

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500442984/23

Planungsempfehlungen für die
(stadt-)klimawandelgerechte Entwicklung
von Konversionsflächen
– Modellvorhaben Heidelberg

von

GEO-NET Umweltconsulting GmbH und ÖKOPLANA

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Juni 2017

KLIMOPASS

– **Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Daniel Schulz-Engler Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, klimopass@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie Stadt Heidelberg Kornmarkt 1, 69117 Heidelberg GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5a, 30161 Hannover in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. G. Groß anerkannt beratender Meteorologe (DMG), Öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen und Kleinklima der IHK Han- nover-Hildesheim ÖKOPLANA Seckenheimer Hauptstraße 98, 68239 Mannheim
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U81-W03-N17
STAND	Juni 2017, Internetausgabe Juni 2017

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1	PROJEKTZIELE UND -ABLAUF	1
2	EINFÜHRUNG IN DEN UNTERSUCHUNGSRAUM	2
2.1	Geographische Lage	2
2.2	Allgemeine Klimatische Einordnung	3
2.3	Das Heidelberger Stadtklima	4
3	STADTKLIMAWANDEL IN HEIDELBERG	7
3.1	Das Methodenpaket ENVELOPE	7
3.2	Verwendete Eingangsdaten	10
3.2.1	Geodaten	10
3.2.2	Daten zum zukünftigen Klimawandel	11
3.3	Ergebnisse	13
3.3.1	Methodik	14
3.3.2	Tagsituation: Auftrittshäufigkeit von Tagen mit starker Wärmebelastung	15
3.3.3	Nachtsituation: Auftrittshäufigkeit von Tropennächten	22
3.3.4	Wachsende Hot-Spots	28
3.4	Bezug zur zukünftigen Entwicklung des Klimas in Baden-Württemberg	32
4	DIE HEIDELBERGER KONVERSIONSFLÄCHEN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DAS STADT- UND LOKALKLIMA	33
5	VERTIEFUNGSGEBIET US HOSPITAL	36
5.1	Stand der Konversion - Planerische Grundlagen der Untersuchungen	36
5.2	Untersuchungsmethoden	38
5.2.1	Messkampagne	38
5.2.2	Modellierungen zur Thermischen Belastungssituation	39
5.2.3	Modellierungen zur Durchlüftung	44
5.3	Ergebnisse der Untersuchung - Auswirkungen der Konversion	45
5.3.1	Messkampagne	45
5.3.2	Auswirkungen auf die thermische Belastungssituation	62
5.3.3	Auswirkungen auf die Durchlüftung	74

5.4	Planungshinweise für eine stadtklima(wandel)gerechte Konversion	80
6	EINBINDUNG DER PROJEKTERGEBNISSE IN DIE PLANUNGSPROZESSE	87
6.1	Planung im Dialog: Rahmenplan Rohrbach – Hospital	87
6.2	Klimawandel-Anpassungskonzept für Heidelberg	88
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	89
	QUELLENVERZEICHNIS	90

1 Projektziele und -ablauf

Baden-Württemberg ist von der Aufgabe militärischer Liegenschaften besonders stark betroffen. Allein in der Metropolregion Rhein-Neckar befinden sich gegenwärtig rund 20 Flächen in einem Konversionsprozess. Insbesondere in städtischen Ballungszentren mit Wachstumsdynamik, wie die Stadt Heidelberg, unterliegen diese Flächen einem enormen Entwicklungsdruck. Dieses gilt insbesondere für den Innenbereich, dessen Nachverdichtung auch aus Gründen des Klima- und Bodenschutzes sinnvoll erscheint. Aus der Sicht der Klimaanpassung kann eine intensive Nachverdichtung aufgrund einer zunehmenden thermischen und luft-hygienischen Belastung allerdings problematisch sein. Die Aufstellung städtebaulicher Rahmen- oder Masterpläne für Konversionsflächen mit den entsprechenden Beteiligungsprozessen bietet nicht nur eine Chance für innovative und zukunftsfähige Nutzungskonzepte. Auch die Klimaanpassung kann von vornherein in Nachverdichtungsprozesse integriert werden.

In diesem Sinne verfolgt das Projekt das Ziel, den Entwicklungsprozess der Heidelberger Konversionsfläche US-Hospital klimaökologisch zu begleiten. Auf der Basis von Messkampagnen sowie meso- und mikroskali-gen Klima(wandel)modellrechnungen sollen Planungshinweise und -empfehlungen für eine klimawandelgerechte Konversion ausgearbeitet werden. Das Projekt hat somit nicht nur Modellcharakter für Heidelberg, sondern ist auch ein best-practice Beispiel zur Unterstützung einer klimawandelgerechten Konversion im Rhein-Neckar-Gebiet und in ganz Baden-Württemberg.

Das Projekt ist in vier aufeinander aufbauende bzw. miteinander korrespondierende Bausteine gegliedert. Im ersten Arbeitsschritt wird zunächst auf der Basis neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse der Heidelberger Stadtklimawandel räumlich hochaufgelöst für die Gesamtstadt modelliert (Kapitel 3). Die Analyse ist eine Grundlage für die Einordnung der klimaökologischen Bedeutung und Belastung der Heidelberger Konversionsflächen für das Heidelberger Stadtklima im Allgemeinen (Kapitel 4). Weitere Basis für diese Einschätzung sind die Ergebnisse der Heidelberger Stadtklimaanalyse aus dem Jahr 2015 sowie eine im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführte Messkampagne (Kapitel 5.3.1). Auf der Grundlage dieser Arbeitsschritte findet im dritten Baustein die eigentliche Bewertung der voraussichtlichen Auswirkungen der Konversion auf die Fläche des US-Hospitals selbst statt (Kapitel 5). Die (Zwischen-)Ergebnisse des Projektes fließen in den Dialogprozess zur Konversion ein (Kapitel 6).

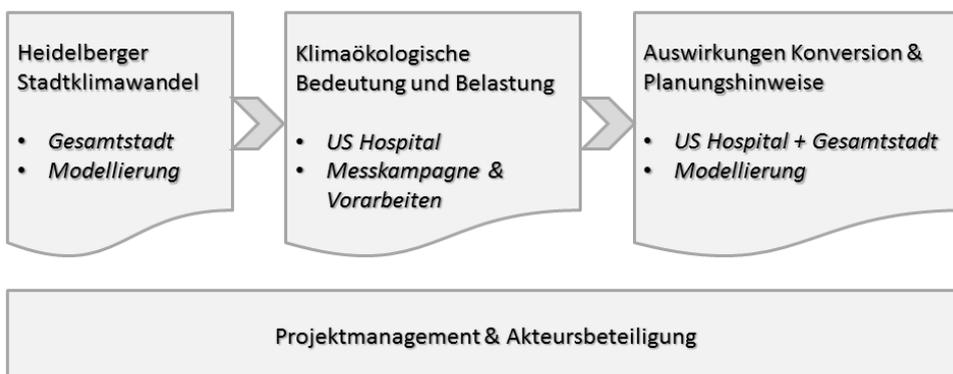


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Projektes

2 Einführung in den Untersuchungsraum

2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE

Die Stadt Heidelberg erfüllt als Universitätsstadt in der Metropolregion Rhein-Neckar die Funktion eines Oberzentrums, das u.a. durch eine Vielzahl überregional bedeutsamer Industrie- und Gewerbebetriebe sowie die renommierte Universität gekennzeichnet ist. Die geographische Lage der Stadt wird von den naturräumlichen Einheiten Odenwald, Bergstraße, und Neckar-Rhein-Ebene gekennzeichnet. Der östliche Teil der Gemarkung wird vom Odenwald eingenommen, dessen höchste Erhebungen auf Heidelberger Gemarkung der Weiße Stein (548 m ü. NN) im Norden und der Königstuhl (568 m ü NN) im Süden darstellen. Die aus dem Heiligenberg (445 m ü NN) im Norden und dem Geisberg (376 m ü NN) im Süden bestehende westliche Randscholle bildet den Übergang zur Bergstraße. Die Bergstraßenlandschaft erstreckt sich als schmaler, 1 bis 2 km breiter Streifen zwischen Odenwald und Oberrheinebene in Nord-Süd-Richtung. Durch den sich nach Westen öffnenden Taltrichter des Neckars wird sie in einen nördlichen und einen südlichen Abschnitt aufgeteilt. Der westliche Teil der Stadt liegt in der Neckar-Rhein-Ebene. Sie stellt einen Schwemmkegel des Neckars dar, der aufgrund von fruchtbaren Flusslehm- und Schwemmlößböden durch landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet ist (LESER 1984, S. 21). Insgesamt liegen die Höhenunterschiede in Heidelberg zwischen 97 m ü NN (Schwabenheimer Schleuse) und 568 m ü NN (Königstuhl).

Die Bodenfläche von Heidelberg beträgt insgesamt 10 883 ha, wovon im Jahr 2015 ca. 30 % den Siedlungs- und Verkehrsflächen zuzuordnen waren. Die Landwirtschaftsfläche nimmt einen Flächenanteil von ca. 26 % ein. Der Anteil der Waldfläche beläuft sich auf ca. 41 %. Laut Statistik leben im Heidelberger Stadtgebiet 156 267 Wohnberechtigte (Stand 2015), wobei der Anteil an über 65-jährigen, die häufig besonders sensibel auf thermische und lufthygienische Belastungen reagieren, ca. 16 % beträgt.

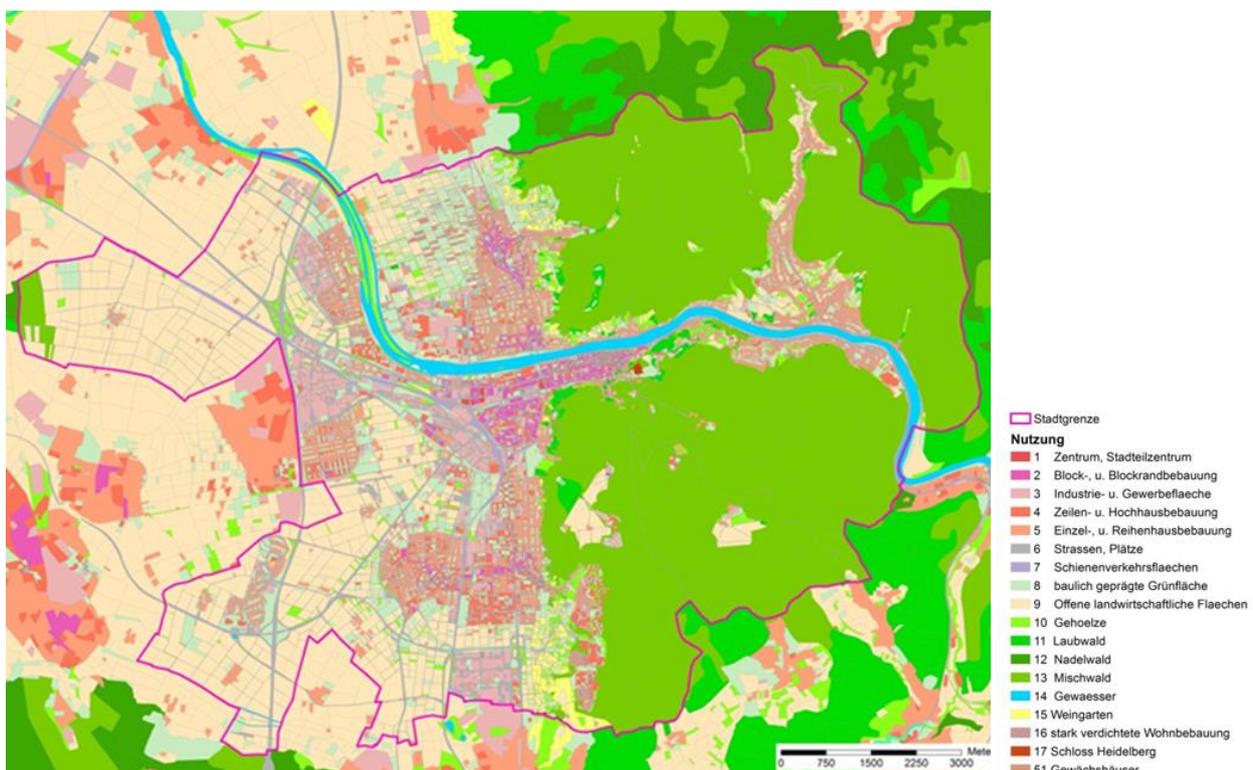


Abbildung 2: klassifizierte Flächennutzung in Heidelberg (Stand 2012)

2.2 ALLGEMEINE KLIMATISCHE EINORDNUNG

Das Stadtgebiet von Heidelberg befindet sich im klimaökologischen Belastungsgebiet „Ballungsraum Rhein-Neckar“. Der Klimaklassifikation nach KÖPPEN und GEIGER folgend gehört der Raum dem warmgemäßigten, vollhumid-maritimen Klimazonentyps Cfb an. Damit verbunden ist das ganzjährige Überwiegen von Meeresluftmassen, die mit Südwest-, West- und Nordwestwinden nach Mitteleuropa gelangen.

Bezogen auf die Periode 1981 – 2010 beträgt die Jahresmitteltemperatur an der DWD-Station Heidelberg 11,4 °C. Die mittleren Julitemperaturen betragen 20,6 °C bei einer durchschnittlichen Tagesschwankung zwischen 15,6 °C (mittleres Minimum) und 25,7 °C (mittleres Maximum). Im Januar beläuft sich die mittlere Lufttemperatur auf 2,4 °C bei einer durchschnittlichen Tagesschwankung zwischen -0,1 °C (mittleres Minimum) und 4,8 °C (mittleres Maximum) (Tabelle 1).

Die thermischen Unterschiede der Jahreszeiten spiegeln sich auch in der Verteilung der Schwellentage (heiße Tage, Sommertage, Frost- und Eistage) wieder. Heiße Tage, d.h. Tagesmaxima von mindestens 30 °C, werden in der Regel nur im Zeitraum von Mai (0,6 Tage) bis September (0,5) mit einem Maximum im Juli (6,4 Tage) beobachtet. Die mittlere Jahressumme beträgt 15,3 heiße Tage. Sommertage, d.h. Tage mit einem Temperaturmaximum von mindestens 25 °C treten im Zeitraum April (1,3 Tage) bis Oktober (0,3 Tage) mit einem Maximum in den Monaten Juli und August (16,8 bzw. 16,3 Tage) und der mittleren Jahressumme 58 Tagen auf. Im Hochsommer wird somit die 25 °C-Schwelle im Mittel an jedem zweiten Tag und die 30 °C-Schwelle im Mittel an ungefähr jedem 5. Tag überschritten. Derartige Situationen sind in der Regel an periodenhaft auftretende Strahlungswetterlagen gebunden.

Die Anzahl der Frosttage beträgt im Mittel 49,7 Tage. Die größte Frostwahrscheinlichkeit stellt sich dabei von Dezember bis Februar (ca. 12 - 14 Tage) ein. Dauerfrostsituationen, d.h. Eistage (Tagesmaxima < 0 °C), zeigen sich mit etwas größerer Häufigkeit nur im Zeitraum Dezember bis Februar (im Monatsmittel ca. 2 bis 5 Tage) und werden sonst nur noch im November (0,7 Tage) und März (0,1 Tage) gelegentlich verzeichnet. Die mittlere Gesamtjahressumme beträgt 11,6 Tage.

Die Sonnenscheindauer erreicht in der Jahressumme durchschnittlich 1 645 Stunden. Höchste Sonnenscheindauern werden in den Monaten Mai bis August (> 200 h) registriert, während die Spätherbst- und Wintermonate (November bis Januar) mit Summen bis 50 h als sonnenscheinarm gelten.

Die Jahressumme des Niederschlags liegt in Heidelberg bei ca. 732 mm. Die Verteilung der Niederschlagssummen ist insgesamt relativ homogen, wobei jedoch höhere Regenmengen vor allem in den Monaten Mai bis Juli und geringere Mengen im Zeitraum von Januar bis April verzeichnet werden. Die Niederschläge in den Sommermonaten resultieren dabei vor allem aus Schauern und Gewittern als Folge konvektiver Wolkenbildung durch die hohe Einstrahlungsintensität.

Der Raum Heidelberg zeichnet sich insgesamt durch eine hohe Wärmebelastung im Sommerhalbjahr aus, ca. 31 % der Tage im Zeitraum April bis September erreichen Tageshöchsttemperaturen von über 25°C. Ungefähr 8 % der Tage im Sommer können als „heiß“ bezeichnet werden (Tageshöchsttemperaturen von über 30 °C). Dabei tritt bei einer hohen Anzahl schwachwindiger Wetterlagen eine große Inversionshäufigkeit auf.

Tabelle 1: Langjährige Monats- und Jahresmittel- und -summenwerte der Lufttemperatur, des Niederschlags, der Feuchte und der Sonnenscheindauer sowie typischer Schwellentage an der DWD-Klimastation Heidelberg im Zeitraum 1981-2010

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C] Tagesmittel	2.4	3.5	7.4	11.2	15.5	18.3	20.6	20.1	16.0	11.5	6.4	3.4	11.4
Temperatur [°C] mittl. Tagesmax.	4.8	6.5	11.3	15.9	20.4	23.3	25.7	25.4	20.8	15.3	9.1	5.6	15.3
Temperatur [°C] mittl. Tagesmin.	-0.1	0.6	3.7	6.4	10.6	13.4	15.6	15.2	11.7	8.1	3.8	1.1	7.5
Temperatur [°C] absol. Tagesmax.	16.2	20.0	25.4	28.0	32.7	37.4	37.1	38.8	32.2	28.5	20.2	18.5	38.8
Temperatur [°C] absol. Tagesmin.	-17.5	-12.4	-12.0	-5.0	1.0	3.5	7.7	6.1	2.0	-3.2	-7.6	-15.0	-17.5
Niederschlagssumme [mm]	48	48	55	49	77	70	76	63	59	64	62	63	732
Dampfdruck [hPa]	6.0	6.0	7.1	8.3	10.2	13.7	15.2	15.1	12.9	10.7	7.9	6.5	10.0
Feuchte [%]	79	74	69	64	64	65	64	65	71	77	80	80	71
Mittl. Anzahl der Sommertage	0.0	0.0	0.0	1.3	6.4	11.7	16.8	16.3	5.2	0.3	0.0	0.0	58.0
Mittl. Anzahl der Hitzetage	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	2.9	6.4	4.9	0.5	0.0	0.0	0.0	15.3
Mittl. Anzahl der Frosttage	13.6	11.8	5.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	5.7	12.3	49.7
Mittl. Anzahl der Eistage	5.4	2.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	3.0	11.6
Mittl. Anz. der Schneedeckentage	7.6	4.7	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	3.7	18.2
Mittl. Sonnenschein- dauer [h]	46	78	118	173	206	215	233	219	157	101	50	35	1631

2.3 DAS HEIDELBERGER STADTKLIMA

Der Stadt Heidelberg steht eine räumlich hochaufgelöste, modellgestützte Stadtklimaanalyse für das gesamte Stadtgebiet zur Verfügung (Stadt Heidelberg 2015). Die Stadtklimaanalyse stellt die Fortschreibung der Analysen aus den 1990`er Jahren dar (Stadt Heidelberg, 1995). Ihre zentralen Produkte sind die Klimaanalyse- und die Planungshinweiskarte. Die Planwerke stellen eine wichtige Vorarbeit für das vorliegende Projekt dar.

Grundlage für die Beurteilung der stadtklimatischen Situation ist die Analyse des klimatischen Ist-Zustands im Stadtgebiet während einer austauscharmen sommerlichen Hochdrucklage, welche häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergeht. Aus den Grundlageninformationen über die Stadt, wie Topographie, Bebauung und Vegetation sowie Kenntnissen über atmosphärische Prozesse und lokalklimatische Phänomene werden Aussagen über Wärmebelastung, Durchlüftung und Bioklima abgeleitet. Im Vordergrund der Betrachtung stehen der lokale nächtliche Kaltluftaustausch und die Sicherung und Verbesserung der damit in Zusammenhang stehenden relevanten städtischen Strukturen, Grün- und Freiflächen. Die Klimaanalysekarte fasst dieses als erstes Ergebnis der Untersuchung zusammen (Abbildung 3).

Im Rahmen der Klimaanalyse sind relativ zum Gebietsmittel bioklimatisch belastete Siedlungsräume einerseits sowie entlastende, Kaltluft produzierende Flächen andererseits ausgewiesen worden. Eine qualitative

Bewertung der Klimaparameter erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 anhand der Abweichungen der Einzelwerte von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsgebiet. Eine Flächenbilanzierung der ermittelten bioklimatischen Belastungsklassen der Siedlungsflächen im Stadtgebiet Heidelberg ergibt, dass:

- 9,9 % der Siedlungsfläche sind als bioklimatisch ungünstig einzuordnen,
- 48,5 % sind weniger günstig,
- 22,9 % weisen günstige bioklimatische Bedingungen auf,
- 18,7 % des Siedlungsraumes können als sehr günstig eingestuft werden.

In Relation zum Gebietsmittel zeigen die am Rand der Rheinebene gelegenen Stadtteile Heidelbergs eine im Vergleich zum Gebietsmittel überdurchschnittlich hohe bioklimatische Belastung. Die neckaraufwärts eher ländlich gelegenen Ortsteile weisen dagegen durch ihre Lage innerhalb der neckarabwärts fließenden Kaltluft insgesamt eine günstige Situation auf. Die Temperaturunterschiede innerhalb der zentralen Stadtteile Heidelbergs mit überdurchschnittlicher bioklimatischer Belastung sind vergleichsweise gering, da auch hier weite Teile dieser Stadtgebiete noch im Einflussbereich des „Neckartälers“ oder lokaler Hangabwinde liegen.

Von den bewaldeten Hängen östlich des zentralen Stadtgebietes strömt vielfach flächenhaft Kaltluft in die Stadt ein. Zum Teil wird die abfließende Kaltluft in Tälern kanalisiert. Erfolgt die Kaltluftströmung nicht flächig auf wärmere Ortsteile zu, sondern innerhalb räumlich begrenzter Bereiche, spricht man von Kaltluftleitbahnen oder Luftaustauschbereichen. Als übergeordnete Luftaustauschbereiche wurden die folgenden stadtklimatisch wichtigen Strukturen ermittelt:

1. der „Neckartäler“, als für die Durchlüftung sehr effektive und für Heidelberg typische Strömungsleitbahn während sommerlicher Hochdrucklagen;
2. der am östlichen Rand der Südstadt gelegene Bergfriedhof, der ein Einfließen von Kaltluft aus den bewaldeten Hangbereichen in das Stadtgebiet ermöglicht. Insbesondere die in der Nähe verlaufenden Gleisareale ermöglichen es der Kaltluft über diese raugkeitsarmen Strukturen bis in Richtung Bahnhof und weiter in besonders stark belastete Gebiete vorzudringen;
3. die Freiflächen zwischen Boxberg und Rohrbach. Vor allem die südöstlichen Siedlungsflächen Rohrbachs können von diesem Luftaustauschbereich profitieren;
4. Hangabfließende Kaltluft aus dem Odenwald wird über Freiflächen Stadtteils Emmertsgrund kanalisiert und kann über weiter hangabwärts gelegene Freiflächen in Richtung Bundesstraße und Gewerbegebiet Rohrbach strömen;
5. Im nördlichen Stadtgebiet erfolgt im Mühlbachtal eine Kanalisierung der hangabfließenden Kaltluft;
6. In dem Hangeinschnitt am Steinberg kommt es ebenfalls zu einem Ansammeln und vermehrten Abfließen von Kaltluft.

Ein Erhalt dieser Strukturen ist aus bioklimatischer Sicht unbedingt anzustreben. Eine raumplanerische Förderung dieser Strukturen kann wesentlich dazu beitragen, gesunde Lebens- und Wohnverhältnisse langfristig zu sichern. Vor dem Hintergrund einer weiter wachsenden Stadt bei gleichzeitig voranschreitendem Klimawandel kommt der Berücksichtigung stadtklimatischer Zusammenhänge bei der zukünftigen Stadtplanung eine besondere Bedeutung zu.

