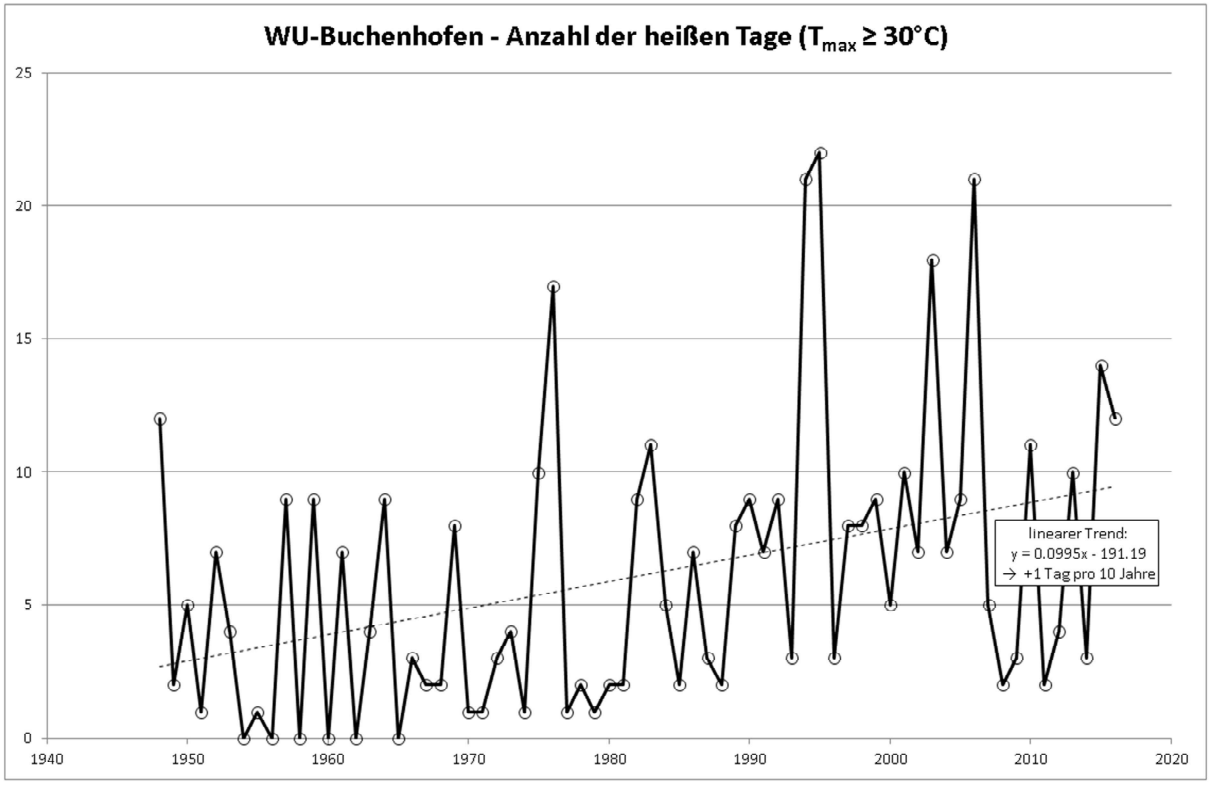


Abb. 3-3: Trend der heißen Tage für Wuppertal-Buchenhofen (Quelle: DWD, 2016e).

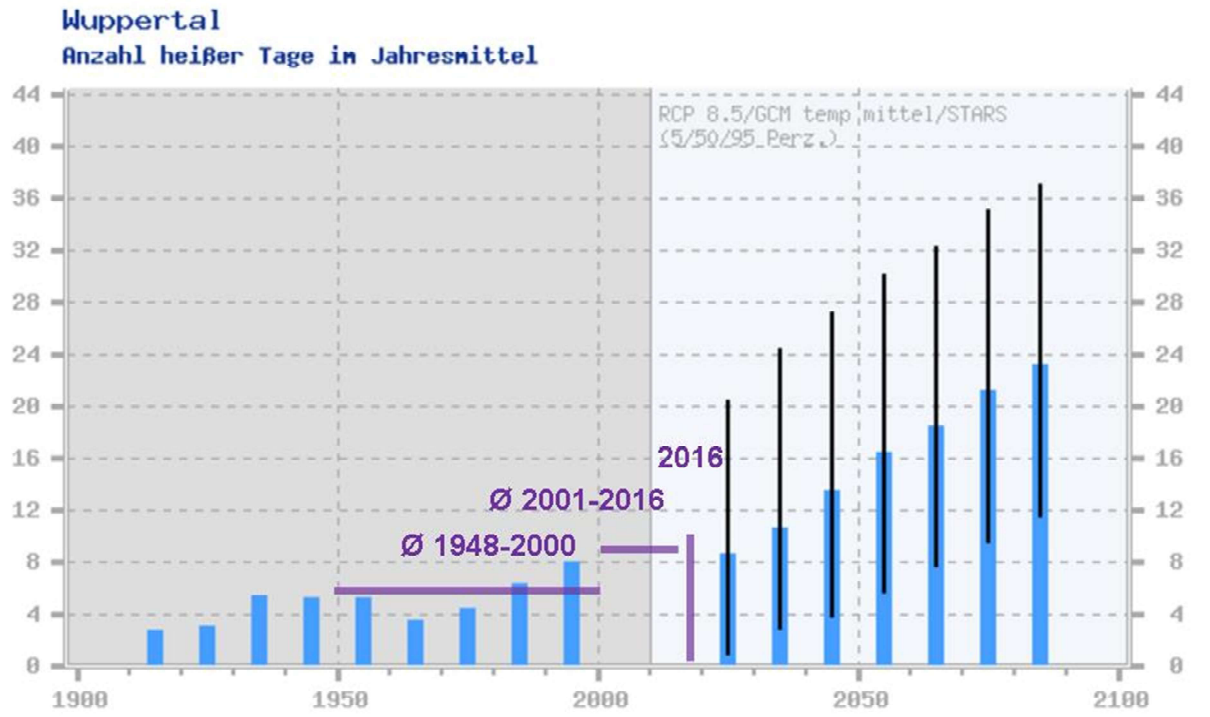


Abb. 3-4: Trend und Projektion bzw. Daten für W-Buchenhofen (Quelle: PIK (klimafolgenonline.com)).

Tropennächte

Die Zahl der Nächte, in denen die Tiefsttemperatur nicht unter 20°C sinkt („Tropennächte“, $T_{min} \geq 20{,}0$ °C), ist als ergänzende bioklimatische Kenngröße bedeutsam, weil die körperliche Erholung nach Hitzetagen bei fehlender nächtlicher Abkühlung ausbleibt. Ein erholsamer Schlaf ist dann meist nicht mehr möglich. Dies führt dazu, dass der Folgetag mit einer bioklimatischen Vorbelastung begonnen wird, und hohe Temperaturen, wie sie in einer Hitzewelle an mehreren Tagen hintereinander auftreten, dann immer schlechter toleriert werden. Hohe Nachttemperaturen verteilen sich dabei räumlich anders als hohe Tagestemperaturen; vom Prozessablauf her spielt jeweils auch noch Kaltluftzufuhr durch lokale Kaltluft eine große Rolle.

Wie bei den heißen Tagen wurde die Zahl der Tropennächte im BESTKLIMA-Gebiet analysiert: An der Station SG-Wald (LANUV, 2016) wurden 2016 6 Tropennächte, an W-Bundesallee (Stadt Wuppertal, 2016) 5 und an RS-Lennep (DWD, 2016e) 2 festgestellt. Wie bei den heißen Tagen kann auf Basis der zeitlich unterschiedlichen Aufzeichnungen verschiedener Messstationen im Untersuchungsgebiet und der Umgebung zurückgerechnet, wie sich das Jahr 2016 im Vergleich zum Zeitraum 2001 - 20016 bzw. zum Zeitraum 1948 - 2000 darstellt (Abb. 3 - 5 und Tab. 3 - 2).

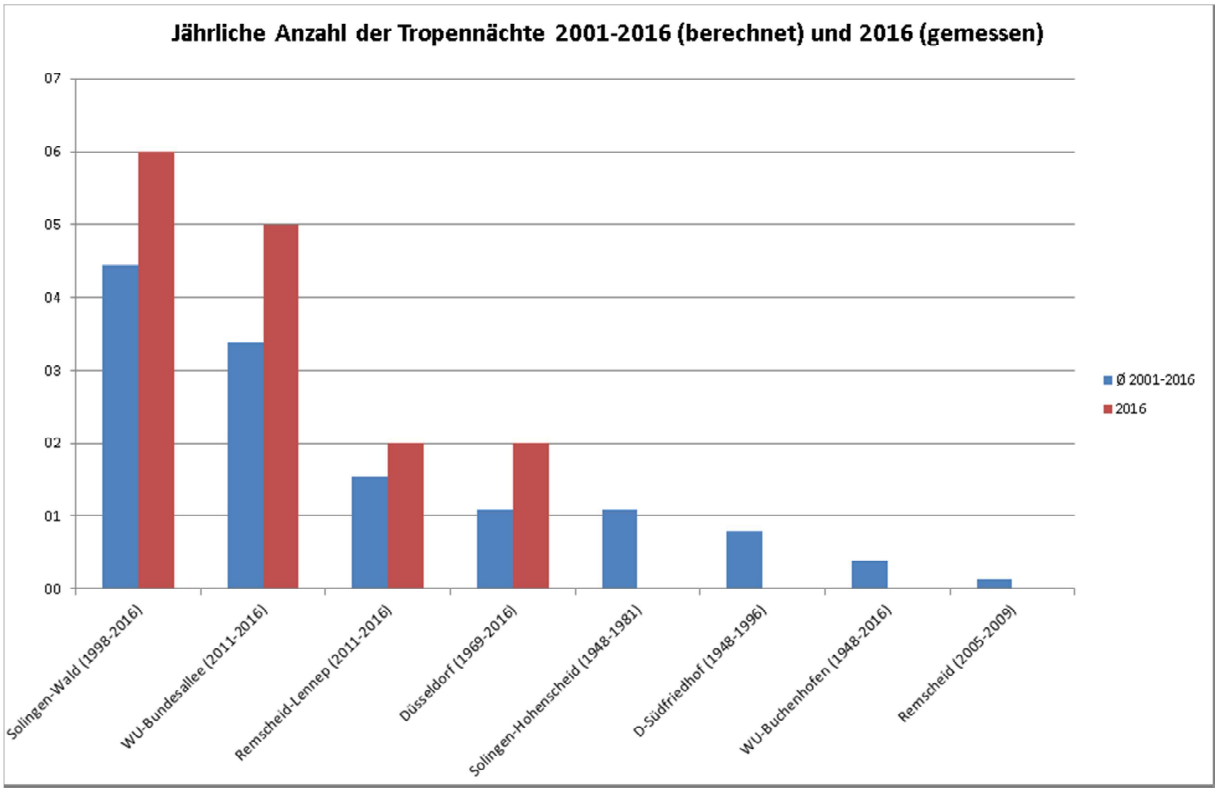


Abb. 3-5: Anzahl der Tropennächte im Untersuchungsgebiet 2001 - 2016 (nur ein Teil der Stationen war 2016 noch in Betrieb).

Tab. 3 - 2: Anzahl der Tropennächte im Untersuchungsgebiet 1948 - 2016.

Tropennächte im Bergischen Land und Umgebung
Differenzen zu WU-Buchenhofen und berechnete Mittelwerte

	Differenz	Ø 1948-2000	ø 2001-2016	2016
Solingen-Wald (1998-2016)	4.1	4.3	4.4	6
WU-Bundesallee (2011-2016)	3.0	3.3	3.4	5
Remscheid-Lennep (2011-2016)	1.2	1.4	1.5	2
Düsseldorf (1969-2016)	0.7	1.0	1.1	2
Solingen-Hohenscheid (1948-198	0.7	1.0	1.1	
D-Südfriedhof (1948-1996)	0.4	0.7	0.8	
WU-Buchenhofen (1948-2016)	0.0	0.3	0.4	0
Remscheid (2005-2009)	-0.3	0.0	0.1	

Anders als bei den heißen Tagen kann die Veränderung der Zahl der Tropennächte anhand der relativ langen Messreihe der Station W-Buchenhofen wegen deren extremer Tallage, deren sehr niedrige nächtliche Temperaturen vermutlich stark von nächtlichen Kaltluftereignissen beeinflusst werden, nicht sinnvoll nachvollzogen werden; es werden hierfür die Daten von Düsseldorf herangezogen. Die Zahl der Tropennächte nimmt hier – bezogen auf den angegebenen Messzeitraum – um knapp einen pro 50 Jahre zu (vergl. Abb. 3 - 6). Für die einzelnen Messstandorte im BESTKLIMA-Gebiet sind die Zeitreihen zu kurz um eine belastbare Aussage zu treffen.

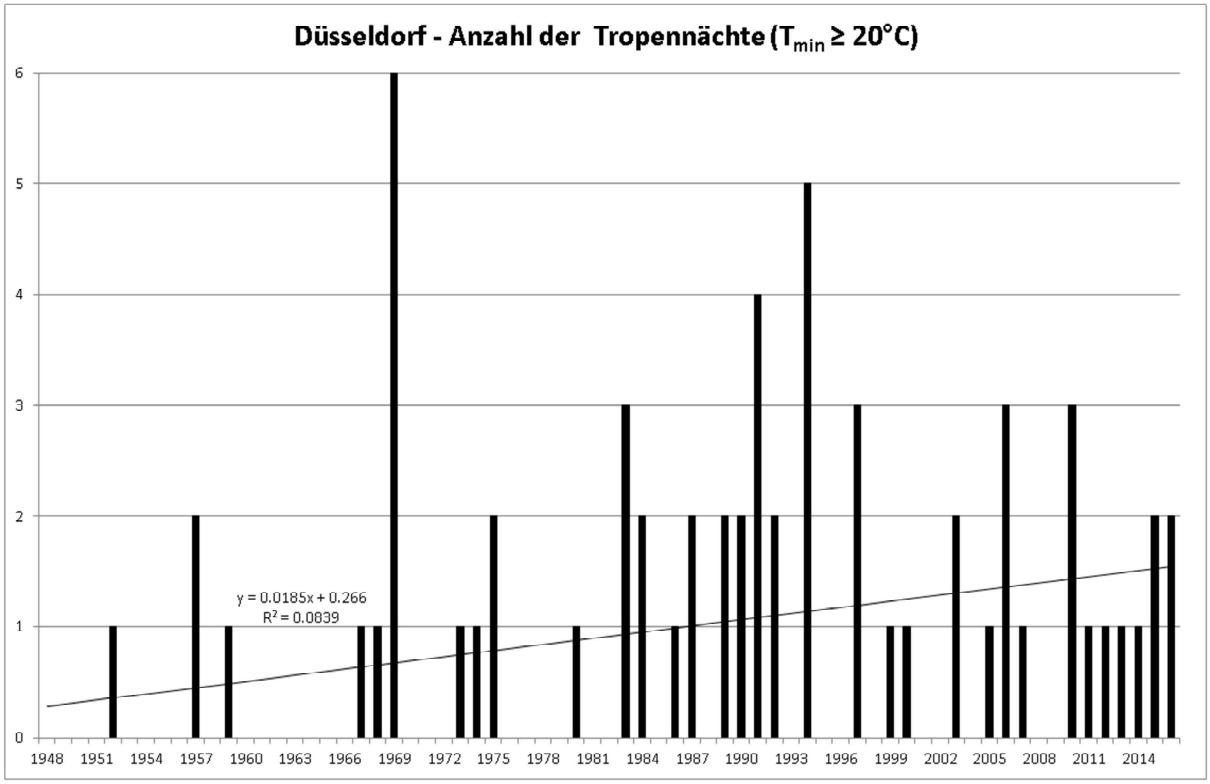


Abb. 3 - 6: Trend der Tropennächte für Düsseldorf (vor 1970: Düsseldorf-Südfriedhof; Quelle: DWD).

3.2 Siedlungsklimatische Modellierungen

Unter Bedingungen des Klimawandels ist eine genaue Kenntnis des räumlichen Verteilungsmusters gegenwärtiger bzw. zu erwartender Bereiche mit besonderer sommerlicher Hitzebelastung von besonderer Bedeutung für die stadtplanerischen Aufgaben in der Anpassung an den Klimawandel. Die räumliche Verteilung von Bereichen besonderer Hitzebelastung wird einerseits durch mehr oder weniger statische Merkmale der Naturausstattung bzw. Flächennutzung beeinflusst, andererseits durch klimatische Prozesse oder räumliche Wechselwirkungen bestimmt.

Im Rahmen von Konzepten zur Klimawandelanpassung wird üblicherweise zuerst eine Bestandsaufnahme von Naturausstattung und Flächennutzung vorgenommen, weil die hier relevanten Fakten meist bekannt sind bzw. bereits als Geodaten verfügbar sind, so dass auch GIS-Methoden eingesetzt werden können. Für Teile des Untersuchungsgebiets wurde eine solche Untersuchung bereits durchgeführt (Klimaschutzteilkonzept „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid“, 2013). Oft sind auch Hintergrundinformationen zu klimatischen Prozessen bzw. Wechselwirkungen aus Klimaanalysen vorhanden („Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“, Lohmeyer, 2000; „Stadtklimaanalyse Solingen“, Kuttler et al., 1993).

Im Rahmen des BESTKLIMA-Projekts wurde das Teilprojekt „Siedlungsklimatische Modellierung“ initiiert, um die verbliebenen bzw. stadtplanerisch als besonders relevant aber noch nicht ausreichend untersucht einzustufenden Fragestellungen in Bezug auf dynamische Prozesse oder räumliche Wechselwirkungen zu klären. Im Vordergrund standen dabei die Verteilungsmuster der als bioklimatologisch besonders belastend anzusehenden Tageshöchsttemperaturen und die besonders entlastenden nächtlichen Abkühlungseffekte durch Kaltluftbildung in den Tälern des Bergischen Landes.

Fragen in Zusammenhang mit nächtlicher Kaltluftbildung wurden mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 untersucht, wobei eine Übersichtsmodellierung und Detailmodellierungen durchgeführt wurden. Die Verteilungsmuster von sommerlichen Tageshöchsttemperaturen wurden mit einer geostatischen Modellierung auf Basis von Messdaten an heißen Tagen in ausgewählten Teilgebieten analysiert; ergänzend wurden hier auch bioklimatische Detailuntersuchungen durchgeführt.

3.2.1 Siedlungsklimatische Modellierung Gesamtgebiet

Hauptergebnisse

- Aus dem oberbergischen Land strömen in Nächten mit Kaltluftabfluss extrem große Mengen Kaltluftluft durch das obere Tal der Wupper (oberhalb von Wuppertal) in das Untersuchungsgebiet ein. Die dicht bebauten Tallagen werden teils kaum bzw. erst sehr spät in der Nacht erreicht. Manche Kuppenlagen werden auch von Kaltluft überströmt, an einzelnen Stellen entspricht der Strömungsverlauf nicht dem nach den Gefällsverhältnissen zu erwartenden.
- In einigen Gebieten spielt darüber hinaus lokaler Kaltluftabfluss in kleinen Tälern oder an Hängen eine Rolle.
- Die verdichteten Siedlungsbereiche der drei Städte befinden sich in sehr unterschiedlicher Lage zu Kaltluftströmen: Remscheids Innenstadt wird wegen der Kuppenlage praktisch nicht erreicht. Für das Zentrum Solingens gilt dies auch, während Ohligs von lokalen Kaltluftströmen teilweise angeströmt wird. In Wuppertal können zentrale Teile der Stadt erst spät nachts vom großen Kaltluftstrom im Tal der Wupper profitieren, aber auch hier bleiben Ortslagen in Kuppenlage kaltluftfrei. Die Kuppenlagen ohne Kaltlufteinfluss sind aber durch die allgemeine Oberströmung gut belüftet.
- In einigen Abschnitten des Tals der Wupper und der Nebentäler herrscht nachts verbreitet Kaltluftstau.
- Die verdichteten Siedlungsbereiche der einzelnen Städte weisen entsprechend ihrer Lage und Beschaffenheit jeweils Wärmeinseln mit unterschiedlichen Merkmalen auf (siehe Kap. 3.2.2 - 3.2.4).

Konsequenzen für die Planung

- Für die Gesamtsituation im Bergischen Städtedreieck ist die Kaltluftzufuhr aus dem Oberbergischen Land und deren Überlagerung mit lokalen Kaltluftströmen von zentraler Bedeutung; dabei sollen überwiegend die Talachsen der Haupttäler von weiterer Überbauung wegen deren Wirkung als Strömungshindernis bzw. wegen der Überwärmung frei gehalten werden (wenn möglich sollte in Problembereichen vielleicht zukünftig sogar zurückgebaut werden).
- Für Remscheid betrifft dies die Innenstadtbereiche kaum, lediglich kleinere Siedlungsbereiche in einzelnen Kuppen sowie in Hanglagen.

- In Solingen ist das Stadtzentrum ebenfalls kaum, wohl aber die größeren Siedlungsbereiche in Hanglage betroffen; letztere erheblich von lokalen Kaltluftströmen. In den kleineren Tälern mit lokalen Kaltluftströmen steht ein Erhalt von Kaltluftentstehungsflächen im Vordergrund.
- In Wuppertal werden die dichter bebauten Innenstadtbereiche erst spät in der Nacht vom großen Kaltluftstrom im Tal der Wupper erreicht. Hier ist anzustreben, einerseits dessen schnelles Eindringen in die dicht bebaute Tallage und andererseits gerade in den kleineren randlichen Seitentälern mit lokalen Kaltluftströmen, den Erhalt von Kaltluftentstehungsflächen zu gewährleisten.

Gesamtkaltlufteinzugsgebiet des Wuppertals

Für das gesamte Kaltlufteinzugsgebiet des Wuppertals wurde eine Übersichtsmodellierung durchgeführt, um die wesentlichen Merkmale des Kaltluftabflussverhaltens im Bergischen Land beschreiben zu können und die lokalen Abkühlungseffekte bzw. deren Sensitivität oder Verstärkungspotentiale beschreiben und insbesondere verorten zu können.

Bei der Analyse der Kaltluftsituation wird zwischen der frühen und der späten Nachtsituation unterschieden (3 h bzw. 8 h nach Sonnenuntergang). Die frühe Nachtsituation ist unter Gesichtspunkten der Klimaanpassung von primärer Bedeutung, weil eine Zufuhr von Kaltluft nach einem Hitzetag schnelle Abkühlung und damit eine gesundheitlich relevante Entlastung bewirken kann; für diese Uhrzeit gibt es in Städten meist auch starke Synergieeffekte in Bezug auf lufthygienische Entlastungen. Die späte Nachtsituation wird gesondert betrachtet, weil sich dann durch Ansammlung großer Kaltluftmengen die Fließwege der Kaltluft ändern können und so teilweise Gebiete von Kaltluft erreicht werden, bei denen dies nach Lage der hydrologischen Einzugsgebiete nicht zu erwarten wäre.

Das großräumige nächtliche Kaltluftabflussverhalten im Untersuchungsgebiet an so genannten Strahlungswetterlagen, d.h. windschwachen Tagen mit starker Sonneneinstrahlung, wie sie auch während Hitzeperioden vorkommen, und dann starker Abkühlung nachts, ist von folgenden Merkmalen geprägt (siehe Abb. 3 - 7 und 3 - 8a bzw. 3 - 8b):

- Das gesamte Untersuchungsgebiet steht nachts unter deutlichem Einfluss von sowohl überörtlichen als auch lokalen Kaltluftströmen.
- Aus dem oberbergischen Land strömen extrem große Mengen Kaltluftluft durch das obere Tal der Wupper (oberhalb von Wuppertal) in das Untersuchungsgebiet ein. Dies betrifft in der frühen Nacht zunächst überwiegend die siedlungsfreien Talabschnitte, im weiteren Verlauf der Nacht kommt es zu sehr großen Kaltluftansammlun-

gen, die bereits zuerst im Oberbergischen Land und oberen Tal der Wupper (oberhalb von Wuppertal), später dann auch im unteren Tal der Wupper (unterhalb von Wuppertal) nicht mehr von den Haupttälern aufgenommen werden können, weshalb es zu Kaltluftüberströmungen (Transfluenzen) tendenziell in Richtung der allgemeinen Abdachung des Gebiets zum Rheintal kommt; dann werden auch die verdichteten Siedlungsbereiche im Tal der Wupper nach und nach von Kaltluft erreicht. Im Untersuchungsgebiet bleiben in jeder der drei Städte Kuppenlagen kaltluftfrei. Dies ist allerdings in Bezug auf die klimatisch-lufthygienische Situation unproblematisch, da es sich in allen Fällen um sehr exponierte Positionen im Gelände handelt, die auch ohne nächtliche Kaltluft ausreichend ventiliert werden.

- In einigen Teileinzugsgebieten spielt lokaler Kaltluftabfluss ebenfalls eine Rolle. Solche kleinräumigen Kaltluftströme in Seitentälern und Mulden sind stark von den lokalen Relief- und Bebauungsstrukturen beeinflusst. Am Abend bzw. in der frühen Nacht ist ihre Reichweite oft noch klein, sie bleiben dann teils auf ein kleines Gebiet beschränkt, wo sie aber schnell und siedlungsnah dort wirksam werden können, wo andere Abkühlungseffekte fehlen. In der späten Nachtsituation kommt es teilweise zu einer Überlagerung v.a. durch den großen Kaltluftstrom im Tal der Wupper.
- Dabei stellen sich großräumige und kleinräume Effekte in den drei unterschiedlich großen bzw. unterschiedlich gelegenen Städten folgendermaßen dar:
    - In Remscheid liegen die moderat großen zusammenhängenden Siedlungsbereiche überwiegend auf hoch gelegen Kuppen, die nachts kaum bzw. erst spät von der Kaltluft aus dem Tal der Wupper oder von kleineren Tälern erreicht werden.
    - In Solingen befindet sich das Zentrum ebenfalls in einer solchen Kuppenlage, nicht aber der Hangbereich zum Rheintal hin (Solingen-Ohligs); hier sind kleinräumige Kaltlufteffekte in den kleinen Bachtälern vorhanden.
    - In Wuppertal wird die zentrale Siedlungsachse im Tal der Wupper zwar vollständig von der Kaltluft aus dem Tal der Wupper erreicht, allerdings die zentralen Teile der großen - und sich vor allem lang durch das Tal erstreckenden - Stadt erst spät in der Nacht; bis dahin wirkt hier nur lokaler Kaltluftabfluss von Hängen und kleinen Seitentälern.
- Die Kaltluft im Tal der Wupper folgt nicht nur den durch die Talform vorgegebenen Strömungswegen; wegen des geringen Tallängsgefälles stauen sich die sehr großen Kaltluftmengen im Tal auf und es kommt zu Kaltluftüberströmungen über die Tal-

schultern und stellenweise Richtungsumkehr durch Kaltluftstau, wovon die im Tal gelegenen Siedlungsgebiete von Wuppertal betroffen sind.

- In den tiefen Talabschnitten mit Kaltluftstau – z.B. im oberen Tal der Wupper im Talabschnitt um Beyenburg und dem unteren Tal der Wupper im Talabschnitt um Burg – kommt es zu ganz erheblicher Abkühlung der Luft, vor allem in der späten Nacht; teils ist dies auch in kleinen Seitentälern der Fall.

Insgesamt liegen in der späteren Nacht mehrere auffällige Abweichungen von einer zu erwartenden Kaltluftsituation vor (vergl. Abb. 3 - 9). Neben den Kaltluftüberströmungen im Oberbergischen Land (1 in Abb. 3 - 9) und im Stadtgebiet von Remscheid (2a und 2b) liegt eine Richtungsumkehr im unteren Tal der Wupper (3) und ein Zustrom von Kaltluft aus dem Ennepe- bzw. Ruhreinzugsgebiet vor (4). Bei Arrenberg (5) liegt ein Bereich sehr geringer Kaltluftzufuhr im ansonsten sehr große Volumenströme aufweisenden Tal der Wupper vor. Einige Kuppenlagen in Remscheid (6), Solingen (7) und Wuppertal (8) bleiben auch in der späten Nacht frei von Kaltluft.

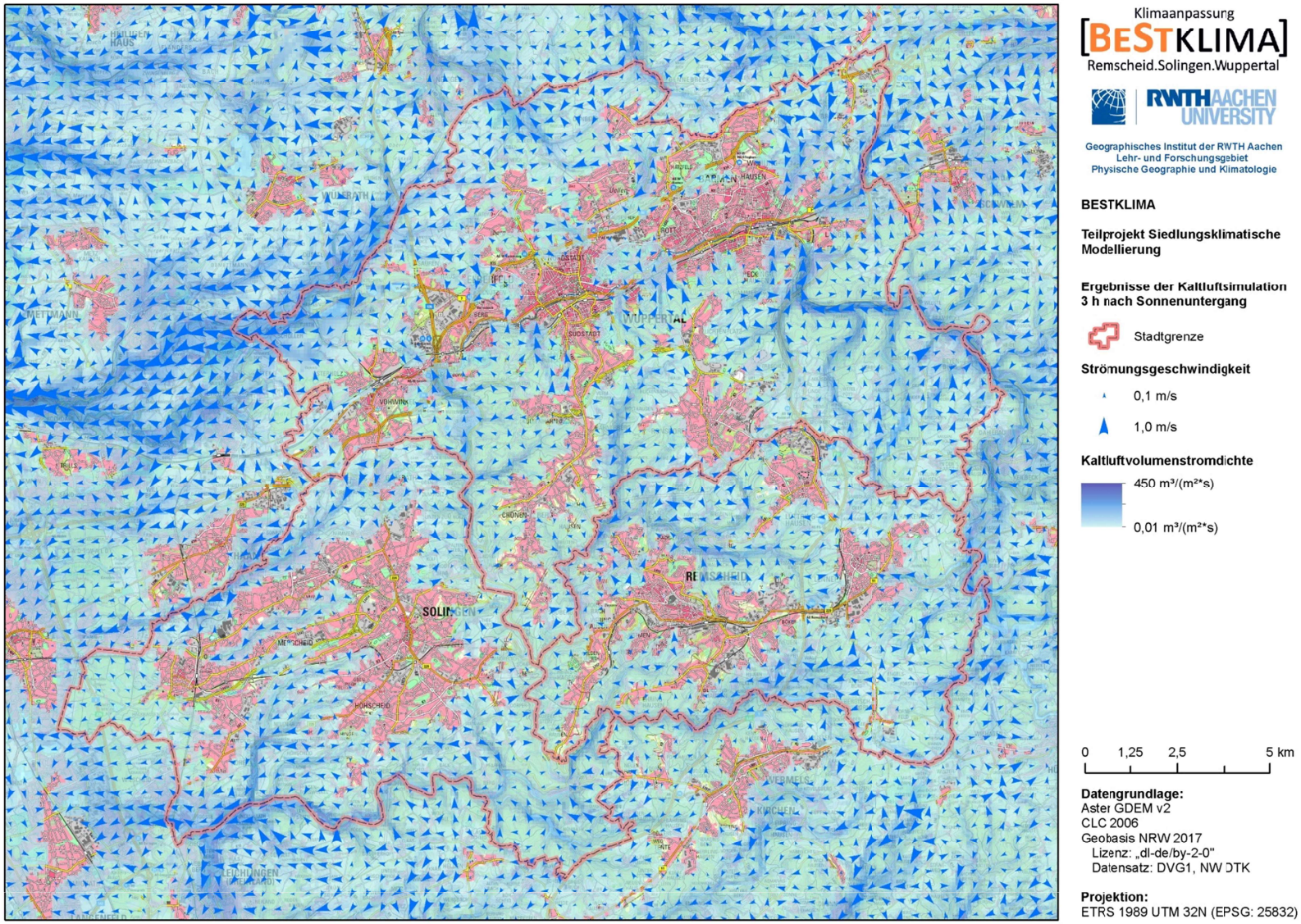


Abb. 3 - 7: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – Kaltluftmengen und Strömungsverhältnisse bei windschwacher Strahlungswetterlage in der frühen Nacht (3h nach Sonnenuntergang).

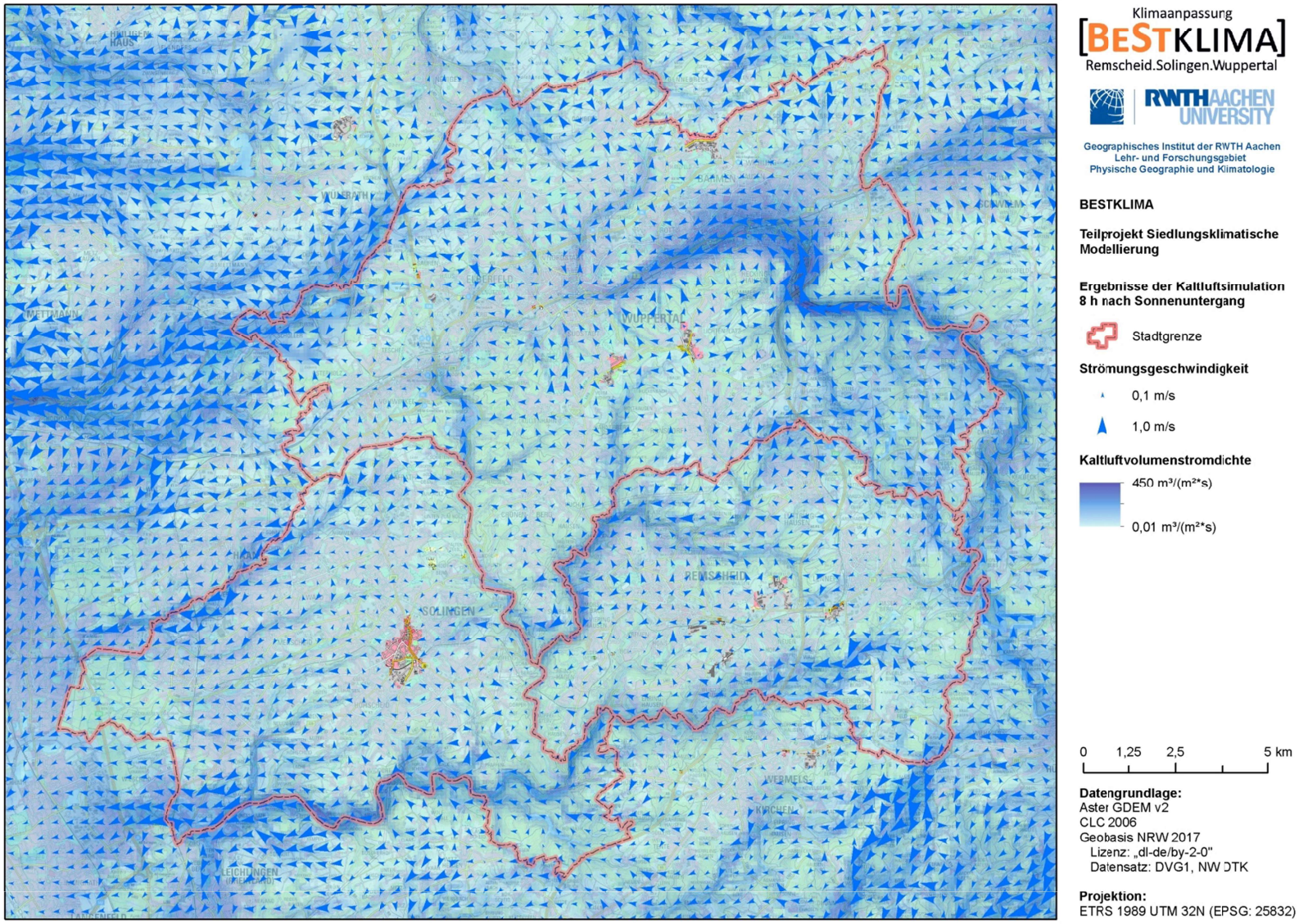


Abb. 3 - 8a: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – Kaltluftmengen und Strömungsverhältnisse bei windschwacher Strahlungswetterlage in der späten Nacht (8h nach Sonnenuntergang).

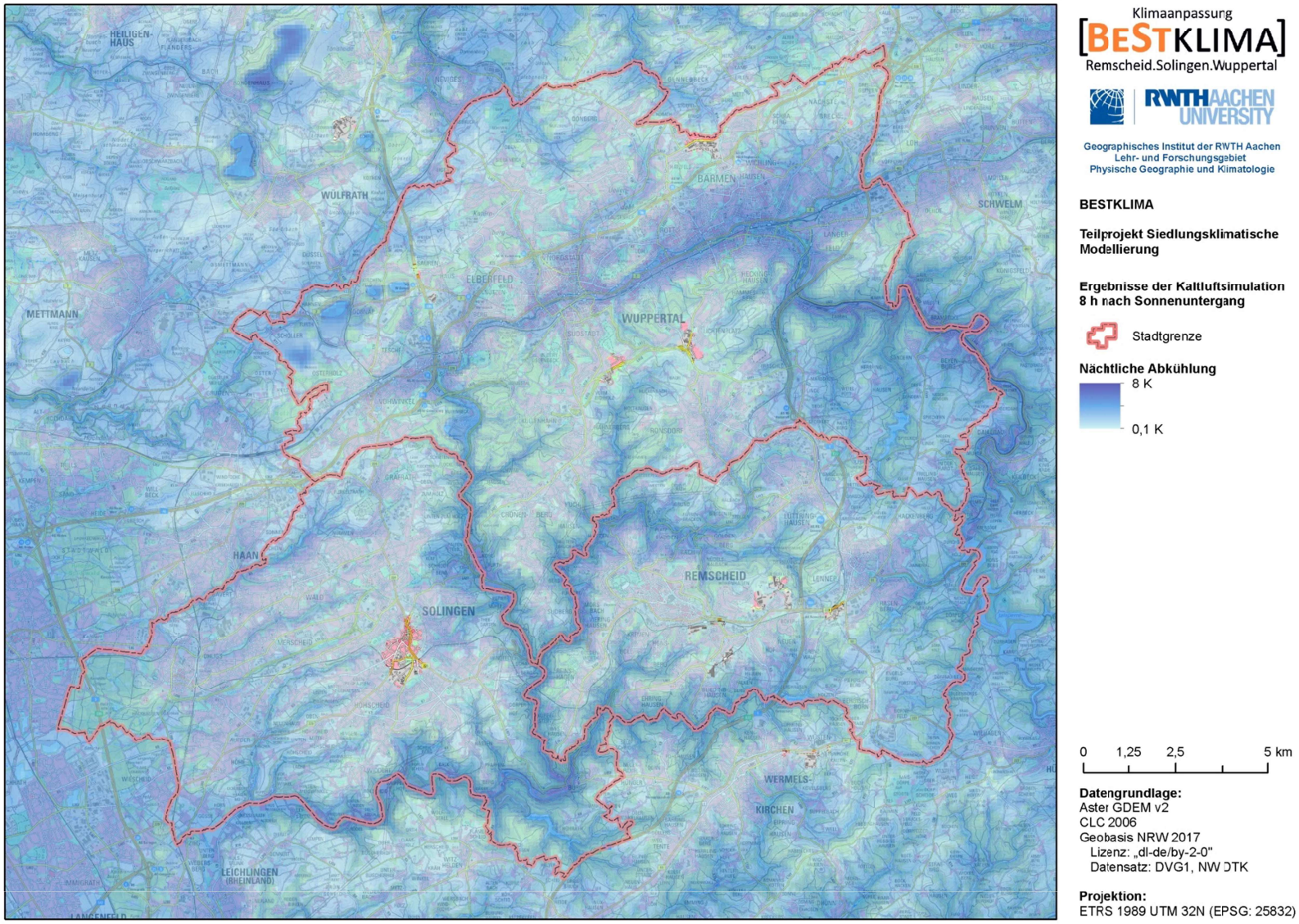


Abb. 3 - 8b: Ergebnisse der Kaltluftmodellierung – nächtliche Abkühlung bei windschwacher Strahlungswetterlage in der späten Nacht (8h nach Sonnenuntergang).

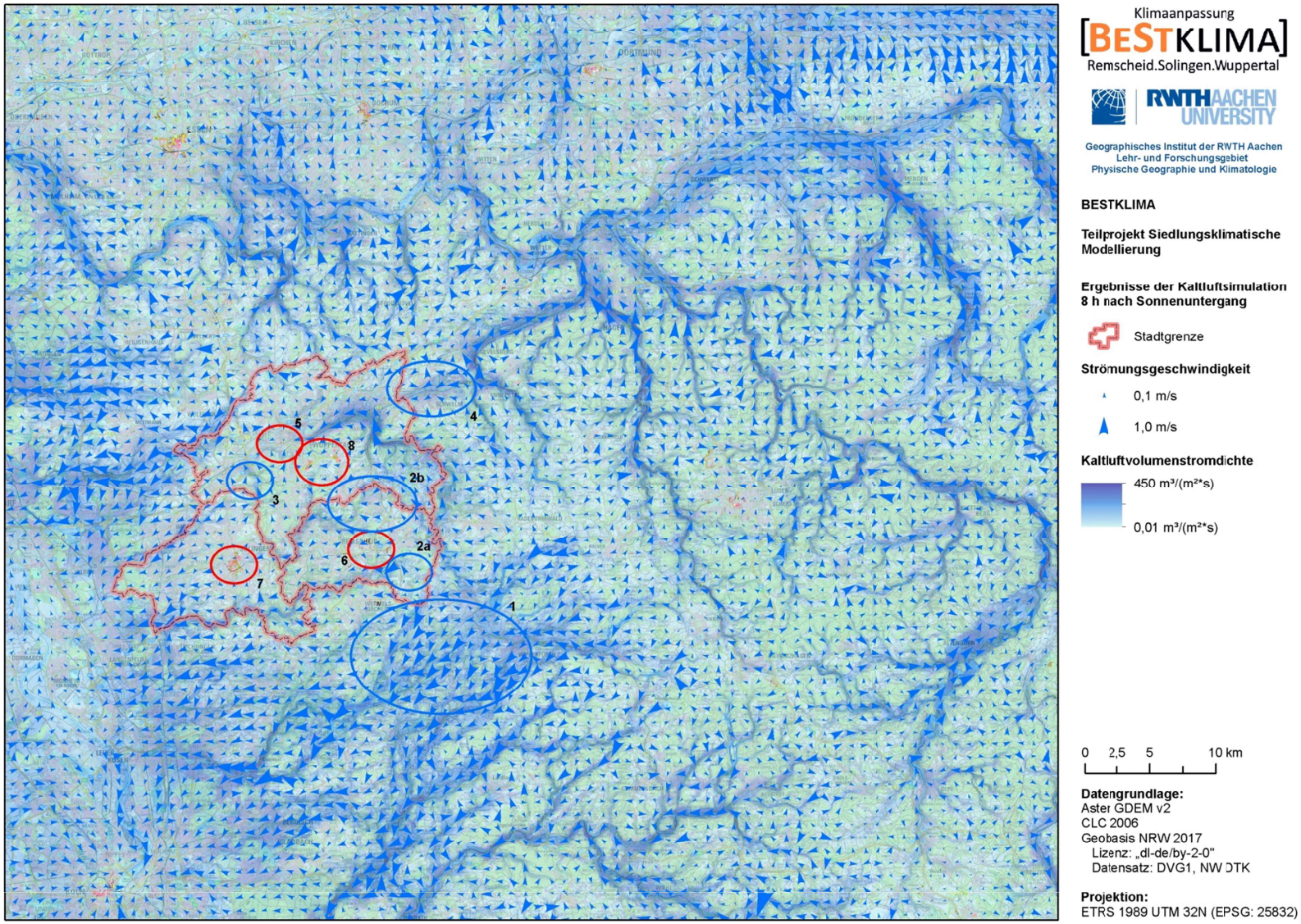


Abb. 3 - 9: Auffälligkeiten der Kaltluftsituation im Untersuchungsgebiet (blau: untypisch große Kaltluftzufuhr, rot: geringe oder fehlende Kaltluftzufuhr; Erläuterung der Ziffern: siehe Text).

3.2.4 Siedlungsklimatische Modellierung Wuppertal

Hauptergebnisse

- Die Lage Wuppertals ist geprägt von den teils stark verdichteten Siedlungskernen Barmen, Elberfeld und Vohwinkel im Tal der Wupper und von kleineren bzw. weniger verdichteten Siedlungsansätzen an den Hängen und auf den Kuppen neben dem Tal, die städtische Wärmeinsel ist demnach bandförmig angeordnet mit „Hot Spots“ und untergeordneten schwachen Nebenwärmeinseln.
- Zwischen den Siedlungskernen und randlich dazu gibt es in Gemengelage großflächige Gewerbe- und Industriebetriebe im Talboden, wobei es Überwärmungen am Tage sowohl in den teils sehr dicht bebauten Siedlungsbereichen als auch in den flächenhaft stark versiegelten Gewerbe- und Industriegebieten gibt, so dass die „Hot Spots“ im Vergleich zu anderen Teilen der Wärmeinsel nicht sehr intensiv ausgeprägt sind.

Konsequenzen für die Planung

- Die klimatischen Effekte der Topografie sind wegen des deutlichen Größenunterschiedes des Tals der Wupper und der Kleinformen bei Planungsvorhaben nur schwer verallgemeinerbar zu bewerten; in Wuppertal liegen bei der gegebenen Relief- und Bebauungssituation in Bezug auf die Klimaanpassung insgesamt sehr spezielle Bedingungen vor, die kaum mit anderen Städten vergleichbar sind, so dass auch kaum standardmäßige Empfehlungen für die Planung gegeben werden können.
- In Bezug auf die Temperaturbelastung am Tage bei Hitzeereignissen sollte im verdichteten Siedlungsbereich (Blockrandbebauung, v.a. in Tallage) auf die Entwicklung von begrünten „Klimaoasen“ in den Blockinnenhöfen, im Bereich großflächig versiegelter Bereiche (Gewerbe- und Industriebetriebe bzw. große Verkehrsflächen v.a. in Tallage) auf Entsiegelung gesetzt werden.

Die Gesamtsituation in Wuppertal ist durch die Lage der teils stark verdichteten Siedlungskerne Barmen, Elberfeld und Vohwinkel – im hier meist nur zwischen 500 m und 1000 m breiten Tal der Wupper – und der weniger verdichteten Siedlungskerne wie Ronsdorf, Lichtenplatz, Cronenberg, Katernberg oder Uellendal – auf den flacheren Oberhängen in einer Höhe von ca. 140 m über dem Talboden – geprägt.

Das Haupttal der Wupper verläuft innerhalb der Bebauung in Westsüdwest-Ostnordost-Richtung; sowohl der Talverlauf oberhalb als auch unterhalb der Stadt hat hingegen einen eher nord-süd-gerichteten Verlauf (vergl. Abb. 3-52). Die Richtung des Haupttals innerhalb

der Bebauung setzt sich aber über niedrige Schwellen als Talmulde sowohl im Westen als auch im Osten in die Nachbareinzugsgebiete fort. Im Stadtgebiet gibt es zudem kleinere Nebentäler des Tals der Wupper.

Die Landnutzungs- und Siedlungsstruktur (Abb. 3-53) ist von großflächiger Bebauung im Tal der Wupper, an dessen Hängen und – ausgehend von den kleineren Siedlungskernen – auf den höheren Lagen geprägt. 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 der engen Längstalsituation wird zudem viel Platz durch übergeordnete Infrastruktur (Bundesstraßen, Fernbahnstrecken) in Anspruch genommen; die Wupper selbst ist teilweise überbaut (neben der Schwebebahn betrifft dies auch in einigen Abschnitten Straßenbauten). Diese Situation in einem dicht bebauten, recht tiefen und schmalen Längstal ist untypisch und bei der gegebenen Einwohnerzahl nur mit wenigen Städten vergleichbar (Hagen, Stuttgart).

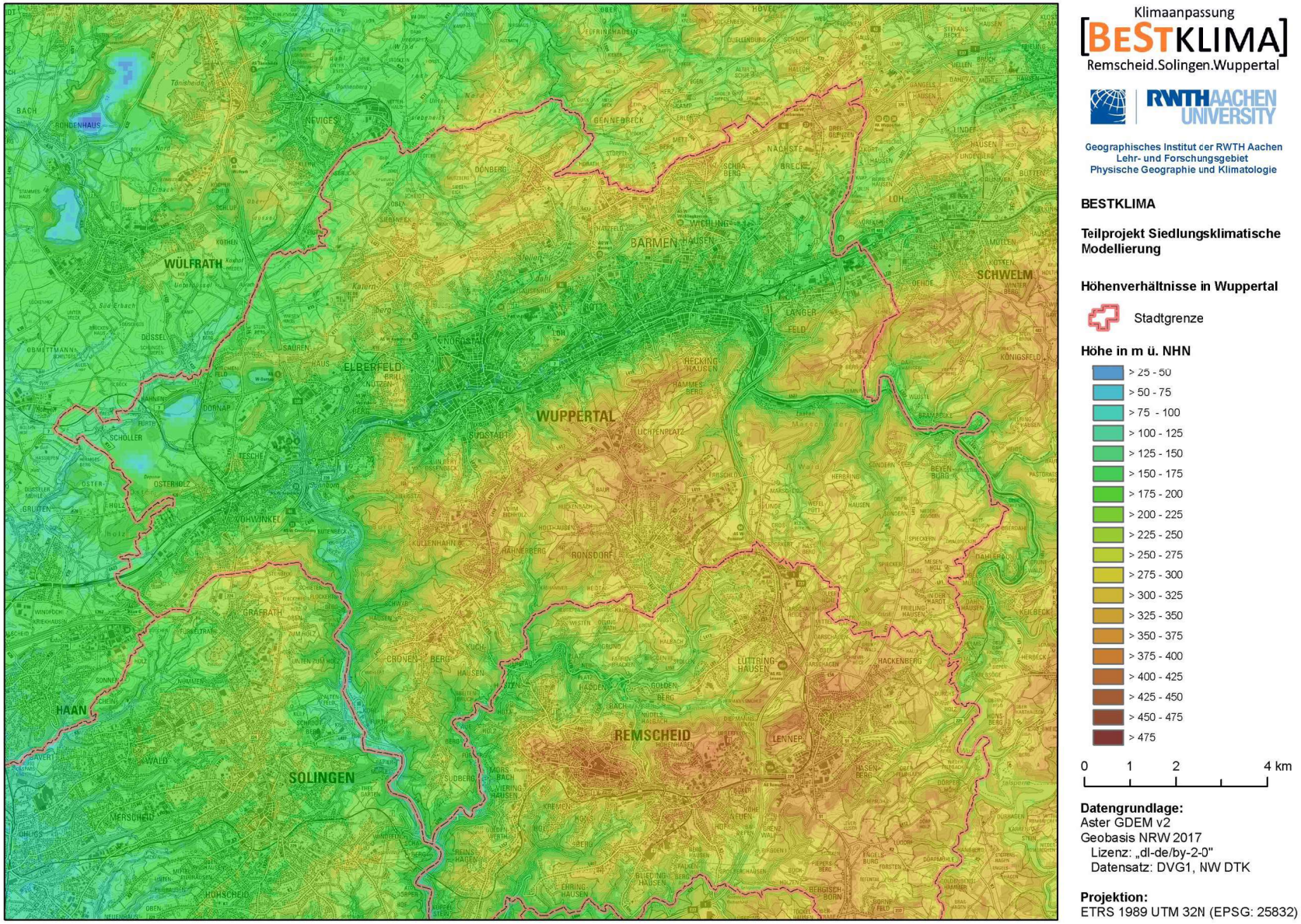


Abb. 3-52: Wuppertal – Geländeverhältnisse.

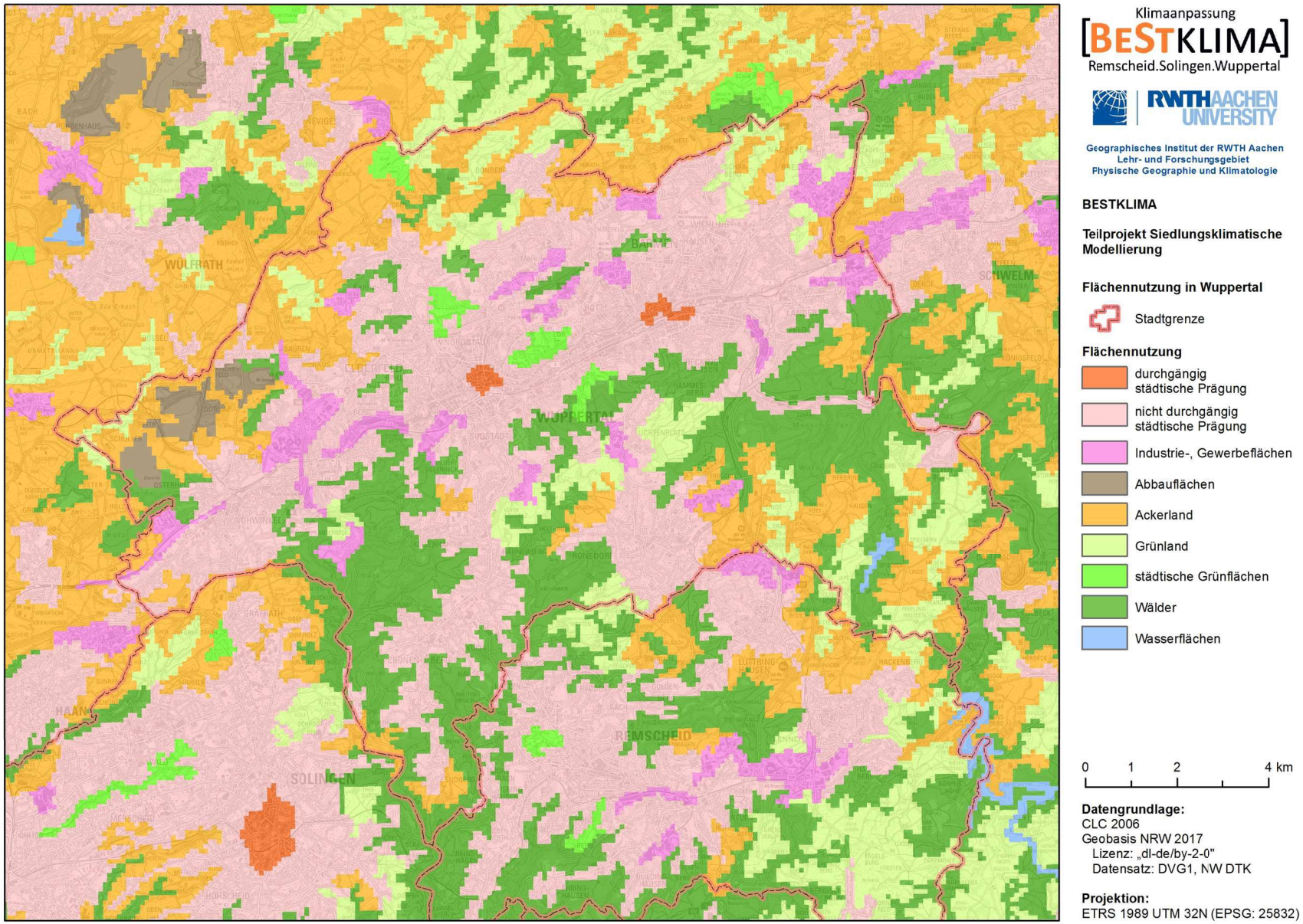


Abb. 3-53: Wuppertal – Landnutzungsstruktur.

Teilergebnis Kaltluftmodellierungen

Hauptergebnisse

- 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.
- Hohe bauliche Dichte entlang der Talachse behindert den Kaltluftabfluss und bewirkt durch die Abwärme Auflösungstendenzen der Kaltluft.
- Die aus dem oberen Tal der Wupper stammende große nächtliche Kaltluftzufuhr kommt erst in der späten Nacht von Beyenburg über Barmen bis Elberfeld voran. In der frühen Nacht wirkt zwar bereits lokaler Kaltluftabfluss von den Hängen und aus kleinen Tälern (hier führen die Täler von Burgholzbach, Murmelbach, Blombacher Bach und andere zusätzliche Mengen Kaltluft heran, die damit – vor allem in den frühen Nachtstunden – einen relativ großen Beitrag leisten), wobei aber einstweilen kaltluftfreie Wärmeinselkerne verbleiben; der kleine Kaltluftstrom im Tal des Mirker Bachs verstärkt sich im Laufe der Nacht und versorgt Elberfeld-Zentrum mit Kaltluft, wo die Wirkung des Kaltluftstroms aus dem oberen Tal der Wupper schon recht gering ist.
- Die westlichen Ortslagen weisen die geringste Kaltluftzufuhr im Tal der Wupper auf, in Elberfeld münden Kaltluftströme unterschiedlicher Größenordnung und aus unterschiedlicher Richtung zu unterschiedlicher Zeit.
- In Arrenberg kommt es zeitweise zum Zusammenströmen von Kaltluft (Konvergenz mit Kaltluftstau). 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 blockieren sich gegenseitig, so dass die Belüftung reduziert wird.
- Es gibt Kaltluftüberströmungen aus dem Ennepetal; dies bedeutet, dass in den Ostteil von Wuppertal neben der Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper auch Kaltluft aus dem Ennepetal einströmt.