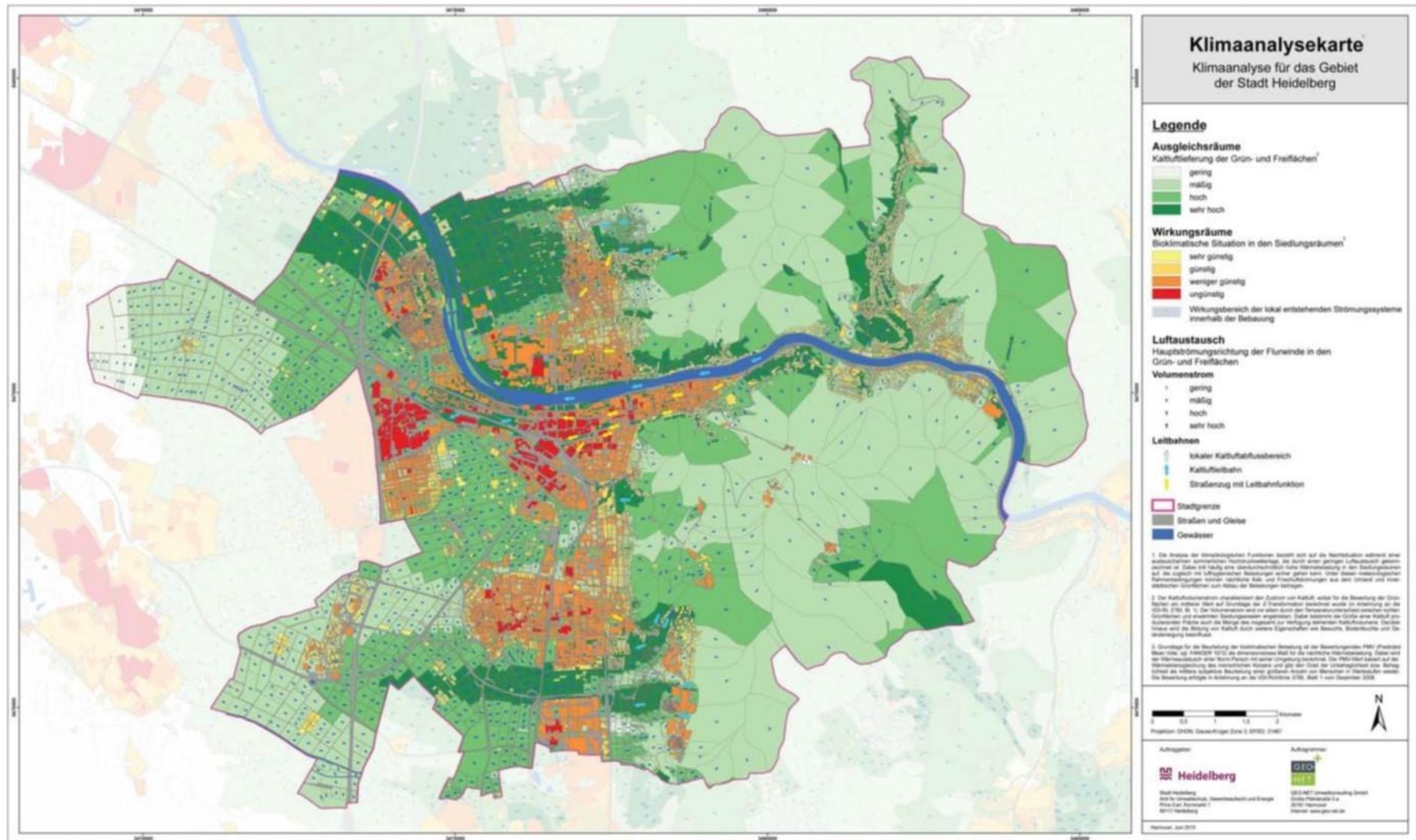


Abbildung 3 Klimaanalysekarte Stadt Heidelberg, 2015

3 Stadtklimawandel in Heidelberg

3.1 DAS METHODENPAKET ENVELOPE

Die räumlich hochaufgelöste Analyse des Heidelberger Stadtklimawandels erfolgt auf Basis des Methodenpakets ENVELOPE. Das Paket koppelt das mesoskalige Stadtklimamodell FITNAH-3D mit den aktuellsten Ergebnissen regionaler Klimamodell-Ensemble Rechnungen und erlaubt auf diese Weise die numerische Simulation stadtklimatisch relevanter Parameter. Diese können mithilfe eines Geographischen Informationssystems visualisiert und geostatistisch ausgewertet werden.

Entsprechend des Projektansatzes beziehen sich die Modellanalysen auf den thermischen Wirkungskomplex und stellen räumlich differenzierte Informationen zur zukünftigen Entwicklung der Auftretshäufigkeit ausgewählter klimatologischer Kenntage bereit. Aus dem Vergleich mit den Daten für die Klimaperiode 1971-1990 kann das zu erwartende Ausmaß des Stadtklimawandels in Heidelberg räumlich hochaufgelöst analysiert werden. Die Modellrechnungen liefern Ergebnisse in einer einheitlichen horizontalen Auflösung für die Gesamtstadt.

Obwohl die Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle auf einem, verglichen mit dem globalen Maßstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen in der Regel noch detailliertere Aussagen benötigt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund notwendig, dass regionale Klimamodelle mit einer sehr guten räumlichen Auflösung von gegenwärtig bis zu 12,5 km dennoch nicht in der Lage sind, die relevanten lokalen Handlungsfelder, wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder Städte räumlich aufzulösen und in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe können mesoskalige und an den entsprechenden Raum angepasste Simulationsmodelle übernehmen. Sie sind aufgrund ihrer höheren räumlichen Auflösung in der Lage die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Größen zu erfassen. Abbildung 4 zeigt schematisch den verfolgten Downscaling-Ansatz ausgehend von der globalen Klimaprojektion bis hin zum Stadtklimamodell.

Mesoskalige dreidimensionale Simulationen werden dabei nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren. Dabei werden die größerskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl mesoskaliger Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnungen für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle „intelligent“ auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt.

Ausgehend von einer definierten Fragestellung werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarienrechnungen ausgewertet, sodass sie als übergeordnete Eingangsdaten für das mesoskalige Modell verwendet werden können. Beispielhaft soll das Vorgehen anhand der Fragestellungen „Wie ändert sich die Wärmebelastung in Städten in der Zukunft (Hitzestress)?“ bzw. „Wie viele Tage mit Hitzestress sind in der Zukunft zu erwarten?“ beschrieben werden.

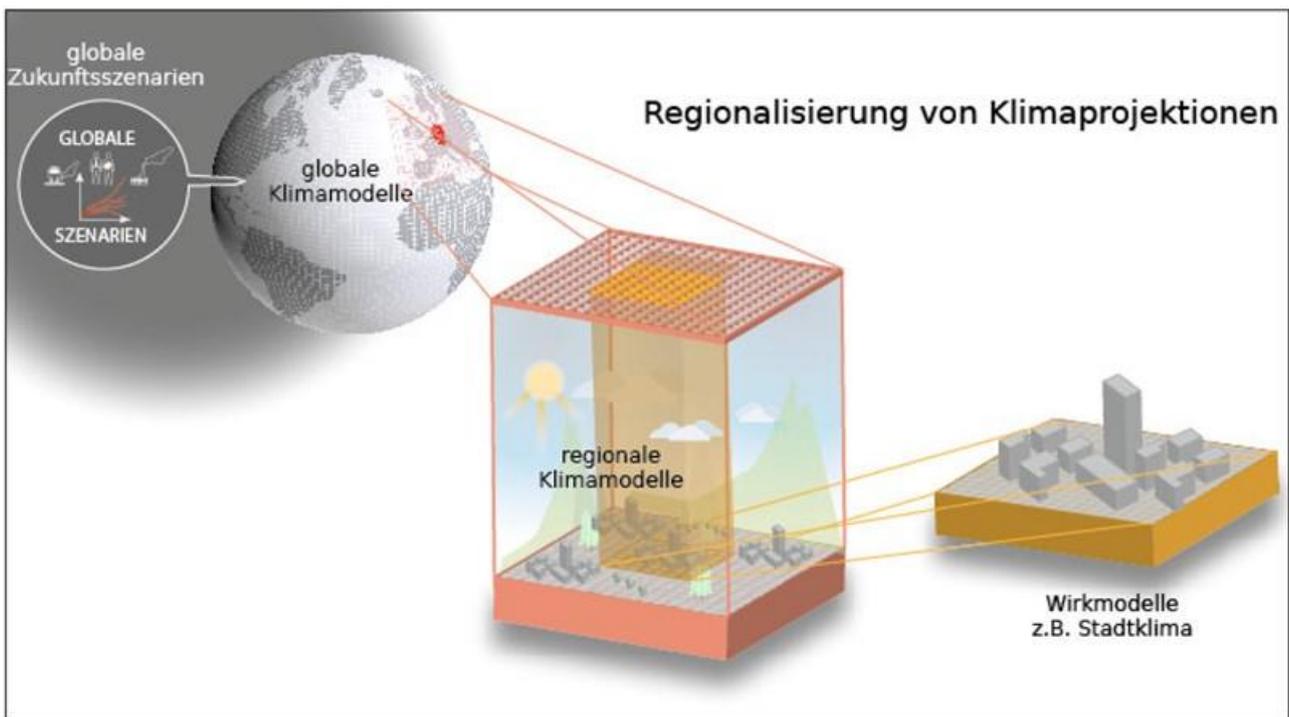


Abbildung 4: Downscaling globaler Klimaprojektionen über die regionale Skala bis hin zur lokalen Skala (Quelle: DWD 2017)

Die Wärmebelastung für den Menschen kann anhand eines Wärmehaushaltsmodells abgeschätzt werden, bei dem der Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung berechnet wird („Klima-Michel“). Als Kriterium werden dabei Indikatoren wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), PMV¹ oder UTCI² berechnet, die jeweils eine Maßzahl für die Komfortbedingungen des Menschen widerspiegeln (vgl. Kapitel 3.3.2).

Bei der Berechnung der Indikatoren müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit stadtspezifischer Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der großräumigen Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften) können mit Hilfe eines mesoskaligen Modells deren Verteilungen innerhalb eines urbanen Raumes detailliert berechnet werden. Während die stadtspezifischen Eingangsgrößen bekannt sind bzw. für die Zukunft vorgegeben werden müssen, werden Wetterlageninformationen aus den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle abgeleitet.

Zur Beantwortung der Ausgangsfragen kann die Auswertung der regionalen Klimaszenarienrechnungen entsprechend eingengt werden. Die regionalen Klimamodelle liefern aufgrund interner Variabilität für verschiedene Rechenläufe bei gleichem Emissionsszenario durchaus unterschiedliche Resultate (z.B. für das Szenario RCP 8.5; vgl. Kapitel 3.2.2). Um sich von den Zufälligkeiten einer bestimmten Realisierung eines regionalen Klimaszenarios zu lösen, ist es empfehlenswert, die Ergebnisse dieser Rechnungen statistisch zu analysieren und daraus die notwendigen Eingangsgrößen für das mesoskalige Modell zu generieren. Die aus den Zeitreihen berechneten Häufigkeitsverteilungen für Wind, Temperatur und relativer Feuchte liefern neben der Aufteilung in entsprechende Werteabschnitte auch die Eckpunkte innerhalb derer sich die regionalen Ergebnisse für alle Tage der nächsten 100 Jahre bewegen (niedrigster Wert, höchster Wert, Abb. 5).

¹ Predicted Mean Vote Index

² Universal Thermal Climate Index

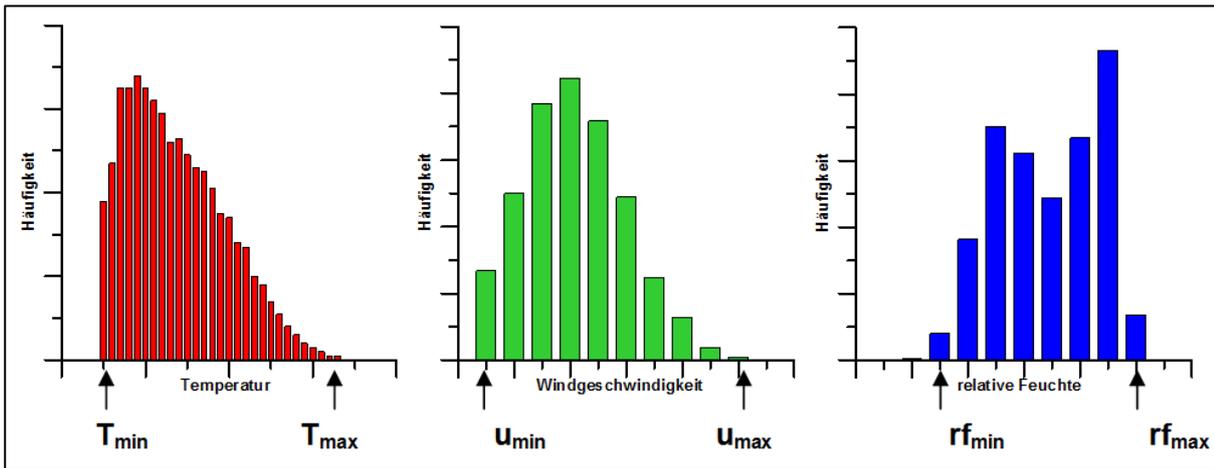


Abbildung 5 Häufigkeitsverteilungen von Temperatur, Wind und relativer Feuchte

Werden diese Auswertungen für die meteorologischen Parameter durchgeführt, spannen die daraus abgeleiteten Extremwerte einen Raum auf, in dem alle berechneten regionalen meteorologische Situationen liegen und von dessen Seitenflächen eingehüllt werden (Abbildung 6). In dem Raum befinden sich nun z.B. alle 14 Uhr-Situationen, die sich in Zukunft im Sommer abspielen (Abbildung 7). In Anlehnung an ein vom Deutschen Wetterdienst vorgestellten Verfahren, werden für größerskalige meteorologische Situationen für jeden der acht durch den Würfel definierten Eckpunkte die Verteilungen der lokalen Wind-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit dem mesoskaligen Modell berechnet (Früh et al. 2011). Dabei bilden die mit dem mesoskaligen Modell berechneten Temperaturen in 2 m über Grund für verschiedene regionale Szenarien die Grundlage für die weitere Bearbeitung (u_{min} , T_{min} , rf_{min} bzw. u_{max} , T_{max} , rf_{max}).

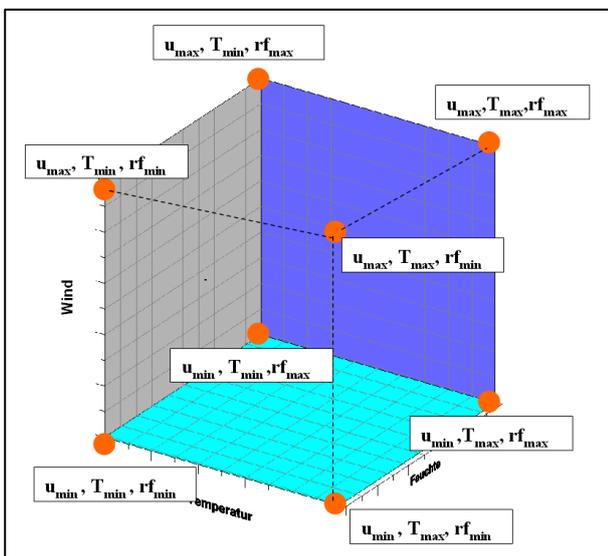


Abbildung 6: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen

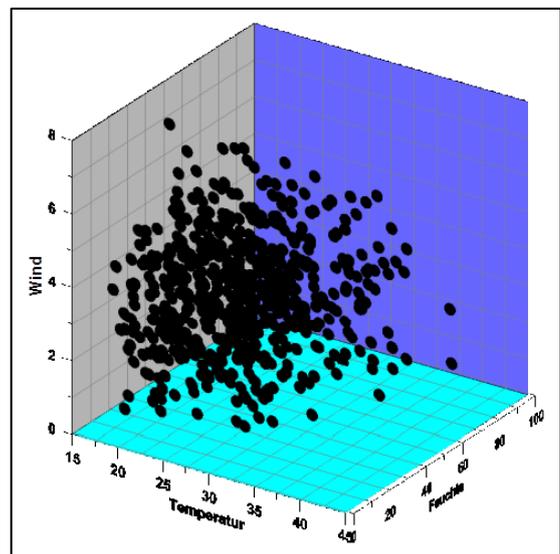


Abbildung 7: Verteilung der 14-Uhr Situationen im Zustandsraum

Basierend auf den Häufigkeitsverteilungen der Parameter des Regionalmodells werden eine große Anzahl von meteorologischen Situationen (Wetterlagen) festgelegt, die in ihrer statistischen Gesamtheit die Einzelverteilungen wiedergeben. Diese Vorgehensweise befreit von den individuellen Ergebnissen eines Szenarienlaufs des regionalen Modells, die für eine andere Realisierung abweichen können.

Die Bestimmung der Verteilungen von Wind, Temperatur und relativer Feuchte für ein Stadtgebiet und eine bestimmte meteorologische Situation der regionalen Klimarechnung erfolgt nunmehr nicht durch eine eigene mesoskalige Rechnung für diese Wetterlage, sondern aus der anteilmäßigen Wichtung der Resultate der mesoskaligen Simulationen für die acht Eckpunkte des Würfels, der die Gesamtheit aller Wetterlagen des ausgesuchten Zeitabschnittes umspannt (z.B. ein Sommer, eine Dekade, ein Jahrhundert; **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dabei wird jeweils eine lineare Änderung vorausgesetzt, was für einzelne, ausgewählte Situationen eine hinreichend genaue Näherung darstellt. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Für jeden Tag eines ausgesuchten Zeitfensters kann die räumliche Verteilung von beispielsweise Wind, Temperatur und Luftfeuchte in einem Stadtgebiet berechnet und daraus der PET-Wert als Kriterium für die Wärmebelastung des Menschen abgeleitet werden. Anhand der Einzelergebnisse kann schließlich auch die Gesamtzahl der Tage mit Wärmebelastung pro Jahr bestimmt werden.

Wie alle Modelle sind Regionale Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken und Ansätzen sowie der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden - ein sogenanntes Modellensemble. Diesem Ansatz folgend wurde für die Modellierung der zukünftigen thermischen Belastung der Stadt Heidelberg auf ein Ensemble bestehend aus 18 Regionalen Klimamodellen zurückgegriffen (vgl. Tabelle 2 in Kapitel 3.2.2).

Für die Auswertung der Ergebnisse eines Modellensembles stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. So ist es möglich die Ergebnisse zu aggregieren und einen Ensemble-Mittelwert auszuwerten oder aus den Ergebnissen statistische Werte wie bspw. Quantile abzuleiten. Auch komplexe statistische Ansätze wie z.B. das Bayes-Verfahren werden bei der Auswertung von Modellensembles verwendet (vgl. Fischer et al. 2012). Weiterhin stellt sich die Frage, ob alle Ensemble-Mitglieder gleichberechtigt betrachtet oder eventuell nach ihrer Güte (die wiederum zu definieren wäre) gewichtet werden sollen. Jede Methode hat Vor- und Nachteile, die an dieser Stelle nicht tiefergehend diskutiert werden können.

Für den vorliegenden Bericht wurden die Mitglieder des Modellensembles gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Bei der Auswertung wurde der Median als statistisches Maß gewählt, d.h. es wurde jeweils der zentrale Wert als Ergebnis akzeptiert, der von der Hälfte der Modelle erreicht bzw. überschritten wird. Diese Vorgehensweise schließt einerseits kein Modell von vornherein aus, andererseits werden die Ergebnisse nicht von stark abweichenden Werten eines Einzelmodells verzerrt wie es bspw. bei der Bildung des arithmetischen Mittels möglich wäre, da der Median robuster gegenüber Ausreißern ist.

3.2 VERWENDETE EINGANGSDATEN

Die Anwendung des Methodenpakets ENVELOPE besitzt die Prämisse der Verfügbarkeit räumlich bzw. zeitlich hochaufgelöster Geo- bzw. Klimainformationen. Im Folgenden wird für beide Eingangsgrößen dokumentiert, welche Daten im Rahmen des Projektes verwendet wurden, um den Heidelberger Stadtklimawandel räumlich hochauflösend projizieren zu können.

3.2.1 GEODATEN

Die für die Modellierung der acht Eckpunkte des ENVELOPE-Würfels mit dem mesoskaligen Klimamodell FITNAH-3D notwendigen Geodaten wurden zur Beibehaltung der Konsistenz und Vergleichbarkeit mit den

bereits existierenden Analysen zur stadtklimatischen Ist-Situation nachrichtlich aus der Heidelberger Stadtklimaanalyse übernommen. Hieraus ergab sich analog zur Stadtklimaanalyse eine horizontale räumliche Auflösung der Modellrechnungen von 25 m. Auf eine ausführliche Dokumentation wird an dieser Stelle zur Vermeidung von Redundanzen verzichtet und stattdessen auf die zugehörige Veröffentlichung verwiesen (Stadt Heidelberg, 2015).

3.2.2 DATEN ZUM ZUKÜNFTIGEN KLIMAWANDEL

Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.53. Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in $W m^{-2}$, der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Abb. 9):

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf knapp $3 W m^{-2}$. Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 W m^{-2}$. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das $2 ^\circ C$ -Ziel nicht überschreiten (DKRZ 2017);
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach nur noch geringfügig bis etwa 2075 steigt und in der Folge stagniert;
- Das Szenario RCP 8.5 weist hingegen den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur um ca. $4 ^\circ C$ gegenüber dem Zeitraum 1986-2005 bewirken würde (DKRZ 2017).

Nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes befinden wir uns, gemessen an den globalen CO_2 -Emissionen, aktuell auf dem „Pfad“ des RCP 8.5-Szenarios (Peters et al., 2013). Auch ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen.

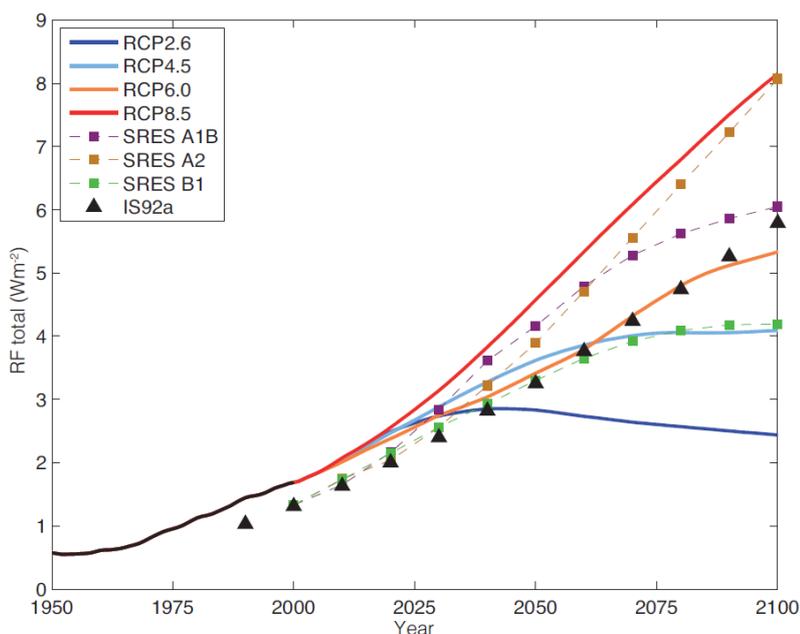


Abbildung 8 Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (Quelle: Klimanavigator 2017)

³ RCP = Representative Concentration Pathways

Um die zukünftige Entwicklung des Stadtklimas mit dem Methodenpaket ENVELOPE analysieren zu können, werden Daten benötigt, die in hinreichender räumlicher Auflösung Aussagen über die möglichen Eigenschaften des Klimas der nächsten Jahrzehnte zulassen. Dies ist durch die Verwendung Regionaler Klimamodelle möglich, die globale Klimaszenarien auf die regionale Skala projizieren (Downscaling). Prinzipiell kommen dynamisch numerische oder empirisch statistische Downscaling-Verfahren zur Anwendung (Christensen et al. 2007). Beim dynamisch numerischen Downscaling wird in das grobmaschige Gitter des Globalmodells (GCM) ein wesentlich höher aufgelöstes Gitter des Regionalmodells (RCM) eingebettet und die Atmosphärenphysik unter Verwendung räumlich höher aufgelöster Eingangsvariablen wie Orographie, Boden und Vegetation neu berechnet (vgl. Pavlik et al. 2012). Die Ausgabedaten des Globalmodells dienen dabei als meteorologischer Antrieb an den Rändern des regionalen Gitters. Beim empirisch-statistischen Downscaling werden statistische Beziehungen zwischen großräumigen Mustern der globalen Zirkulation und meteorologischen Eigenschaften von Stationsdaten abgeleitet und auf die Ergebnisse der Zukunftsszenarien des jeweils verwendeten GCMs angewendet (vgl. Benestad et al. 2007).

Für die Analyse der zukünftigen thermischen Belastung der Stadt Heidelberg wurden die Daten eines Ensembles regionaler Klimamodelle von EURO-CORDEX verwendet. EURO-CORDEX erstellt Ensembles von Klimasimulationen basierend auf einer Vielzahl von Downscaling-Modellen angetrieben von verschiedenen globalen Klimamodellen für Europa. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX⁴-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC⁵ Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt. Die Hauptziele der CORDEX-Initiative sind die Bereitstellung eines koordinierten Rahmenwerks zur Modellevaluierung, eines Klimaprojektionsrahmens und einer Schnittstelle für die Nutzer von Klimasimulationen zur Impaktforschung, für Studien der Klimaanpassung und des Klimaschutzes (Giorgi et al., 2009).

Die EURO-CORDEX Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt. Verwendet wurden tägliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11°). Tabelle 2 listet die aktuell verfügbaren Modellrechnungen von EURO-CORDEX auf, welche die Grundlage für das zusammengestellte Ensemble bilden. Zu beachten ist, dass nach dem Zeitpunkt der Berechnungen für Heidelberg noch weitere Daten durch EURO-CORDEX bereitgestellt wurden, die jedoch in der vorliegenden Studie nicht mehr berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 2: Für die Heidelberger Modellrechnungen zusammengestelltes Ensemble von Modellsimulationen der EURO-CORDEX Initiative (Stand: 10/2016)

GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		X	X
MPI-ESM-LR	RCA4		X	X
MPI-ESM-LR	REMO2009	X	X	X
CNRM-CM5	CCLM4-8-17		X	X
CNRM-CM5	RCA4		X	X
EC-EARTH	RCA4warm	X	X	X
HadGEM2-ES	RCA4		X	X
HadGEM2-ES	RCA4		X	X

⁴ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, welches Europa flächen- deckend überspannt, erfolgte durch die Ermittlung des dem Stadtzentrum von Heidelberg am nächsten ge- legenen Gitterpunktes (Abbildung 9). Bei der Extraktion von punktbezogenen Klimamodell- daten aus einem räumlichen Gitter wird die Einbeziehung der umliegenden acht Gitterpunkte empfohlen (DWD 2016), wobei die Daten der insgesamt dann neun Gitterpunkte räumlich gemittelt werden, um eine repräsentative Zeit- reihe zu erhalten. Nach dieser Vorgehensweise wurden die Daten für jedes der insgesamt 18 Ensemble-Mit- glieder zusammengestellt und zur Verwendung für das Methodenpaket ENVELOPE aufbereitet.