Konsequenzen für die Planung

- In Bezug auf den Zustrom von Kaltluft ist die untypische Situation planerisch nicht einfach zu handhaben, wegen der Komplexität der Geländesituation sollten kritische Vorhaben mit Einzelgutachten überprüft werden.
- Im Haupttal der Wupper sollten die Bedingungen für ein schnelles und tiefes Einströmen der Kaltluft allgemein verbessert werden; hierzu sollte entlang der Talachse unbedingt auf weitere Strömungshindernisse verzichtet und die Entsiegelung von Flächen angestrebt werden, dies kann schwerpunktmäßig im Rahmen einer Umnutzung von Industriebrachen oder auch in Verbindung mit Begrünungsmaßnahmen entlang der Wupper geschehen (beidseits der Wupper im Abstand von mind. 5 m zukünftig keine neue Bebauung zulassen; siehe Konzept „Lebensader Wupper“ bzw. wasserrechtliche Regelungen) und wird zu Verbesserungen der Situation beitragen.
- Für Barmen sind kaltluftbezogene Fragen weniger kritisch, allerdings gibt es Fernwirkungen, wobei bauliche Verdichtung zu negativen Veränderungen stromabwärts, also in Richtung Elberfeld / Arrenberg, führen können, die jeweils genau betrachtet und ggf. im Einzelnen untersucht werden sollten.
- In den westlichen Ortslagen entlang der Talachse (speziell in Elberfeld / Arrenberg) ist bei Bauvorhaben, die mit Nachverdichtung verbunden sind, wegen insgesamt geringer Kaltluftmengen besondere Vorsicht geboten, da hier die Belüftungssituation komplex und kritisch ist; besondere Bedeutung hat hier die Freihaltung der kleinen Nebentäler (Mirker Bach etc.) und Aktivierung des Kaltluftabflusses entlang der Wupper (Vermeidung von Hindernissen, konzentrierte Begrünung in den Abflussbahnen, Rückbau ungünstiger Hindernisse).
- Wichtig ist hier vor allem, dass der Talboden früh mit lokaler Kaltluft geflutet werden kann und die danach eintreffende (weniger kalte) Talkaltluft auf diese aufgleiten kann anstatt sich – wie jetzt – aufzustauen (Konvergenz), wobei diese Situation in Arrenberg zwar unter Abkühlungsgesichtspunkten nicht sehr problematisch ist, aber wegen der Gefahr von Immissionsakkumulation vermieden werden sollte; geeignete Maßnahmen zur durch systematischen Verbesserung der Kaltluftzufuhr von den Hängen sind vor allem der Verzicht auf weitere Bebauung sowie eine Reduzierung aller Hindernissen in der Längsrichtung der Kaltluftströme (z.B. Entfernung bzw. Längs- statt Querausrichtung von Gehölzen).

In der frühen Nacht (3 h nach Sonnenuntergang) entsteht Kaltluft in verschiedenen Teilen des Stadtgebiets in unterschiedlichen Größenordnungen und teilweise komplizierter Überlagerung; die Hauptmerkmale werden hier in einer Klassifikation in Anlehnung an die VDI-Richtline 3787 „Lokale Kaltluft“ dargestellt. Es bildet sich zunächst in den unbebauten Teilen

des Stadtgebiets flache Kaltluft auf Hängen und in Mulden, die sich in kleinen Tälern zu Kaltluftströmen sammelt und in Richtung auf die noch von Tage warme Bebauung zuströmt und sie deutlich vor der Kaltluft des Tals der Wupper erreicht. Dies ist nach den Modellergebnissen in Abb. 3 - 54 bei folgenden kleinen Tälern bzw. Talmulden der Fall: Talmulde zwischen Tesche und Sonnborner Kreuz, Varresbecktal, Eschenbeektal, Tal des Mirker Bachs, Schwarzbachtal, Meinetal, die Talmulden des Fischertaler Bachs und beiderseits davon, die Täler des Kothener Bachs, des Auer Bachs, des Bendahler Bachs, die Talmulde an der Hatzenbecker Straße bzw. In der Ossenbeck sowie die Talmulde am Zoologischen Garten.

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 entgegen dem Gefälle (wegen dort früh einsetzendem Kaltluftstaus in Folge des geringen Längsgefälles bzw. auch wegen dichtem Baumbestands). In der frühen Nacht werden aber erst 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; s.u.).

Die sehr verschieden starken Kaltluftströme erreichen in der frühen Nacht die dichter bebauten Teile der Stadt noch weitgehend getrennt. Im Tal der Wupper zwischen Langerfeld und Vohwinkel ergeben sich dementsprechend noch getrennte und unterschiedlich weitreichende kleine Kaltlufteinzugsgebiete. In Barmen, Elberfeld-Zentrum, rund um das Sonnborner Kreuz und in Vohwinkel bleiben die am dichtesten bebauten und von diesen einzelnen kleinen Kaltluftströmen erst einmal nicht erreichten Gebiete auch im Talboden zunächst weitgehend kaltluftfrei; ansonsten werden viele Bereiche in Hanglage früh (möglicherweise auch vor Sonnenuntergang) von der Kaltluft erreicht. Der Ortsteil Arrenberg wird teilweise von kleinen Kaltluftströmen schon früh in der Nacht erreicht.

Zum Stadtgebiet gehören ansonsten noch Teile von Kaltlufteinzugsgebieten außerhalb des Wuppereinzugsgebiets (Düsseltal, Deilbachtal). Da sie für die Stadt Wuppertal bzw. das BESTKLIMA-Untersuchungsgebiet keine besondere Bedeutung haben, bleiben sie hier unberücksichtigt, auch wenn sie für andere Gebiete wichtig sein können.

In der späten Nacht (8 h nach Sonnenuntergang; vergl. Abb. 3-55) 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. Während die anderen kleinen Kaltluftströme etwa gleich intensiv bleiben und die Hanglagen inzwischen flächenhaft mit etwas Hangkaltluft überstrichen werden, verstärkt sich der Kaltluftstrom im Tal des Mirker Bachs deutlich und versorgt Elberfeld-Zentrum, wo die Wirkung des Kaltluftstroms im oberen Tal der Wupper schon nachlässt, in erheblichem Umfang mit Kaltluft. Aus dem Ennepetal strömt über eine flache Einsattelung Kaltluft nach Langerfeld ein (laut Modell in einer Größenordnung zwischen den kleinen Bachtälern und dem Tal der Wupper); bei Vohwinkel strömt eine geringere Menge Kaltluft in ähnlicher Geländesituation in Richtung Rheintal ab.

Im Bereich der Ortslage Arrenberg wirkt nach den Modellergebnissen keiner der beiden großen Kaltluftströme (aus dem oberen und dem unteren Tal der Wupper) nennenswerter. Da diese Sondersituation sowohl für die Klimaanpassung als auch für die stadtklimatisch-lufthygienische Situation heute von Belang ist und weil ein Ausbleiben bzw. ein gegenseitiges Blockieren von großräumiger Kaltluftzufuhr in derartiger Tallage einen Problembereich kennzeichnen würde, wurde eine Sonderauswertung u.a. von Messdaten der Station Wuppertal-Bundesallee durchgeführt (siehe Kap. 3.2.4, darin: Sonderauswertung Kaltluft in Arrenberg). Danach verdichten sich die Hinweise darauf, dass eine Wirkung der Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper tatsächlich erst spät in der Nacht eintritt und somit in großen Teilen der Nacht die Situation eines lokalen Blockierens der beiden großen Kaltluftströme vorliegt. Neben der Frage, wie diese Situation genau zu bewerten ist, hat dies in jedem Fall zur Konsequenz, dass die kleinräumigen Kaltluftströme hier besonders wichtig sind und dementsprechend unbedingt erhalten bzw. soweit möglich verstärkt werden sollten (vergl. Abb. 3-56).

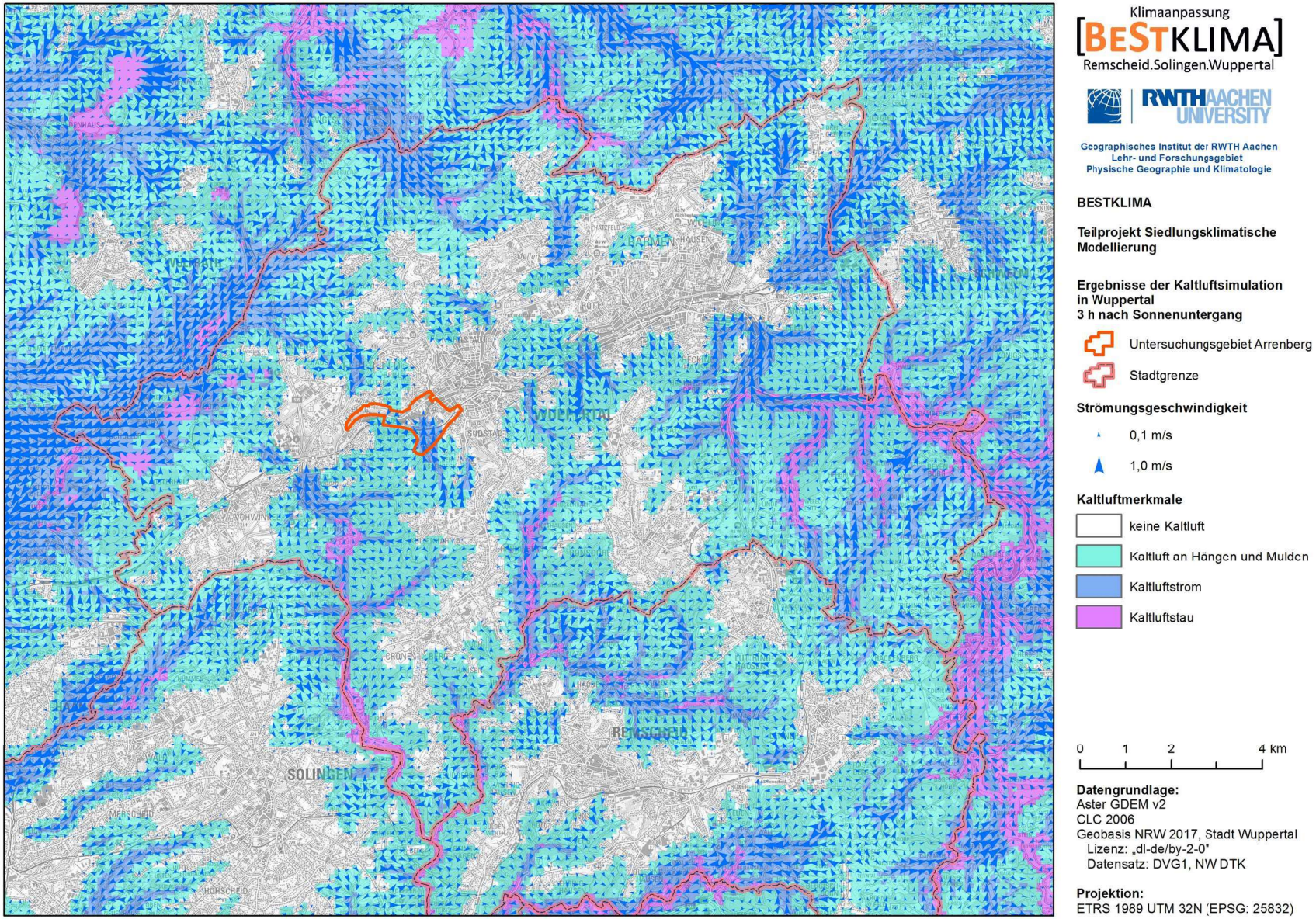


Abb. 3-54: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht (3 h nach Sonnenuntergang).

In den oberhalb und unterhalb der Stadt liegenden Teilen des Tals der Wupper überwiegt Kaltluftstau, d.h. stagnierende oder sehr langsam strömende Kaltluft (siehe Abb. 3-55). 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 innerhalb der Bebauung flächenhaft Kaltluftstau; diese Bereiche können sich als besonders immissionsgefährdet erweisen. Kleine isolierte Teilflächen mit der Signatur „Kaltluftstau“ in den Kerngebieten von Wuppertal stellen vermutlich keine flächenhafte Problemlage dar, weisen aber darauf hin, dass die Schwellenwerte für Kaltluftstau nach der VDI-Richtlinie flächenhaft fast erreicht sind; eine weitere flächenhafte Erhöhung der Bodenreibung wird in diesen Gebieten aber die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens dieses Schwellenwertes erhöhen.

In Bezug auf die planerische Umsetzung der kaltluftbezogenen Sachverhalte ist die untypische Situation im Tal der Wupper nicht einfach zu handhaben. Grundsätzlich ist bei weiterer Verdichtung entlang der Talachse Vorsicht geboten, zukünftige größere bauliche Veränderungen sollten in dieser Hinsicht genau überprüft werden.

Für Barmen selbst sind kaltluftbezogene Fragen wenig kritisch. Allerdings muss die Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper über Barmen zu den im Tal gelegenen Ortslagen von Elberfeld (z.B. nach Arrenberg) geführt werden. Von daher muss grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass in solchen Fällen Fernwirkungen zu erwarten sind. In diesem Sinne sind Wechselwirkungen auch mit Planungen in der großräumigen Umgebung zu beachten.

In den westlichen Ortslagen entlang der Talachse (speziell in Arrenberg) ist wegen geringer Kaltluftmengen besondere Vorsicht geboten (lokaler Kaltluftabfluss aus Hängen und Mulden ist hier wichtiger als in anderen Teilen des Tals). Anzustreben ist hier (Arrenberg) ein weitgehender Verzicht auf weitere Verdichtung und Versiegelung und ein Freihalten bzw. ein Erweitern von Strömungsleitlinien, wodurch nicht nur der gewünschte Abkühlungseffekt erzielt werden kann und die Hitzebelastung gering bleibt, sondern auch eine verbesserte Strömungssituation erreicht wird, die die Häufigkeit bzw. Intensität von Stagnation der Kaltluft und Schadstoffakkumulation reduziert. Einer Stagnation von Kaltluft bei flachem oder verbautem Talverlauf kann durch Reduzierung von Hindernissen in Längsrichtung und das Erleichtern des Einströmens der Hangkaltluft vor der Talkaltluft entgegengewirkt werden. Die – dann kühlere – Hangkaltluft kann den Talboden auffüllen, so dass die später einströmende Talkaltluft nicht einfach eingemischt wird, sondern aufgleitet; so teilweise von der Bodenreibung abgekoppelt nimmt die Tendenz zur Stagnation ab.

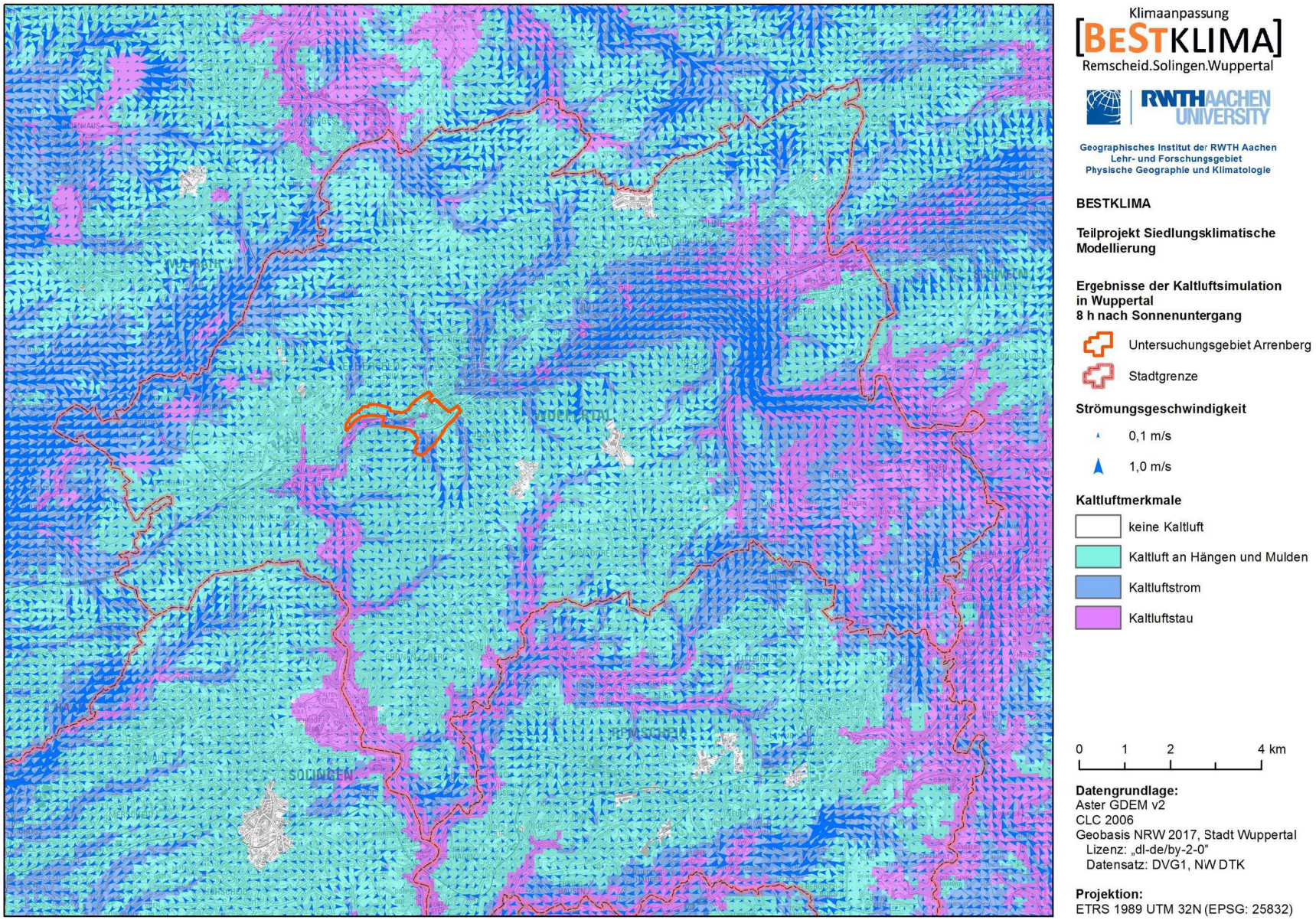


Abb. 3-55: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der späten Nacht (8 h nach Sonnenuntergang).

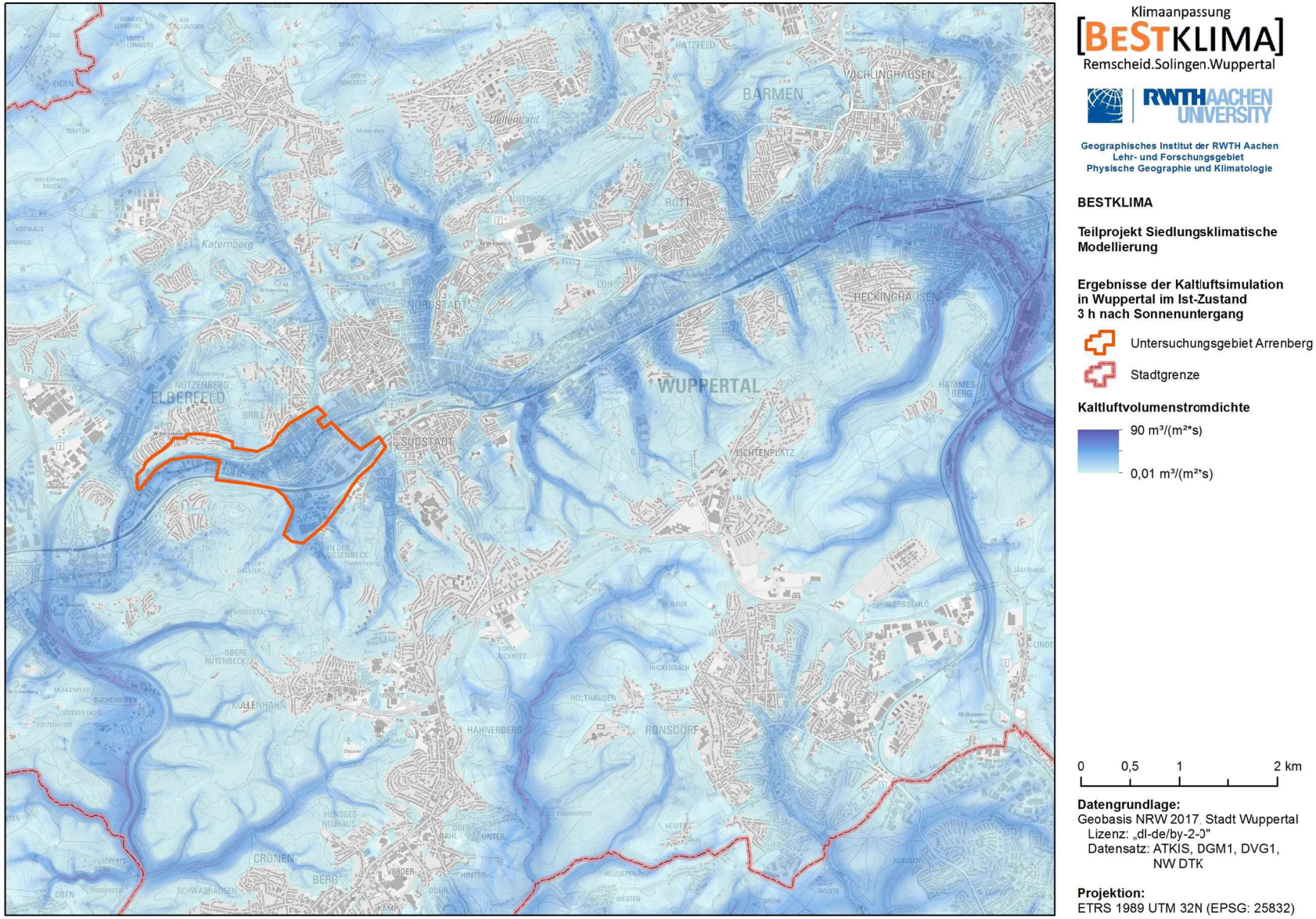


Abb. 3-56: Wuppertal – Kaltluftmerkmale in der frühen Nacht (3 h nach Sonnenuntergang) – Detail aus dem hoch aufgelösten Modelllauf (siehe Abschnitt „Sonderauswertung Kaltluft in Arrenberg“)

Ergebnis Messfahrten und Geostatistik - Hot Spots im Bereich Arrenberg

Hauptergebnisse

- An heißen Tagen treten die höchsten flächenhaften Temperaturen in den dicht bebauten Bereichen als Band im Talverlauf entlang der Wupper zwischen Barmen und Vohwinkel auf, dies ist auch in Arrenberg der Fall.
- Die „Hot-Spots“ sind allerdings nicht extrem.
- „Hot Spots“ befinden sich in Bereichen mit höchster Gebäudedichte und größtem Versiegelungsgrad; speziell im Bereich des Industriegebiets Kiesberg, des Gewerbegebiets Steinbecker Meile und entlang der Friedrich-Ebert-Straße (sowohl in den gewerblich genutzten als auch den verdichteten Wohngebieten).
- Zusätzlich ist die Tallage mit dem durch reduzierte Ventilation verringerten Abtransport künstlicher Wärmefreisetzung temperaturerhöhend.
- Es wurde eine durch die Flächennutzung verursachte Erhöhung der Lufttemperatur um bis über 2,7 K gegenüber der Freilandsituation festgestellt.

Konsequenzen für die Planung – allgemein

- Es wird dringend empfohlen, Nachverdichtungen nicht zuzulassen und die (v.a. auf offene Bauweise bezogene) Flächennutzung im Zuge der Anpassung an den Klimawandel v.a. in den thermisch belasteten Bereichen zu überprüfen, denn hier bestehen flächenhaft erhebliche Abkühlungspotentiale.
- Die „Hot Spots“ repräsentieren die Bereiche, in denen in Zukunft aufgrund der Temperaturerhöhungen die höchsten bioklimatischen Belastungen zu erwarten sind, weshalb hier eine Bündelung der Maßnahmen sinnvoll ist.
- Insbesondere im Bereich großer Verkehrsflächen sind hohe thermische Belastungen erreicht, wobei Begrünung und Entsiegelung nicht nur im Bereich von Parkplätzen sondern auch teils im öffentlich Raum oft noch in größerem Umfang möglich ist.
- In Gebieten mit geschlossener Bauweise sollten Klimaoasen mit Entsiegelung, Dach- und Fassadenbegrünung entwickelt werden, in denen Bedingungen wie in Parks herstellbar sind.
- Planerisch ist dies im Bestand auch durch die nachträgliche Schaffung von Straßenbegleitgrün, Dach- und Fassadenbegrünung, Innenhofbegrünung und Vernetzung mit bestehender grüner Infrastruktur und bei Neubauten durch entsprechende Festsetzungen (v.a. Grad der baulichen Nutzung und Grünanteil) beeinflussbar.

Zur zahlenmäßigen Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Hitzebelastung und planungsmäßig beeinflussbaren Eckdaten wurde eine Analyse der Feinstruktur der städtischen Wärmeinsel in Zusammenhang mit den die Überwärmung verursachenden Faktoren über eine geostatistische Auswertung von Temperaturmessdaten und Landnutzungsinformationen durchgeführt. Die Flächennutzungsinformationen stammen aus den Liegenschaftskatasterdaten (ALKIS; Wuppertal, 2016b), die extrahiert und als separate Informationsebenen zusammen mit Messfahrtdaten bearbeitet wurden. Wie in Kap. 1.2.2 erläutert, wird die turbulenzverursachte Verwirbelung der einzelnen Landnutzungseffekte mit GIS-Techniken in einem Radius von hier 100 m als Mittelung abgebildet. Die Abbildungen 3-57 bis 3-61 zeigen die Messpunkte und die so aufbereiteten Landnutzungsanteile im 100 m-Radius für das Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

Das Ergebnis der geostatistischen Auswertung der Messfahrtdaten in Verbindung mit den planerisch steuerbaren Landnutzungseckdaten für Wuppertal-Arrenberg stellt sich folgendermaßen dar. In Relation zu den Temperaturverhältnissen in einem Gebiet mit Grünflächen ergeben sich die folgenden rechnerischen Temperatureffekte (mit „Grünfläche“ sind hier und im Folgenden offen begrünte Freiflächen vom Typ „Freiland“ entsprechend Stock, 1992, im Gegensatz zu „Park“ als waldähnlich begrünten Freiflächen gemeint):

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park:	+ 0,86 K
versiegelte Fläche:	+ 2,06 K
Gebäudefläche:	+ 2,75 K

Aus dem Zusammenhang zwischen diesen anteilig berücksichtigten Landnutzungen und der Lufttemperatur kann ein Temperaturmodell für Wuppertal-Arrenberg berechnet und in thermischen Belastungsklassen dargestellt werden (vergl. Abb. 3-62). Die thermischen Belastungsklassen werden dabei entsprechend anderen Klimaanpassungsstudien über eine objektive Skalenteilung auf Basis der statistischen Verteilung der Temperaturwerte gebildet. Die Abbildung lässt flächige Bereiche mit unterschiedlicher thermischer Belastung erkennen, in denen sich die räumliche Verteilung der verschiedenen Landnutzungsklassen und ihrer Wirkung auf die Temperatur abbildet (kleinräumige Sondersituationen, wie z.B. ein stark durchgrünter Pocket-Park, sind hierdurch nicht abzubilden, da hier eine Abschirmung von der turbulenzgesteuerten Wechselwirkung mit der Umgebungsluft vorliegt).