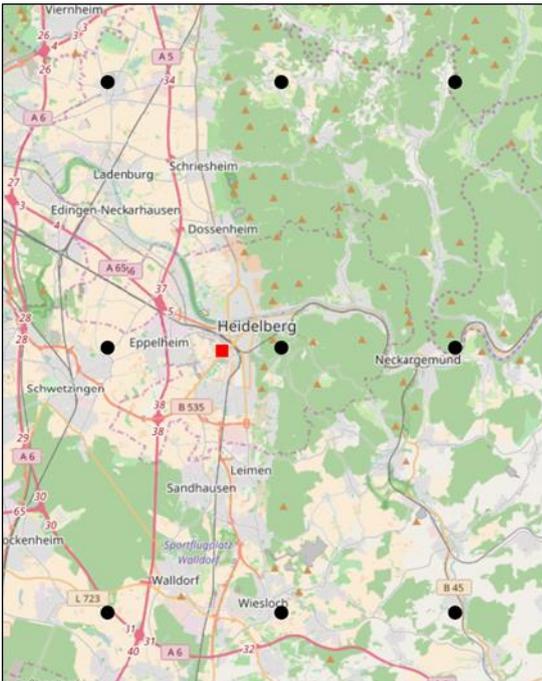


Abbildung 9 Lage der aus dem Modellgitter ausgewählten Gitterpunkte

3.3 ERGEBNISSE

Um die zukünftige Entwicklung der Intensität der thermischen Belastung im Heidelberger Stadtgebiet räum- lich differenziert und akteursgerecht für Politik und Verwaltung abbilden zu können, werden im Folgenden vier 30-jährige Zeiträume miteinander verglichen:

- der Ist-Zustand in der Referenzperiode 1971-2000,
- die kurzfristige Zukunft im Zeitraum 2021-2050 (Zukunftsperiode I),
- die mittelfristige Zukunft im Zeitraum 2041-2070 (Zukunftsperiode II),
- die langfristige Zukunft im Zeitraum 2071-2100 (Zukunftsperiode III).

Betrachtungsraum ist der freie, nicht von Gebäuden bestandene Raum. Die bioklimatische Situation in den Sommermonaten kann über verschiedene meteorologische Parameter sowie für die Tag- und Nachtsitua- tion ausgedrückt werden. Ausgewertet wurden jeweils die durchschnittlichen jährlichen Auftrittshäufigkei- ten innerhalb der 30-jährigen Zeiträume für folgende bioklimatischen Kenngrößen:

- Tropennächte, $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$,

- PET-Überschreitungstage, PET > 36 °C (Tage mit starker Wärmebelastung).

3.3.1 METHODIK

Durch die Kombination verschiedener Modellketten und Klimaszenarien, ergeben sich für die Referenzperiode 8 und für die Zukunftsperioden jeweils 18 Ergebnisse pro Rasterzelle (vgl. Kapitel 3.2.2). Damit wird der Wertebereich aller derzeit verwendeter Modelle und Klimaszenarien aufgespannt und über den Median auf einen belastbaren Wert je Periode reduziert (vgl. Kapitel 3.1).

Mit den Ergebnissen können räumliche Aussagen über die absoluten Werte der Kenngrößen getroffen werden (Kapitel 3.3.2f). Zur Ableitung von Planungshinweisen wurden relative Unterschiede im Stadtgebiet dargestellt, um verschieden belastete Bereiche in Abhängigkeit vom regionalen Wertenniveau hervorzuheben (Kapitel 3.3.4). Dafür wurden die Kenngrößen über die z-Transformation standardisiert, sodass verschiedene Parameter miteinander sowie mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichbar sind⁶. Der z-Transformation liegen alle Werte aus der Referenzperiode sowie den Zukunftsperioden zugrunde, um deren Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Diese Werte umfassen eine große Spannweite und weisen eine rechtsschiefe Verteilung auf⁷, sodass die Ergebnisse nach der z-Transformation zwar standardisiert vorliegen, jedoch stark verzerrte Bewertungskategorien bzw. Sprünge zwischen den Klassen nach sich ziehen. Aus diesem Grund wurde die Verteilung vor Durchführung der z-Transformation in eine (annähernd) Normalverteilung überführt⁸.

Die Transformationen wurden für jede Rasterzelle im gesamten Untersuchungsgebiet durchgeführt, wobei die dafür benötigten Berechnungen wie Mittelwert und Standardabweichung auf der jeweiligen Flächenkulisse im Stadtgebiet Heidelberg basieren, d.h. für die PET-Überschreitungstage auf Wohn- und Gewerbegebieten bzw. für Tropennächte auf Wohngebieten. Anschließend wurden die Ergebnisse aus den Rasterdaten auf die einzelnen Nutzungspolygone übertragen (über den jeweiligen Flächenmittelwert).

Die Einteilung der Belastung besteht aus fünf Stufen:

- weder heute noch in Zukunft belastet,
- heute bereits belastet,
- in 2021-2050 belastet,
- in 2041-2070 belastet,
- in 2071-2100 belastet.

Als „in Zukunft belastet“ wurden dabei Flächen mit einer überdurchschnittlichen Belastung angesehen ($z > 0,5$). Da für die Gegenwart keine Informationen aus der Klimamodellierung bekannt sind, erfolgte die Einteilung anhand der Referenzperiode (1971-2000). Um der bis zum heutigen Tage bereits erfolgten Zunahme gerecht zu werden, wurde die Klassengrenze im Vergleich zu den Zukunftsperioden angepasst ($z > 0$).

⁶ Bei der z-Transformation wird von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt. Daraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen festgelegt sind. (Für weitere Informationen zur Methodik der z-Transformation siehe Stadt Heidelberg (2015))

⁷ Der Grund für die (zumeist) rechtsschiefen Verteilungen liegt darin, dass sowohl die Anzahl an PET-Überschreitungstagen als auch an Tropennächten viele Werte gleich Null (bzw. nahe Null) aufweisen, insb. in der Referenzperiode sowie in Abhängigkeit von der Flächennutzung

⁸ Die Transformation erfolgt über $p(\text{transf.}) = p^\lambda$, wobei λ mittels Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmt wird.

3.3.2 TAGSITUATION: AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON TAGEN MIT STARKER WÄRMEBELASTUNG

Die PET ist ein Maß für die Wärme- bzw. Kältebelastung eines Menschen und beschreibt das thermische Empfinden einer „Standardperson“, die eine mittlere thermische Empfindlichkeit repräsentiert (vgl. VDI 2008; Tabelle 3). Aktuelle Klimawerte der Umgebung werden auf ein Raumklima gleicher thermophysiologischer Belastung transferiert. Die PET entspricht der Raumtemperatur, die die gleiche Energiebilanz des Menschen wie die betrachtete Umgebungstemperatur hervorruft. Eingangsparameter sind unter anderem die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und thermophysiologische Strahlung.

Tabelle 3: Bewertungsklassen der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Im Folgenden wird die Anzahl an PET-Überschreitungstagen pro Jahr in den betrachteten Perioden dargestellt (Tage mit starker Wärmebelastung). Zu den für die thermische Belastung am Tage als relevant anzusehenden Aufenthaltsbereichen des Menschen zählen neben den Wohngebieten auch die Arbeitsstelle bzw. Kindergarten/Schule und der Weg dorthin bzw. zu Einkäufen oder Arztbesuchen sowie der Aufenthalt auf Spielplätzen oder Sportflächen, etc.

Das Auftreten von PET-Überschreitungstagen steht in starker Abhängigkeit zur Art der Flächennutzung. So weisen (versiegelte) Freiflächen aufgrund der an Strahlungstagen meist direkten solaren Einstrahlung die höchsten Werte auf⁹ (in der Referenzperiode 1971-2000 im Mittel über 10 Tage pro Jahr auf Verkehrsflächen bzw. Freiland (Abb. 11).

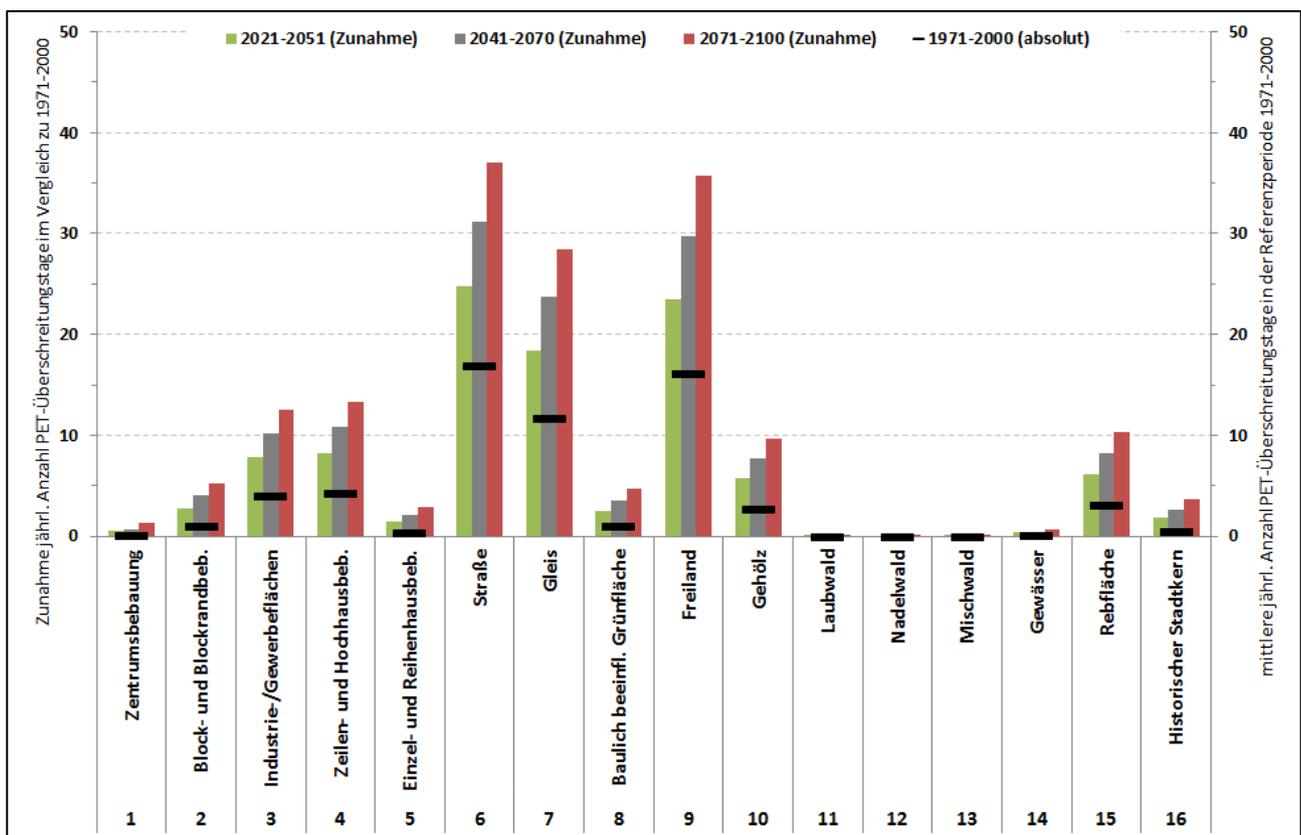


Abbildung 10 Mittlere jährliche Anzahl an PET-Überschreitungstagen in der Referenzperiode und deren Zunahme in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

Entsprechend treten in den Ergebniskarten der Straßenraum¹⁰ sowie die im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes gelegenen landwirtschaftlichen Flächen in den Ergebniskarten deutlich hervor¹¹ (Abbildung 11 bis 15). Auf Grünflächen sind dagegen deutlich geringere Werte zu beobachten, die insb. auf den Schattenwurf durch Bäume und damit reduzierter Einstrahlung zurückzuführen sind. So sind in Waldgebieten keine PET-Überschreitungstage zu verzeichnen (z.B. im östlichen Teil des Stadtgebiets), da der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m über Grund im Stammraum unterhalb des Kronendachs liegt.

⁹ Dem Heidelberger Schloss wurde in der Stadtklimaanalyse eine eigene Flächennutzungskategorie zugewiesen, die hier jedoch aufgrund der zu geringen Fläche für eine Mittelwertbildung bioklimatischen Kenngrößen nicht separat dargestellt wird.

¹⁰ Dabei ist zu berücksichtigen, dass bspw. Verschattungseffekte durch Straßenbäume nicht dargestellt werden, da einzelne Bäume aufgrund der räumlichen Auflösung von 25 m nicht erfasst werden konnten.

¹¹ Die flächenhafte Darstellung erfolgt in einer räumlichen Auflösung von 12,5 m (basierend auf den Ergebnissen des 25 m-Rasters).

Der Verschattungseffekt kann auch durch dichte, vielgeschossige Bebauung erreicht werden, sodass die Zentrumsbebauung oder in den engen Gassen des Historischen Stadtkerns geringe Werte erreicht werden (in der Referenzperiode nahezu kein Auftreten von PET-Überschreitungstagen). Selbiges gilt für eine aufgelockerte Einzel- und Reihenhausbebauung mit erhöhtem Grünanteil, während die Anzahl an PET-Überschreitungstagen in durch eine hohe Versiegelung geprägten Gewerbegebieten sowie offeneren Bauungsstrukturen wie Zeilen- und Hochhausbebauung höher ausfällt (im Mittel ca. 4 Tage pro Jahr in der Referenzperiode). Diese Effekte erklären die Differenzierung an PET-Überschreitungstagen im Siedlungsbereich der Stadt Heidelberg mit geringen Werten bspw. in den Stadtteilen Ziegelhausen oder Teilen Handschuhsheims und den höchsten Werten bspw. in Bergheim und der Bahnstadt.

Durch den Klimawandel steigt die Anzahl an PET-Überschreitungstagen nahezu im gesamten Stadtgebiet bis Ende des Jahrhunderts kontinuierlich an und erreicht ein deutlich höheres Niveau mit im Mittel teilweise über 100 PET-Überschreitungstagen pro Jahr in der langfristigen Zukunftsperiode III (2071 - 2100). Dabei wird deutlich, dass Flächennutzungen, die bereits heute durch ein hohes Wertenniveau gekennzeichnet sind, zusätzlich die stärksten Zunahmen aufweisen, sodass die Intensität überproportional steigt – übertragen auf die Fläche bedeutet dies, dass bereits belastete Bereiche in Zukunft noch stärker belastet sind.

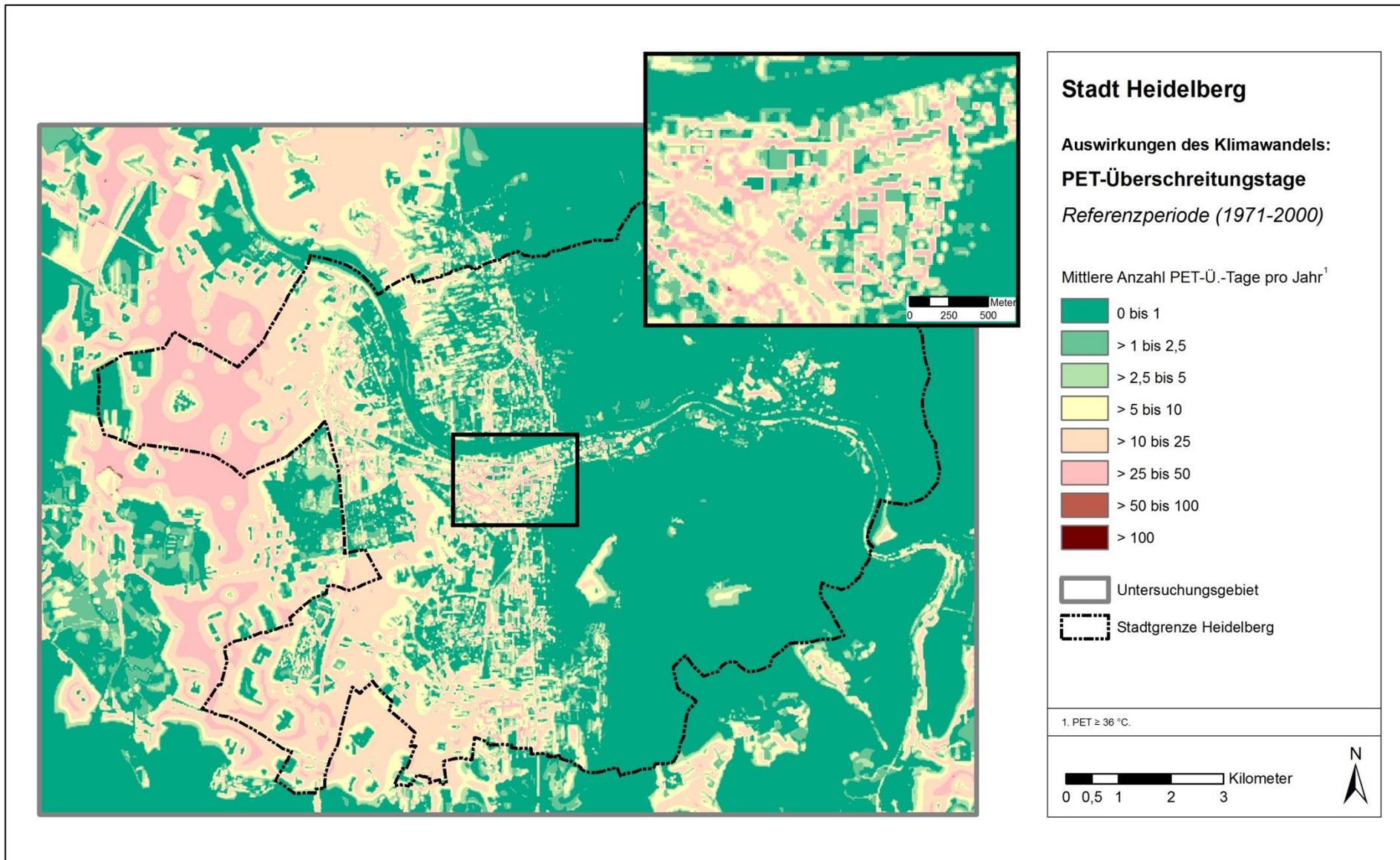


Abbildung 11: Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tagen mit starker Wärmebelastung in der Referenzperiode 1971-2000

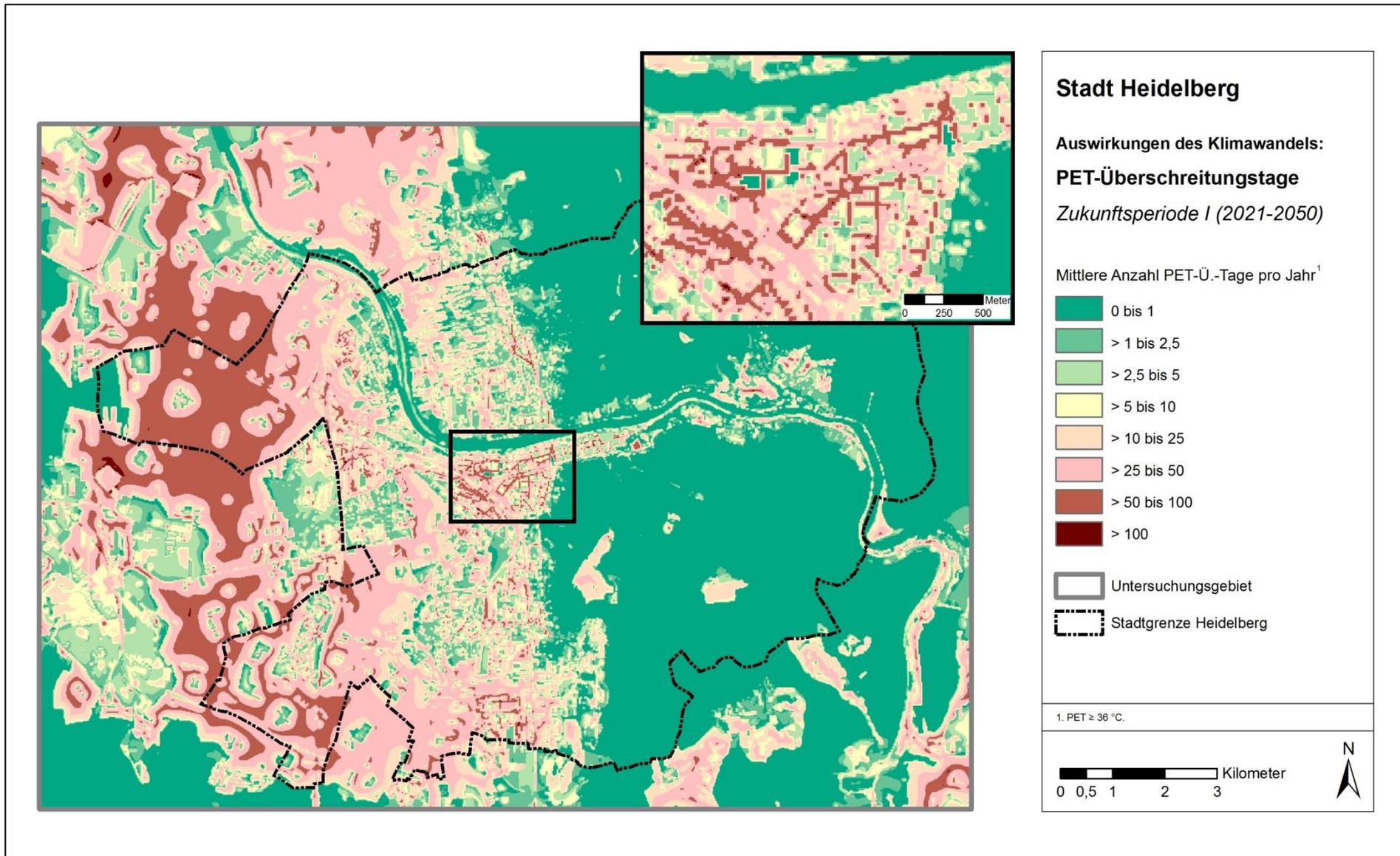


Abbildung 12 Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tagen mit starker Wärmebelastung im Zeitraum 2021-2050

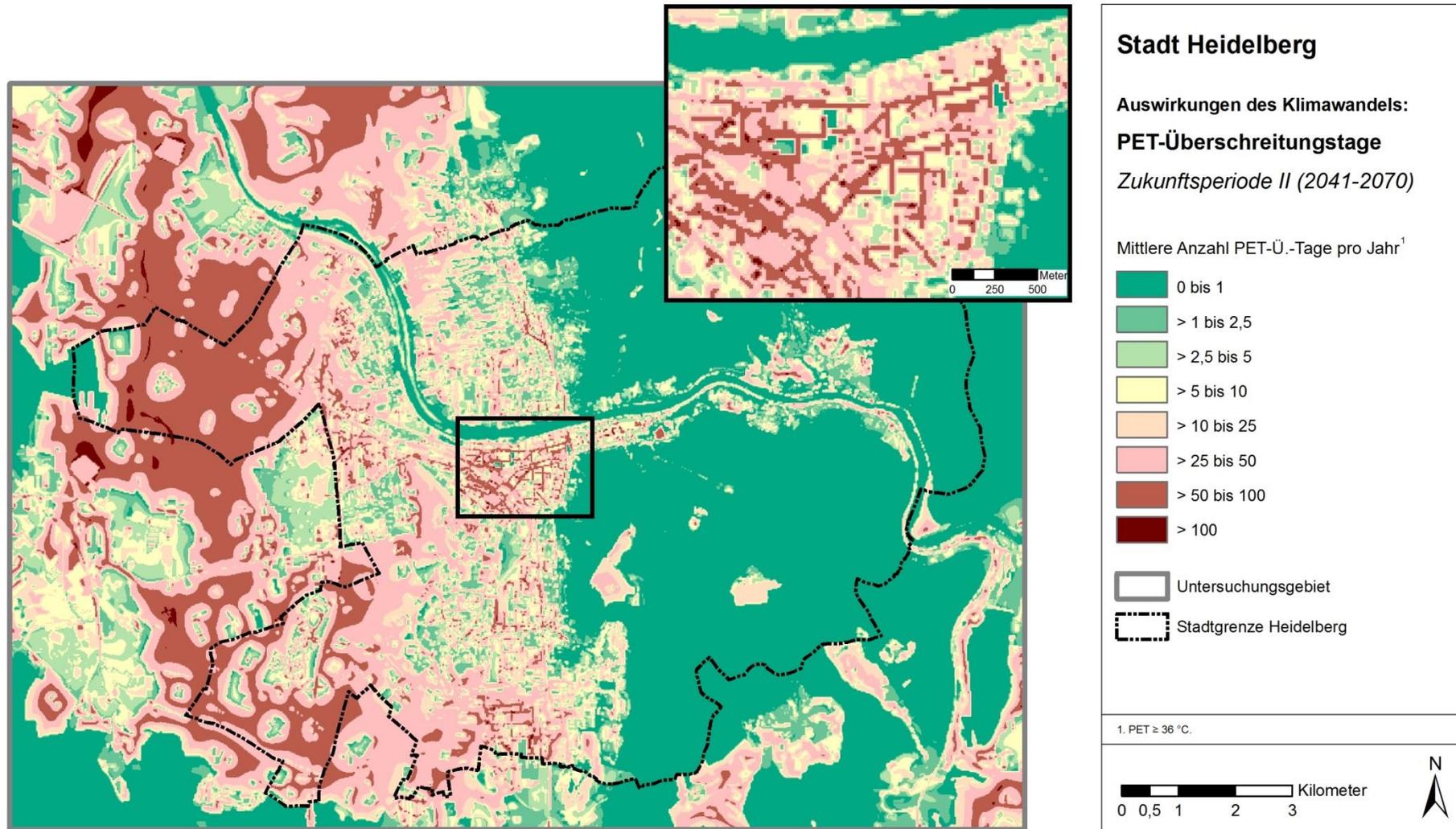


Abbildung 13 Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tagen mit starker Wärmebelastung im Zeitraum 2041-2070

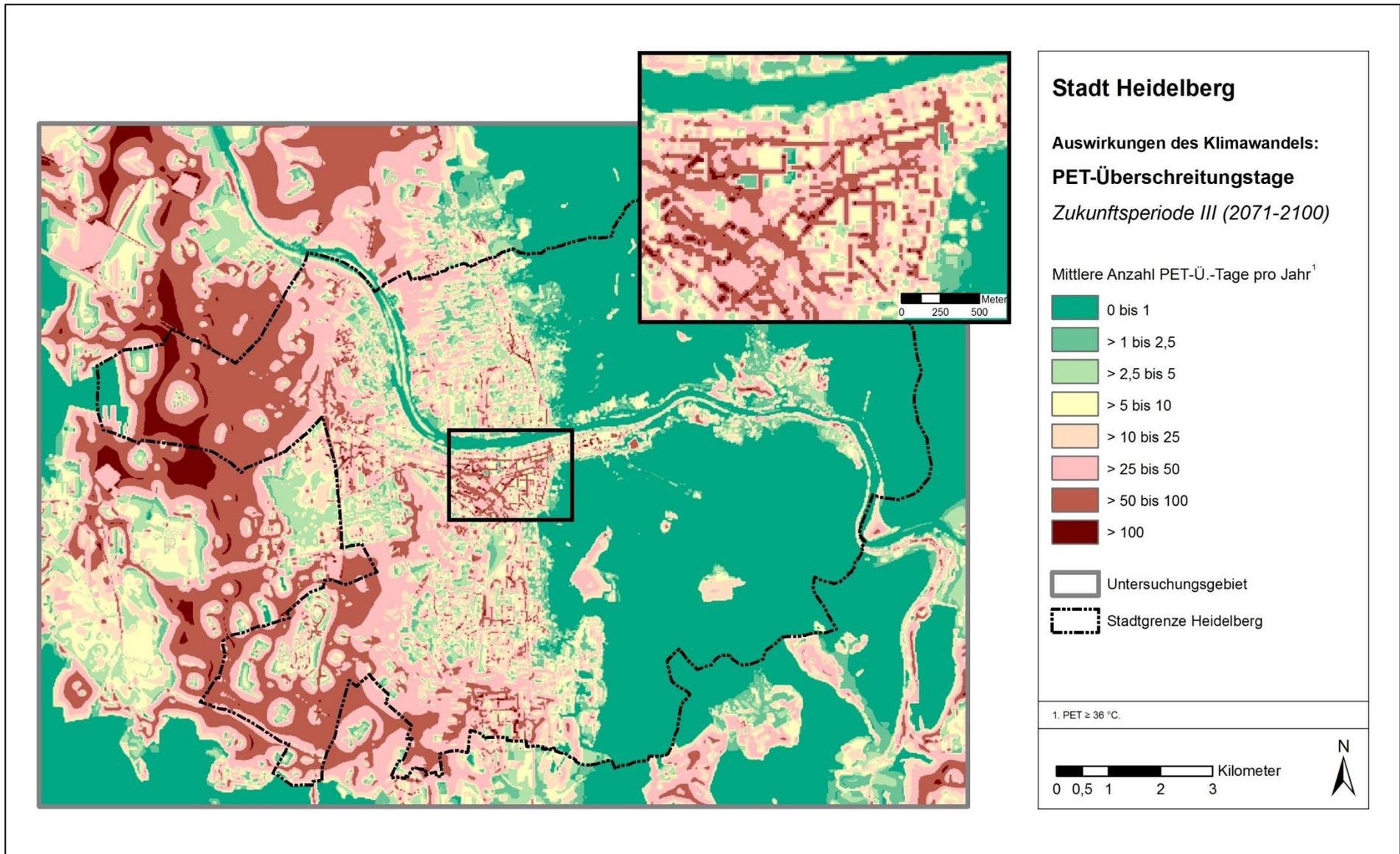


Abbildung 14 Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tagen mit starker Wärmebelastung im Zeitraum 2071-2100

3.3.3 NACHTSITUATION: AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON TROPENNÄCHTEN

Als Tropennacht wird eine Situation bezeichnet, bei der die nächtliche Minimaltemperatur 20 °C nicht unterschreitet. Die für die Bewertung als relevant einzustufenden Flächen sind in erster Linie Siedlungsräume, in denen die nächtliche Überwärmung einen erholsamen Schlaf erschwert und damit insb. für sensible Bevölkerungsgruppen eine gesundheitliche Belastung darstellen kann – zumal die Anpassungskapazität des Menschen auf diese Form der Belastung geringer einzustufen ist als z.B. an Hitzestress am Tage¹².

Auch in Bezug auf das Auftreten von Tropennächten ist eine deutliche Abhängigkeit von der Art der Flächennutzung festzustellen, die jedoch einem anderen Muster als bei den PET-Überschreitungstagen folgt (Abb. 16). So weist die *Zentrumsbebauung* aufgrund ihrer dichten Bebauung, des hohen Gebäudevolumens und hohen Anteils versiegelter Flächen höhere Werte auf als z.B. *Einzel- und Reihenhausbebauung*, die durch eine aufgelockerte Bauweise und erhöhtem Grünanteil gekennzeichnet ist. Verglichen mit Wohngebieten sind Grün- und insbesondere unversiegelte Freiflächen durch deutlich geringere Werte gekennzeichnet, was deren Bedeutung für das Stadtklima unterstreicht, während Wasserflächen nur eine geringe bis keine ausgleichende Funktion bewirken¹³.

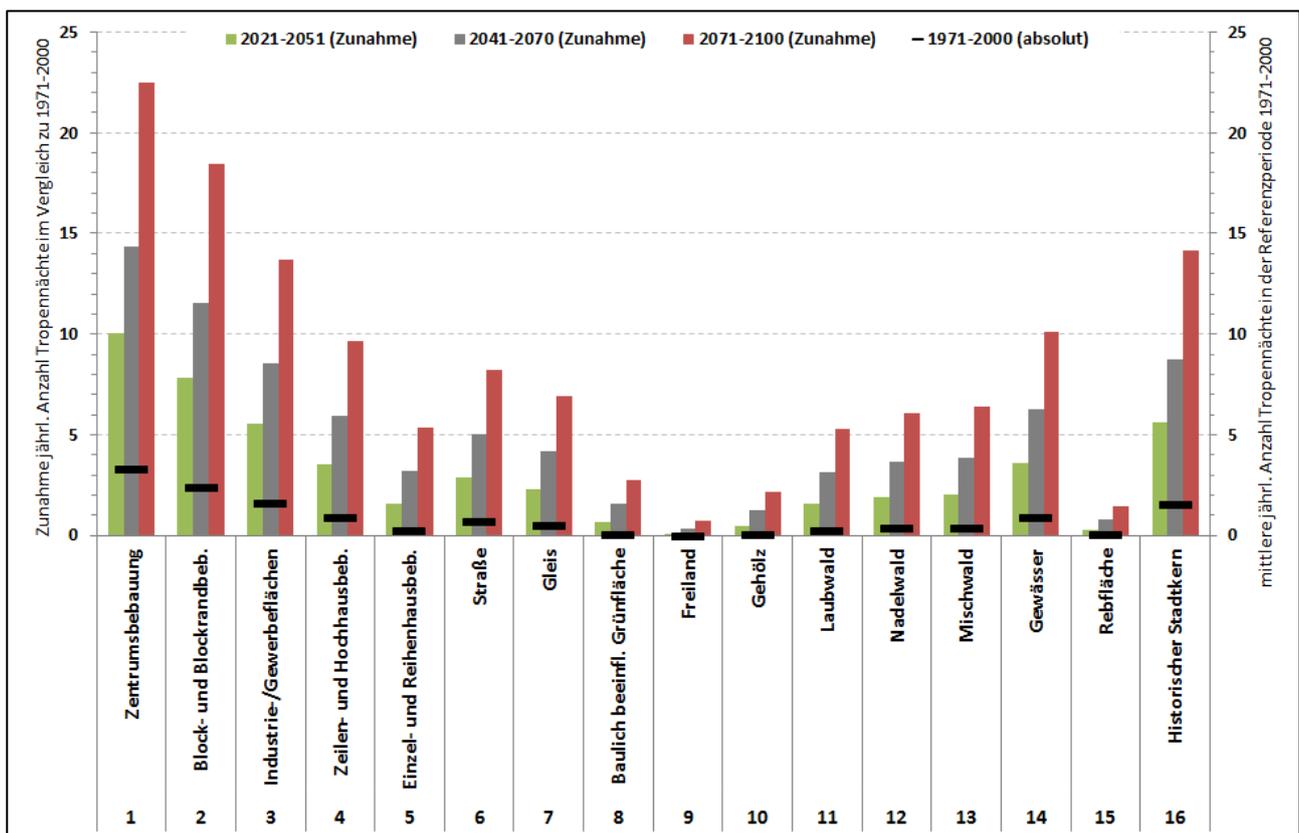


Abbildung 15 Mittlere jährliche Anzahl an Tropennächten in der Referenzperiode und deren Zunahme in den Zukunftsperioden in Abhängigkeit von der Flächennutzung

¹² Für beide bioklimatischen Kenngrößen gilt, dass eine gewisse Anpassung des Menschen daran, was als angenehme bzw. belastende Bedingungen gelten, im Zeitverlauf bis Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist.

¹³ In Wäldern ist in Zukunft dagegen mit einem vermehrten Auftreten von Tropennächten zu rechnen, das sich nicht so deutlich von Wohngebieten abgrenzt wie z.B. unversiegelte Freiflächen. Der Grund dafür ist, dass der Stammraum durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs nicht so stark auskühlt und entsprechend in 2 m über Grund höhere Temperaturen als z.B. über Freiland aufweist.

In der flächenhaften Darstellung der Ergebnisse tritt der Kernbereich mit seiner dichten Bebauung hervor und zeigt bereits in der Referenzperiode ein regelmäßiges Auftreten von Tropennächten (im Mittel 2 - 4 Tropennächte pro Jahr; Abb. 17). Mit steigender Entfernung zum Zentrum sinken die Werte und in den aufgelockerten Randbereichen sind Tropennächte noch die Ausnahme (0 - 1 Tropennächte pro Jahr). Durch den Klimawandel nimmt die Anzahl an Tropennächten im gesamten Stadtgebiet zu, wobei, analog zur Situation am Tage, für bereits belastete Gebiete höhere Zunahmen prognostiziert werden, sodass die Intensität der Belastung in diesen überproportional steigt. Entsprechend weitet sich das regelmäßige Auftreten von Tropennächten auch auf die Randbereiche aus, während im Kerngebiet bis Ende des Jahrhunderts sogar mit über 10, in einigen Bereich über 20 Tropennächten pro Jahr zu rechnen ist (Abb. 18-20).

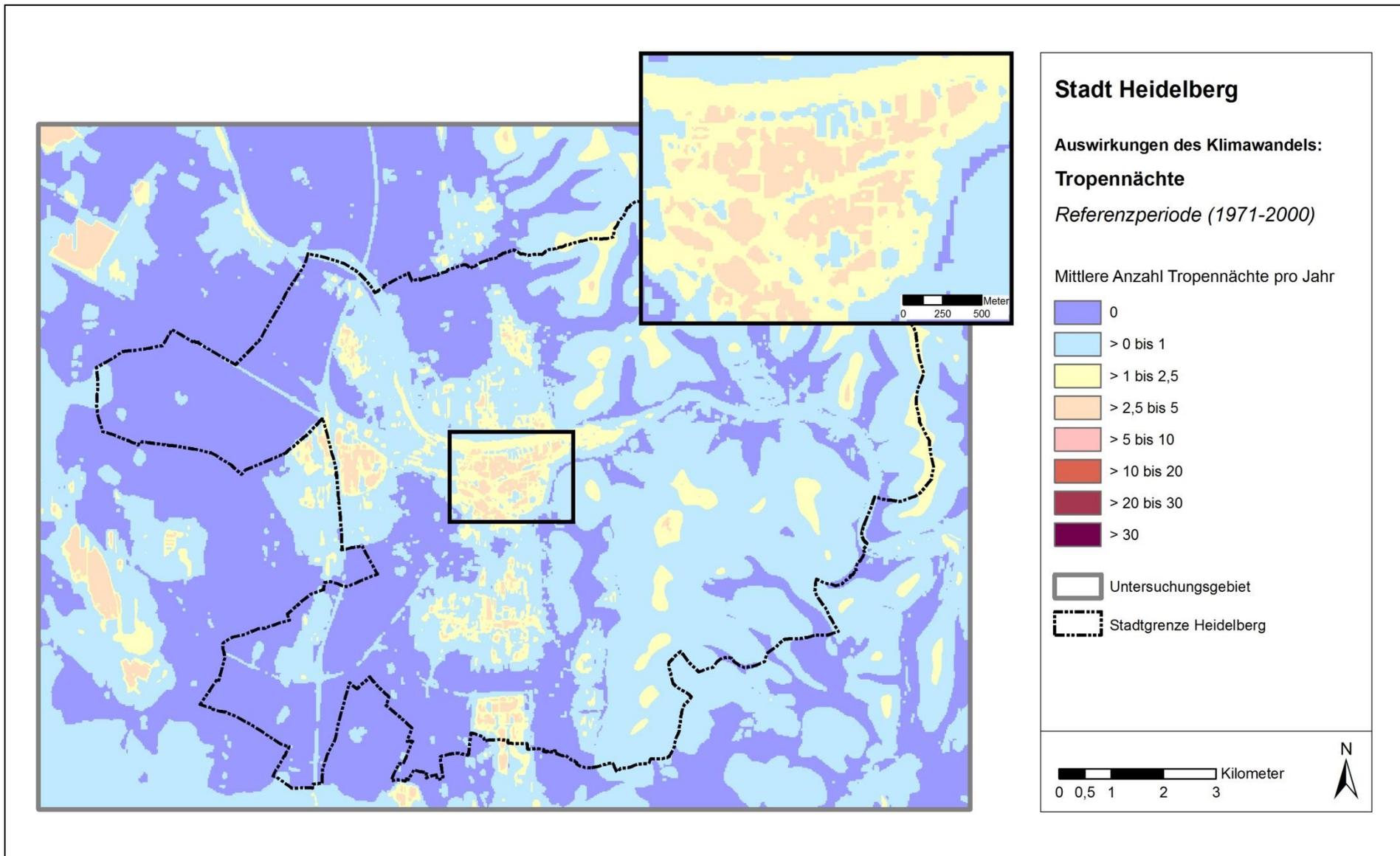


Abbildung 16: Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tropennächten in der Referenzperiode 1971-2000

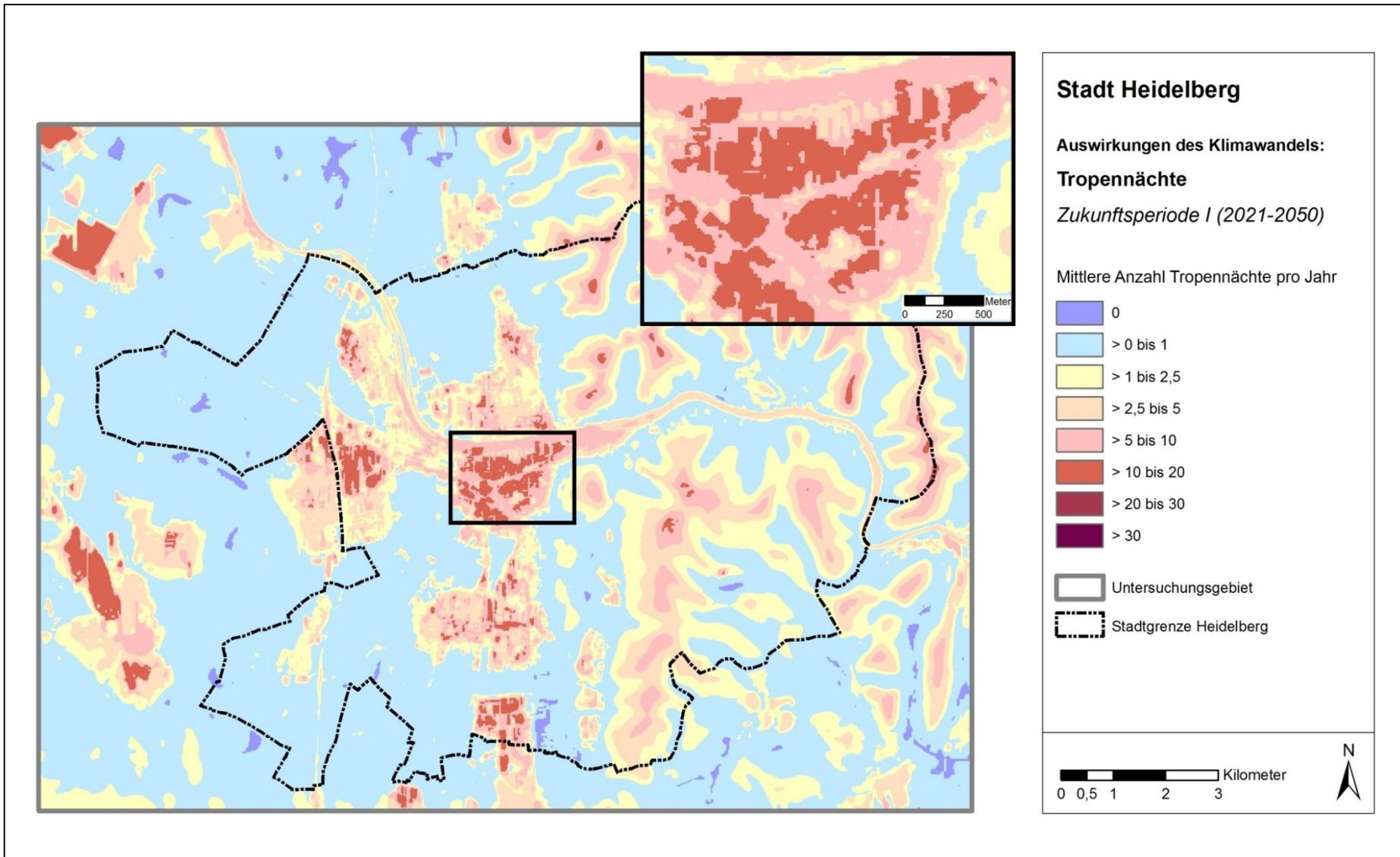


Abbildung 17 :Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tropennächten im Zeitraum 2021-2050

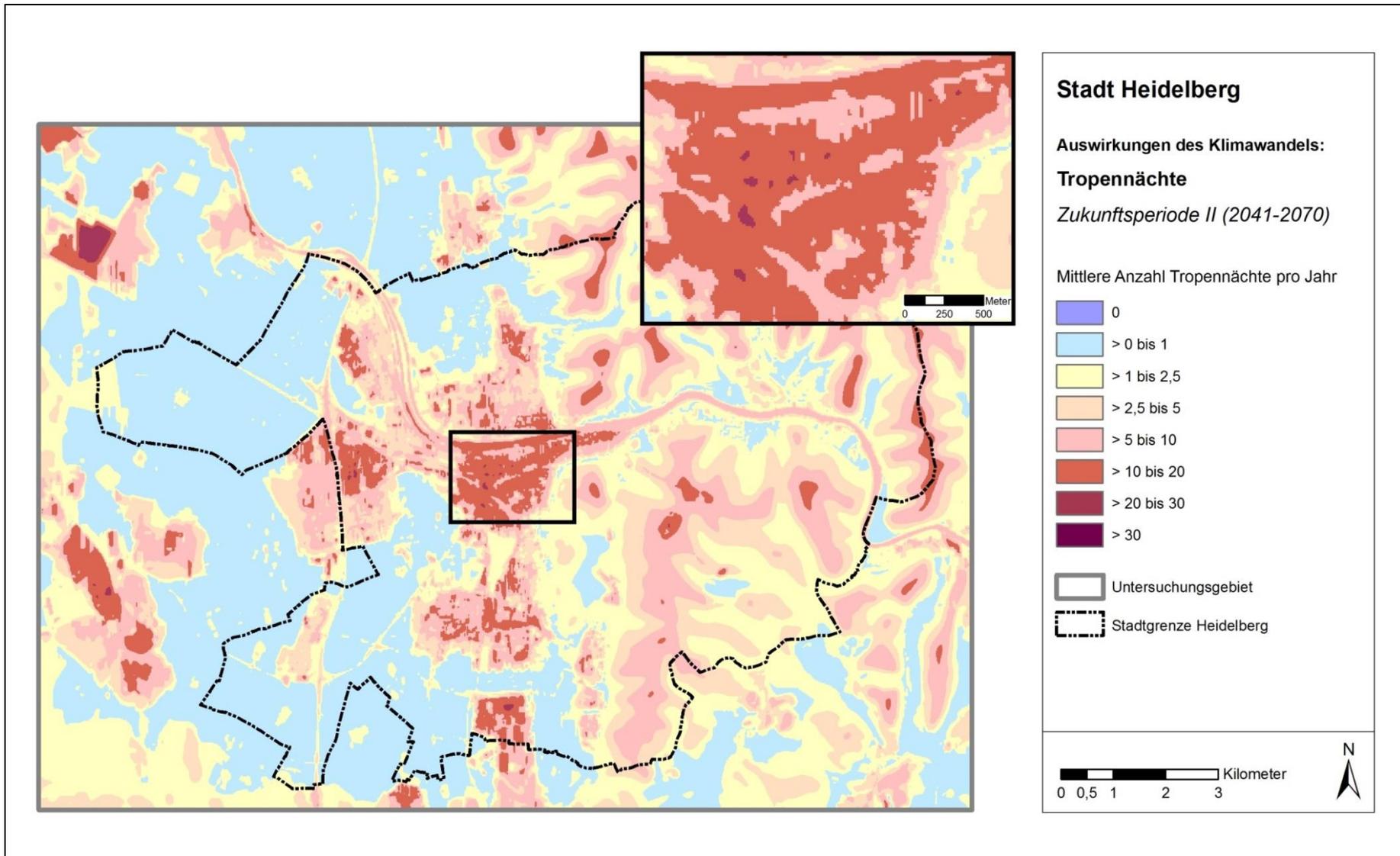


Abbildung 18:D urchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tropennächten im Zeitraum 2041-2070

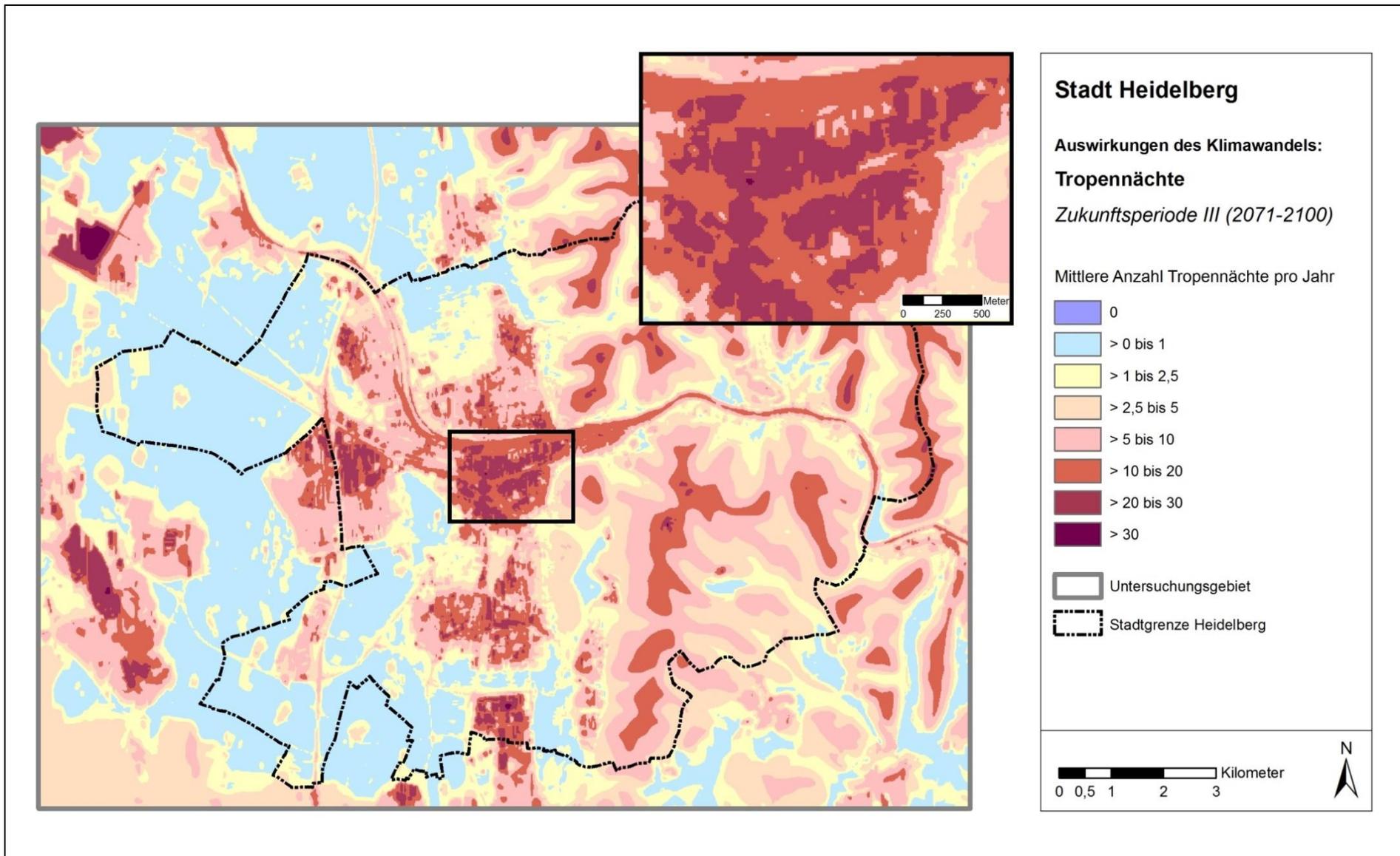


Abbildung 19: Durchschnittliche jährliche Auftrittshäufigkeit von Tropennächten im Zeitraum 2071-2100

3.3.4 WACHSENDE HOT-SPOTS

Die Belastung am Tage im Siedlungsbereich, insbesondere in Wohn- und Gewerbegebieten, wurde anhand der relativen Unterschiede zwischen den Gebieten festgelegt, um besonders belastete Baugebiete hervorzuheben. Als *Heute bereits belastet* gilt $\frac{1}{4}$ der Flächen, durch den Klimawandel steigert sich deren Anteil auf knapp 55 % (Tab. 4). Dabei tritt der Kernbereich hervor, doch ergibt sich kein eindeutiges räumliches Muster, da sich typischerweise besonders stark belastete Gewerbegebiete genauso wie (versiegelte) Freiflächen nicht nur auf den Kernbereich konzentrieren, sondern auf den gesamten Siedlungsbereich verteilt sind (Abbildung 20).