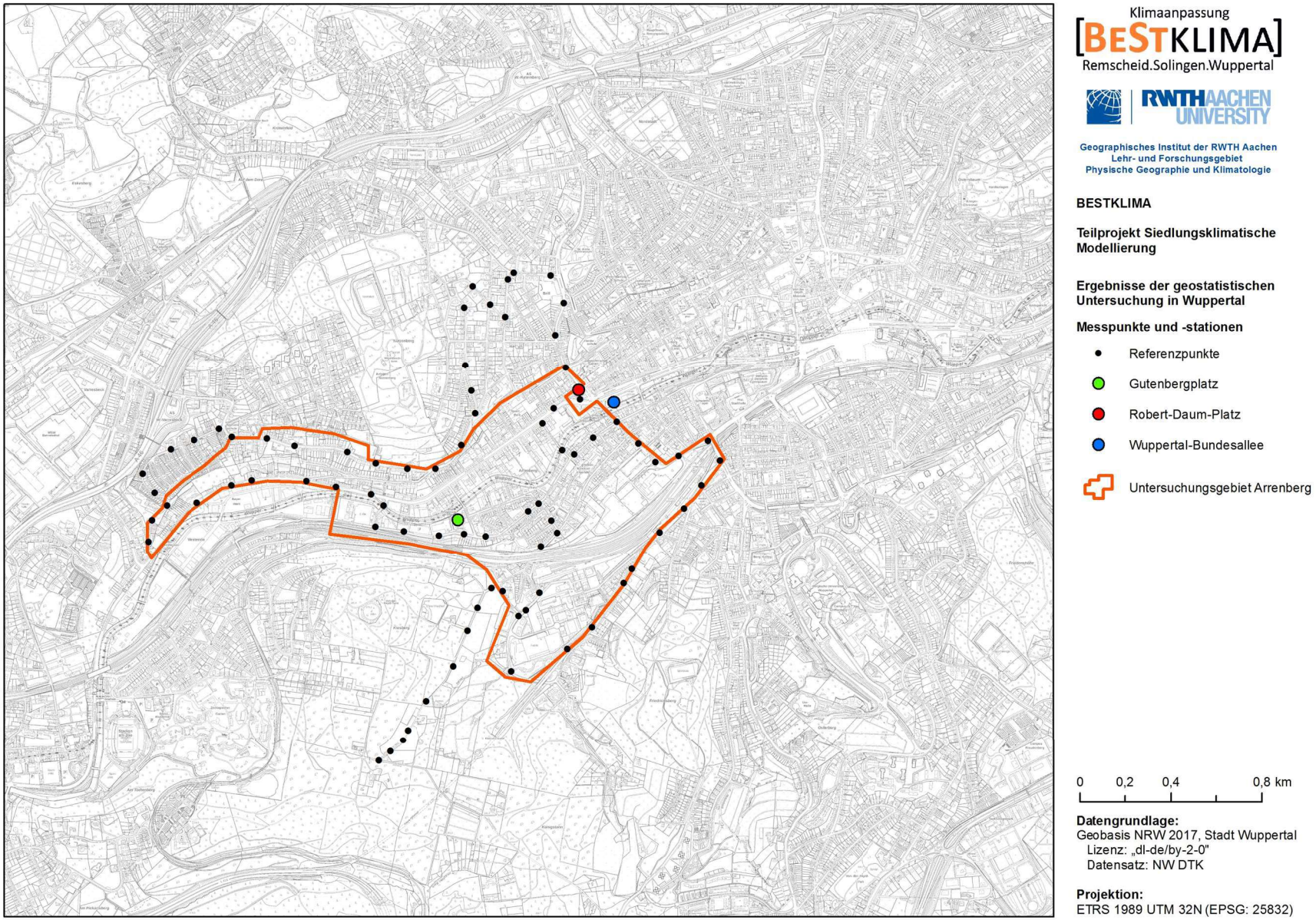


Abb. 3-57: Wuppertal – Messpunkte im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

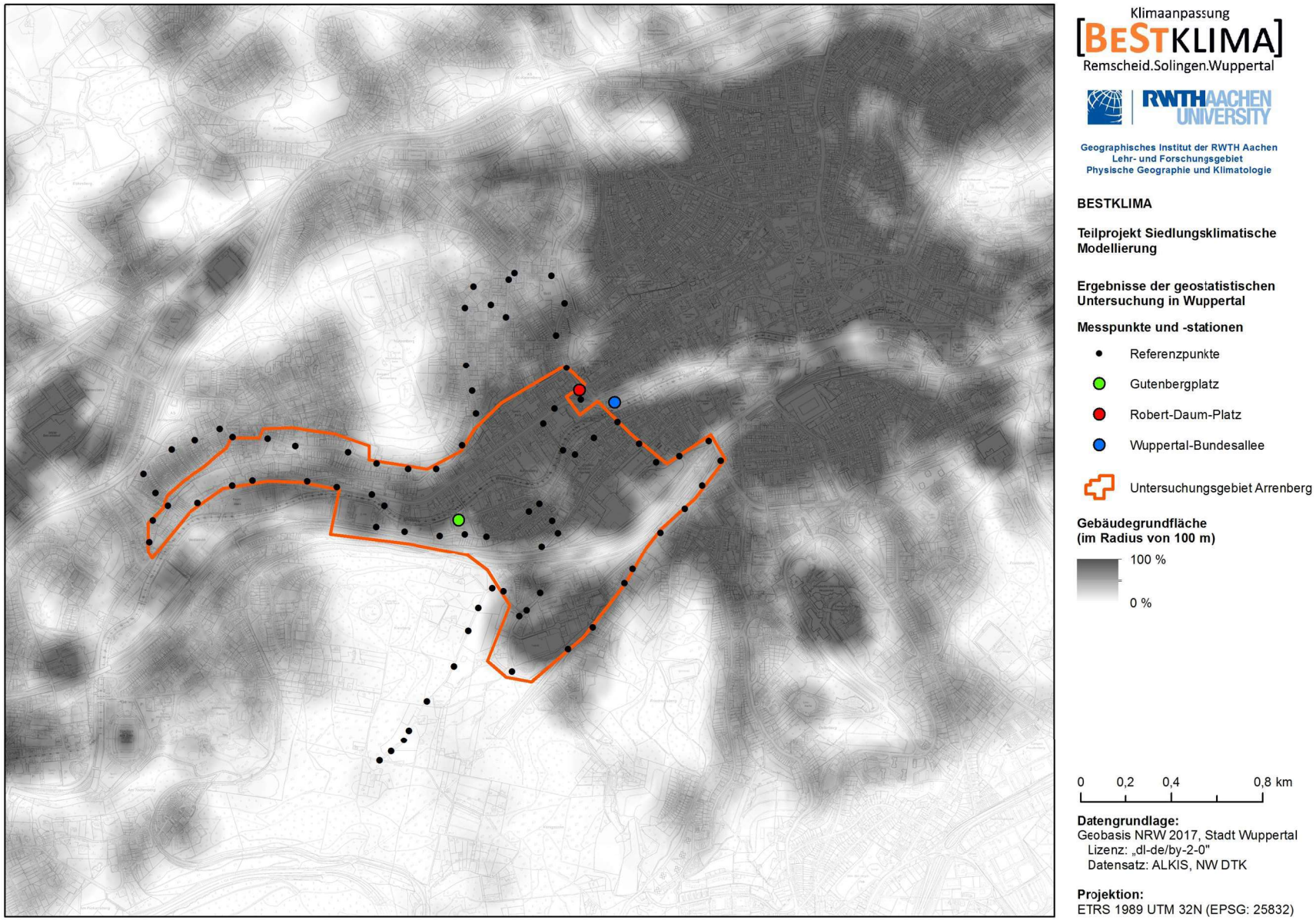


Abb. 3-58: Wuppertal – Gebäudedichte im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

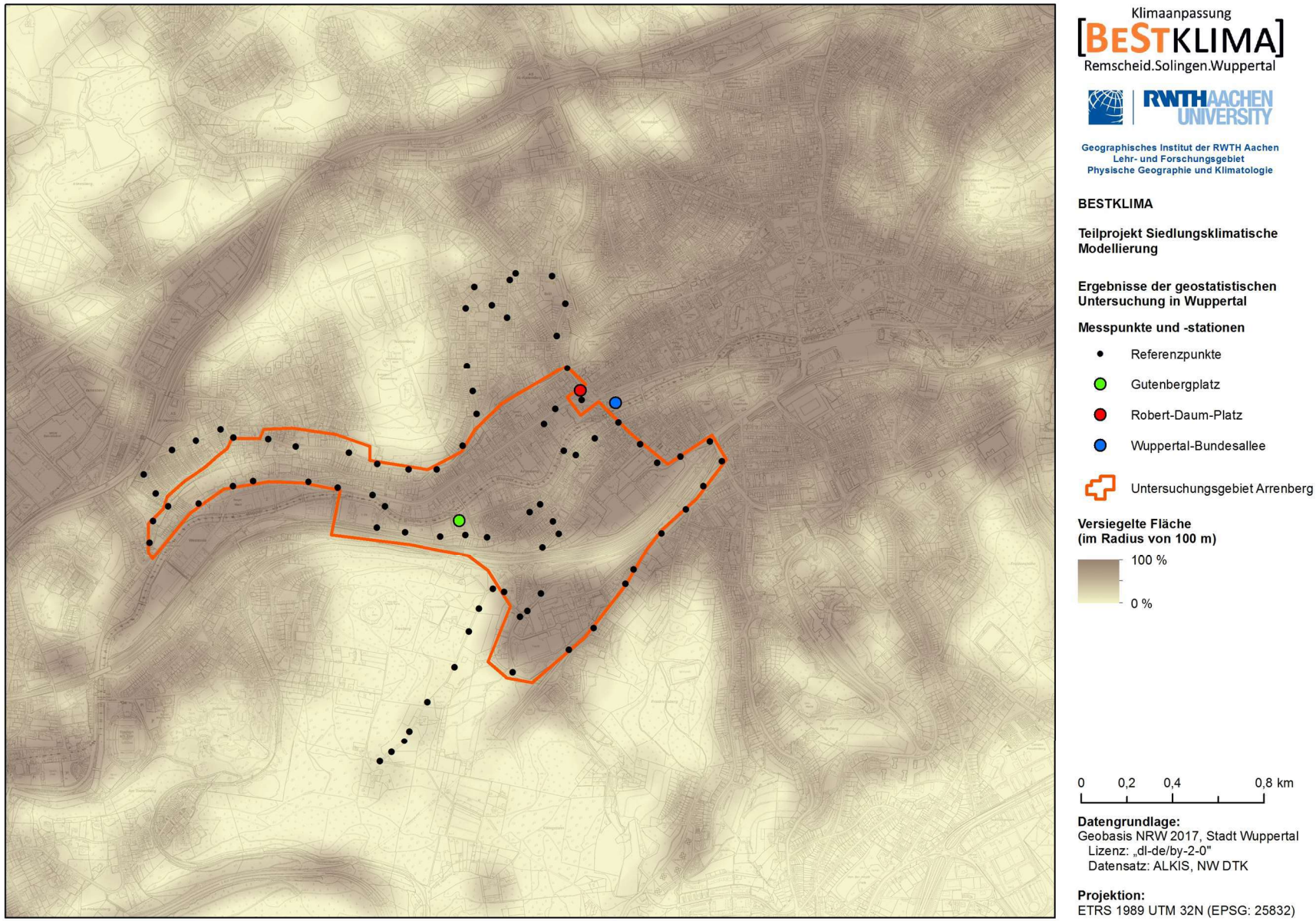


Abb. 3-59: Wuppertal – Versiegelungsgrad im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

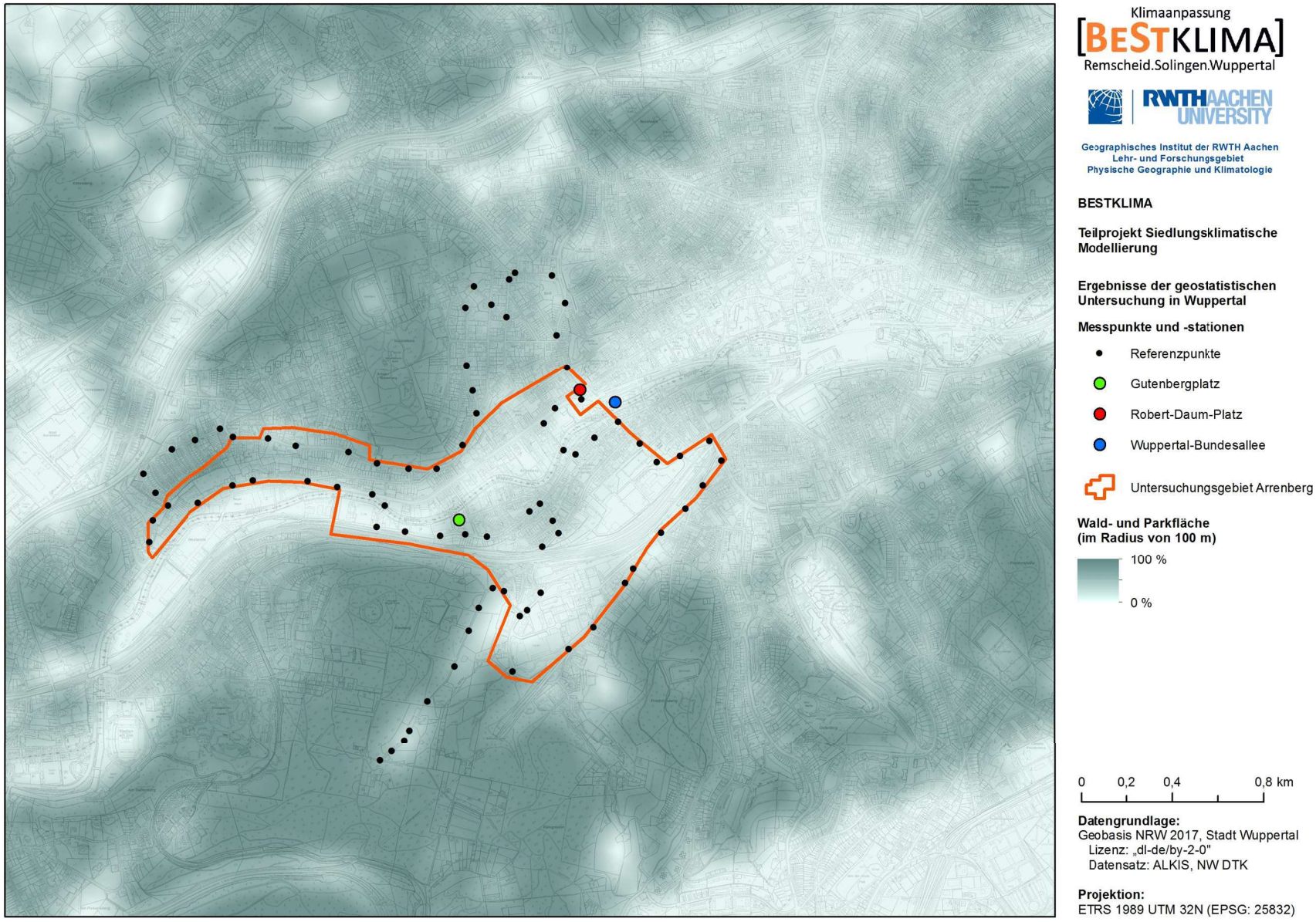


Abb. 3-60: Wuppertal – Wald- und Parkdichte im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

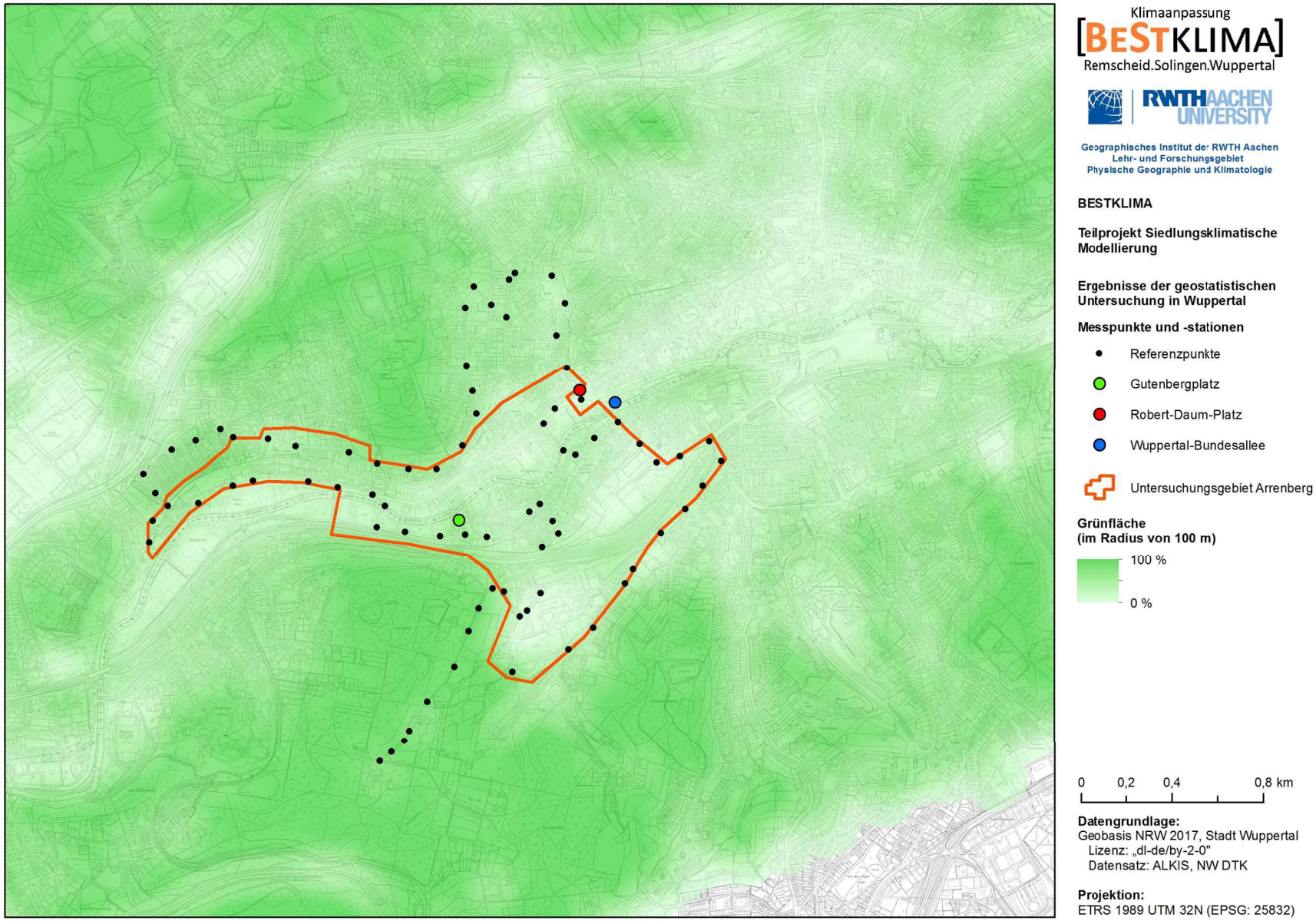


Abb. 3-61: Grünflächendichte – Messpunkte im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg.

Es liegen im Untersuchungsgebiet insgesamt größere Differenzierungen bei allen Flächennutzungsmerkmalen vor und auch die räumliche Verteilung der thermischen Belastungsstufen weist dementsprechend Unterschiede auf. So sind z.B. die größeren Grünflächenareale mit in ihrem deutlichen Temperatureffekt zu erkennen. Auch treten die dichter bebauten Teile im Zentrum Elberfeld als erkennbar überwärmt hervor.

Die räumlichen Unterschiede innerhalb der Bebauung sind vorhanden aber nicht extrem. Dies ist durch das in der Umgebung von Arrenberg vorhandene Muster aus Teilgebieten mit einerseits vielen Freiflächen bei hohem Versieglungsgrad (z.B. Handel mit Großparkplätzen) und andererseits wenig Freiflächen bei hoher Gebäudedichte (dichte innerstädtische Bebauung oder Industriegebiete) und beides bei geringer Durchgrünung und dem zudem hohem Anteil der am Talverlauf ausgerichteten Verkehrsflächen verursacht; Versiegelungsgrad und Gebäudedichte wirken – bei etwas unterschiedlichen Beträgen – beide in Richtung hoher Temperaturen. Somit ergibt sich eine talparallele Streifenstruktur eines insgesamt thermisch hoch belasteten Gebiets als Abbild der dicht bebauten bzw. hoch versiegelten Bereiche im Tal. Größere Grünflächen sind speziell an den Hängen angeordnet (Kiesberg, Nützenberg etc.) und bilden lokale Kälteinseln, die thermisch gering belastet sind.

Um die recht großen und flächigen thermisch hoch belasteten Bereiche besser differenzieren zu können, wurde hier eine zusätzliche Belastungsstufe („thermisch sehr hoch belastet“) eingeführt. Neben dem Zentrum Elberfeld und einzelnen Verdichtungsbereichen um größere Gebäudekomplexe entlang der Wupper bzw. in Gewerbeflächen oberhalb Nützenberg an der A46 handelt es sich um Teilflächen in Arrenberg. Hier ist insbesondere das Industriegebiet mit Schwerpunkten beiderseits der Bahnstrecke zu nennen. Außerdem liegen noch kleine Kerne entlang der Friedrich-Ebert-Straße.

An den lokalen Differenzierungen der Bebauungsdichten bzw. Versiegelungsgraden orientierte Maßnahmen sollten schwerpunktmäßig folgendermaßen aussehen (siehe auch Abb. 62a).

In Gebieten mit hoher oder sehr hoher thermischer Belastung in Verbindung mit großflächigen Verkehrsflächen werden Begrünungsmaßnahmen empfohlen; es sollte sich hier insbesondere um Teilentsiegelungen handeln, die mit lockeren Baumanpflanzungen verbunden sind.

In Gebieten mit hoher oder sehr hoher thermischer Belastung in Industriegebieten werden teils Begrünungsmaßnahmen empfohlen; es kommt hier insbesondere Fassadenbegrünung

in Frage. Teils kommt energetische Optimierung in Betracht, sofern von Gebäuden und Anlagen hohe Abwärmebeträge ausgehen (Isolation und Wämerückgewinnung).

Im Geschäftszentrum Elberfeld-Mitte mit Blockbebauung wirkt sich die sehr hohe Belastung vor allem im Straßenraum (Fußgängerzone) aus; hier sind vor allem lockere Baumpflanzungen – wo möglich – zu empfehlen.

In Wohngebieten mit Blockrandbebauung treten teilweise hohe thermische Belastungen auf. Dies ist meist auf Seiten der Innenhöfe besser beeinflussbar, zum Beispiel durch Entwicklung von „Klima-Oasen“ durch Entsiegelung und intensive Begrünung (Fassaden-, Dach- und Flächenbegrünung), soweit noch nicht vorhanden.

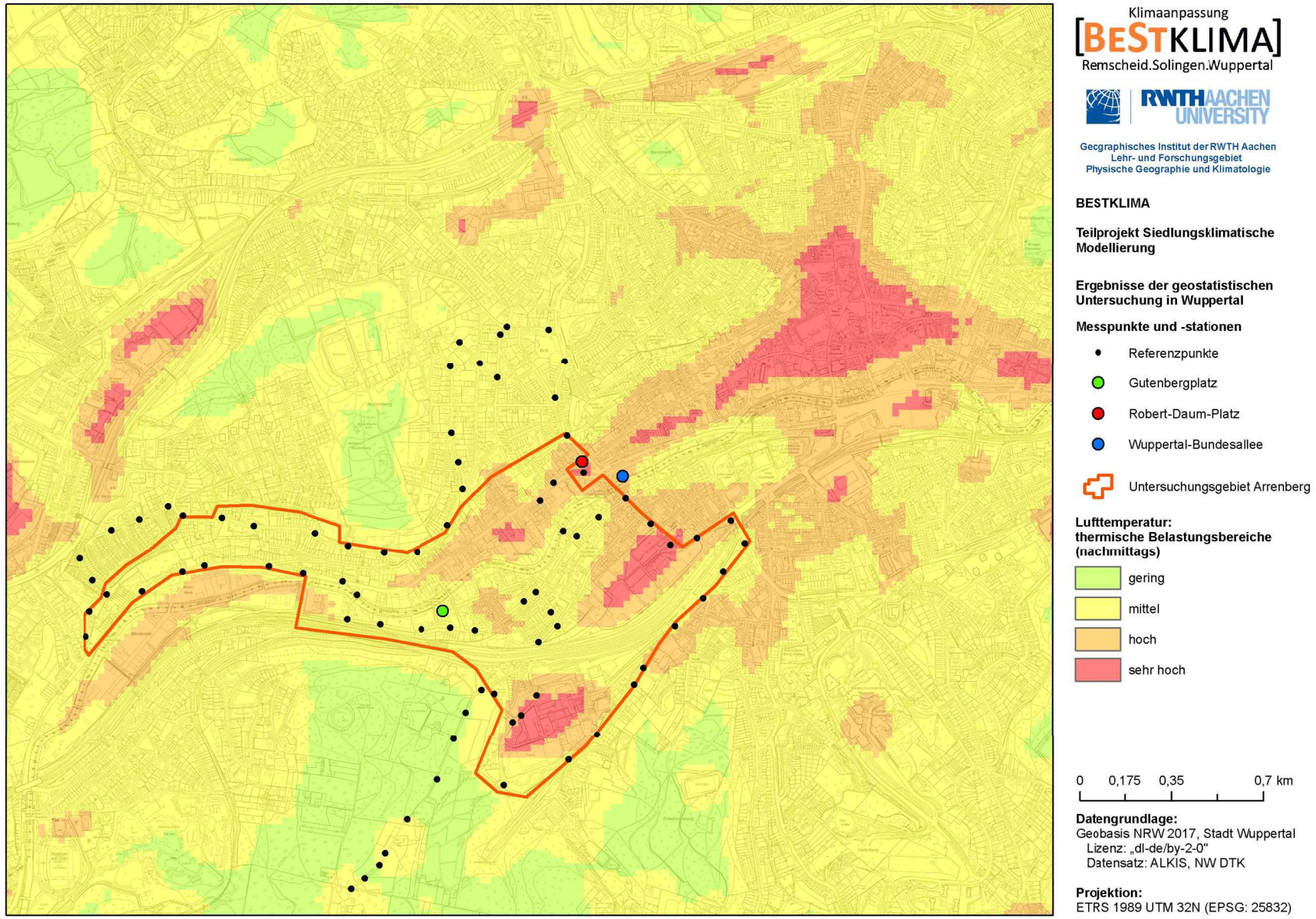
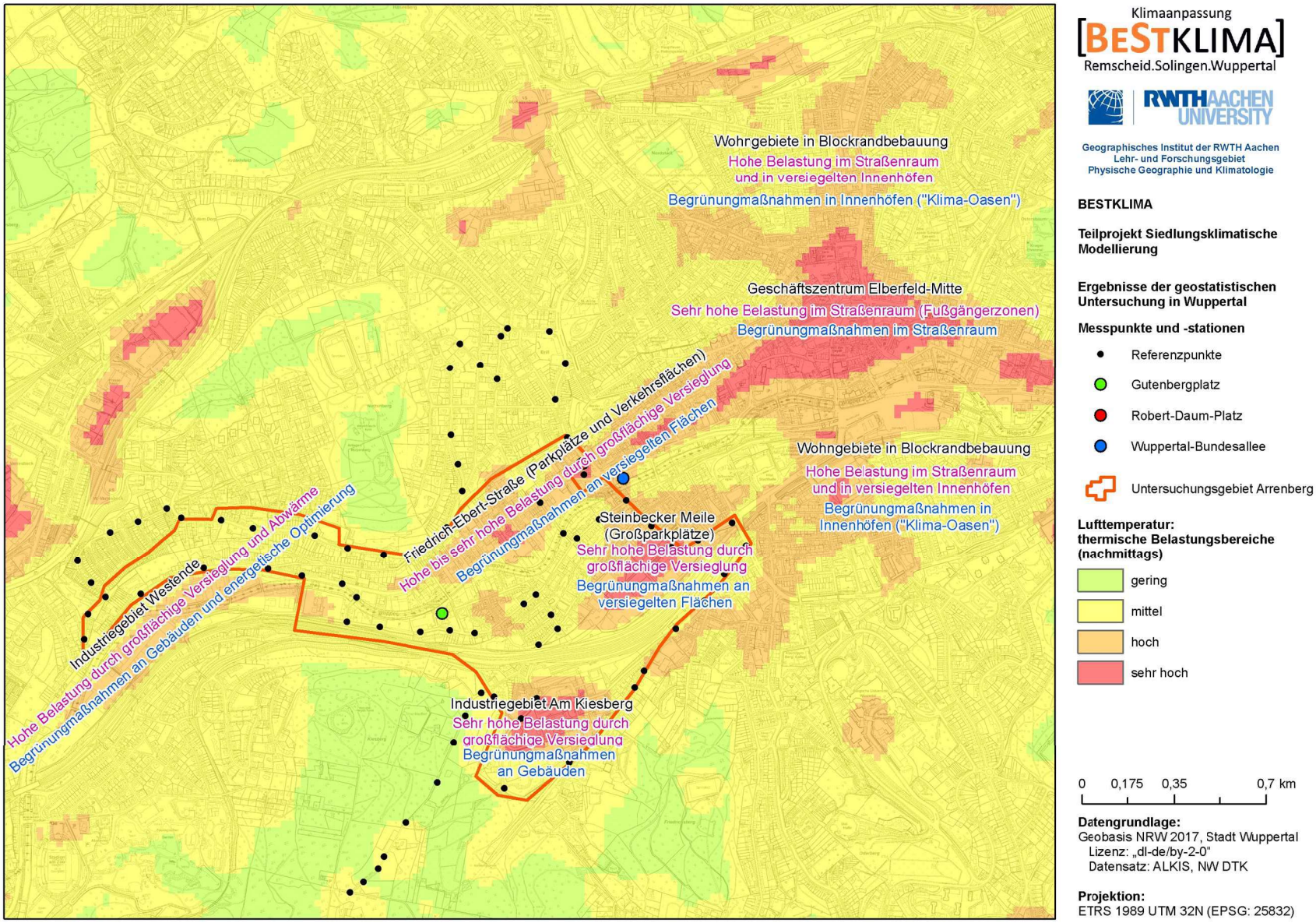


Abb. 3-62: Wuppertal – Arrenberg: Temperaturmodell in thermischen Belastungsklassen.