Für die Nachtsituation wird die Belastung in den Baugebieten betrachtet. Heute bereits belastete Gebiete machen zwar nur einen Anteil von ca. 5 % des Siedlungsbereichs aus, umfassen aber nahezu den kompletten Kernbereich als bestehenden Hot-Spot (Abbildung 21). In Zukunft weiten sich die belasteten Flächen annähernd radial aus und reichen teilweise bis in den Randbereich. Bis Ende des Jahrhunderts wird prognostiziert, dass knapp $\frac{2}{3}$ des Siedlungsbereichs als belastet gilt, $\frac{1}{3}$ werden als *Weder heute noch in Zukunft belastet* eingestuft.

Über das Ausmaß der Belastung kann mit dieser Methodik keine Aussage getroffen werden. Die bisher aufgezeigten Ergebnisse verdeutlichen aber, dass in den heute bereits belasteten Gebieten im Zeitverlauf auch die Intensität der Belastung steigt – die Hot-Spots weiten sich also sowohl räumlich im Stadtgebiet als auch in ihrer Intensität aus. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die räumliche Verteilung der relativen Belastung unabhängig von der Zunahme der Intensität der Belastung verläuft¹⁴. Außerdem muss bedacht werden, dass beide Kenngrößen erst nach Überschreitung eines Schwellenwertes relevant werden. Eine zunehmende Belastung ist beiden Kenngrößen gemein, ob damit letztlich ein Überschreiten des Schwellenwertes verbunden ist, hängt jedoch auch vom Ausgangswert in der Gegenwart bzw. Referenzperiode ab.

Für die Ableitung von Betroffenheiten und Maßnahmen sind die relativen Änderungen der Kenngrößen und die im Vergleich zum übrigen Stadtgebiet auftretenden besonders belasteten Gebiete relevanter als die absoluten Werte¹⁵. Grundsätzlich gilt, dass verschiedene bauliche Nutzungen bzw. Stadtstrukturen am Tage und in der Nacht unterschiedlich stark belastet sind, was bei Maßnahmen berücksichtigt werden sollte. Anpassungsmaßnahmen an die nächtliche Belastung sollten zum einen auf die (sich in Zukunft ausdehnenden) besonders belasteten Bereiche zielen. Zum anderen darf nicht vergessen werden, dass nachts nahezu das gesamte Stadtgebiet als Aufenthaltsbereich des Menschen mit seinem Bedürfnis nach erholsamen Schlaf angesehen werden muss. Demgegenüber sind die Aufenthaltsbereiche des Menschen am Tage klarer definiert, sodass Anpassungsmaßnahmen gezielter verortet werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits heute ein gewichtiger Teil des Stadtgebiets von einer starken Wärmebelastung betroffen ist und somit Bedarf an geeigneten Maßnahmen besteht.

¹⁴ Dies soll am Beispiel der PET-Überschreitungstage erläutert werden: Die Wärmebelastung am Tage nimmt durch den Klimawandel zwar zu, doch weisen die Zunahmen eine ähnliche räumliche Verteilung wie die heutige Situation auf. Folglich ändert sich das Muster der im mittleren Vergleich zum gesamten Stadtgebiet stärker belasteten Gebiete nur geringfügig.

¹⁵ Auch vor dem Hintergrund, dass diese über den Median auf einen belastbaren Wert reduziert wurden, insgesamt die Spannweite der prognostizierten Werte jedoch recht groß ist.

Tabelle 4: Anteil der durch den Klimawandel belasteten Siedlungs-/Gewerbeflächen.

Belastungsklasse	Anteil belasteter Fläche (aggregiert)	
	PET-Überschreitungstage (Wohn- und Gewerbegebiete)	Tropennächte (Wohngebiete)
1 = Weder heute noch in Zukunft belastet	45.4%	36.4%
2 = Heute bereits belastet	25.5%	5.1%
3 = In 2021-2050 belastet	37.2%	21.1%
4 = In 2041-2070 belastet	46.5%	45.3%
5 = In 2071-2100 belastet	54.6%	63.6%

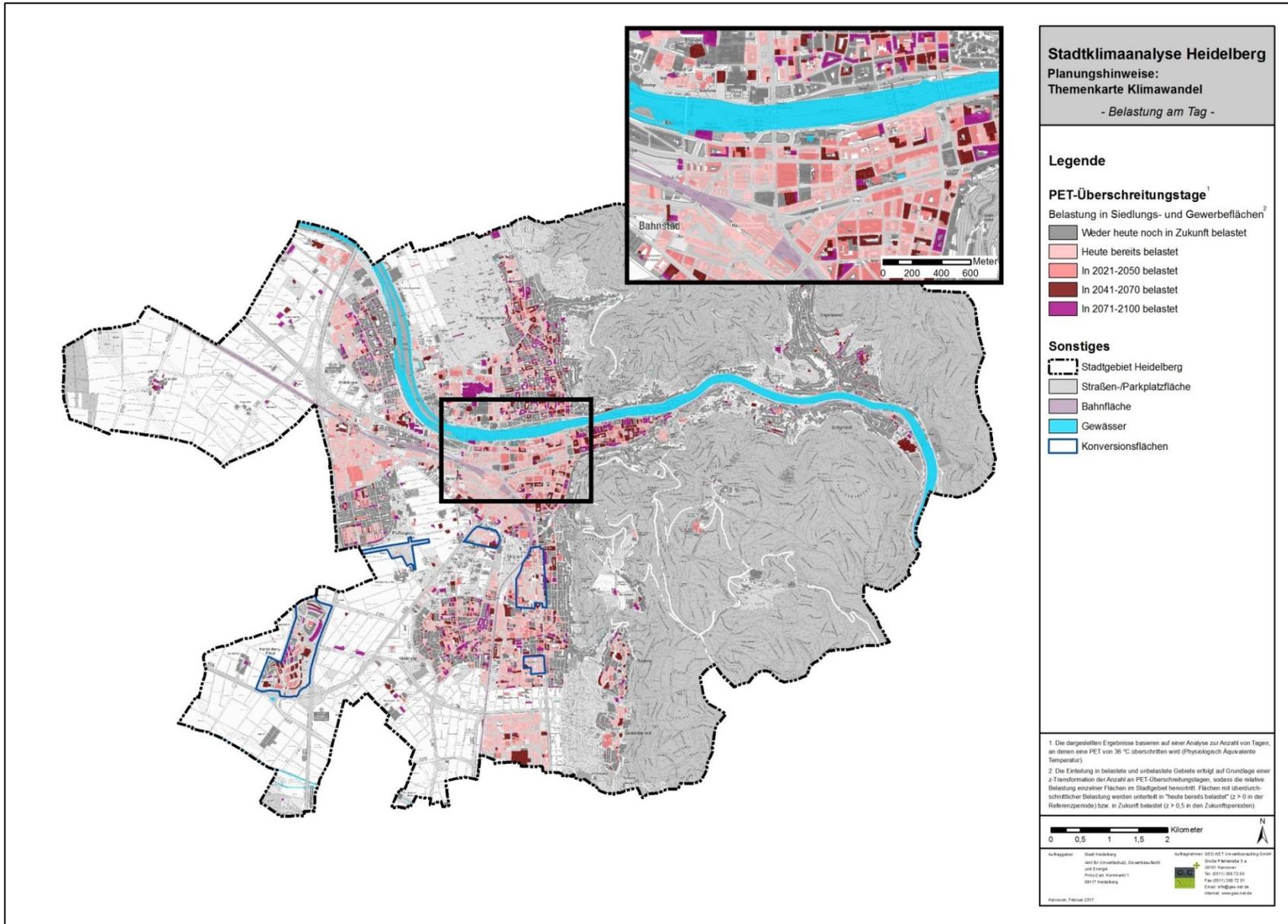


Abbildung 20: Planungshinweise Themenkarte Klimawandel: Belastung am Tag (PET-Überschreitungstage)

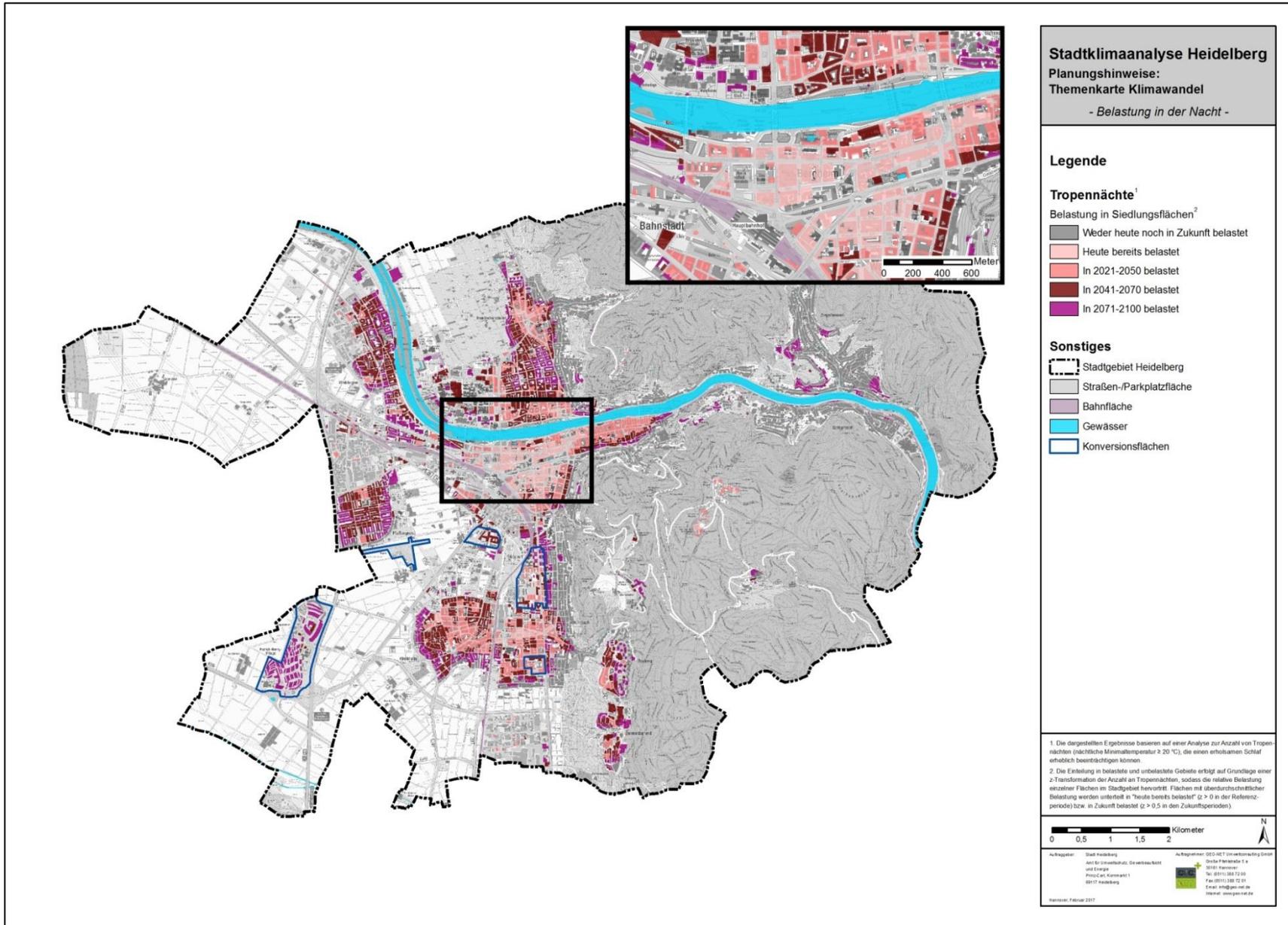


Abbildung 21: Planungshinweise Themenkarte Klimawandel: Belastung in der Nacht (Tropennächte)

3.4 BEZUG ZUR ZUKÜNFTIGEN ENTWICKLUNG DES KLIMAS IN BADEN-WÜRTTEMBERG

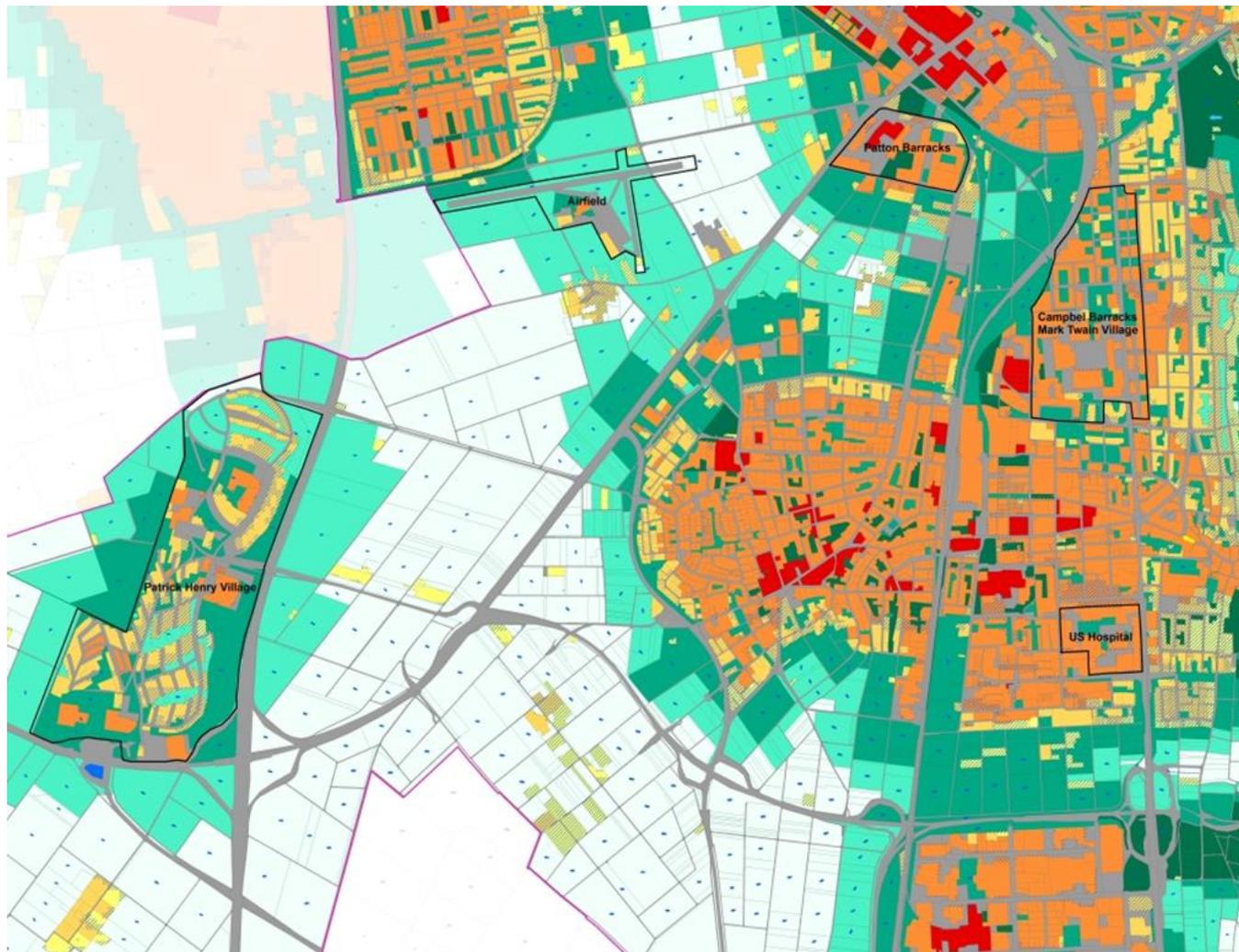
Der in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 dargestellte Ansatz ist - mit geringfügigen methodischen Einschränkungen - unmittelbar an die für Baden-Württemberg durch die LUBW veröffentlichten Daten anschlussfähig (LUBW 2015 und UMBW 2015). Beide Vorgehensweisen beruhen auf dem Ensemble-Ansatz, stützen ihre Aussagen zu weiten Teilen auf den Ergebnissen für das 50. Perzentil und betrachten (u.a.) dieselben Zeiträume (2021-2050, 2071-2100). In dem der hier verwendete Ansatz das Ensemble auf alle durch die EuroCordex-Gruppe regionalisierten RCP-Szenarien bezieht, geht er zwar über die für ganz Baden-Württemberg gewählte Vorgehensweise hinaus (Ensemble für das SRES-Szenario A1B). Entscheidend ist hierbei jedoch, dass die Ergebnisse den Aussagen der Baden-Württembergischen Anpassungsstrategie in keiner Weise widersprechen. Vielmehr konkretisiert das Forschungsvorhaben die räumlich gröberen Aussagen für den urbanen Raum auf der Basis aktualisierter regionaler Klimaprojektionen/-modellierungen. Die deutlichen Zunahmen in der Auftrittshäufigkeit der relevanten Klimakenngrößen (Tropennächte, Sommer- bzw. Heiße Tage) werden durch das vorliegende Projekt eindeutig bestätigt. Zwar weichen die absoluten Änderungen in den betrachteten Zeiträumen moderat voneinander ab. Allerdings können die Größenordnungen für stadtplanerische Prozesse vernachlässigt werden, bei denen die grundsätzliche Entwicklungsrichtung aufgrund fehlender Grenz- und Richtwerte gegenwärtig noch entscheidender ist, als die tatsächlichen quantitativen Werte.

4 Die Heidelberger Konversionsflächen und ihre Bedeutung für das Stadt- und Lokalklima

Im Jahre 2014 hat die US Army alle fünf Militärgelände Heidelberger Stadtgebiet geräumt. Sie hinterließ ungefähr 2.350 Wohnung, soziale und kulturelle Einrichtungen wie Kindergärten und Schulen, sowie Kasernen-, Bürogebäude und Hallen. Die freigewordenen Flächen (etwa 180 Hektar, doppelt so groß wie die Fläche der Altstadt) gingen in das Eigentum der Bundesrepublik Deutschland über. Die zuständige Behörde für die Verwertung und Verwaltung der Flächen ist die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA). Sie hat den gesetzlichen Auftrag, die Konversionsflächen zu vermarkten.

Die Stadt Heidelberg beabsichtigt, die Flächen zu erwerben, aber nicht vollständig im Eigentum zu halten, sondern sie an geeignete Interessenten weiter zu veräußern. Ziel ist es auf diesem Gelände preiswerten Wohnraum zu schaffen. Außerdem sollen Angebote für Wissenschaft, Forschung, Gewerbe und Kultur gemacht werden sowie hochwertige Freizeit- und Erholungsflächen entstehen.

Die Flächen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe, Lage sowie gemäß ihrer ursprünglichen Nutzung auch im Verhältnis zwischen bebauten und unbebauten Anteilen z.T. sehr deutlich. Hieraus resultieren sowohl divergierende stadtklimatische Belastungsniveaus als Bedeutungen für den Heidelberger Kalt- bzw. Frischlufthaushalt (Tabelle 5).



Ausgleichsräume

Grün- und Freiflächen

- Geringe bioklimatische Bedeutung
- Mittlere bioklimatische Bedeutung
- Hohe bioklimatische Bedeutung
- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung

Wirkungsräume

Siedlungsräume

- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Weniger günstige bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation

- Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung

Luftaustausch

Hauptströmungsrichtung der Flurwinde in den Grün- und Freiflächen

Volumenstrom

- gering
- mäßig
- hoch
- sehr hoch

Leitbahnen

- lokaler Kaltluftabflussbereich
Strömung, die kaum Auswirkungen auf Siedlungsbereiche hat
- Kaltluftleitbahn
- Straßenzug mit Leitbahnfunktion im Innenstadtbereich bzw. in hangnahen Zonen

- Konversionsflächen

Abbildung 22: Die Lage der Konversionsflächen innerhalb der Planungshinweiskarte der Stadt Heidelberg

Tabelle 5: Stadtklimatisch relevante Kennwerte für die Heidelberger Konversionsflächen

Konversionsfläche	Lage (Stadtteil)	Größe	Nutzungskennwerte	Stadtklimatisches Belastungsniveau der Siedlungsräume	Stadtklimatische Bedeutung der Grünflächen
Patrick Henry Village	Kirchheim	97,2 ha	Bebaut: 27,7 ha Unbebaut: 69,5 ha Gebäude: 448	Günstige bis weniger günstige bioklimatische Situation	Hohe bioklimatische Bedeutung der großflächigen Grünflächen
Airfield	Kirchheim	15,6 ha	Bebaut: 1,8 ha unbebaut: 13,8 ha Gebäude: 14	Günstige bis weniger günstige bioklimatische Situation	Mittlere bioklimatische Bedeutung
Patton Barracks	Kirchheim	14,8 ha	Bebaut: 4,9ha unbebaut: 9,9 ha Gebäude: 29	Überwiegend weniger günstige bis ungünstige bioklimatische Situation	Hohe bis sehr hohe bioklimatische Bedeutung der wenigen Grünflächen
Campbell Barracks / Mark Twain Village	Südstadt	43,4 ha	bebaut: 8,5 ha Unbebaut: 34,9 ha Gebäude: 150	Überwiegend weniger günstige bioklimatische Situation	Hohe bioklimatische Bedeutung
US Hospital	Rohrbach	9,3 ha	Bebaut: 1,8 ha unbebaut: 7,5 ha Gebäude: 26	Weniger günstige bioklimatische Situation	Hohe bioklimatische Bedeutung der einzigen Grünfläche

5 Vertiefungsgebiet US Hospital

5.1 STAND DER KONVERSION - PLANERISCHE GRUNDLAGEN DER UNTERSUCHUNGEN

Das Gebiet der Konversionsfläche US Hospital ist ca. 9 Hektar groß und liegt in Rohrbach, einem Stadtteil in Heidelbergs Süden. Das Quartier ist über die B3 (Karlsruher Straße) an den Stadtbereich angeschlossen und mit zwei Straßenbahnhaltestellen und drei Bushaltestellen ist das Gebiet gut an den ÖPNV angebunden.

In den 30er Jahren wurde dieser Bereich als Nachrichtenkasernen der Wehrmacht genutzt. Nach dem Krieg wurde das Areal vom US-Militär in ein Krankenhausgelände umgenutzt, um die medizinische und zahnärztliche Versorgung der Militärangehörigen und ihrer Familien zu sichern. Ebenfalls sind hier Büro- und Lagerbauten, ein Theater und eine Sporthalle errichtet worden. Letztere stehen unter Denkmalschutz. Anders als in den umliegenden Bereichen, ist die Bebauung aufgelockert und macht nur 20 Prozent (1,8 Hektar) der Gesamtfläche aus. Zu den unbebauten Flächen gehören überwiegend versiegelte Parkplätze und eine größere Rasenfläche mit einem Hubschrauber-Landeplatz.



Abbildung 23: Die Konversionsfläche US Hospital im Luftbild (Bild: Stadt Heidelberg)

Der Rahmenplan sieht einen umfangreichen Umbau des Gebiets US-Hospital vor. Nur wenige Bestandsgebäude bleiben erhalten und viele neue Gebäude sollen dazu kommen, sodass es sich insgesamt eine höhere Baudichte ergibt. Im zugrunde gelegten Planungsstadium sind etwa 600 Wohnungen, ein rund 7.700 m² großer Park sowie Flächen für Gewerbe und Bildungseinrichtungen vorgesehen. Zudem ist für die zwei denkmalgeschützten Gebäude im Osten des Areals eine öffentliche Nutzung angedacht. Zentraler Ansatz der Planungen ist eine Vernetzung des ehemaligen Militärgeländes mit den umliegenden Stadtvierteln Rohrbach-Ost und Hasenleiser. Dies soll insbesondere über die Gestaltung der drei Quartierseingänge im Westen, Süden und Osten sichergestellt werden.



Abbildung 24 US-Hospital, Städtebaulicher Entwurf, Stand Oktober 2016, Architekt: Mathias Hähnig und Martin Gemmeke, Freiraum: Stefan Fromm, Ausrichtung nach Norden

Um den Rahmenplan klimaökologisch zu bewerten bzw. nach Möglichkeit entsprechend aufzuwerten wurde eine vertiefende Analyse mittels klimatologischer Messungen und mikroskaliger Modellierung vorgenommen. Während die Messkampagne den bioklimatischen Ist-Zustand abbildet und als Referenz für das Modell dient, werden durch die modellgestützten Simulationen zwei Planszenarien in ihrer klimatischen Wirkung bewertet und miteinander verglichen.

5.2 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

5.2.1 MESSKAMPAGNE

Im Rahmen des Stadtklimagutachtens Heidelberg 1995 wurden zwischen 1989 und 1992 von der Arbeitsgemeinschaft Geografisches Institut der Universität Heidelberg und ÖKOPLANA im Auftrag der Stadt Heidelberg mehrere netzförmig angelegte Lufttemperaturmessfahrten durchgeführt. Die Konversionsfläche US-Hospital war zu den damaligen Messfahrtterminen nicht zugänglich. Um diesen „weißen Fleck“ zu schließen und abgesicherte Klimadaten als Grundlage für Verifizierung der Modellrechnungen zu erhalten, wurden im Laufe der Sommermonate 2016 in sommerlichen Strahlungstagen/-nächten Lufttemperaturmessfahrten und Messgänge (Lufttemperatur, Oberflächenstrahlungstemperaturen, Windfeld) durchgeführt.

Als weitere Grundlage der Messkampagne wurden drei stationäre Klimamessstationen eingerichtet (Abbildung 25). Sie erfassen im Zeitraum 06.04. – 14.09.2016 kontinuierlich die Klimaparameter Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

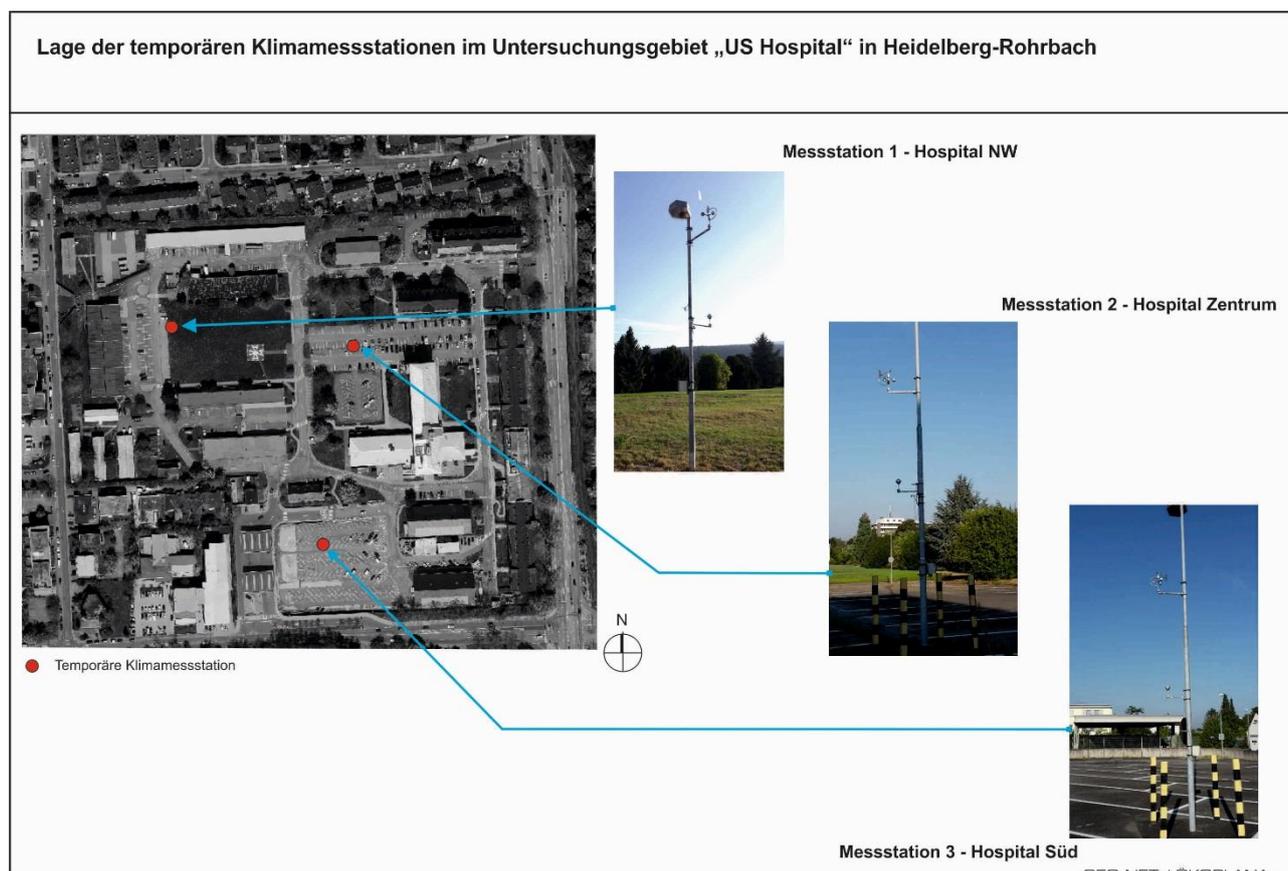


Abbildung 25 Lage der temporären Klimamessstationen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ in Heidelberg-Rohrbach

Mit Hilfe der netzförmig angelegten Messfahrten wurden im Bereich der Konversionsfläche sowie in dessen Umfeld die ortsspezifischen Lufttemperaturverhältnisse erfasst. Die Messfahrten wurden mit zwei Messfahrzeugen durchgeführt, die mit einem ventilierten Psychrometer der Fa. Ahlborn ausgestattet waren. Entlang festgelegter Routen wurden kontinuierlich die Lufttemperaturwerte aufgezeichnet.

Einen zweiten Baustein der Messkampagne bildeten Messgänge auf dem Hospital-Gelände. Mit Hilfe von tragbaren Messgeräten zur Erfassung der Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit (Psychrometer), der Windgeschwindigkeit (Hitzdrahtanemometer) und Oberflächenstrahlungstemperaturen (IR-Thermometer) unterschiedlicher Bodenbeläge und Hauswände wurden die zur Bestimmung humanbiometeorologischer Indizes notwendigen Klimaparameter gemessen (Abbildung 26). Die Messungen dienten u.a. der Überprüfung der Modellergebnisse und sollen im Rahmen des Monitoringprozesses wiederholt werden. Die Ergebnisdokumentation erfolgte in Form von textlich erläuterten Diagrammen und Fotoaufnahmen.



Abbildung 26 Messgeräte im Rahmen der mobilen Messungen

5.2.2 MODELLIERUNGEN ZUR THERMISCHEN BELASTUNGSSITUATION

Für die Darstellung der humanbioklimatischen Situation im Gebiet wurde ein hochaufgelöstes Modell AS-MUS_Green (Ausbreitungs- und Strömungsmodell für urbane Strukturen) gewählt (Groß G., 2012 und Günther R., 2014). Es basiert auf der Navier-Stokes-Gleichung, der Kontinuitätsgleichung, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik als auch der Gleichung für spezifische Luftfeuchtigkeit. Mit dem Modell werden die dreidimensionale Umströmung der Gebäude und der Vegetation als auch die Lufttemperatur und die thermische Behaglichkeit berechnet.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Tagesgang der genannten Parameter während einer sommerlichen autochthonen Wetterlage simuliert. Somit konnten die lokalen Feuchte- und Temperaturunterschiede als auch deren Einfluss auf die lokale Luftströmung gut abgebildet werden. Für die Darstellung der nächtlichen klimatischen Situation wurde der Zeitpunkt 04:00 Uhr und für die Situation am Tag 14:00 Uhr gewählt. In beiden Fällen handelte es sich um das Niveau in 2 m Höhe, also dort, wo sich die Menschen in der Regel

draußen aufhalten. Die nächtliche östliche Anströmung aus der gesamtstädtischen Modellierung mit FIT-NAH wurde als Antrieb für die Modellierung des Windfeldes mit ASMUS übernommen.

Für die Simulationen wurden die Gebäude-, Vegetations-, und Versiegelungsinformationen in ein Raster mit einer Auflösung von 4 m x 4 m überführt. Als Eingangsdaten für den Ist-Zustand dienten der Gebäude-Shape, das digitale Geländemodell und die Laserscandaten zur Ableitung der Gebäudehöhe als auch die Luftbilder zur Ableitung der Vegetationsstruktur. Der Plan-Zustand wurde anhand der Pläne des Büros Häh-nig – Gämmeke Freie Architekten und Stefan Fromm Landschaftsarchitekten und in enger Abstimmung mit den beiden Büros für die Modellierung aufbereitet.

Es wurden vier Fälle simuliert:

- Ist-Zustand, der die aktuelle Situation vor Ort abbildet;
- Planzustand anhand des Rahmenplans der Konversionsfläche (Stand Dezember 2016), der die geplante Bebauungs- und Vegetationsstruktur mit dem geplanten Teich im Park und der Fontäne im Süden des Gebietes berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.1). Jedes neue Gebäude erhält laut Planern eine extensive Dachbegrünung;
- Optionsplan, der die noch offenen Optionen der Architekten berücksichtigt. Dazu gehören die blau-grünen Dächer auf den Gebäuden der beiden Höfe südlich des Parks und eine Fassadenbegrünung am Parkhauses im Süden des Gebietes;
- Plan „Null“, der eine Bebauungsvariante, wie im Plan darstellt, mit dem Unterschied, dass die Dachbegrünung, der Teich im Park und die Fontäne entfallen. Die Simulation des Plans „Null“ dient dem Vergleich mit dem Plan und dem Optionsplan, um die Wirkung der Wasser- und Begrünungsmaßnahmen aufzuzeigen.

Die Nutzungsstruktur des Untersuchungsgebietes im Ist-Zustand, die aus dem Luftbild abgeleitet wurde, ließ sich in 6 Klassen einteilen (Abbildung 27):

- Gebäude,
- Höhere Vegetation (Bäume, Sträucher),
- Rasen,
- Wasser,
- Straße (100% versiegelt),
- Teilversiegelte Oberflächen (angenommener Versiegelungsgrad 50%).

Jede 4m x 4m Gitterzelle erhielt eine Information über die Nutzungsklasse. Zusätzlich fanden die Gebäude- und Vegetationshöhen Eingang in das Modell. Während die Gebäudehöhen aus den Laserscandaten abgeleitet werden konnten, war die aktuelle Vegetation nicht deckungsgleich mit den Punkten aus den Laserscandaten. So mussten (nach Absprache mit dem Auftraggeber) die Baumhöhen aus den Luftbildern, mithilfe der bekannten Gebäudehöhen abgeschätzt werden. Bei Sträuchern wurde eine einheitliche Höhe von 2 m angenommen.

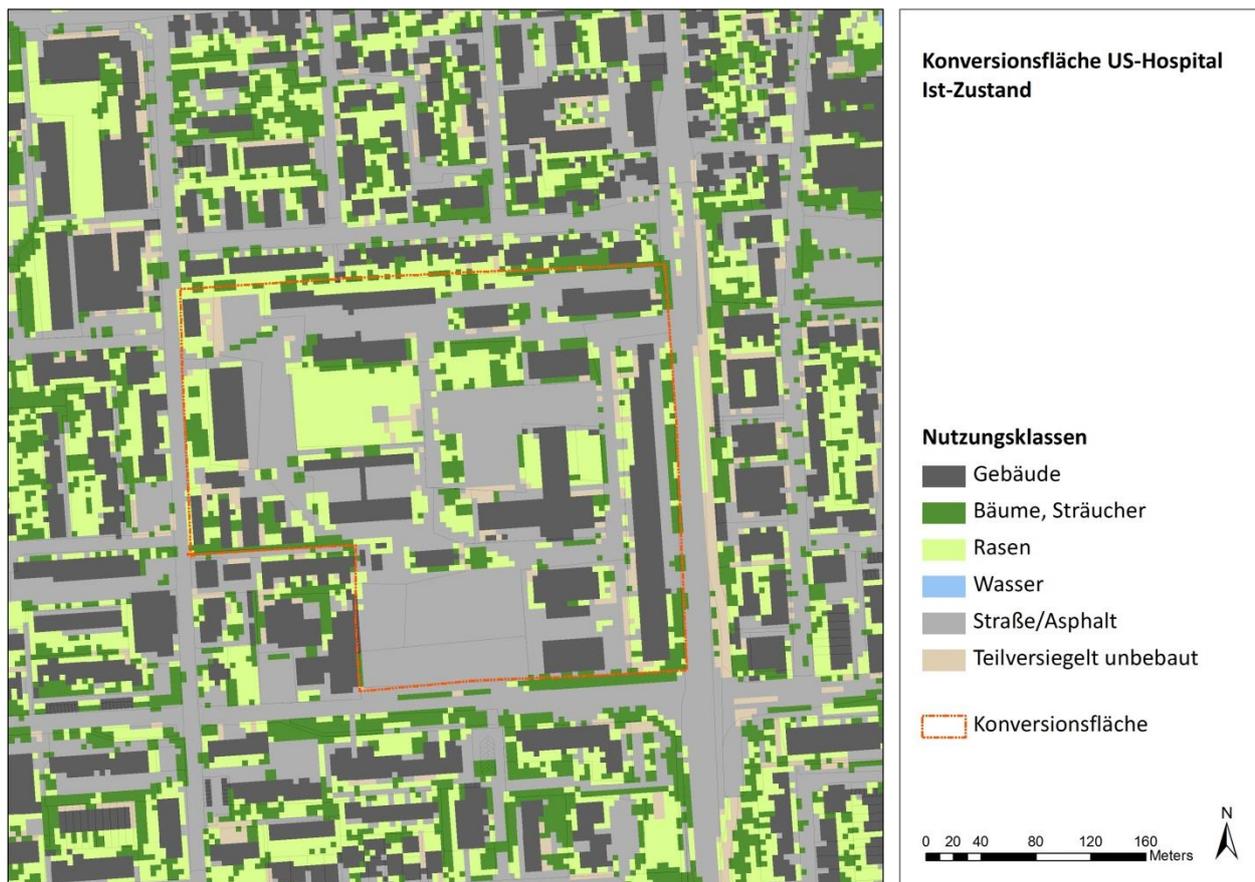


Abbildung 27 Nutzungsclassen im Ist-Zustand (Auflösung 4 m x 4 m)

Der Rahmenplan sieht einen umfangreichen Umbau des Gebiets US-Hospital vor. Nur wenige Bestandsgebäude bleiben erhalten, viele neue Gebäude kommen dazu, sodass es sich insgesamt eine höhere Baudichte ergibt (Abbildung 28). Das lange Gebäudekomplex entlang der Karlsruher Straße soll geteilt und eine Öffnung des Gebietes nach Osten hin geschaffen werden. Eine besondere bioklimatische Rolle nimmt der geplante Park ein. Mit seinem Teich, einer offenen Rasenfläche und Schattenbereichen unter den Bäumen, bietet er eine mikroklimatische Vielfalt auf kleinem Raum.

Während die Gebäudehöhe genau definiert wird, sollte für die Bäume im Planzustand eine einheitliche Höhe von 12 m angenommen werden. Das Parkhaus im Süden des Gebietes und die Fahrradschuppen haben eine teils offene Bauweise, was von Bedeutung für die Modellierung der Windströmung war. Auf jedem neuen Gebäude wird eine extensive Dachbegrünung geplant. Zusätzlich soll eine ca. 10 m x 10 m Fontänenfläche auf dem Platz im Süden des Gebietes errichtet werden, die genauer undefinierte Wassersäulen darstellt.

Für Plätze und Wege sollte ein Versiegelungsgrad von 50% und für Rasenpflaster von 20% angenommen werden. Die Grünflächen außerhalb des Parks sind noch nicht genauer konkretisiert, sodass hier zur Hälfte vom Rasen und zur Hälfte von einer Teilversiegelung ausgegangen werden sollte. Diese Flächen gingen als 25% versiegelt in die Rechnung ein.

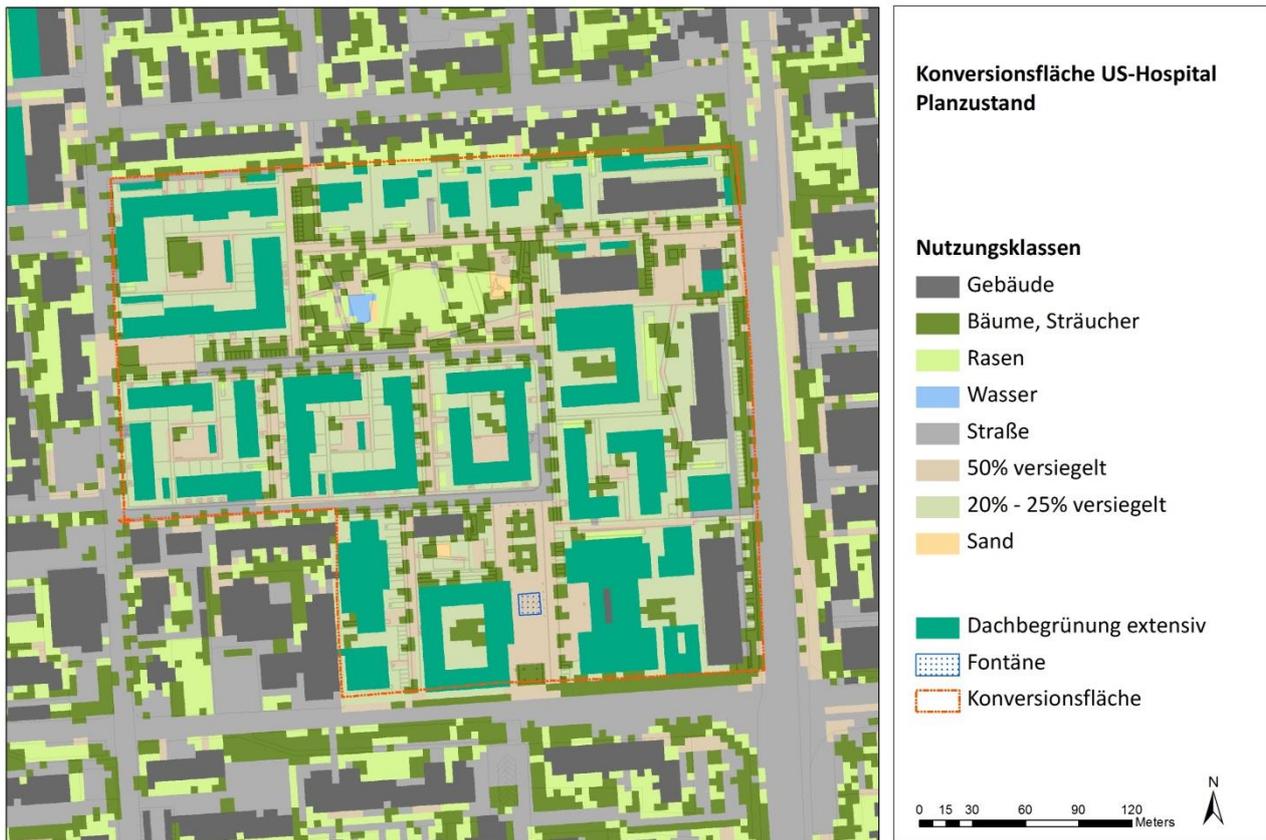


Abbildung 28 Nutzungsclassen und besondere Maßnahmen im Planzustand (Ausflösung 4 m x 4 m)

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Plan wird von den Architekten eine Variante mit einer Fassadenbegrünung am Parkhaus und blaugrünen Dächern auf Gebäuden der beiden Höfe südlich des Parks in Erwägung gezogen. Diese wird im vorliegenden Bericht als Optionsplan bezeichnet (Abbildung 29). Bei den blaugrünen Dächern handelt es sich um verdunstungsstarke Pflanzen, die auf dauerstaunasser Dachfläche wachsen. Für die Modellierungszwecke wurde eine Dachoberfläche, die abwechselnd mit Rasen und Wasser bedeckt ist, angenommen.

Um die Wirkung der Gebäudebegrünungs- und Wassermaßnahmen als auch den Unterschied zwischen den Planvarianten aufzeigen zu können, wurde ein s.g. Plan „Null“ simuliert. Dabei wurde auf die Dach- und Fassadenbegrünung, den Teich und die Fontäne verzichtet. Die Gebäude und sonstige Vegetation bleiben, wie im Planzustand eingezeichnet, berücksichtigt (Abbildung 30). Dank Differenzkarten zwischen der jeweiligen Planvariante mit dem Plan „Null“ kann die Wirkung der genannten Maßnahmen als Temperatur- und UTCI-Differenz flächenscharf dargestellt werden.

Während die Eingangsdaten in einer Auflösung von 4 m x 4 m in das Modell eingeflossen sind, wurden die Ergebnisse bilinear auf eine Auflösung von 2 m x 2 m interpoliert.

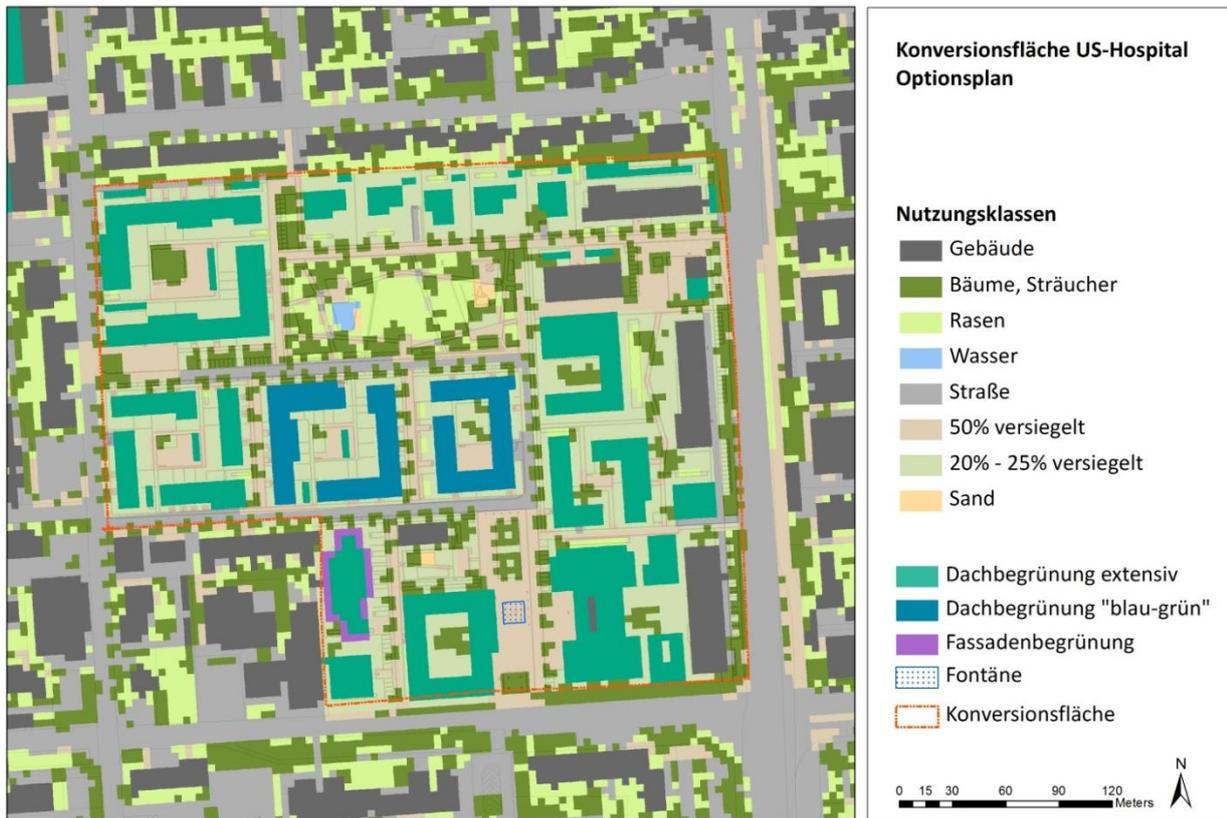


Abbildung 29 Nutzungsklassen und besondere Maßnahmen im Optionsplan (Auflösung 4 m x 4 m)

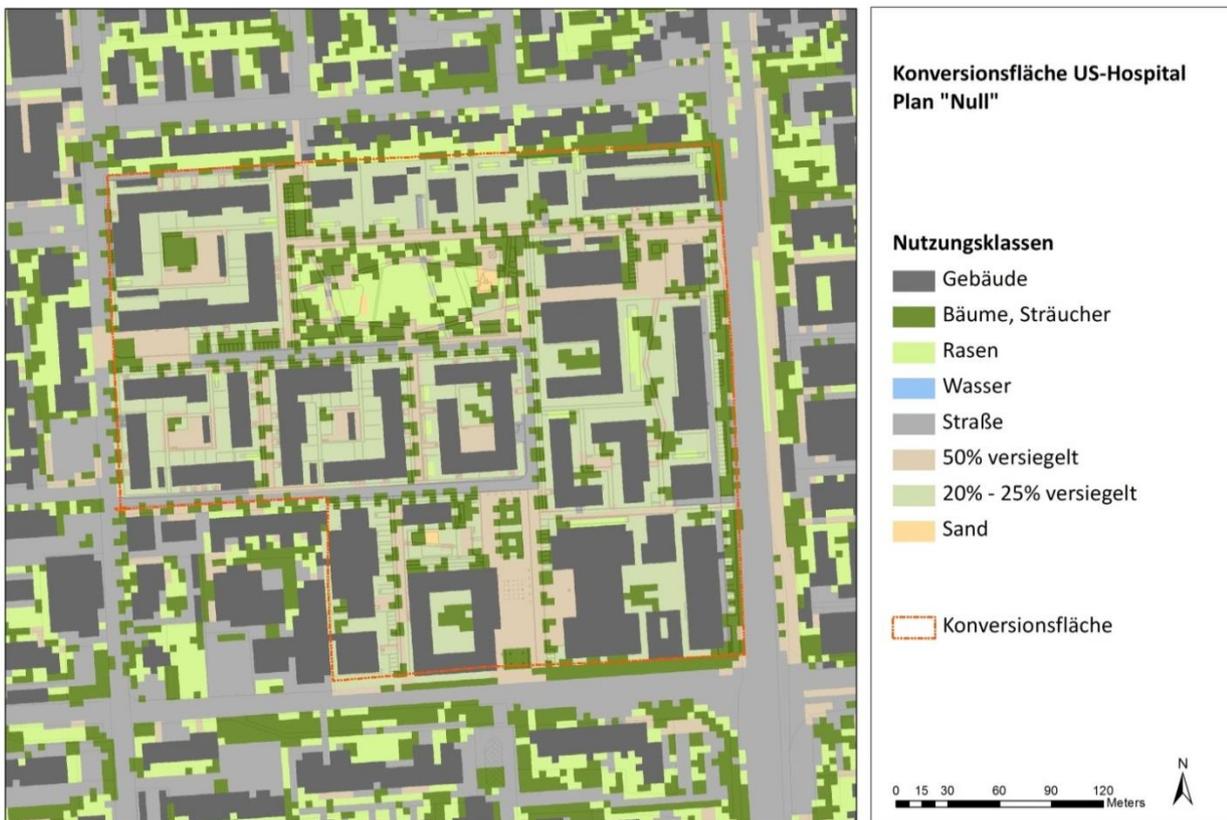


Abbildung 30 Nutzungsklassen im Plan „Null“, in dem die Gebäudebegrünung, der Teich und die Fontäne rausgenommen wurden (Auflösung 4 m x 4 m)

5.2.3 MODELLIERUNGEN ZUR DURCHLÜFTUNG

Im Rahmen des Planungsprozesses zur Entwicklung eines klimaökologisch abgestimmten städtebaulichen Entwurfs für die Konversionsfläche „Rohrbach ehemaliges Hospital“ sind die ortsspezifischen Be- bzw. Durchlüftungsverhältnisse von Interesse.