Klimaanpassung
[BESTKLIMA]
Remscheid.Solingen.Wuppertal

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Geographisches Institut der RWTH Aachen
Lehr- und Forschungsgebiet
Physische Geographie und Klimatologie

BESTKLIMA

Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Ergebnisse der geostatistischen Untersuchung in Wuppertal

Messpunkte und -stationen

- Referenzpunkte
- Gutenbergplatz
- Robert-Daum-Platz
- Wuppertal-Bundesallee
- Untersuchungsgebiet Arrenberg

Lufttemperatur: thermische Belastungsbereiche (nachmittags)

- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch

0 0,175 0,35 0,7 km

Datengrundlage:
Geobasis NRW 2017, Stadt Wuppertal
Lizenz: „dl-de/by-2-0"
Datensatz: ALKIS, NW DTK

Projektion:
ETRS 1989 UTM 32N (EPSG: 25832)

Abb. 3-62a: Wuppertal – Arrenberg: Lage von thermischen Belastungsbereichen, Hauptursachen und empfohlene Maßnahmen

Human-Biometeorologie für innerstädtische Extremstandorte

Hauptergebnisse

- Die größere Differenzierung bei den Bioklimadaten hängt v.a. mit den kleinräumig stark differenzierten Verschattungsverhältnissen zusammen, die in die „Gefühlte Temperatur" eingehen.
- Die bioklimatologischen Belastungsindices (PET, UTCI) haben an heißen Tagen eine wesentlich größere Bandbreite als die gemessene Lufttemperatur.
- Besonders belastend ist der Aufenthalt auf stark versiegelten Flächen wie Parkplätzen/Verkehrsflächen („extrem starker Hitzestress").
- Parks weisen deutlich geringere gefühlte Temperaturen auf („moderater Hitzestress" im unteren Bereich).
- In Parks wird der Aufenthalt in Hitzeperioden auch gegenüber verschatteten versiegelten Flächen als angenehmer empfunden.

Konsequenzen für die Planung

- Generell ist die Entsiegelung und Begrünung von Flächen mit einer Temperaturentlastung verbunden.
- Bei einer offen gestalteten Grünfläche ist dieser Effekt im Nahumfeld geringer als bei einer dichten Baumbepflanzung (demgegenüber ist der Effekt aber dann in das weitere Umfeld hinein größer).
- „Klimaoasen" können insbesondere dann entstehen, wenn eine starke Abschirmung der Grünfläche nach außen gegeben ist (z.B. in Blockrandbebauung oder durch randlich dichte Begrünung).
- Eine zusätzliche Verschattung öffentlicher Flächen kann durch hohe Bäume erreicht werden (in immissionsbelasteten Bereichen bevorzugt mit lichten Kronen, um den Luftaustausch nicht zu erschweren).

Als innerstädtisches Extremstandortpaar im Sonderuntersuchungsgebiet Arrenberg wurden der großflächig versiegelte und in der Umgebung massiv bebaute Standort Robert-Daum-Platz und der Park am Gutenbergplatz ausgewählt (siehe Abb. 3-63).

Ebenso wie für die Messstandorte in Solingen ergeben sich auch für dieses Extremstandortpaar in Wuppertal Differenzen zwischen den erhobenen thermischen Belastungen an den beiden Standorten. Diese Differenzen sind aber bei den verschiedenen Bioklima-Belastungsmaßen und bezogen auf verschiedene Uhrzeiten unterschiedlich. Im Mittel des Messzeit-

raums (nachmittags bis abends) liegt die Lufttemperatur am Standort Gutenbergplatz erwartungsgemäß mit 30.2 °C erheblich (1.5 K) unter der am Standort Robert-Daum-Platz; beim Bioklima-Belastungsindex UTCI unterscheiden sich die Werte kaum (- 0.1 K), beim Index PET liegt der der Gutenbergplatz sogar deutlich über dem Robert-Daum-Platz (- 0,8 K).

Die Ursache hierfür liegt in der konkreten Bebauungs- bzw. Grünflächenstruktur der Standorte. Der Bereich um den Robert-Daum-Platz ist von massiver Bebauung umgeben und zeitweise durch die Baukörper verschattet, während der Gutenbergplatz zu großen Teilen aus einer unverschatteten Rasenfläche besteht, so dass der Messstandort nur zeitweise im Schatten lag; dementsprechend liegt die gemessene Globalstrahlung im Mittel mit



Abb. 3-63: Wuppertal - Standorte der human-biometeorologischen Untersuchungen (Grafik: Arne Thiemann).

167.8 Wm^{-2} am Messpunkt Robert-Daum Platz deutlich unter dem gemessen Mittel am Gutenbergplatz (232.5 Wm^{-2}).

Das tatsächliche Be- bzw. Entlastungspotential der Standorte wird deutlich, wenn die Daten für einen Zeitraum betrachtet werden, an dem der versiegelte Standort in der Sonne liegt und der Grünstandort verschattet ist, wie es üblicherweise in einem Park der Fall ist. Wie Abbildung 3-64 zeigt, sind dann bei einer – dem oben genannten Mittelwert ungefähr entsprechenden – Differenz der Lufttemperatur (Ta = 1,0 K) die Belastungsindizes PET und UTCI am versiegelten Standort Robert-Daum Platz nicht nur deutlich höher als am Parkstandort Gutenbergplatz (11,1 K bzw. 6,8 K), in Bezug auf die daraus abgeleiteten thermischen Belastungsstufen handelt es sich beim PET um den Unterschied zwischen „mäßige Belastung“ und „extremer Belastung“. Die Sonnenstrahlung kommt als einer der – neben der Lufttemperatur – wichtigen Einflussfaktoren für die thermische Behaglichkeit des Menschen hinzu. Das Abkühlungspotential von Grünflächen als innerstädtische Rückzugsräume bei Hitzeereignissen ist demnach auch von der konkreten Ausgestaltung der jeweiligen Grünfläche abhängig.

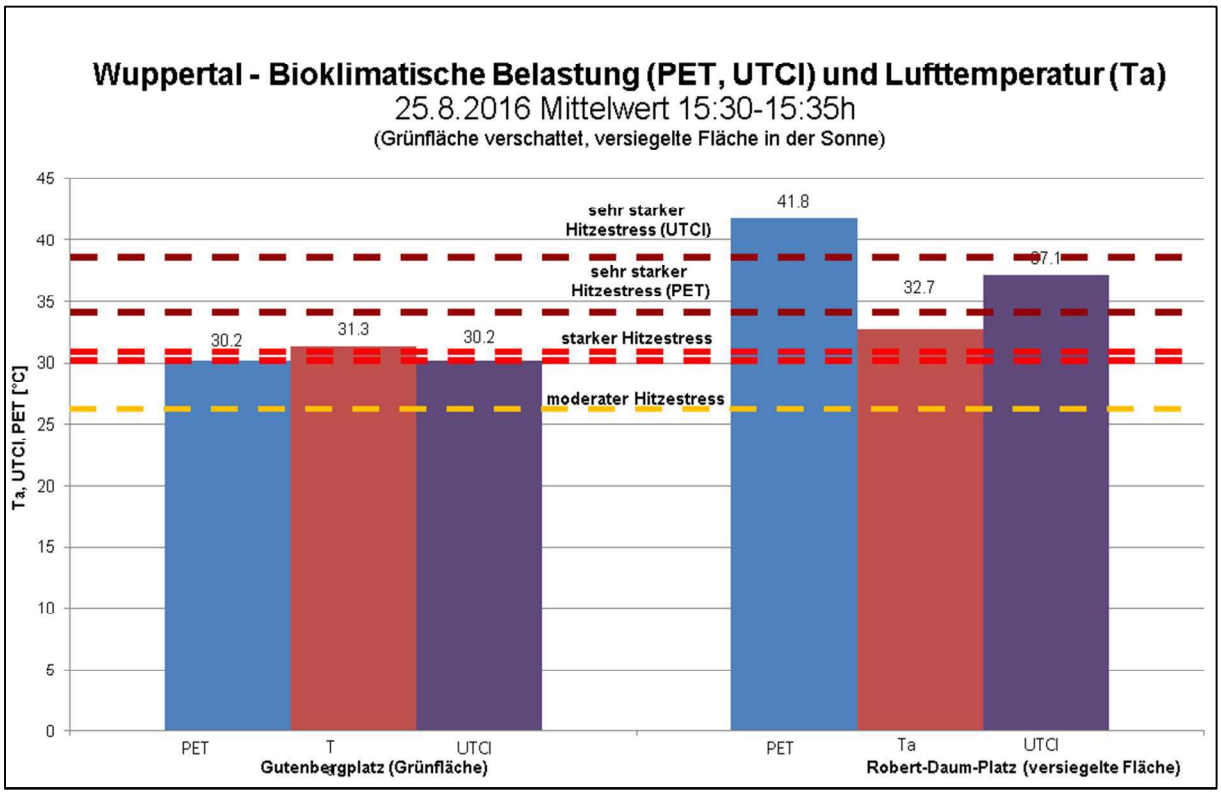


Abb. 3-64: Wuppertal - bioklimatische Belastung an innerstädtischen Extremstandorten (Grünfläche verschattet, versiegelte Fläche in der Sonne; Schwellenwerte für Hitzestress für PET und UTCI).

Neben den Messungen wurde eine Passantenbefragung durchgeführt, die Auskunft über die subjektive Wahrnehmung der Klimaparameter Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Luft-

feuchtigkeit und Wind ergeben sollte (Abb. 3-65). Die Befragten konnten die Merkmale auf einer Skala von sehr kalt bis sehr warm bzw. sehr niedrig bis sehr hoch einstufen und zum anderen auf einer Skala von sehr angenehm bis sehr unangenehm bewerten. Alter, Geschlecht und aktueller Wohnort wurden dabei als Einflussfaktoren für den thermischen Komfort mit in den Fragebogen aufgenommen (Detailergebnisse siehe Anhang).

Im Wesentlichen werden die Klimaparameter an beiden Standorten sehr differenziert wahrgenommen und bewertet. Bei der Wahrnehmung der einzelnen Klimaparamater fällt auf, dass die Klimaparameter Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur an beiden Standorten als warm oder sehr warm empfunden werden. Betrachtet man demgegenüber jedoch die Frage zum Wohlbefinden am Aufenthaltsort, wird der Grünstandort deutlich besser bewertet als der versiegelte; es tritt dort in der Rangfolge der Häufigkeiten jeweils die günstigere Klasse häufiger auf.

Dieses differenzierte, aber wenig pointierte Ergebnis steht offensichtlich in Zusammenhang mit der Tatsache, dass am Robert-Daum-Platz wegen der großen Baukörper zwischenzeitliche Verschattungsphasen am Mess- und Befragungsstandort vorlagen, während der Park am Gutenbergplatz über längere Zeiten in der Sonne lag. Immerhin bleibt festzuhalten, dass am Robert-Daum-Platz tatsächlich praktisch nur Passanten, also Personen, die nicht länger am Ort verbleiben wollten, zu befragen waren; am Gutenbergplatz waren hingegen die meisten der anwesenden Personen längere Zeit, also erkennbar zur Erholung, dort.

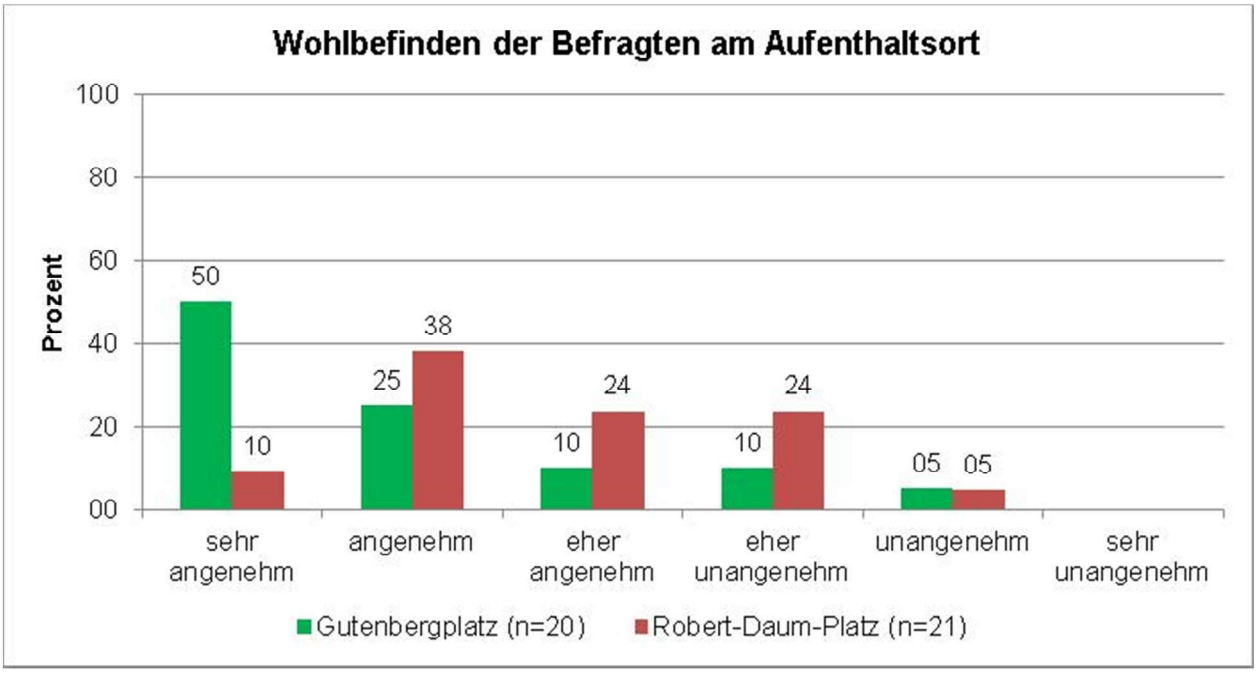


Abb. 3-65: Wuppertal – Ergebnisse der Passantenbefragung.

Sonderauswertung Kaltluft in Arrenberg

Hauptergebnisse

- Größere Kaltluftmengen aus dem oberen Tal der Wupper treffen in Arrenberg meist erst spät in der Nacht ein, die Kaltluft ist dann auch schon durch die bis dahin durchströmten Stadtteile „vorgewärmt“ und wirkt daher nicht so stark abkühlend.
- In den östlichen Teil des dicht bebauten Talbereichs in der Stadt Wuppertal dringt Kaltluft auch aus dem unteren Tal der Wupper von Süden bzw. Südwesten her ein.
- Daraus ergibt sich die Situation eines lokalen Blockierens der beiden großen Kaltluftströme in Arrenberg mit der Konsequenz, dass sie nur eingeschränkt in der Lage sind, überwärmte bzw. mit Schadstoffen belastete Luft auszuräumen also .

Konsequenzen für die Planung

- Die späte und dann teils blockierte Zufuhr von Kaltluft in einer engen Tallage führt zu einer Überlagerung sowohl lufthygienischer als auch stadtklimatischer Probleme, deren Lösung insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Anpassung an den Klimawandel mit hoher Priorität angegangen werden sollte,
- die Belüftungsfunktion der nächtlichen Kaltluft kann unter den gegeben Umständen nur durch Abschwächung des lokalen Blockierens unterstützt werden, wozu die kleinräumigen Kaltluftströme von den Hängen aktiviert werden und dazu ihre Fähigkeit in die Bebauung vorzudringen in jedem Fall erhalten bzw. wo möglich verstärkt wird,
- konkrete Maßnahmen entsprechend einem vorgeschlagenen Konzept sind der Verzicht auf weitere bauliche Hindernisse und eine Optimierung von versiegelten Flächen (Entsiegelung) sowie von Grünflächen (Reduzierung von Vegetationshindernissen in der Strömungsachse und Ersatz an den Rändern).

Nach den Ergebnissen der Kaltluftmodellierung wirkt in der Ortslage Arrenberg in der späteren Nacht keiner der beiden großen Kaltluftströme aus dem Tal der Wupper mehr nennenswert. Um diese Sondersituation, die sowohl für die Klimaanpassung als auch für die stadtklimatisch-lufthygienische Situation heute von Belang ist, zu klären, wurde eine Sonderauswertung durchgeführt. Immerhin würde ein Ausbleiben bzw. ein gegenseitiges Blockieren von großräumiger Kaltluftzufuhr in derartiger Tallage eine Situation mit allgemein schlechter Durchlüftung (wegen der markanten Tallage) betreffen, in der relativ hohe Belastung sowohl durch Schadstoffemissionen als auch durch Wärmebelastung vorliegt.

Hierzu wurde einerseits eine Feinmodellierung mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 ausgewertet und andererseits eine Auswertung von Stationsdaten vorgenommen.

Ergebnisse einer Feinmodellierung mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21

Aus einer Feinmodellierung mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 (siehe auch Kap. 3.2.4. Abschnitt „Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Grünzug entlang der Wupper“) können Details des lokalen Kaltluftabflusses in der frühen Nachsituation abgelesen werden (siehe Abb. 3 - 66). Die bereits im Abschnitt „Teilergebnis Kaltluftmodellierungen“ auf Basis der Grobmodellierung genannten kleinen Täler und Mulden treten hier klar in Erscheinung.

In den verschiedenen kleinen Tälern und Mulden liegen als jeweils vorwiegende Problemlagen vor: Rückstau von Kaltluft durch Verbauung oder Verbuschung sowie geringe Kaltluftproduktion durch geringen Grünflächenanteil im Bereich der entsprechenden Beschriftungen bzw. entlang der dargestellten Leitlinien.

Als Planungsempfehlungen werden an den entsprechenden Stellen abgeleitet: die Entwicklung der Mittelhanglagen in Richtung auf mehr offene Flächen bzw. offenen Hochwald bzw. offener durchgrünte Wohnnutzung bzw. in Form von hangabwärts ausgerichteten Luftleitbahnen (mittelfristig erreichbar), das Erreichen einer stärkeren Kanalisierung statt ungerichteter Ableitung der einströmenden Kaltluft durch Maßnahmen der Stadtplanung (langfristige Umstrukturierung der Flächennutzung mit Entwicklung von Grünzügen bzw. die Kaltluft leitenden Baumreihen) und Verstärkung des Kanalisierungseffekts, den das Bett der Wupper jetzt schon hat, in dem Hindernisse zurückgenommen und Grünstreifen längs der Wupper angelegt oder verbreitert werden.

Auswertung von Stationsdaten

Neben den Ergebnissen der Kaltluftmodellierung (s. Kap. 3.2.4, darin: Teilergebnis Kaltluftmodellierungen) wurden u.a. Messdaten der Station Wuppertal-Bundesallee (etwa am Ostrand von Arrenberg) und Modellergebnisse aus dem „Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“ (Lohmeyer, 2000) ausgewertet.

Die Daten der Station Wuppertal-Bundesallee (Stadt Wuppertal, 2016) wurden dabei in zwei Richtungen ausgewertet. Einerseits wurden auf Stundenbasis mittlere Schwachwindhäufigkeiten an Strahlungstagen berechnet um potentielle Fälle mit Kaltluftabfluss zu identifizieren (s. Abb. 3-67), andererseits wurden auf gleicher Zeitbasis Windrichtungen ebenfalls an Strahlungstagen ermittelt um die Richtung von vermutlichen Kaltluftabflüssen aus den beiden Haupttalrichtungen zu erfassen (s. Abb. 3-68).

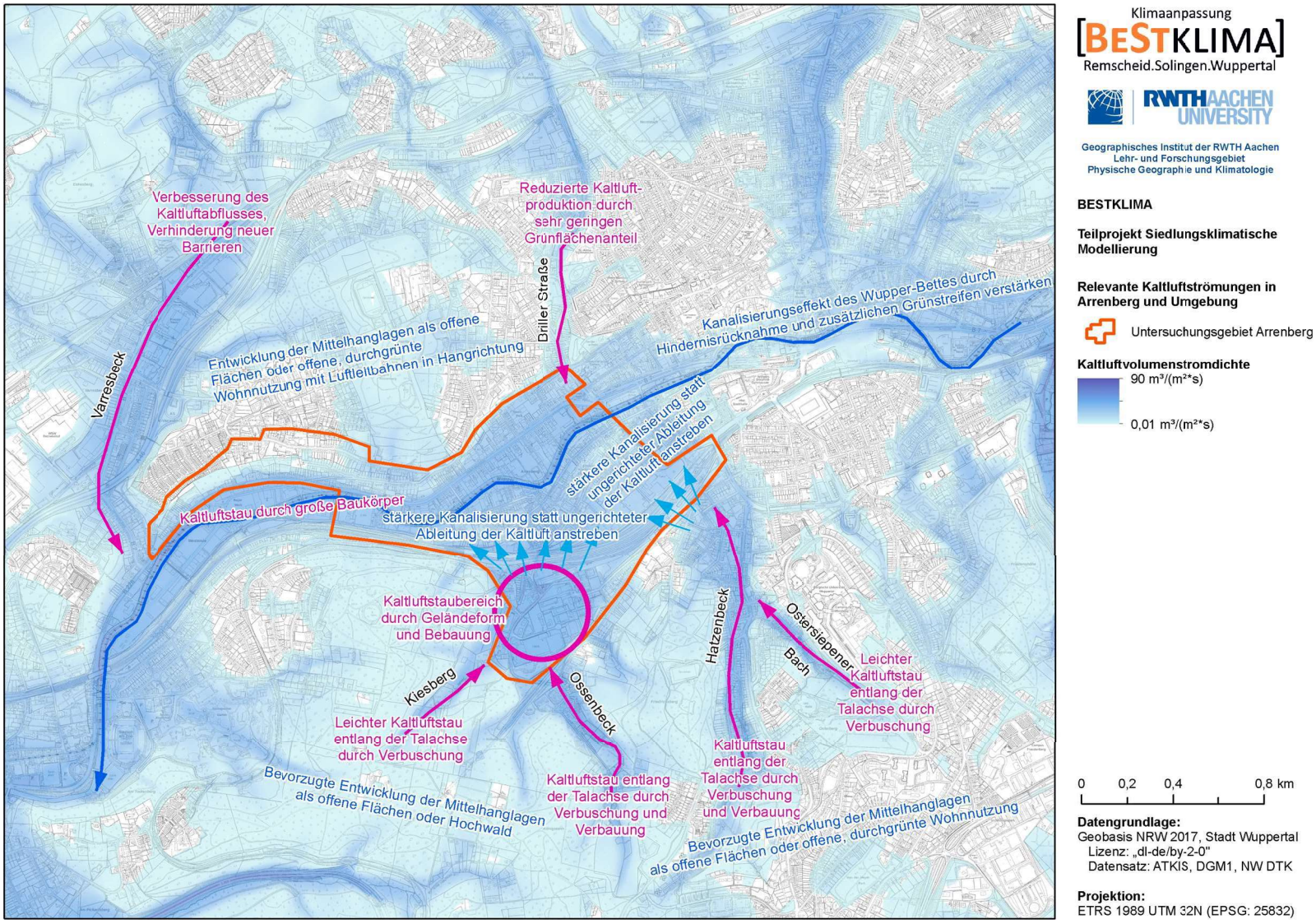


Abb. 3-66: Kaltluftvolumenstromdichte in Wuppertal-Arrenberg – Details der Feinmodellierung (siehe Kap. 3.2.4. Abschnitt „Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Grünzug entlang der Wupper“) in der frühen Nachtsituation (3 h nach Sonnenuntergang) und Verortung von Problemlagen (rote Beschriftungen) sowie von Planungsempfehlungen (blaue Beschriftungen); orange: Untersuchungsgebiet Arrenberg

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die höchste Häufigkeit von Schwachwindstunden an Strahlungstagen und damit die größte Wahrscheinlichkeit für Kaltluftabfluss im Laufe des Abends ansteigt und erst nach Mitternacht ein hohes Endniveau erreicht. Dem widersprechen die vorgestellten Modellierungsergebnisse nicht, wonach gegen 3 h nach Sonnenuntergang kein Einfluss der großen Talkaltluftströme bestehen soll, gegen 8 h nach Sonnenuntergang am Ostrand von Arrenberg wohl. Da im hier relevanten Sommerhalbjahr der Sonnenuntergang zwischen etwa 19 h MEZ und 21 h MEZ schwankt, ist damit auch klar, dass am Ostrand von Arrenberg erst später als 3 h nach Sonnenuntergang ein voll entwickelter Kaltluftstrom erfasst werden kann (die Windmessung erfolgt über Dach).

Zudem wird aus den Ergebnissen deutlich, dass es sich bei den Schwachwindfällen nachts meist um Fälle mit Anströmrichtung um NE handelt (s. Abb. 68), was ein recht sicheres Indiz für Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper ist (da die Nordostrichtung in ungestörten Lagen in NRW selten ist). Hingegen sind Fälle mit Anströmung aus SW selten, wobei es sich möglicherweise um Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper handeln könnte (diese Windrichtung sollte in ungestörten Lagen – wie hier tagsüber – deutlich die Hauptwindrichtung ausmachen). Die Fälle mit NE-Anströmung, bei denen es sich überwiegend um Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper handelt, kommen in großer Häufigkeit am Messstandort erst deutlich in der späten Nacht vor. Dieses Ergebnis steht in sehr guter Übereinstimmung mit den vorgestellten Modellierungsergebnissen, nach denen hier in der frühen Nacht kein Einfluss der großen Talkaltluftströme bestehen soll, in der späten Nacht hingegen wohl. Ob es sich bei den Fällen mit nächtlicher SW-Anströmung tatsächlich um Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper handelt oder lediglich um anders verursachte Schwachwindfälle dieser auch in Wuppertal ansonsten häufigen Windrichtung (siehe Luftmessbericht Wuppertal 2014) kann hier nicht geklärt werden.

Auch die Ergebnisse einer älteren Kaltluftmodellierung aus dem „Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“ (Lohmeyer, 2000) zeigen – trotz anderem Modell – eine ähnliche Konstellation von talaufwärtiger Kaltluftströmung aus dem unteren Tal der Wupper in Richtung Arrenberg, talabwärtiger Kaltluftströmung aus dem oberen Tal der Wupper in Richtung Elberfeld und tendenziell stagnierender Kaltluft dazwischen.