Die Intensität des bodennahen Windes hat nicht nur Einfluss auf die örtlichen bioklimatischen Verhältnisse, sondern besitzt auch eine nicht zu unterschätzende lufthygienische Bedeutung.

Eine Studie der Universität Trier (Buchholz S., 2006) dokumentiert, dass u.a. die NO₂-Konzentration durch die Sicherung einer intensiven Durchlüftung begrenzt werden kann. Anhand der Tabelle 6 zeigt sich, dass bereits ein Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeit von 0,5 – 1,0 m/s auf 1,0 – 1,5 m/s zu einem 30 %-igen Immissionsrückgang führen kann.

Tabelle 6 Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und der NO₂-Immissionskonzentration (nach: S. Buchholz 2006)

Mittlere Windgeschwindigkeit in m/s	Relative NO ₂ -Konzentration in %
0.5 – 1.0	100%
1.0 – 1.5	70%
1.5 – 2.0	56%
2.0 – 2.5	50%
2.5 – 3.0	44%
3.0 – 3.5	36%

Die Modellierung der Durchlüftungsintensität erfolgt mit dem mikroskaligen Klimamodell MISKAM 6.3 (Eichhorn, 2013). Auf Grundlage einer 3-jährigen örtlichen Windstatistik wird das Windfeld (1,5 m ü.G.) für eine Planung entsprechend dem vorliegenden städtebaulichen Entwurf der Planungsgemeinschaft Hähnig Gemmeke Freie Architekten BDA und Stefan Fromm Landschaftsarchitekten BDLA berechnet. Das Modell erfasst ein Gebiet von 440 x 400 m zzgl. Randzellen und weist in der Horizontalen eine äquidistante Auflö- sung von 2 x 2 m auf. In der Vertikalen ist das Gitternetz nicht-äquidistant (0,5 m – 8 .0 m).

Für die Bäume im Planungsgebiet wird eine Kronenhöhe von 4 – 11 m den Berechnungen zu Grunde gelegt. Der Blattflächenindex beträgt 7 m²/m³. Der Bedeckungsgrad ist mit 70 % angesetzt.

Die Berechnungen werden entsprechend der vorliegenden Windstatistik für 12 Windrichtungen (30°- Schritte) durchgeführt.

Die Darstellung der Ergebnisse (1,5 m ü.G.) erfolgt für ausgewählte Windrichtungen sowie über alle Wind- richtungen gemittelt.

5.3 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG - AUSWIRKUNGEN DER KONVERSION

5.3.1 MESSKAMPAGNE

Die **Windrosen** für das Datenkollektiv „alle Tage“ (Abbildung 31) dokumentieren, dass im Bereich der Konversionsfläche Hospital am Tag großwetterlagenbedingt südwestliche bis westliche Windrichtungen vorherrschen. Dabei werden mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen ca. 1,6 und 2,3 m/s gemessen. Ein Sekundärmaximum liegt bei östlichen bis südöstlichen Richtungen.

An den Messstandorten Hospital NW und Hospital Süd wird über alle Windrichtungen gemittelt eine mittlere Windgeschwindigkeit von 1,80 bzw. 1,85 m/s aufgezeichnet. An der Station Hospital Zentrum liegt das Windgeschwindigkeitsmittel am Tag bei 1,75 m/s. Auffallend ist, dass bei vorherrschenden Ostwinden die mittlere Windgeschwindigkeit am Messstandort Hospital Zentrum nur einen Wert von ca. 1,5 m/s zeigt, während an den Standorten Hospital NW und Hospital Süd mittlere Windgeschwindigkeiten von ca. 2,00 m/s bzw. 1,95 m/s registriert werden. Die um ca. 25% reduzierte Windgeschwindigkeit weist auf die Barrierewirkung der Gebäuderiegel entlang der Karlsruher Straße hin, die am Standort Hospital Zentrum noch Wirkung zeigt.

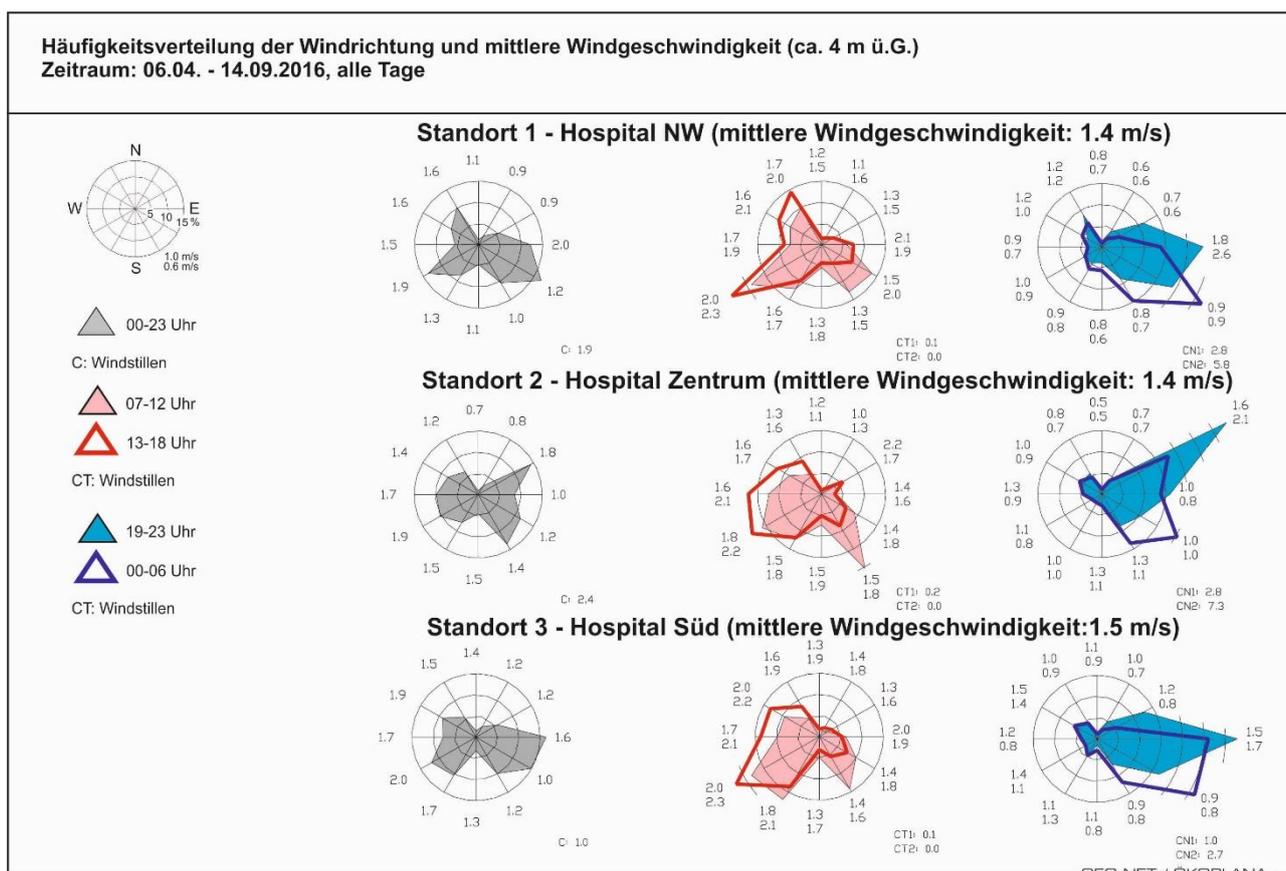


Abbildung 31 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeit (4 m ü.G.). Zeitraum: 06.04. – 14.09.2016, Datenkollektiv: „alle Tage“

In den Nachtstunden überwiegen an allen Messstandorten nordöstliche bis südöstliche Winde. Wie bereits stationäre und mobile Windmessungen im Rahmen der Stadtklimaanalyse Heidelberg von 1995 (Geogr. Institut Universität Heidelberg/ ÖKOPLANA 1995) sowie Ergebnisse numerischer Strömungssimulationen (Stadtklimagutachten für die Stadt Heidelberg - Fortschreibung des Gutachtens von 1995, GEO-NET / ÖKOPLANA 2015) zeigen, stellen sich im Stadtteil Rohrbach insbesondere in Strahlungsnächten im Bereich der Hangzonen bzw. der Hangeinschnitte (z.B. Kühler Grund) durch den Kaltluftzustrom über die Hangwälder sowie die gartenbaulich/landwirtschaftlich genutzten Flächen lokale Kaltluftabflüsse, die bis über die Karlsruher Straße nach Westen Wirkung zeigen.

Zeitweise ist entlang der Hangzone Rohrbach - Boxberg/Emmertsgrund - Leimen nach Sonnenuntergang zudem eine östliche Regionalströmung mit mittleren Windgeschwindigkeiten von über 3 m/s (10 m ü.G.) zu erfassen, die eine intensive Belüftung des bodennächsten Luftraums bewirkt.

An Strahlungstagen mit geringer Bewölkung (ca. 28% der Tage im Untersuchungszeitraum 2016), ist ebenfalls ein auffälliger tagesperiodischer Windrichtungswechsel zu verzeichnen. Wie Abbildung 32 dokumentiert, herrschen in diesem Datenkollektiv am Tag an allen Stationsstandorten südwestliche bis nordwestliche und östliche bis südöstliche Windrichtungen vor. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt am Tag an den Messstationen Hospital NW und Hospital Süd 1,75 m/s und am Stationsstandort Hospital Zentrum 1,65 m/s. Wie bereits beim Datenkollektiv „alle Tage“ ermittelt, macht sich bei Ostwinden am Messstandort Hospital Zentrum die Barrierewirkung der Bebauung entlang der Karlsruher Straße in reduzierter Windgeschwindigkeit bemerkbar (-20 bis -23% gegenüber den Messwerten an den Standorten Hospital NW und Hospital Süd).

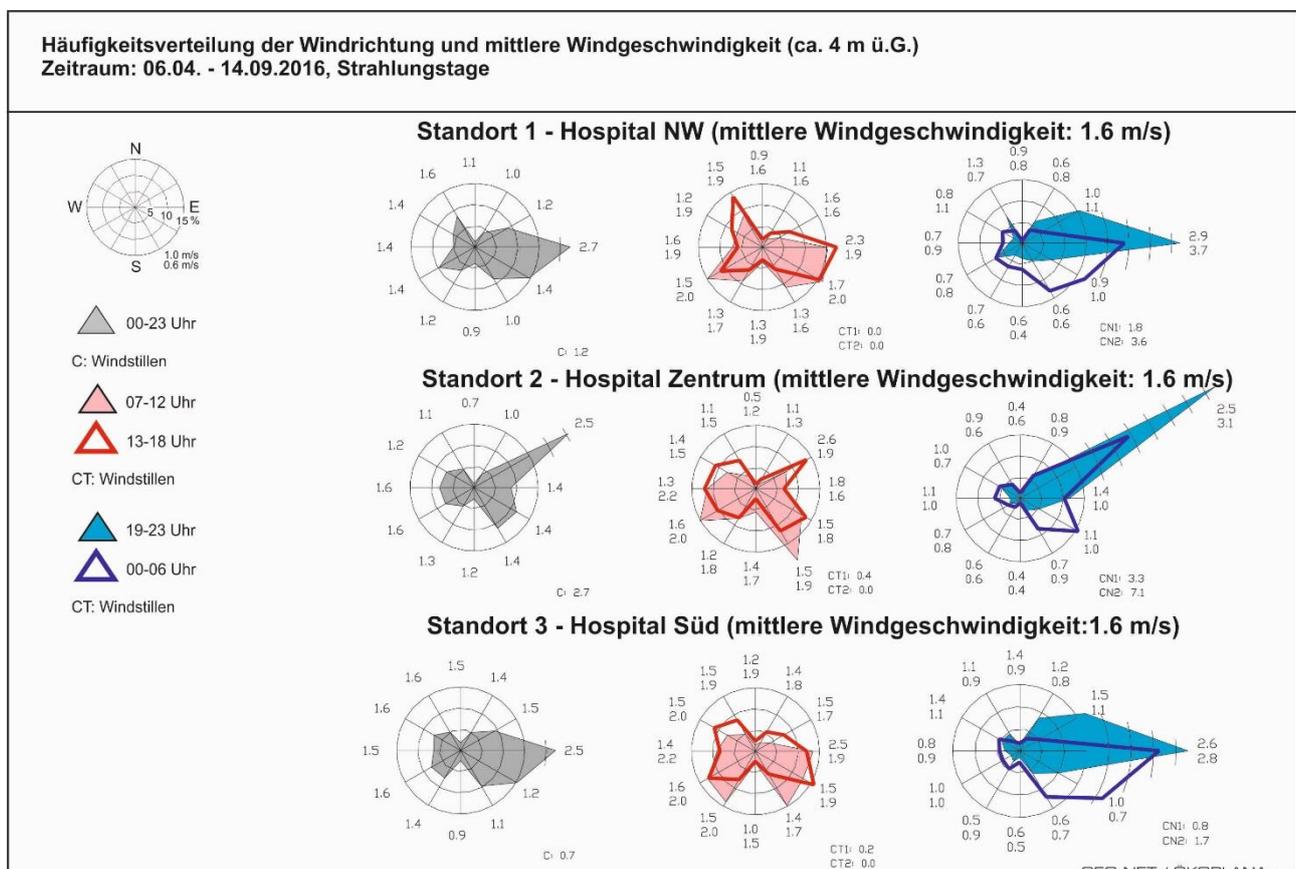


Abbildung 32 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeit (4 m ü.G.). Zeitraum: 06.04. – 14.09.2016, Datenkollektiv: Strahlungstage

Nach Sonnenuntergang überwiegen auf dem US Hospital-Gelände Winde aus östlichen Richtungssektoren, die in der zweiten Nachthälfte mittlere Windgeschwindigkeiten bis 3,7 m/s (Station Hospital NW) erreichen.

Die Messungen bestätigen die Erkenntnisse aus dem Stadtklimagutachten von 1995 (Geogr. Institut Universität Heidelberg/ ÖKOPLANA 1995), dass in Strahlungs Nächten im Süden von Heidelberg häufig fallwindartige Ausgleichsströmungen zwischen Bergland und Rheingraben die lokalen Hangabwinde überlagern. Sie treten im Zeitraum Mai – September in den Nachtstunden mit einer Häufigkeit von ca. 10% auf (Geogr. Institut Universität Heidelberg/ ÖKOPLANA 1995, S. 19) und zeigen dabei eine durchschnittliche Dauer von ca. 2,5 Std.

Die Messungen bestätigen, dass die regionalen/lokalen Ostwinde über das US Hospital-Gelände nach Westen hin wirksam werden. Dies ist bei der dortigen Planung zu berücksichtigen.

Abbildung 33 zeigt die Windrosen für das Datenkollektiv der heißen Tage im Zeitraum 06.04. – 14.09.2016 (Häufigkeit der Tage im Untersuchungszeitraum ca. 13%). Hierbei gingen auch Nichtstrahlungstage in die Statistik ein. Die Windgeschwindigkeitsmittel und die Windrichtungsverteilung sind mit den Messungen des Datenkollektivs „Strahlungstage“ vergleichbar, wobei die Intensität der Ostwinde geringer ist. Die periodisch zu erfassenden Fallwinde treten vorwiegend in wolkenarmen Strahlungsnächten auf.

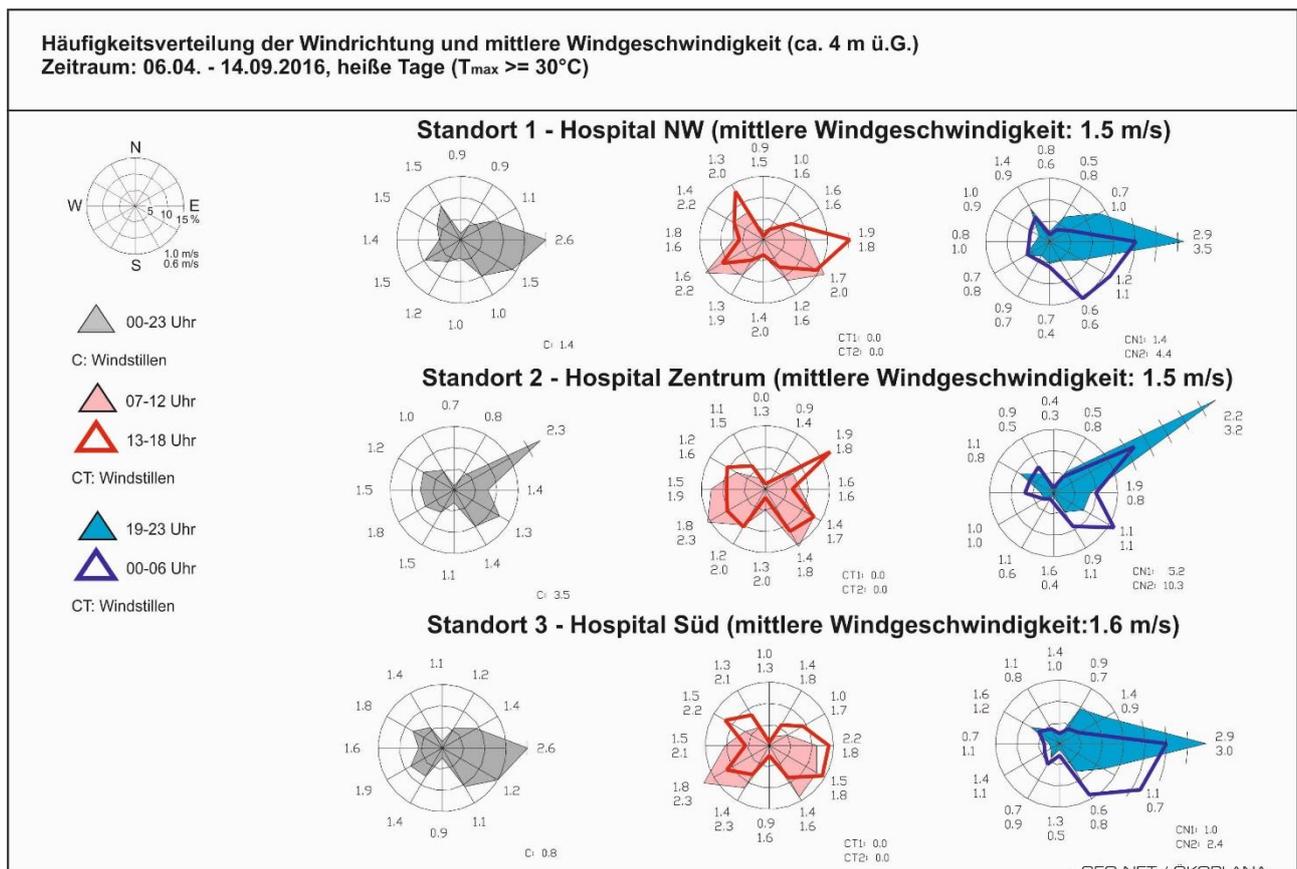


Abbildung 33 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeit (4 m ü.G.). Zeitraum: 06.04. – 14.09.2016, Datenkollektiv: Heiße Tage

Die thermische Situation im Untersuchungsgebiet wird vorwiegend vom Strömungsgeschehen und von der baulichen Nutzung bestimmt. Die Ergebnisse der stationären Lufttemperaturmessungen verdeutlichen, dass die durchschnittliche Lufttemperaturverteilung nur recht geringe Differenzierungen zeigt. Die Mitteltemperatur im Messzeitraum 06.04. – 14.09.2016 schwankt zwischen 17,9°C und 18,4°C ($\Delta T = 0,5$ K) (Abbildung 34). Der niedrigste Wert ist am Standort Hospital NW zu erfassen. Hier macht sich die östlich angrenzende Wiesenfläche thermisch positiv bemerkbar. Auffallend sind die geringen Unterschiede bei den mittleren Lufttemperaturmaxima und –minima von ca. 1,0 K bzw. 0,6 K. Am Tag sind die geringen Lufttemperaturunterschiede auf den intensiven horizontalen und vertikalen Luftaustausch zurückzuführen. Zudem befinden sich alle Standorte in unbeschatteten Lagen, sodass die Sonneneinstrahlung vergleichbar intensiv ist. Die geringen Differenzierungen bei den Lufttemperaturminima lassen auf die intensiven Belüftungseffekte durch die nächtlichen Ostwinde schließen. Sie verwischen die gebietspezifischen Temperaturunterschiede.

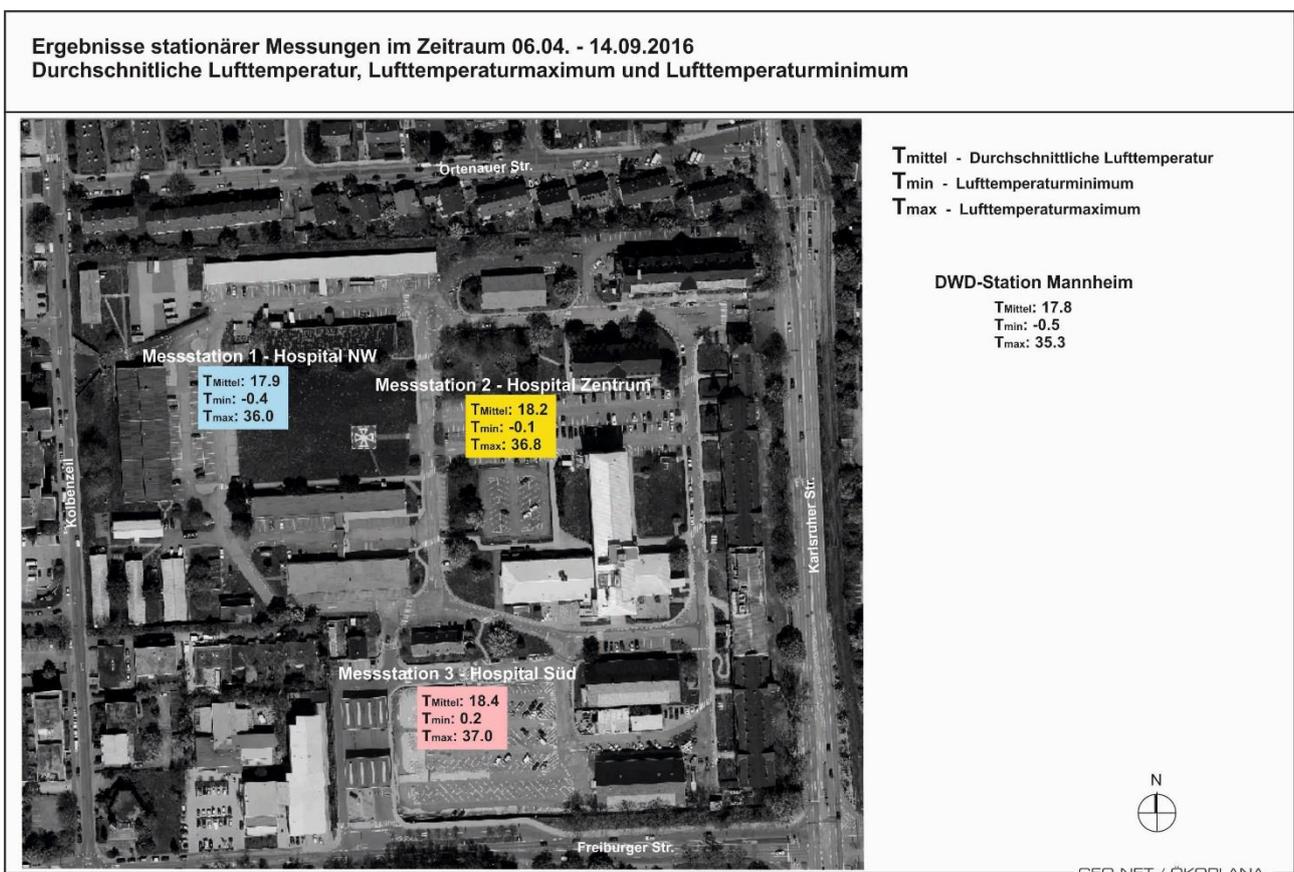


Abbildung 34 Ergebnisse stationärer Messungen im Zeitraum 06.04. – 14.09.2016. Durchschnittliche Lufttemperatur, Lufttemperaturmaximum und Lufttemperaturminimum

Die mittleren Tagesgänge für die Datenkollektive „alle Tage“ und „heiße Tage“ dokumentieren, dass die Lufterwärmung nach Sonnenaufgang beginnt und in der wärmeren Jahreszeit ihr Maximum zwischen 15:00 Uhr und 17:00 Uhr erreicht (Abbildung 35). Die gegenüber dem Sonnenhöchststand verzögerte maximale Erwärmung ist darauf zurückzuführen, dass das Maximum der Energiebilanz der Oberfläche nach Sonnenhöchststand eintritt und sich infolgedessen die Erwärmung der dem Boden aufliegenden Luft auch noch danach fortsetzt. Bereits vor Sonnenuntergang setzt die Abkühlung ein, die in den Abendstunden am stärksten ist. Das Temperaturminimum wird an allen Stationen kurz vor Sonnenaufgang gemessen.