Als Gesamtergebnis kann auf Basis von Mess- und Modelldaten festgehalten werden, dass größere Kaltluftmengen aus dem oberen Tal der Wupper im Osten von Arrenberg sehr wahrscheinlich erst spät in der Nacht häufiger eintrifft (aus dem unteren Tal der Wupper selten, wenn überhaupt). Auf Basis von Daten aus zwei verschiedenen Kaltluftabflussmodellen kann darüber hinaus als sehr wahrscheinlich angesehen werden, dass Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper von Süden bzw. Südwesten her in den dicht bebauten Talbereich in der Stadt Wuppertal eindringt.

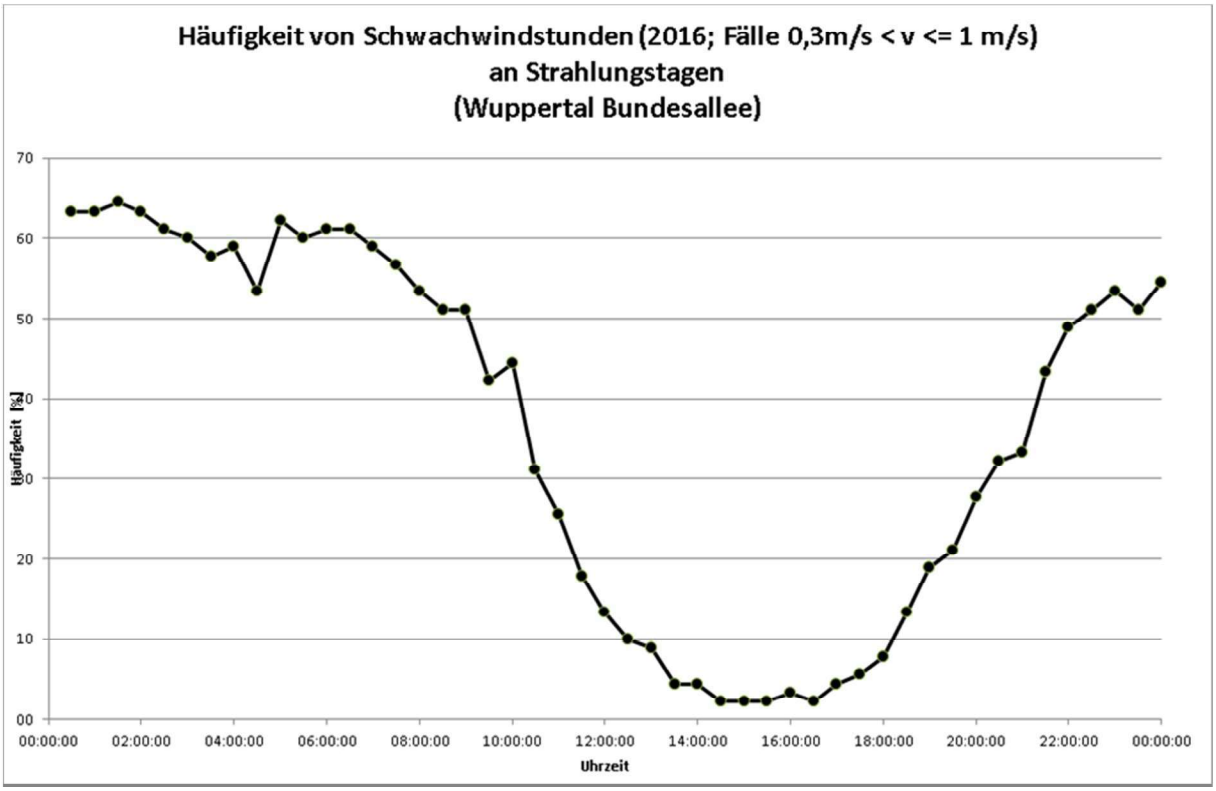


Abb. 3-67: Häufigkeit von Schwachwindstunden an Strahlungstagen (Uhrzeit = MEZ).

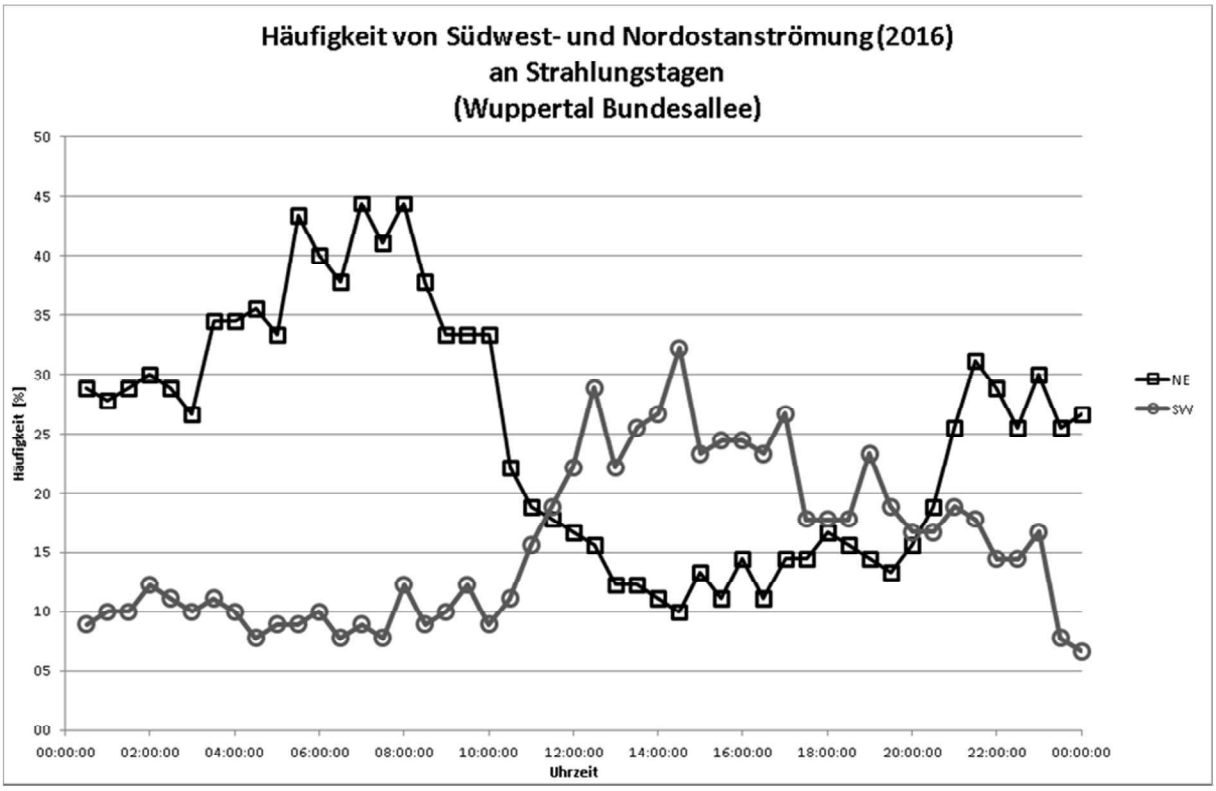


Abb. 3-68: Häufigkeit von Windrichtungen an Strahlungstagen (Uhrzeit = MEZ).

Daraus ergibt sich notwendigerweise die Situation eines lokalen Blockierens der beiden großen Kaltluftströme. Wie intensiv diese Konstellation wirkt, wie häufig sie genau vorkommt und welche genauen stadtklimatisch-lufthygienischen Auswirkungen sie hat, kann so nicht abschließend aufgeklärt werden; Kenntnis der hier zugrundeliegenden Prozesse ist aber für das Verständnis der Situation in der spezifischen Tallage von Wuppertal durchaus von Bedeutung. In jedem Fall ist klar, dass die beiden großen Kaltluftströme in Arrenberg nicht ohne weiteres in der Lage sein können, überwärmte bzw. mit Schadstoffen belastete Luft auszuräumen. Eine solche Konstellation wird generell maximal in der gleichen Größenordnung wie alle Fälle mit Kaltluftbildung eintreten (maximal ca. 1/3 aller Nächte); allerdings handelt es sich hier meist um Witterungssituationen in der Übergangsjahreszeit oder im Sommer, die mit Inversionsbildung also ungünstigem Luftaustausch verbunden sind.

Die notwendige Abkühlungs- und Luftaustauschfunktion in einer solchen Blockade-Konstellation können nur die kleinräumigen Kaltluftströme von den Hängen übernehmen. Deren Kaltluft ist vermutlich kälter als die bereits durch das Stadtgebiet geströmte Kaltluft aus dem Tal der Wupper, sie wird sich daher unter die Talkaltluft schieben und dabei gleichzeitig wenig mit Schadstoffen belastete Luft zuführen. Die Fähigkeit dieser kleinen Kaltluftströme in die Bebauung vorzudringen sollte daher mindestens erhalten aber möglichst deutlich verstärkt werden; dies kann durch die in Abb. 3-66 dargestellten Maßnahmen geschehen.

Sonderauswertung: Planspiel - Umnutzung von Gewerbebrachflächen in Wuppertal-Langerfeld/ Heckinghausen in Grünflächen bzw. in Bebauung

Hauptergebnisse

- Für die Nutzungsalternative „Grünfläche“ statt „hochverdichtete innerstädtische Bebauung“ von Industriebrachen in Langerfeld / Heckinghausen ergab sich eine Zunahme des Kaltluftzustroms von flächenhaft über 5 % und stellenweise über 10 %,
- diese Wirkungen reichen stromabwärts bis nach Elberfeld, dort profitieren Bereiche in der Talachse bis an den Rand von Arrenberg besonders,
- partielle Abnahmen des Kaltluftzustroms treten in Gebieten auf, für die dies ohne besondere Bedeutung ist, oder in denen diese Abnahme nur für kurze Zeit wirkt.

Konsequenzen für die Planung

- Bei der Umnutzung von Industriebrachen in Langerfeld / Heckinghausen sollte dringend geprüft werden, einen erheblichen Teil dieser Flächen in Grünflächen umzuwandeln, da dies zu einer Verstärkung der Kaltlufteffekte führen kann und so einen Beitrag zur Reduzierung von durch den Klimawandel verursachter Erwärmung leisten kann,
- für hierfür in Betracht kommende Flächen wird bei entsprechenden Planvorhaben ein diese Fragen jeweils klärendes Fachgutachten dringend empfohlen.

Zusammenfassung

Im Rahmen des BESTKLIMA-Teilprojekts „Siedlungsklimatische Modellierung“ wurden klimatische Effekte einer großflächigen Umnutzung von Industriebrachen in Langerfeld / Heckinghausen auf die überwärmte Innenstadt mit einer Kaltluftsimilationsrechnung untersucht. Es war dabei zu klären, ob eine Umnutzung in dem Umfang der hier betrachteten Flächen erhöhten Kaltluftzufluss in der dicht bebauten Tallage und damit eine Entlastung bei lufthygienischen Problemen und Wärmeinseleffekten im Sinne der Klimaanpassung bewirken kann.

Für die Nutzungsalternative „Grünfläche“ statt „hochverdichtete innerstädtische Bebauung“ ergab sich eine Zunahme des Kaltluftzustroms in der späten Nacht von flächenhaft über 5 % und stellenweise über 10 %. Diese Wirkungen reichen demnach bis nach Elberfeld. Partielle Abnahmen des Kaltluftzustroms treten in Gebieten auf, für die dies ohne besondere Bedeutung ist, oder in denen die Abnahme nur für kurze Zeit wirkt.

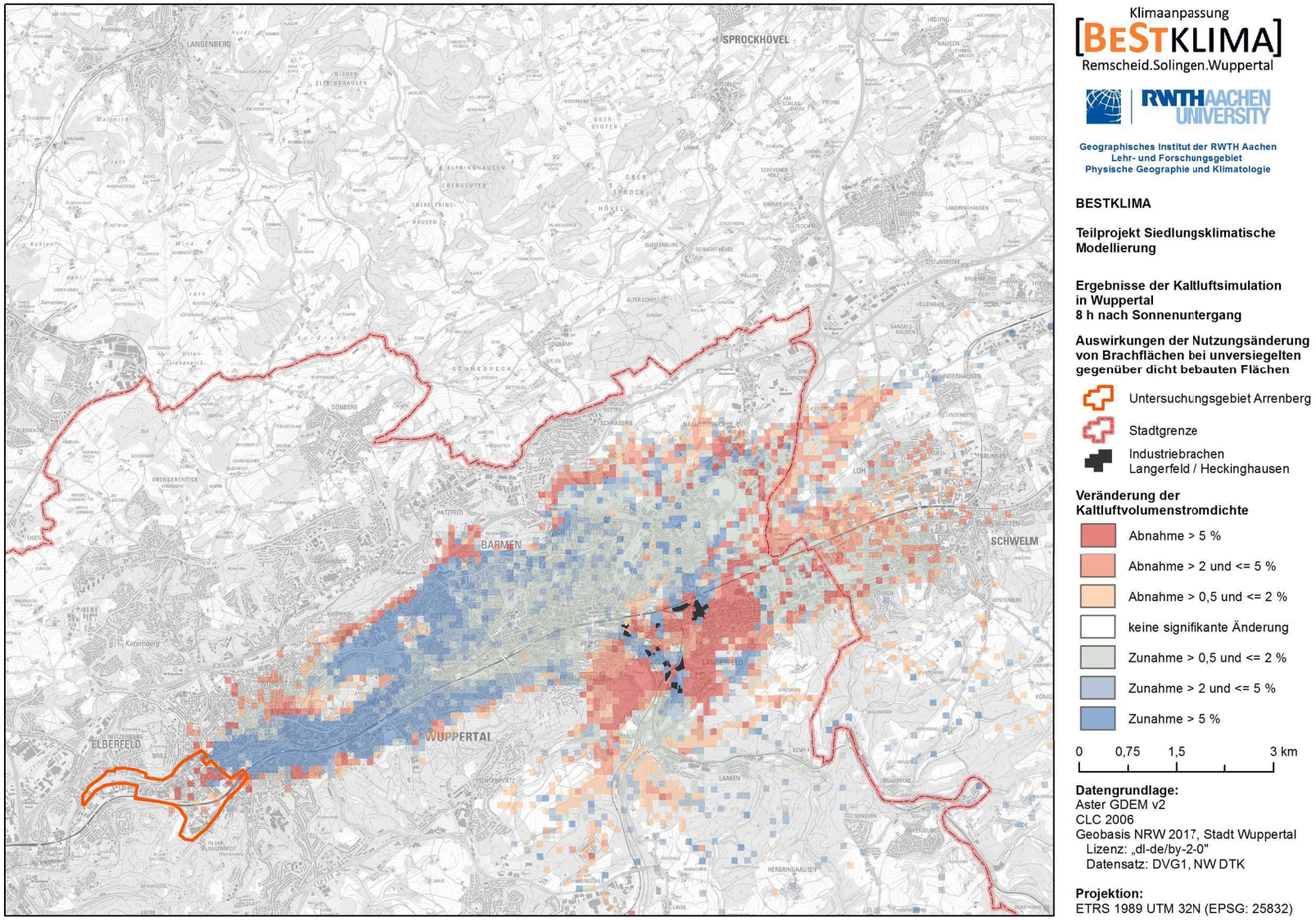


Abb. 3-69: Zunahme (blau) bzw. Abnahme (rot) des Kaltlufteinflusses in Wuppertal bei Begrünung statt Bebauung von Industriebrachen in W-Langerfeld / W-Heckinghausen (schwarze Flächen) im Bereich des Einströmens des Hauptkaltluftstroms aus dem oberen Tal der Wupper in das bebaute Stadtgebiet; grün: Untersuchungsgebiet W-Arrenberg.

Daten und Modellansatz

Es wurde eine Modellsimulation mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (Sievers, U., 2005; VDI, 2003) durchgeführt, um abschätzen zu können, ob Gesamteffekte einer Umnutzung von einigen größeren Brachflächen in Oberbarmen Auswirkungen auf die Kaltluft im Tal der Wupper haben können. Hierzu wurde eine Liste von Vorhaben übermittelt. Es handelt sich um insgesamt ca. 14 ha Fläche.

Es wurden auf Basis der CORINE-Landnutzungsklassen (EEA, 2014) zwei Extremszenarios als Eingangsdaten für eine Modellierung mit KLAM_21 aufbereitet: Im ersten Szenario werden alle Brachflächen als Grünflächen und im zweiten Szenario als dichte städtische Bebauung betrachtet. Die beiden Modellläufe wurden ansonsten mit den gleichen Eingangsdaten wie die im Projekt bereits vorgestellten großräumigen Modellierungen durchgeführt (CORINE-Landnutzungsdaten und ASTER-DGM). Aus den Ergebnissen der beiden Szenarios wurden für die späte Nacht (8 h nach Sonnenuntergang) Differenzen gebildet.

Da hier die Veränderung der Kaltluftvolumenstromdichte näher fokussiert wird, werden die Differenzen der Ergebnisse zur Kaltluftvolumenstromdichte aus den beiden Szenarios (Nutzung der Brachfläche als Grünfläche statt als dichte, städtische Bebauung) betrachtet. Anhand der Veränderung der Kaltluftvolumenstromdichte können Aussagen sowohl für kaltluftbedingte Belüftungs- als auch für Abkühlungsfunktionen getroffen werden. Als Kaltluftvolumenstromdichte wird hier diejenige Kaltluftmenge in m³ definiert, die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und der Obergrenze der Kaltluftschicht, welcher senkrecht zur Strömung steht, fließt; ihre Einheit ist m³/s (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg 2012).

Ergebnisse

Die Veränderung der Kaltluftvolumenstromdichte durch Gesamtwirkungen der Alternativnutzung von Brachflächen (Grünflächen statt dichte städtische Bebauung) ist in Abb. 3-69 in Prozent dargestellt.

Unmittelbar an den alternativ genutzten Flächen stellt sich eine deutliche Erhöhung des Kaltluftvolumenstroms als Folge der geringeren Bodenreibung von Grünflächen ein (blaue Flächen). Von Langerfeld / Heckinghausen über Oberbarmen bis nach Elberfeld erstreckt sich großflächig entlang der Talachse ebenfalls ein Bereich zunehmender Kaltluftvolumenstromdichte; der größeren Nachschub an Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper führt, hier zu einem langsameren hitzebedingten Aufzehren der Kaltluft und damit einem talabwärts weniger schnell abnehmenden Volumenstrom. Für die vom Ort der Nutzungsänderung entfernter gelegenen Gebiete sind diese Zunahmen relativ hoch; in diesen weiter talabwärts gelege-

nen, städtisch überwärmten Gebieten sind die Kaltluftmengen absolut geringer, die prozentualen Zunahmen trotz kleiner Kaltluftvolumenstromzunahmen also hoch. Besonders profitieren Bereiche um das Zentrum Elberfeld (bis an den Rand von Arrenberg) sowie ein Hangbereich zwischen Nordstadt und Rott.

Im Gebiet talaufwärts von Langerfeld / Heckinghausen befindet sich ein – durch die Nutzungsänderung von Grünflächen statt dichter städtischer Bebauung verursachter – Bereich mit abnehmender Kaltluftvolumenstromdichte (rote Farbe). Diese Zunahme ist dadurch verursacht, dass die Grünflächen durch eine geringere Reibung einen ansonsten talaufwärts vorhandenen Rückstau der Kaltluft reduziert, wodurch höhere Lagen am Hang von einem abnehmenden Kaltluftvolumenstrom betroffen sind. Es handelt sich hierbei aber um nicht bebaute Gebiete bzw. um aufgelockerte Wohnsiedlungsbereiche, die gar nicht von besonderer Hitzebelastung betroffen sind.

Hangaufwärts bzw. talabwärts des großflächigen Gebiets zunehmender Kaltluftvolumenstromdichte befindet sich ein schmaler Saum mit abnehmenden Werten (rote Farbe). Diese Abnahmen sind durch – wegen zunehmender Kaltluftmächtigkeit im Haupttal – weniger von Hängen abfließende Kaltluft verursacht. Da die Kaltluftzufuhr aus dem oberen Tal der Wupper bzw. deren Vordringen in den dichter bebauten Talbereich im Lauf der Nacht insgesamt zunimmt, so dass die Kaltluft das Tal ansteigend auffüllt, wird dieser Saum mit der ansteigenden Kaltluft nach und nach hangaufwärts bzw. talabwärts vorgeschoben und am jeweiligen Ort nur für kurze Zeit verbleiben; eine nachhaltige Verschlechterung der Belastungssituation ist in diesem Saum also nicht gegeben.

Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Grünzug entlang der Wupper

Hauptergebnisse

- Für die Nutzungsalternative „Grünfläche“ auf einem beidseitig 5 m breiten Streifen entlang des gesamten Wupperverlaufs statt der vorhandenen Nutzung ergaben sich Zunahmen des Kaltluftzustroms von großflächig über 5 % und Temperaturabnahmen speziell direkt entlang der Wupper aber auch stellenweise flächig von bis über 1 K,
- diese Auswirkungen sind entsprechend der zu diesem Zeitpunkt noch sehr ungleichmäßig einströmenden Kaltluft räumlich sehr unregelmäßig verortet.

Konsequenzen für die Planung

- Die Begrünung eines beidseitig 5 m breiten Streifen entlang der Wupper kann lokal deutliche Kaltlufteffekte hervorrufen und ist daher aus klimatologischer Sicht sehr zu empfehlen,
- es sollte noch geprüft werden, ob entlang der Wupper eher die Entwicklung von „Klimaoasen“ für die Tagsituation oder einer Kaltluftgasse für die Nachtsituation angestrebt werden soll bzw. ob das räumlich differenziert sinnvoll ist,
- je nachdem kann eine stärkere Entwicklung von Baumvegetation oder Rasenflächen sinnvoll sein.

Zusammenfassung

Im Rahmen des BESTKLIMA-Teilprojekts „Siedlungsklimatische Modellierung“ wurden klimatische Effekte einer systematischen Begrünung der Wupper-Ufer auf die überwärmte Innenstadt mit einer Kaltluftsimulationsrechnung untersucht. Es war dabei zu klären, ob eine systematische Begrünung, wie derzeit in der Diskussion, einen erhöhten Kaltluftzufluss in der dicht bebauten Tallage und damit eine Entlastung bei lufthygienischen Problemen und Wärmeinseleffekten im Sinne der Klimaanpassung bewirken kann.

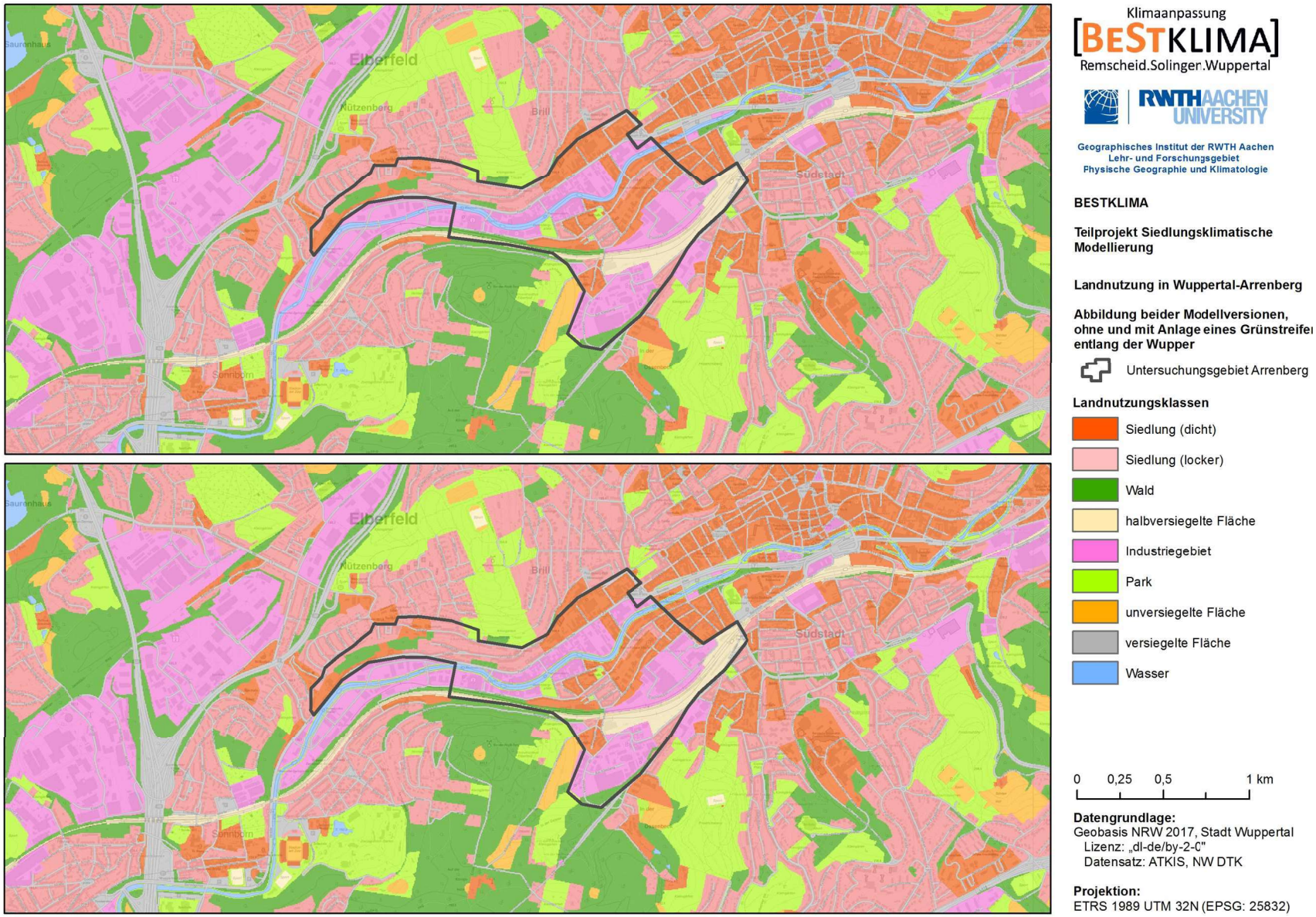


Abb. 3-70: Wuppertal – Landnutzungsalternative: ohne (oben) und mit beidseitigem - sehr schmalem - Grünstreifen entlang der Wupper.

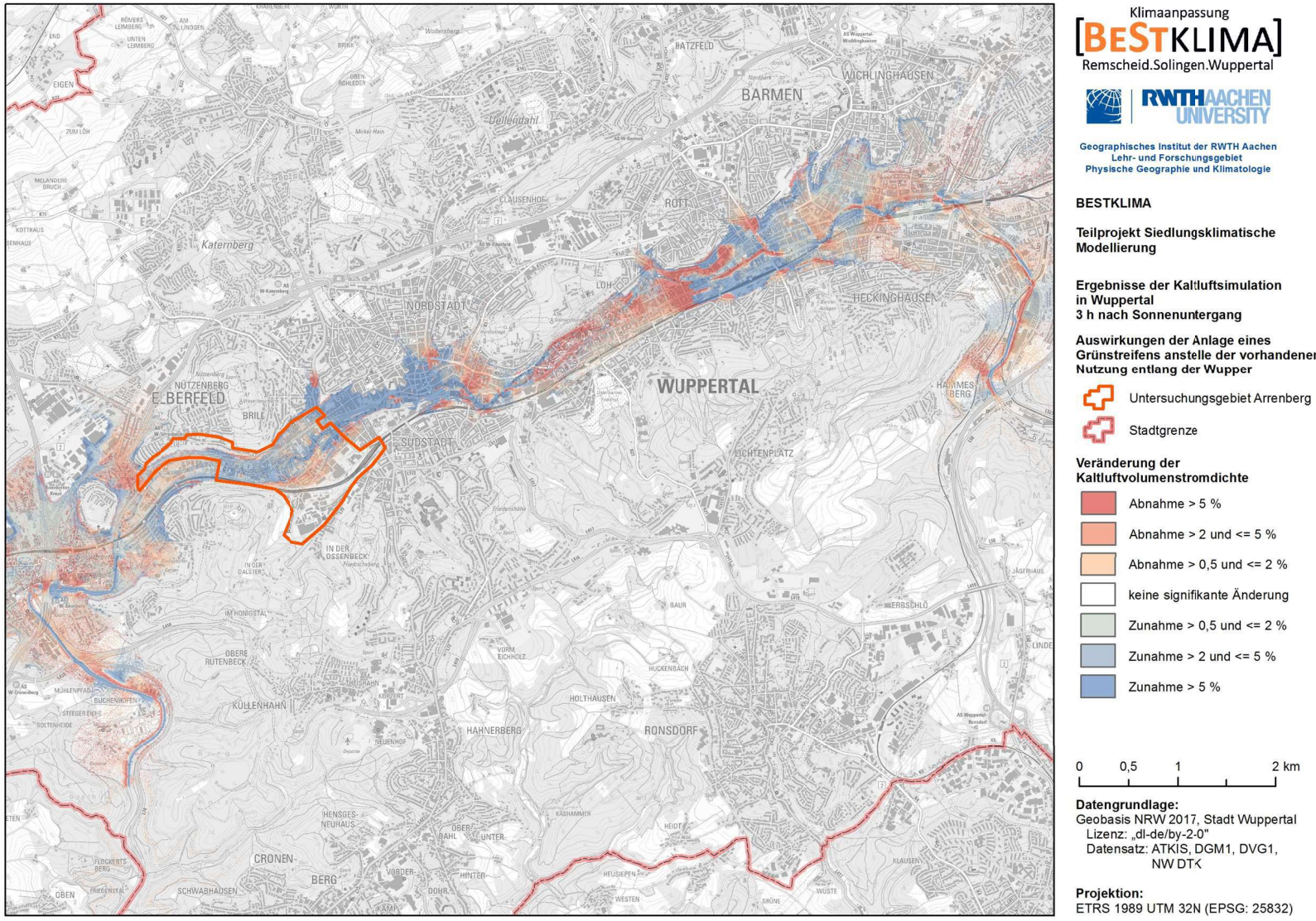


Abb. 3-71: Wuppertal - Zunahme (blau) bzw. Abnahme (rot) des Kaltlufteinflusses in Wuppertal bei Modellierung eines beidseitig 5 m breiten Grünstreifens statt der vorhandenen Nutzung entlang der Wupper; grün: Untersuchungsgebiet Arrenberg.

Für die Nutzungsalternative „Grünfläche“ auf einem beidseitig 5 m breiten Streifen entlang des gesamten Wupperverlaufs – statt der vorhandenen Nutzung – ergaben sich für die Situation 3 h nach Sonnenuntergang teilweise eine Zunahme des Kaltluftzustroms von großflächig über 5 % (siehe Abb. 3-71; blaue Farbe), stellenweise aber auch Abnahmen (rot). Speziell direkt entlang der Wupper aber auch stellenweise flächig kommt es zu Abkühlungseffekten von bis über 1 K. Diese Auswirkungen sind entsprechend der zu diesem Zeitpunkt noch sehr ungleichmäßig im bebauten Talabschnitt verteilten und aus unterschiedlichen Richtungen einströmenden Kaltluft räumlich sehr unregelmäßig verortet.

Daten und Modellansatz

Um Effekte einer Umnutzung eines beidseitig 5 m breiten Streifens entlang der Wupper auf den lokalen Kaltluftabfluss abschätzen zu können, wurde eine Modellsimulation mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (Sievers, U., 2005; VDI, 2003) mit – gegenüber der Übersichtsmodellierung - entsprechend erhöhter Modellauflösung und verringerter Modellgebietsgröße (nur Teile des Stadt- bez. Einzugsgebiets) durchgeführt. Dieser insgesamt etwa 15 km lange, beidseitige Streifen entlang der Wupper umfasst eine Gesamtfläche von ca. 15 ha.

Als Datengrundlage wurden ALKIS-Daten in die KLAM_21-Landnutzungsklassen umgewandelt allerdings ohne Auflösung von Einzelgebäuden (siehe Anhang); als Höhenbasis diente das digitale Geländemodell der Geobasis.NRW mit 1 m räumlicher Auflösung (DGM1). Im ersten Szenario wird der gegenwärtige Zustand modelliert, im zweiten wird ein beidseitig 5 m breiter Streifen der bisherigen Ufernutzung in Grünfläche umgewandelt (vergl. Abb. 3-70). Die beiden Modellläufe wurden ansonsten mit den gleichen Einstellungen wie die im Projekt bereits vorgestellten großräumigen Modellierungen allerdings mit einer räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m durchgeführt. Aus den Ergebnissen (ausschließlich für die frühe Nacht = 3 h nach Sonnenuntergang) wurden Differenzen gebildet.

Ergebnisse

Die Veränderung der Kaltluftvolumenstromdichte durch Gesamtwirkungen der Alternativnutzung von Flächen entlang der Wupper (Grünflächen statt aktuelle Bebauung) ist in Abb. 3-71 in Prozent, die Veränderung der Temperatur in Abb. 3-72 und Details der Strömungssituation im Ist-Zustand in Abb. 3-73 dargestellt. Es lassen sich drei grundsätzliche Wirkbereiche unterscheiden: Effekte im direkten Nahbereich an der Wupper, flächenhafte Veränderungen im Talboden und streifenförmige Veränderungen an den Talflanken an der Obergrenze der Kaltluft.

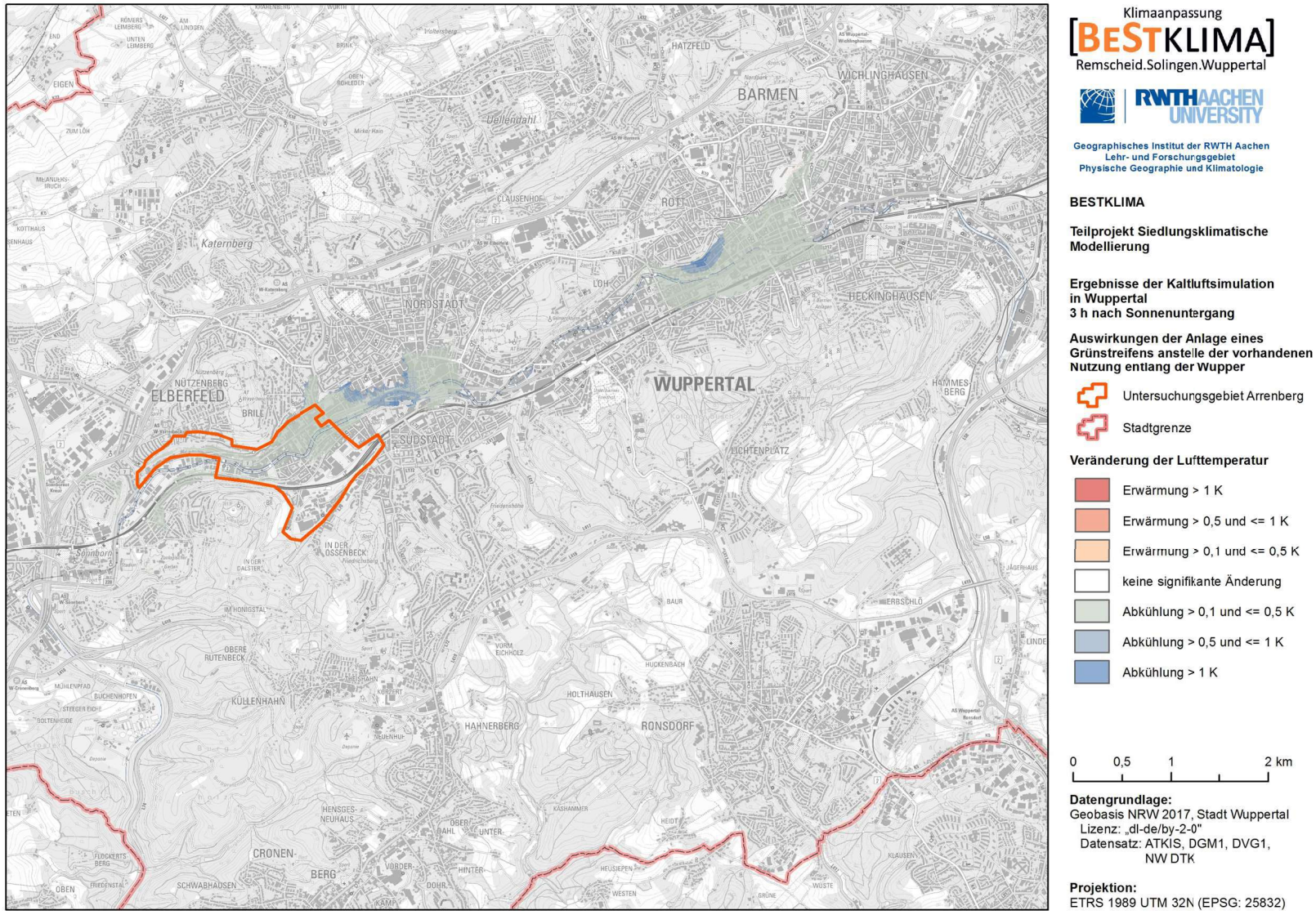


Abb. 3-72: Wuppertal - Zunahme (blau) des Abkühlungseffekts der Kaltluft bzw. Erwärmung (rot) bei Modellierung eines 5 m breiten Grünstreifens statt der vorhandenen Nutzung entlang der Wupper; grün: Untersuchungsgebiet Arrenberg.

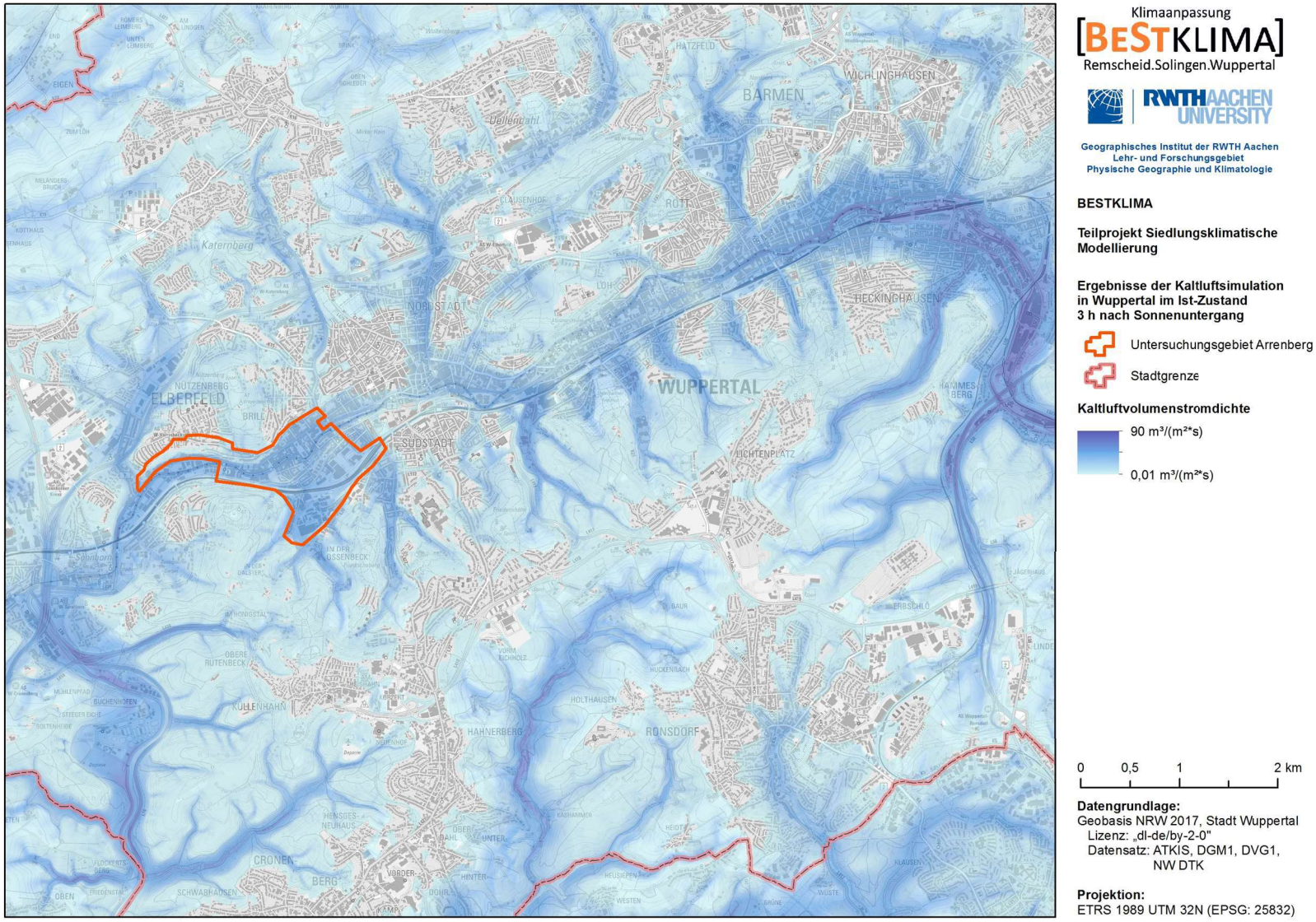


Abb. 3-73: Wuppertal – Kaltluftvolumenstrom 3 h nach Sonnenuntergang im Ist-Zustand (Detailmodellierung); grün: Untersuchungsgebiet Arrenberg.

Im direkten Nahbereich an der Wupper überwiegen auf einem schmalen Streifen erwartungsgemäß deutliche Zunahmen des Volumenstroms; stellenweise kommen auch Abnahmen des Volumenstroms vor. Letztere sind anscheinend an Sondersituationen in Barmen gekoppelt (Brücken etc.), wo der größere Kaltluftvolumenstrom aus dem oberen Tal der Wupper möglicherweise durch Rückstau etc. deutlich aus dem Bett der Wupper und teils in die Umgebung gedrängt wird, wo dann wiederum eine schwache flächige Zunahme vorliegt. Die Temperaturen gehen in diesem Streifen meist um mehr als 1 K zurück (im Bereich der Abnahmen des Kaltluftvolumenstroms tritt keine Erwärmung ein).

Im Bereich des dichter bebauten Talbodens kommt es zu flächenhaften Veränderungen. Es ergibt sich dabei ein kompliziertes Muster aus Flächen mit Zu- und Abnahmen des Kaltluftvolumenstroms. Dieses Muster ergibt sich aus der zu diesem Zeitpunkt sehr komplizierten Struktur der Kaltluftströme aus Haupt- und Nebentälern (siehe Abb. 3-73). Insbesondere talwärts des Zentrums Barmen sind Abnahmen wohl dadurch verursacht, dass die – zu diesem Zeitpunkt sehr geringen Mengen – Kaltluft durch die am Bett der Wupper nach Nutzungsänderung stärkere Abkühlung und geringere Bodenreibung in diese Richtung konzentriert werden und dementsprechend auf der Fläche zurückgehen. Erkennbare Zunahmen der Lufttemperatur sind damit nicht verbunden. Flächenhaft gibt es in einigen Bereichen eine leichte Abkühlung. Im Bereich der einzelnen Flächen in Oberbarmen mit schwachen relativen Rückgängen des Kaltluftvolumenstroms ist diese Veränderung mit einem absolut schon sehr hohen Volumenstrom verbunden; diese Gebiete sind deutlich ausreichend mit Kaltluft versorgt.

In den Bereichen mit streifenförmigen Veränderungen an den Talflanken geht dies auf Veränderungen der Höhenlage der Obergrenze der Kaltluft zurück. Konzentriert sich die Kaltluft stärker auf den Kern der Talachse, kann die Obergrenze absinken und entweder strömt dann Hangkaltluft nach (Erhöhung des Volumenstroms) oder es ist keine vorhanden (Reduzierung des Volumenstroms). An der Nordseite der Zentren von Barmen und Elberfeld scheint ersteres der Fall zu sein; hier kommt es nämlich auch zu den größten Abkühlungsbeträgen.

In Arrenberg kommt es zu einer Zunahme des Kaltluftvolumenstroms entlang der Wupper und – in Verbindung damit – zu einer Abkühlung. Relativ nah beieinander liegen ansonsten in Arrenberg Teilflächen mit zunehmendem bzw. abnehmendem Volumenströmen und eine Teilfläche mit mäßiger Abkühlung. Hier liegt anscheinend eine komplizierte Strömungssituation vor, die das Kaltluftabflussmodell vermutlich auch nicht zuverlässig abbilden kann. Wahrscheinlich erhöht sich die Reichweite des Kaltluftstroms aus dem unteren Tal der Wupper zu dem Auswertezeitpunkt bis in den Westteil von Arrenberg (zunehmender Volumenstrom); dies könnte im Modell zu einem gegenüber der Ausgangslage verschobenen Konvergenzbereich zwischen dieser und der lokalen Hangkaltluft (abnehmender Volumenstrom)

führen. Wahrscheinlich kann in der Realität sich die (kältere) Hangkaltluft unter die (etwas weniger kalte) Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper schieben und dies umso besser tun, je besser sie entlang der Wupper strömen kann.

Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Gesamtströmungssituation Kaltluft in Wuppertal (mit und ohne Bebauung)

Hauptergebnisse

- Einen Zusammenhang zwischen der talaufwärts gerichteten Kaltluftströmung im unteren Tal der Wupper und der städtischen Wärmeinsel Wuppertals besteht nicht.

Konsequenzen für die Planung

- keine

In Zusammenhang mit der Untersuchung der talaufwärts gerichteten Kaltluftströmung im Tal der Wupper unterhalb von Vohwinkel ergab sich die Frage, ob die eigentliche Ursache hierfür in einer Wirkung der städtischen Wärmeinsel Wuppertals oder der Geländesituation im Tal der Wupper begründet liegt. Da dies für langfristige Klimaanpassungen von Bedeutung sein könnte, wurde ein Modellvergleich auf Basis des Ist-Zustands und einer Geländesituation ganz ohne Bebauung durchgeführt.

In Bezug auf die grundsätzlichen Strömungsrichtungen im Tal der Wupper zeigen die Ergebnisse dieses Modellvergleichs keinen Unterschied zum Ist-Zustand. Insbesondere bleibt die talaufwärts gerichtete Strömung im Tal der Wupper unterhalb von Vohwinkel erhalten. Diese ungewöhnliche Strömungssituation erweist sich als vor allem durch die ungewöhnliche Geländesituation verursacht: die sehr großen Kaltluftmengen aus dem Oberbergischen Land, die sich im talabwärts sich verengenden oberen Tal der Wupper aufstauen und teils die Talschultern bei Remscheid in Richtung auf das untere Tal der Wupper überströmen, sind in Verbindung mit dem großräumig sehr gewundenen Verlauf des Tals der Grund.

Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der talaufwärts gerichteten Kaltluftströmung im unteren Tal der Wupper und der städtischen Wärmeinsel Wuppertals besteht demnach nicht (allerdings ändern sich die Beträge).

3.3 Neueste Klimaszenarien für NRW

Im Klimaschutzteilkonzept „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid" (ISB, 2013) werden u.a. das Klima und die Klimaänderung im Bereich der Lufttemperatur für die Städte Solingen und Remscheid beschrieben sowie die Betroffenheit gegenüber dem Themenfeld Hitze dargestellt (Riegel et al. 2013: 24 ff). Daran wurde bereits im Kapitel 3.1 angeknüpft, indem die Entwicklung der Anzahl heißer Tage für Stationen im Bergischen Städtedreieck sowie Projektionen vom PIK (PIK, 2015) für diesen Kennwert aufgezeigt wurden. In diesem Kapitel wird dieser Kennwert noch einmal aufgegriffen und zudem die Entwicklung der Parameter mittlere jährliche Lufttemperatur (bzw. Jahresmitteltemperatur) und Tropennächte für unterschiedliche Klimaszenarien betrachtet. Dabei werden 30-Jahreszeiträume betrachtet, da das Klima „durch statistische Auswertung der meteorologischen Größen einer Mindestperiode von 30 Jahren beschrieben werden“ kann (LANUV 2016a: 9).

Der Klima-Ist-Zustand wurde im oben genannten Klimaschutzteilkonzept bereits anhand ausgewählter Parameter für den Zeitraum 1971-2000 für Städte Solingen und Remscheid beschrieben (Riegel et al. 2013: 12). Zur besseren Vergleichbarkeit und aufgrund der Verfügbarkeit aktuellerer Daten wurde die Grafik zum Klima-Ist-Zustand aktualisiert.

In Abbildung 3-74 sind (aus Beobachtungen berechnete) Rasterdaten für die Parameter mittlere jährliche Lufttemperatur, mittlere jährliche Niederschlagssumme sowie mittlere jährliche Anzahl an heißen Tagen für die Zeiträume 1971-2000 und 1981-2010 gegenübergestellt (LANUV, 2016a). Beim Vergleich des Parameters mittlere jährliche Lufttemperatur fällt insbesondere auf, dass der Anteil der Temperaturklassen >8 - 9°C im Betrachtungsgebiet abgenommen und der Anteil der Temperaturklassen >9-10°C sowie >10 - 11°C hingegen zugenommen hat. Betrachtet man die jährlichen Niederschlagssummen kann festgestellt werden, dass für den Zeitraum 1981 bis 2010 höhere jährliche Niederschlagssummen verzeichnet wurden, die jährlichen Niederschlagssummen also im Vergleich zur Periode 1971 bis 2000 zugenommen haben. Insbesondere der Anteil der Klassen > 1300 - 1400 mm und > 1400 - 1500 mm ist gestiegen.

Die mittlere jährliche Anzahl an heißen Tagen ist im Zeitraum 1981 bis 2010 gegenüber der Periode 1971 bis 2000 in allen drei Städten gestiegen. Waren es beispielsweise 1971 bis 2000 überwiegend 5-6 sowie teils 3-4 heiße Tage pro Jahr in Wuppertal, hat sich dies im Zeitraum 1981 bis 2010 mit 7-8 bzw. 5-6 heißen Tagen pro Jahr in die nächst höhere Klasse verschoben. So verhält es sich im gesamten Betrachtungsgebiet.

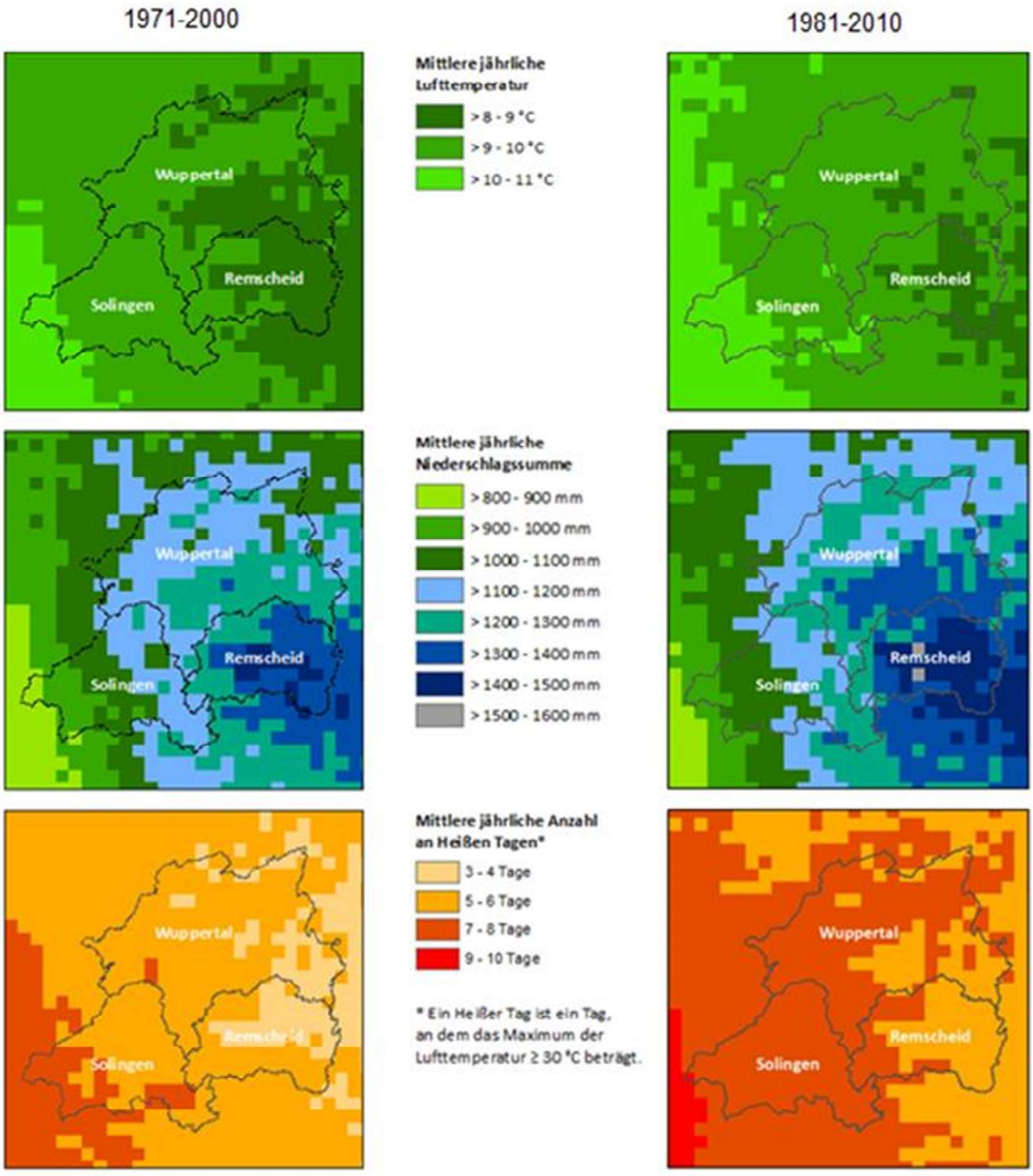
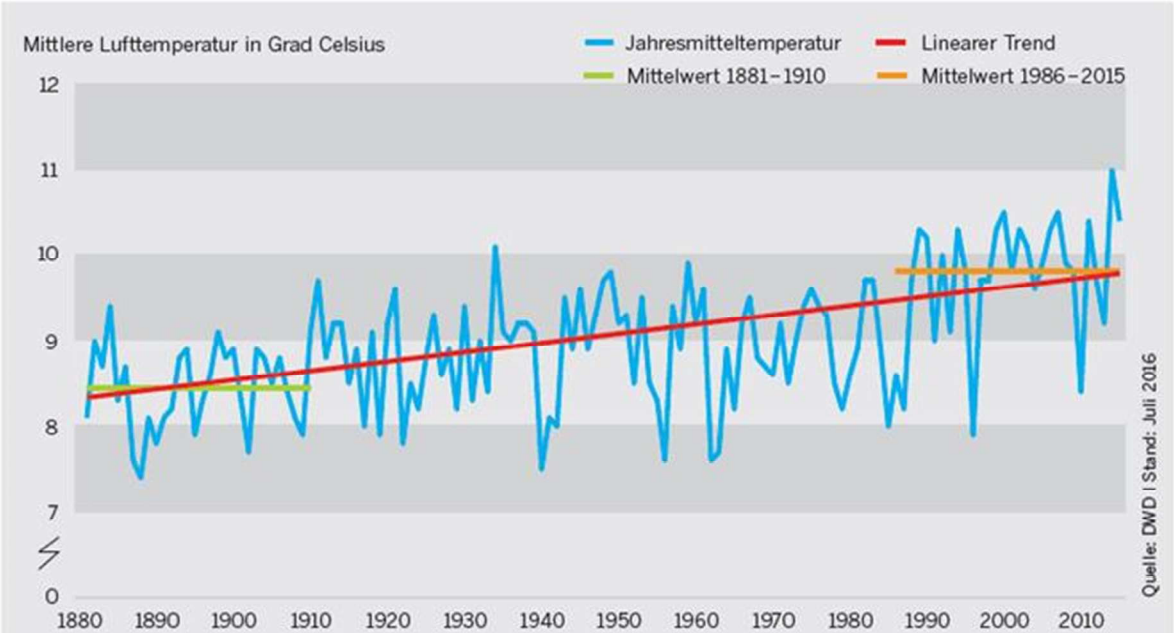


Abb. 3-74: Links: Klima-Zustand im Bergischen Städtedreieck 1971 bis 2000. Rechts: Klima-Zustand im Bergischen Städtedreieck 1981 bis 2010 (Datenquelle: DWD 2014, BKG 2017).

An dieser Stelle wird auf den digitalen Klimaatlas NRW verwiesen, der für viele Parameter Messdaten für die Zeiträume 1971 bis 2000 und 1981 bis 2010 sowie Zukunftsprojektionen für die Zeiträume 2021 bis 2050 sowie 2071 bis 2100 bereithält (LANUV 2016a: 11, LANUV NRW 2017).

Neben dem Kennwert Anzahl heißer Tage steht in diesem Kapitel auch die Entwicklung der mittleren jährliche Lufttemperatur (bzw. Jahresmitteltemperatur) im Vordergrund. Abb. 3-75 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in NRW im Zeitraum 1880 bis 2015, deren linearer Trend einen kontinuierlichen steigenden Verlauf über den gesamten Zeitraum aufweist.



Während im 30-Jahres-Zeitraum 1881 bis 1910 eine Jahresmitteltemperatur von 8,4 °C herrschte, liegt diese für die Spanne 1986 bis 2015 um 1,3 °C höher. Der Durchschnittswert für den gesamten Zeitraum liegt bei 9,0 °C. Der Trend über die Messreihe seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 ist signifikant steigend. Die 10 wärmsten Jahre erreichen ein Jahresmittel von mindestens 10,3 °C und liegen alle im letzten 30-Jahres-Zeitraum. Die niedrigste Jahresmitteltemperatur im Land wurde 1888 mit 7,4 °C registriert, die höchste mit 11,0 °C im Jahr 2014.

Abb. 3-75: Jahresmitteltemperatur in NRW im Zeitraum 1880-2015 (entnommen aus MKULNV 2016: 33).

Auf der regionalen Ebene ergibt sich laut den „Regionalen Ergänzungen zur Vorstellung des Berichts ‚Klimawandel und Klimafolgen in NRW' für die Großlandschaft Süderbergland, zu der auch die Region Bergisches Land zählt, eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur um 0,5 °C – 0,8 °C (Vergleich der Klimanormalperiode 1951-1980 mit der aktuellen Klimanormalperiode 1981-2010) festgestellt. Bei Betrachtung der Änderungen der einzelnen klimatologischen Kenngrößen in Vergangenheit und Gegenwart wird für die Zukunftsprojektionen im vorliegenden Bericht das Klimaszenario RCP 8.5 verwendet, da dieses der Entwicklung größter Teile des 20. Jahrhunderts am ehesten entspricht (Umweltbundesamt GmbH 2017). Nähere Erläuterungen zu den einzelnen Klimaszenarien des IPCC können im Anhang nachgelesen werden (s. Anhang).

Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg der bodennahen Lufttemperatur um etwa 1,3°C für NRW erwartet (Zeithorizont 2021 – 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000), wobei dieser Wert je nach zugrundeliegendem Klimaszenario zwischen 0,5°C und 2°C schwankt (MKULNV 2016:24). Bei Verwendung des Szenarios RCP 8.5 wird sich die Erwärmung landesweit mit etwa 1,5°C bis 2,0°C bemerkbar machen (ebd.). Regionale Unterschiede lassen sich für die Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur 2021 bis 2050

bezogen auf 1971 bis 2000 in NRW unter Annahme des Szenarios RCP 8.5 (85. Perzentil) nicht ausmachen. Unter Annahme des Szenarios RCP 4.5 (85. Perzentil) hingegen schon: Im Westen NRWs ist die Zunahme der mittleren jährlichen Lufttemperatur tendenziell etwas geringer als im Osten und weiten Teilen NRWs, was mit dem maritimen Einfluss im Westen und dem eher kontinentalem Einfluss in den östlichen Landesteilen zusammenhängt. Abbildung 3-75 verdeutlicht den Trend der mittleren jährlichen Temperatur für NRW. Demnach wird sich der Trend der Zunahme der mittleren jährlichen Temperatur in Zukunft fortsetzen und nach dem Szenario 8.5 sind für diesen Parameter bis zu 14 °C bis Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (RCP 8.5. 85. Perzentil).

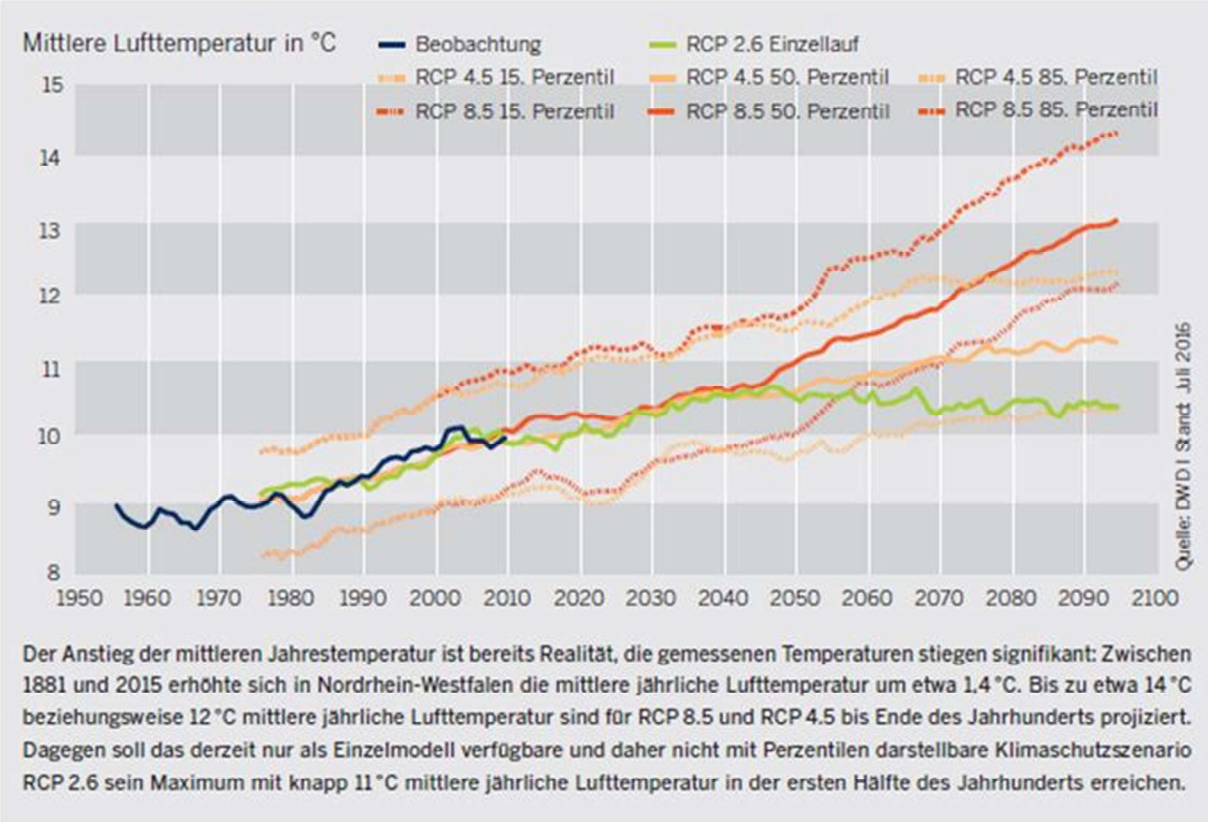
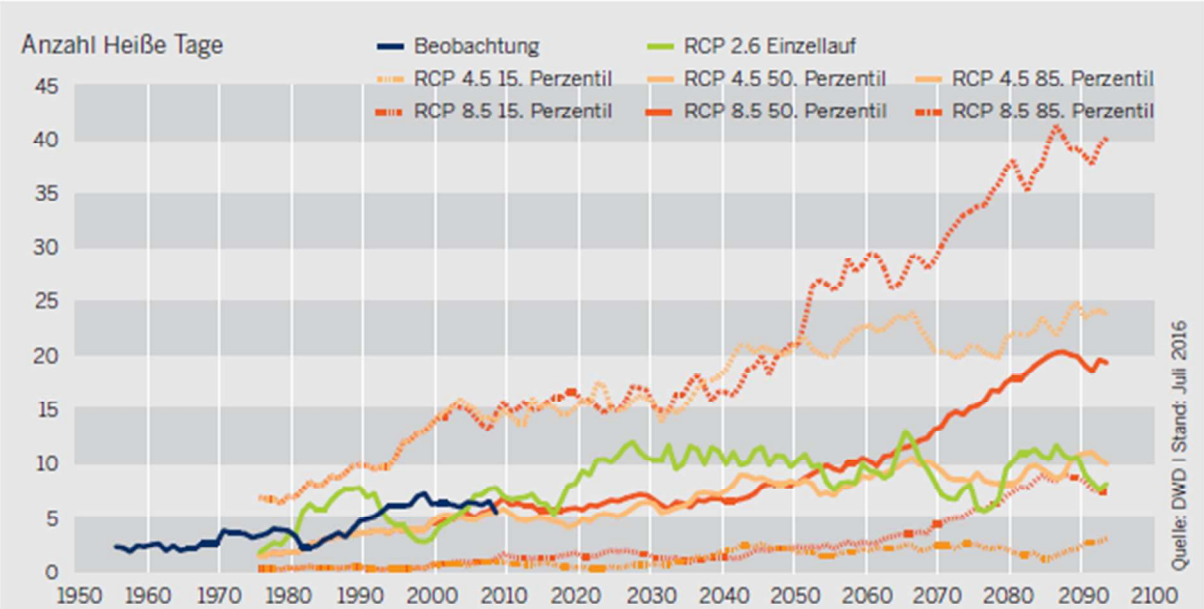


Abb. 3-76: Beobachtete und projizierte mittlere jährliche Lufttemperaturen in NRW (entnommen aus MKULNV 2016: 25).

Der Trend der Zunahme der Anzahl heißer Tage wird sich ebenfalls Abbildung 3-77 zufolge fortsetzen, allerdings nach einem Anstieg bis in die Gegenwart möglicherweise erst wieder in einer weiteren Phase ab ca. 2040.



Ein Anstieg der Anzahl Heißer Tage (mit einer maximalen Lufttemperatur von mindestens 30 °C) pro Jahr ist bereits für die vergangenen Jahrzehnte erkennbar. Während bis 2050 maximal etwa 20 Heiße Tage für die durch hohe beziehungsweise moderate Treibhausgasemissionen geprägten Szenarien RCP 8.5 und 4.5 prognostiziert werden, drohen bis Ende des Jahrhunderts möglicherweise bis zu 40 Heiße Tage beim „Weiter wie bisher"-Szenario. Es würde sich lohnen, zeitnah und global einen effektiven Klimaschutz umzusetzen: Nach dem hier in einem einzigen Modelllauf abbildenden Szenario RCP 2.6 könnten die Veränderungen auf etwa 12 Heiße Tage pro Jahr begrenzt werden (50 % mehr als im „Jahrhundertsommer" 2003).

Abb. 3-77: Beobachtete und projizierte Heiße Tage pro Jahr in NRW (entnommen aus MKULNV 2016: 25).

Glossar

Betroffenheit

Im Sinne der Klimaanpassungsuntersuchungen der Gesamteffekt aus Exposition und Sensitivität, d.h. in wie weit eine Klimaänderung auf eine Empfindlichkeit gegenüber solchen Veränderungen trifft.

Biometerologie / Bioklimatologie

Alle kurzfristigen (meteorolgischen) bzw. langfristigen (klimatologischen) Wirkungen der Atmosphäre auf die Lebewelt. Speziell sind in der Regel die durch künstliche Veränderungen der Umgebung (Städte) erzeugten und über die Atmosphäre vermittelten Wirkungen auf Menschen gemeint. Es kann sich um positive oder negative Effekte auf Gesundheit und Wohlbefinden handeln.

Dekade

Zeitspanne von 10 Jahren; in der Klimatologie verbreitetes Mittelungsintervall.

Energiebilanz

Die Summe aller Energieflüsse in der Atmosphäre für einen bestimmten Ort. Meist ist die Energiebilanz an der Erdoberfläche gemeint. In diesem Fall ist es die Summe aus (von oben [+]) eintreffender bzw. (von unten [-]) reflektierter Sonnenstrahlung, der von der Erdoberfläche (von unten [-]) und der Atmosphäre (von oben [+]) ausgehenden Wärmestrahlung, des in den Erdboden (nach unten [-]) und in die Atmosphäre (nach oben [-]) geleiteten fühlbaren Wärmestroms sowie des in die Atmosphäre (nach oben in Form von verdunstetem Wasser [-]) geleiteten latenten Wärmestroms. Sie muss in dieser Form für die unendlich dünn zu denkende Energieumsatzfläche an der Erdoberfläche Null sein; für definierte Volumen, z.B. den Boden (auch Gebäude) oder die Luft, kann sie Werte verschieden von Null annehmen, wodurch letztlich Erwärmung oder Abkühlung hervorgerufen werden.

Epidemiologie

Medizinisch-biologische Untersuchungsmethode, mit der über Studien zur räumlichen Verbreitung von Krankheiten Informationen über Ursachen gewonnen werden können.

Evaporation

Verdunstung von Wasser von der Erdoberfläche (siehe auch „Transpiration“). Evapotranspiration ist die Gesamtheit der Verdunstung sowohl von Landoberflächen als auch durch Transpiration von Organismen.

Exposition

Im Sinne der Klimaanpassungsuntersuchungen die Wirkungen der veränderten Klimasituation auf Mensch, Umwelt etc..

Geostatistik

Statistische Analyse von räumlichen Zusammenhängen, hier speziell die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der räumlichen Verteilung der gemessenen Lufttemperaturen und der durch amtliche Geodaten gegebenen Informationen über die planerisch festsetzbaren Nutzungsarten in Städten über eine sog. Landnutzungsregression.

Globalstrahlung

Die auf eine horizontale Fläche auftreffende gesamte sichtbare Sonnenstrahlung. Sie setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung (die auf geradem Weg durch die Atmosphäre zur Mess- = Erdoberfläche gelangt) und der diffusen Himmelsstrahlung (die in der Atmosphäre – z.B. an Wolken, Staubteilchen, Gasmolekülen – reflektiert, gestreut bzw. gebeugt wird).

Heißer Tag

Tag, an dem die Höchsttemperatur 30°C erreicht oder überschreitet.

Hitzewelle

Aufeinanderfolge mehrerer heißer Tage (die genaue Definition kann unterschiedlich sein).

Höhengradient

Veränderung einer Größe mit zunehmender Meereshöhe, hier speziell der Lufttemperatur, die im Mittel um ca. 0,65 K und bei trockenen atmosphärischen Bedingungen um ca. 1,0 K pro 100 m abnimmt. „K“ ist die - in deutschsprachigen Wissenschaftsveröffentlichungen übliche - Temperaturangabe der Kelvin-Skala mit gleichen Temperaturintervallen wie die Celsius-Skala; sie ist auf den absoluten Temperaturnullpunkt bezogen und nicht auf den – für viele Fragen recht willkürlichen, weil auf den Gefrierpunkt des Wassers bezogenen – Nullpunkt der Celsius-Skala.

Hotspot

Im Sinne von Stadtklimauntersuchungen Gebiete innerhalb einer Stadt mit besonders hoher Temperaturbelastung.

Humanbiometeorologie

Wirkungen der Atmosphäre speziell auf den Menschen (siehe „Biometeorologie“).

Inversionsneigung

Unter den tagsüber häufigsten atmosphärischen Schichtungsbedingungen („neutrale“ bis „labile“ Schichtung) kann die sich die in Bodennähe befindliche (meist relativ warme und auch oft schadstoffreiche) Luft leicht nach oben in Bewegung setzen; umgekehrt kann Luft aus höheren Luftschichten im Austausch diese Luft ersetzen. Nachts oder bei so genannter austauscharmer Witterung ist häufig die Temperaturschichtung umgedreht („Inversion“) und dabei der vertikale Luftaustausch behindert. Die Neigung zur Ausbildung einer Inversion ist im Winter bzw. nachts größer als im Sommer bzw. tagsüber.

Kaltluftabflussmodell

Ein Rechenmodell, das die Ausbildung und Bewegung bodennaher Kaltluft simuliert. Die in wolkenarmen Nächten in Folge der durch die negative Strahlungsbilanz der Erdoberfläche erfolgende Abkühlung der bodennahen Luft („Inversion“) führt zu einer Abkoppelung dieser kalten Luftschicht („Kaltluft“) von der darüber liegenden Luft. Bei Höhenunterschieden im Gelände bewegt sich die Kaltluft wegen ihrer höheren Dichte hang- bzw. talabwärts, wobei ihre Bewegung gewisse Ähnlichkeiten mit der Bewegung von Flüssigkeiten aufweist, worauf der Modellansatz beruht.

Kaltlufteinzugsgebiet

Das Gebiet, aus dem die Kaltluft benachbarter Hänge zusammenströmt.

Kaltluftstrom

Diejenigen Talbereiche, in denen Hangkaltluft von den Talhängen nach Zusammenströmen im Tal als gerichteter Strom mit einer Mächtigkeit von meist mehreren Zehnern von Metern und mit meist kaum wahrnehmbarer Strömungsgeschwindigkeit talabwärts fließt.

Klimamodellierung

Numerische Rechenmodelle, mit denen bestimmte Eigenschaften des Klimas abgebildet werden. Neben den globalen Klimamodellen gibt es auch kleinräumige Klimamodelle. Klimamodelle können z.B. die als wichtig angesehenen bzw. bekannten physikalischen Prozesse nachzuvollziehen („physikalische Modelle“) oder auch die bekannten Daten ohne Bezug zu den genauen Prozessen abzubilden versuchen („statistische Modelle“).

Hier wird einerseits eine Kaltluftmodellierung verwendet, bei der es sich um eine physikalische Modellierung handelt, mit der die Prozesse der nächtlichen Abkühlung und des Strömens der abgekühlten, schweren Luft an Hängen und durch Täler als mathematisch-physikalisches Modell nachgebildet werden. Andererseits wird die räumliche Verteilung der Temperaturen tagsüber bei Hitzeereignissen geostatistisch modelliert, wobei gemessene Temperaturdaten von Messfahrten auf statistische Zusammenhänge zur Bebauungsstruktur untersucht und diese Zusammenhänge mit einem Geographischen Informationssystem in die gesamte Fläche umgerechnet werden.

Klimaprojektion

Aussagen über die mögliche zukünftige Entwicklung des Klimas. Sie erfolgen üblicherweise auf Basis von Ergebnissen numerischer globaler Klimamodelle, die insbesondere mit Annahmen zu zukünftigen Treibhausgasemissionen angetrieben werden.

Klimatop

Gebiet z.B. innerhalb von Städten mit typischen klimatischen Merkmalen im Sinne der Methodik der Stadtklimaanalyse („Park“, „Siedlung“, Innenstadt“).

Kuppenlage

Gebiet innerhalb einer Landschaft oder Stadt, in dem aufgrund der relativen Hochlage zur Umgebung besondere klimatische Verhältnisse herrschen. Einerseits handelt es sich hier (v.a. am Tage) um Wirkungen einer verstärkten Ventilation und damit verbesserten lufthygienischen Situation bzw. reduzierten Erwärmung und andererseits (v.a. nachts) um Abfluss lokaler Kaltluft von den Kuppen weg und damit reduzierter nächtlicher Abkühlung und geringerer Feuchte.

Landnutzungsregression

Geostatistisches Verfahren, bei dem eine Messgröße – hier die Lufttemperatur – auf einen Zusammenhang zur Landnutzung untersucht wird; dabei wird speziell eine Regressionsanalyse auf Geodaten angewendet.

PET

Physiologische Äquivalenttemperatur, ein Bioklimaindex. Der PET wird aus Messdaten zu den Umgebungsbedingungen im Außenbereich berechnet, in dem diese Daten auf Innenraumbedingungen (kein Wind, ausgeglichener Strahlungshaushalt) übertragen werden. Der so ermittelte Wert entspricht einer Innenraumtemperatur mit gleicher Wärmebelastung wie die beobachtete Außenbereichssituation.

Schwüle

Biometeorologische Belastungsempfindung durch die Kombination von Hitze mit relativ hoher Luftfeuchtigkeit; es gibt verschiedene Berechnungsweisen, z.B. die sog. Dampfdruckschwüle ab einem Dampfdruck von 18,8 hPa.

Im Sinne der Klimaanpassungsuntersuchungen die Empfindlichkeit von Mensch, Umwelt etc. für geänderte Klimabedingungen („Exposition“).

Sommertag

Tag, an dem die Höchsttemperatur 25°C erreicht oder überschreitet.

Strahlungswitterung

Witterung, bei der die örtlichen atmosphärischen Gegebenheiten überwiegend durch die aktuellen Bedingungen der Sonnenstrahlung gesteuert werden (starke Erwärmung durch Sonneneinstrahlung am Tage, starke nächtliche Abkühlung durch Ausstrahlung, wenig Wind) und nicht durch das Heranführen von Luftmassen mit Merkmalen anderer Ursprungsgebiete (z.B. in Mitteleuropa vom Atlantik).

Szenarien

Im Rahmen von Klimawandeluntersuchungen Annahmen über die zukünftige Entwicklung klimarelevanter Faktoren, z.B. zum Ausstoß von Treibhausgasen.

Thermalbild

Luft- oder Satellitenaufnahme im Infrarotbereich. Thermische IR-Aufnahmen geben ein Abbild der Oberflächentemperatur wider („Oberflächenstrahlungstemperatur“).

Transpiration

Verdunstung von Wasser von der Oberfläche von Pflanzen, Tieren und Menschen (siehe auch „Evaporation“).

Tropennacht

Neben den heißen Tagen eine zusätzliche Definition zur Kennzeichnung von Tagen mit hoher Wärmebelastung, hier in Form einer geringen nächtliche Abkühlung; eine Tropennacht ist eine Nacht, in der die Lufttemperatur 20°C nicht unterschreitet.

UTCI

Universeller Thermaler Klimaindex („Universal Thermal Climate Index"), ein Bioklimaindex. Der UTCI wird ähnlich wie der PET aus Messdaten zu den Umgebungsbedingungen im Außenbereich allerdings mit einem komplzierteren, moderneren und international abgestimmten Verfahren berechnet. Die Ergebnisse werden meist in thermische Belastungsklassen übertragen.

Versiegelungsgrad

Anteil der durch Gebäude und Oberflächenbefestigung (Straßen, Wege etc.) versiegelten Oberfläche an der Gesamtfläche eines Areals. Die Versiegelung verändert die Energieumsätze an der Oberfläche insbesondere in der Form, dass Verdunstung – und damit Abkühlung – nicht mehr oder nur eingeschränkt möglich ist.

Wärmeinsel

Gebiet mit überdurchschnittlichen hohen Temperaturen, speziell die „städtische Wärmeinsel". Durch hohen Versiegelungsgrad, veränderte Umsätze der Sonnenstrahlung (anderes Reflektions- bzw. Absorptionsverhalten) und durch technisch bedingte Wärmefreisetzungen (Abwärme durch Gebäudeheizung oder Verbrennungsmotoren) liegt das Temperaturniveau in der Stadt höher als im Umland.

Quellen

- Atteslander, P. (2008): Methoden der empirischen Sozialforschung. Berlin (Erich Schmidt Verlag).
- Aufbruch am Arrenberg e.V. (2016): Klimaquartier Arrenberg. URL: http://www.aufbruch-am-arrenberg.de/site/home/klimaquartier/aktuelle_situation_am_arrenberg/ (25.01.17).
- Bezirksregierung Köln (2017): TIM-online. ALKIS-Daten, WebAtlasDE 2.0. URL: https://www.tim-online.nrw.de/tim-online/initParams.do?role=default (30.01.17).
- DWD (2016a): Pressemitteilung Deutschlandwetter im Juni 2016: Statt Sommer viele Unwetter mit Blitz, Donner und Starkregen.
- DWD (2016b): Pressemitteilung Deutschlandwetter im Juli 2016: Ein warmer, zu trockener und durchschnittlich sonniger Monat.
- DWD (2016c): Pressemitteilung Deutschlandwetter im August 2016: Ein viel zu trockener August mit einer Hitzewelle am Monatsende.
- DWD (2016d): Pressemitteilung Deutschlandwetter im Sommer 2016: Ein recht warmer Sommer mit durchschnittlichem Sonnenschein.
- DWD (2016e): CDC (Climate Data Center); https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html; abgerufen am 16.9.2016)DWD, 2016f): INKAS - Informationsportal KlimaAnpassung in Städten (http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/inkas/inkas_node.html) EEA – European Environmental Agency (2014): Corine Land Cover 2006 seamless vector data; http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-2; abgerufen am 19.8.2014
- EEA - European Environment Agency (2005): Vulnerability and adaptation to climate change in Europe; EEA Technical report No 7/2005
- Gosling et al. (2014); A glossary for biometeorology; in: Int J Biometeorol. 2014; 58(2): 277–308. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3936130/ (abgerufen am 28.12.2017)
- Hamann & Schulte (1999):Fachbeitrag Umwelt zum Flächennutzungsplan der Stadt Remscheid - Erläuterungsbericht

- Hupfer, P. & W. Kuttler (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie.

- ISB (2013): Klimaschutzteilkonzept - Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid

- Johansson, E., S. Thorsson, R. Emmanuel, E. Krüger (2014): Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. In: *Urban Climate* Vol. 10, Part 2.

- King, E.: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 130. (Offenbach: DWD) 1973

- Kuttler, W., Roßmann, F., Steffens, H. (1993): Stadtklimaanalyse Solingen; im Auftrag der Stadt Solingen, Amt für Umweltschutz

- LANUV (2016a): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. LANUV-Fachbericht 74.

- LANUV (2016b): Klimawandel in den Regionen Nordrhein-Westfalens. Regionale Ergänzungen zur Vorstellung des Berichts „Klimawandel und Klimafolgen in NRW".LANUV (2016c): Messwerte Station Solingen-Wald - alle abschließend validierten Messwerte dieser Station seit Messbeginn; http://opendata.lanuv.nrw.de/abt4/OpenKontiLUQS_SOLI_alt.csv, abgerufen am 5.7.2016

- Lohmeyer (2000): Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal. Bearbeiter: T. Nagel, W. Bächlin, A. Lohmeyer.

- Maras, I., T. Schmidt, B. Paas, M. Ziefle & C. Schneider (2016): The impact of human-biometeorological factors on perceived thermal comfort in urban public places. In: *Meteorologische Zeitschrift* **25** (4): 407-420.

- Munich RE (2012): Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, GeoRisikoForschung, NatCatSERVICE – Stand Juli 2012; https://www.munichre.com/de/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html

- Paffen, M. (2013): Projektstudie Physische Geographie Sommersemester 2013, Geographisches Institut RWTH Aachen. Fragebogen „Bürgerbefragung zur soziologischen und bioklimatischen Funktion von innerstädtischen Grünflächen". http://www.klimageo.rwth-aachen.de/index.php?id=1337&L=1Casassa (08.02.17).

- PIK - Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2014): Portal KlimafolgenOnline.com; www.klimafolgenonline.com, abgerufen am 4.11.2015Sievers, U. (2008): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21: theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells; in: Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 227

- Stadt Remscheid (2012): Rahmenplan Ostbahnhof Stadterneuerung/Zukunftssicherung. Analyse und Konzept. Stadt Remscheid, Stadtentwicklung und Wirtschaft. Stadt Remscheid (2017): Flächennutzungsplan (bereitgestellt am 5.4.2017)

- Stadt Solingen (2005): Geoportal - Flächennutzungsplan der Stadt Solingen, Stadtdienst Planung, Mobilität, Denkmalpflege. Stand: Januar 2005. URL: http://www2.geoportal.solingen.de/buergerservice/?MID=0&LANG=de&xpos=2575989.17&ypos=5671431.44&scale=10000&layers=stadtkarte_extlay,lp_webmaplay (19.04.16).

- Stadt Wuppertal (2009): Geoportal, Flächennutzungsplan 2005.

- Stadt Wuppertal (2015): Wuppertaler Statistik – Raumbezogene Daten, Daten für das Quartier Arrenberg (14). URL: https://www.wuppertal.de/rathaus/onlinedienste/rbs_statistik/statistik_quartier.phtml?wahlquar=14&aktion_jahr=2015 (19.04.16).

- Stadt Wuppertal (2016): Messdaten der Station Wuppertal-Bundesallee

- Stadt Wuppertal (2016b): Geodatenlieferung (ALKIS, ATKIS, LOD)

- Steinrücke, M.(2015): Klimagutachten für das Ittertal in Solingen

- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2003): VDI Richtlinie 3787 – Umweltmeteorologie – Blatt 5 Lokale Kaltluft