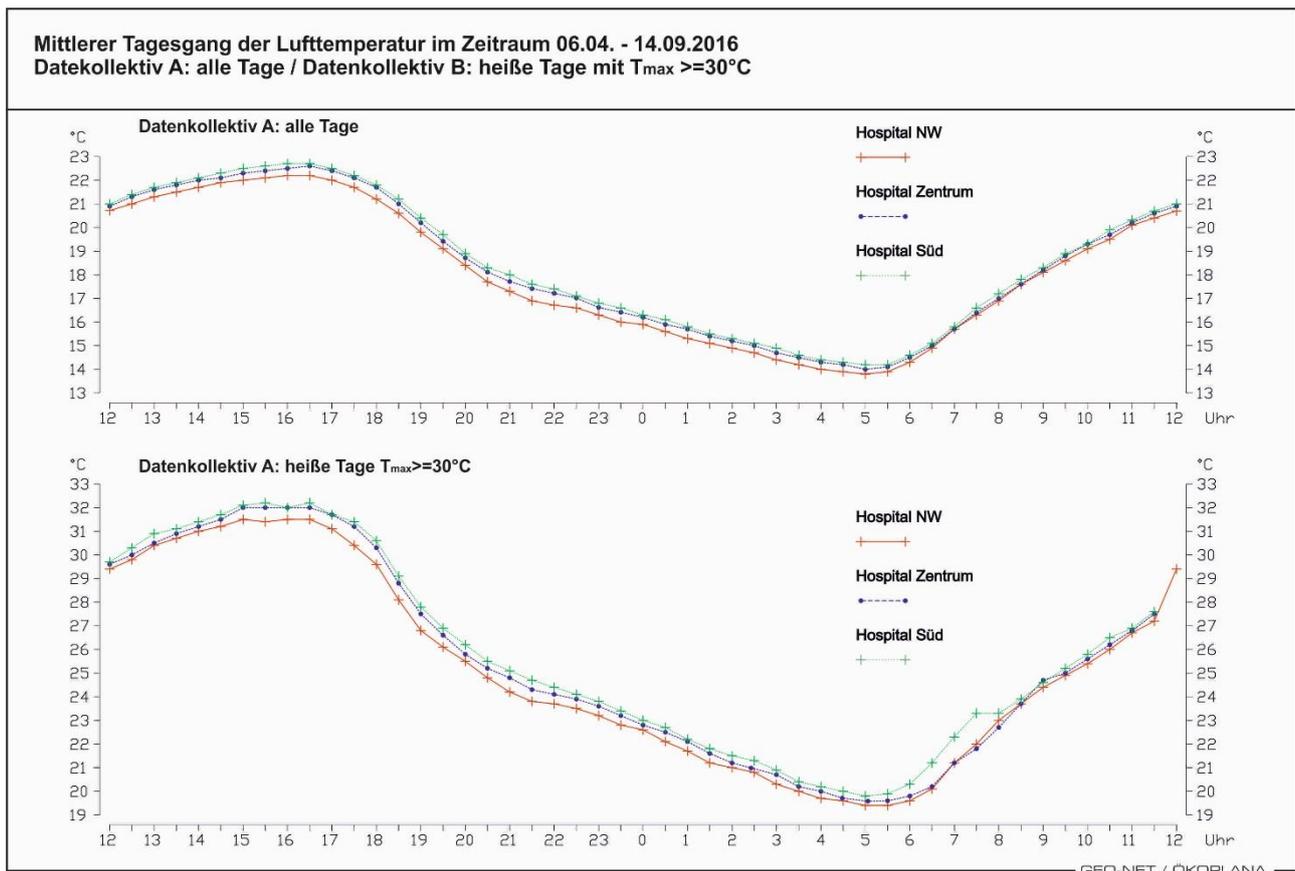


Abbildung 35 Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur im Zeitraum 06.04. – 14.09.2016. Datenkollektiv A: „alle Tage“ / Datenkollektiv B: „heiße Tage“

Der Tagesgang für den windschwachen heißen Sommertag 18.-19.07.2016 zeigt am Tag bei vorherrschenden Winden aus nordwestlichen Richtungen deutliche Lufttemperaturschwankungen, die auf die labile Luftschichtung mit intensivem vertikalen Luftaustausch zurückzuführen ist (Abbildung 36). Zwischen den Stationsstandorten zeigen sich nur bei kurzzeitig abflauendem Wind auffallende Temperaturunterschiede. So wird gegen 12:00 Uhr zwischen den Messstandorten Hospital Süd und Hospital NW ein Lufttemperaturunterschied von ca. 2,8 K gemessen, der die thermische Positivwirkung der zentralen Wiesenfläche dokumentiert. Gegen 13:00 Uhr ist diese Differenzierung aufgehoben. Nun zeigt sich die Station Hospital Süd gegenüber dem Messstandort Hospital NW sogar um ca. 0,2 K kühler. Die Bedeutung der Belüftungsintensität für die thermischen Umgebungsbedingungen wird offenbar.

Gegen 18:00 Uhr dreht der Wind auf dem Hospital-Gelände von Nordwest auf vermehrt nordöstliche bis östliche Richtungen, wobei in der ersten Nachthälfte mittlere Windgeschwindigkeiten bis ca. 2,5 m/s zu verzeichnen sind. Besonders intensiv ist die Abkühlung am Messstandort Hospital NW, wo gegen 21:30 Uhr kurzzeitig gegenüber den Stationsstandorten Hospital Zentrum und Hospital Süd um ca. 2,0 bzw. 2,4 K niedrigere Lufttemperaturen zu erfassen sind. Erreicht der Wind Geschwindigkeiten von mindestens 2,0 m/s bleiben die Lufttemperaturdifferenzierungen auf ca. 1,0 K begrenzt.

Im Laufe der zweiten Nachthälfte zeigen sich unter dem Einfluss von Schwachwinden ($< 1.0 \text{ m/s}$) zwischen den Stationsstandorten max. Unterschiede von ca. 1,2 K. Niedrigste Werte zeigt die Station Hospital NW, die sich am Westrand des zentralen Wiesengeländes befindet.

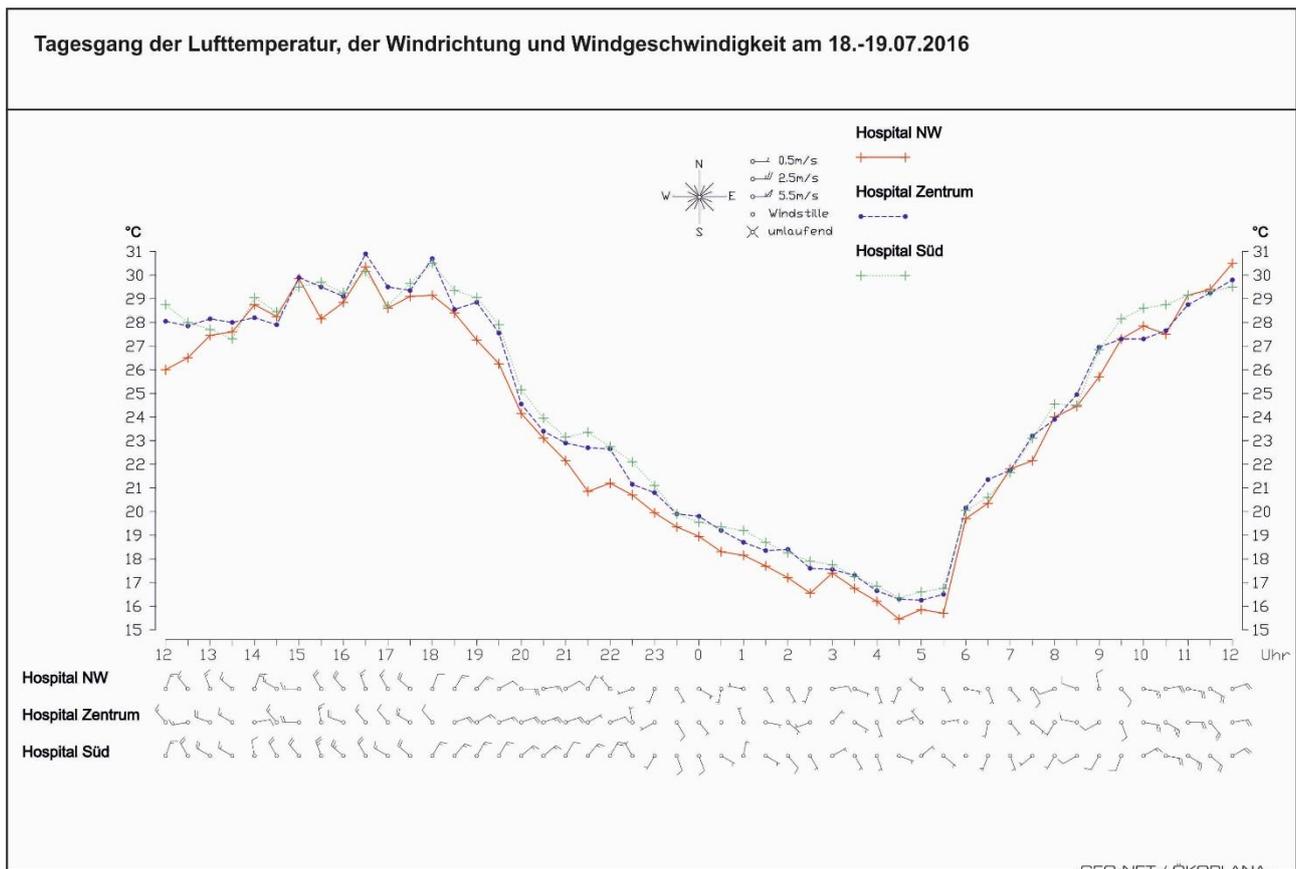


Abbildung 36 Tagesgang der Lufttemperatur, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 18.-19.07.2016

Der Tagesgang der Lufttemperatur und des Windes für den Sommertag 07.-08.08.2016 weist in der zweiten Nachthälfte einen auffallenden Lufttemperaturanstieg auf (Abbildung 37). Anhand dieses Temperaturverlaufs lässt sich die thermische Wirksamkeit der aus Osten zuströmenden Hangkaltluft auf dem US Hospital-Gelände veranschaulichen. In der ersten Nachthälfte kommt es unter dem Einfluss von östlicher Hangkaltluft zu einer raschen Abkühlung, wobei am Messstandort Hospital NW gegenüber den Stationen Hospital Zentrum und Hospital Süd um ca. 1.8 K bzw. 2.2 K niedrigere Lufttemperaturen zu erfassen sind. Dies belegt die thermische Ausgleichswirkung der zentralen Wiesenfläche. Gegen 02:00 Uhr ändert sich das Windfeld. Es setzen etwas kräftigere und regionale Ausgleichsströmungen ein und die Lufttemperaturen steigen um ca. 1,2 – 2,0 K an. Dies ist ein Indiz für die Kühlwirkung der Hangabwinde und der örtlichen Grünflächen.

Tagesgang der Lufttemperatur, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 07.-08.08.2016

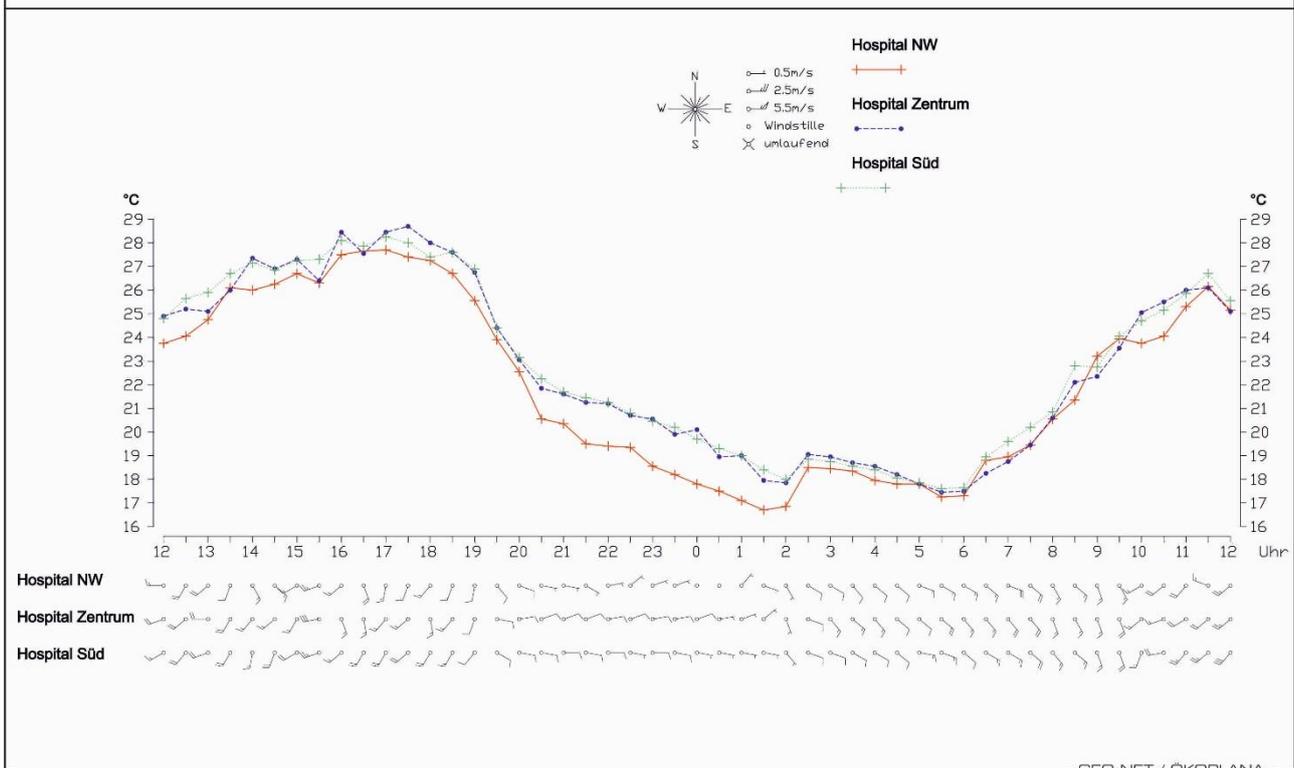


Abbildung 37 Tagesgang der Lufttemperatur, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 07.-08.08.2016

Im Rahmen der Messungen wurden zur Erfassung der flächenhaften Lufttemperaturverteilung im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer sommerlichen Strahlungsnacht **Messfahrten** durchgeführt. Die darauf basierenden Isothermenkarten zeigen die flächenhafte Verteilung der Lufttemperatur während einer typischen sommerlichen Strahlungsnacht (07./ 08.07.2016) (Abbildung 38 und Abbildung 39).

Abbildung 38: Auf der Isothermenkarte von 22:00 Uhr lassen sich deutlich die gebietsspezifischen thermischen Unterschiede im Planungsumfeld erkennen. Auf dem Konversionsgelände US Hospital zeigen sich nahezu einheitlich Lufttemperaturen von 20 – 21°C. Allein in Teilbereichen der Wiesenfläche sind Werte von 19 – 20°C zu erfassen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei den Messfahrten allein die Lufttemperatur entlang fahrbarer Wege erfasst werden konnte. Kleinräumige Temperatursenken (z.B. Hausgärten, kleinere Grünflächen mit Gehölzen) können in ihrer Wirksamkeit nicht berücksichtigt werden. Dies kann mit Hilfe der nachgeschalteten mikroskaligen Modellrechnungen erfolgen. Auch in direkter Nachbarschaft zum Konversionsgelände zeigen sich keine auffallenden thermischen Differenzierungen. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus den Messfahrten im Rahmen der Stadtklimauntersuchung von 1995.

Eine deutliche Lufttemperatursenke im Planungsumfeld bildet das Freiraumgefüge „Hangäckerhöfe“ zwischen dem Wohngebiet Hasenleiser im Norden und dem Gewerbegebiet Rohrbach-Süd im Süden. Über den Landwirtschaftsflächen und Gärten werden Lufttemperaturen bis unter 15°C gemessen.

Bei vorherrschenden schwachen östlichen Windbewegungen dringt die Kaltluft nur in geringer Intensität in die Bebauung Hasenleiser im Norden ein. Zudem steht die recht dichte südliche Randbebauung des Wohngebiets Hasenleiser einer intensiveren Kaltluftzufuhr entgegen. Auf kurzer Distanz (ca. 90 m) nimmt daher die Lufttemperatur vom Dohlweg (Nordrand des Freiraums „Hangäckerhöfe“) bis zur Konstanzer Straße um

ca. 3 – 4 K zu. Das Konversionsgelände US Hospital profitiert somit nicht vom thermischen Ausgleichsvermögen des südlichen Freiraumgefüges.

In Richtung östliche Hangzone stellt sich zwischen dem US-Hospital-Areal und der Leimer Straße am Ost- rand des Rohrbacher Wohngebiets Süd ein Lufttemperaturunterschied von ca. 3,5 K ein. Über der Hang- zone unterhalb des Stadtteils Boxberg entwickeln sich östliche Hangabwinde, die im westlich angrenzenden Wohngebiet zwischen Thoraxklinik im Norden und Schleifweg im Süden die nächtliche Abkühlung forcieren. Die Hangabwinde werden am Bebauungsrand angehoben und strömen über die Bebauung hinweg nach Westen, wobei sie einen Großteil ihrer abkühlenden Wirkung verlieren. Das Konversionsgelände US Hospi- tal profitiert nur noch in geringem Maße vom thermischen Ausgleichsvermögen der östlichen Hangkaltluft.

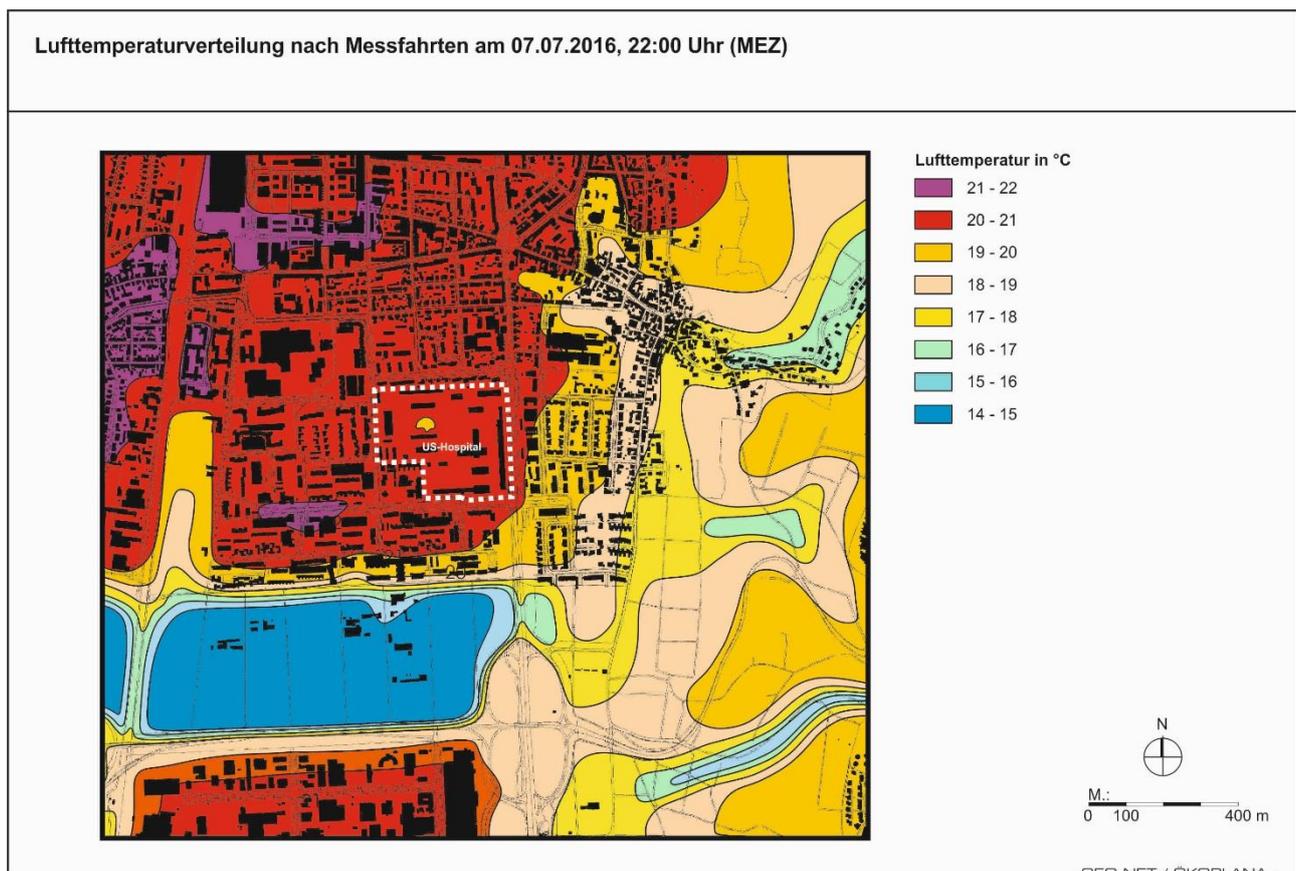


Abbildung 38 Lufttemperaturverteilung nach Messfahrten am 07.07.2016, 22:00 Uhr

Durch die gegen 00:00 Uhr einsetzenden fallwindartigen Ausgleichsströmungen zwischen Bergland und Rheingraben verwischen im Zuge der Messfahrten gegen 01:00 Uhr die lokalen thermischen Differenzierungen. Die max. Lufttemperaturdifferenzen im Untersuchungsgebiet bleiben auf ca. 4,7 K begrenzt (Abbildung 39). Innerhalb des Konversionsgeländes US Hospital werden Lufttemperaturen zwischen 20 und 21 °C erfasst. Ein derartiges Temperaturniveau zeigt auch die Wohnbebauung Rohrbach östlich der Karlsruher Straße. Durch den intensiven Einfluss der regional angelegten östlichen Strömung wird die östliche Hangkaltluft mit wärmerer Luft aus höheren Luftschichten durchsetzt, so dass im Hangbereich unterhalb des Stadtteils Boxberg die Lufttemperatur gegenüber der 22 Uhr-Messfahrt um ca. 3 K zugenommen hat. Auffallend ist, dass in den Wohnbaugebieten südlich von US Hospital die Einwirkung von Kaltluft aus dem Freiraumgefüge „Hangäckerhöfe“ gegenüber der ersten Nachthälfte etwas intensiver erscheint.

Lufttemperaturverteilung nach Messfahrten am 08.07.2016, 01:00 Uhr (MEZ)

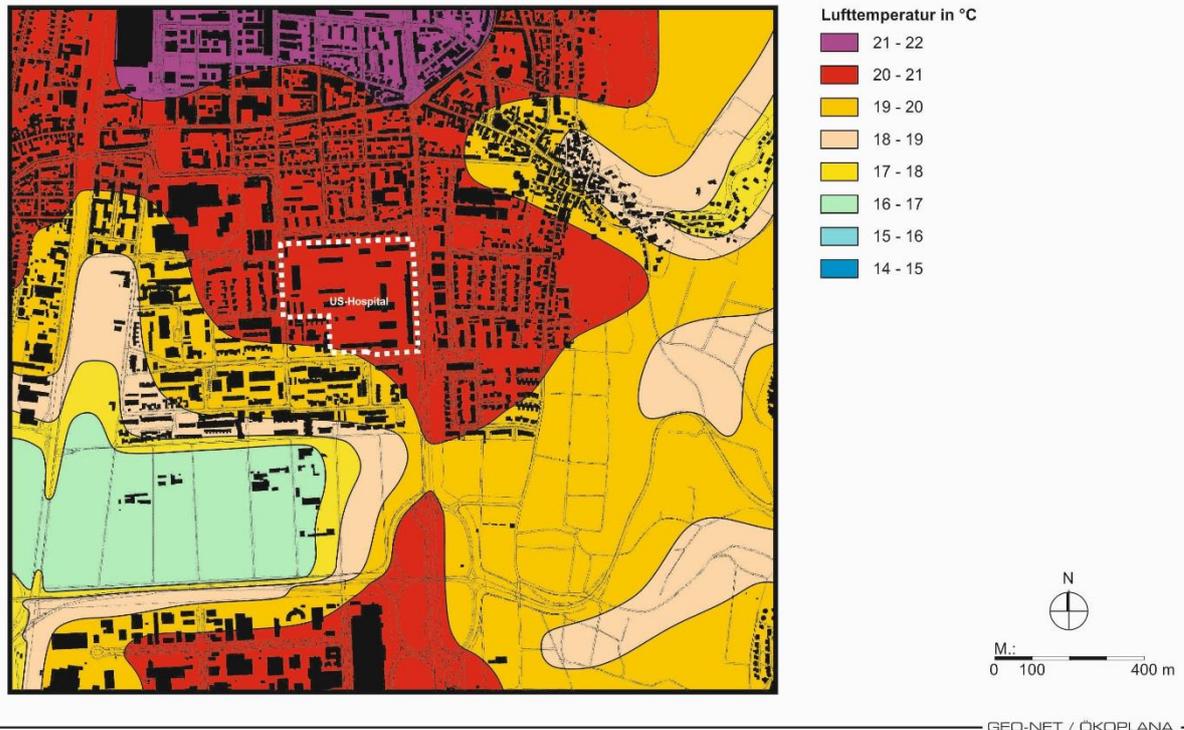


Abbildung 39 Lufttemperaturverteilung nach Messfahrten am 08.07.2016, 01:00 Uhr

Neben den Lufttemperaturmessungen bilden **Messgänge** auf dem US-Hospital-Gelände einen zweiten Baustein zur Beschreibung des örtlichen Kleinklimas. Anhand der Abbildung 40 wird ersichtlich, dass sich bei den Oberflächenstrahlungstemperaturen abhängig von der Art und Beschaffenheit der Oberflächen bei vergleichbaren Einstrahlungsverhältnissen auffallende Differenzierungen einstellen. Dies ist neben der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Oberflächen auch auf ihr Reflexionsvermögen zurückzuführen.

Die besonnten Asphaltflächen erreichen im Laufe des Tages (13:00 Uhr) Höchstwerte von 44°C (Lufttemperatur ca. 25,2 °C). Pflasterbeläge einen Maximalwert von ca. 39 °C auf. Die ebenfalls besonnten Rasen-/Wiesenflächen zeigen Maximalwerte von ca. 32 °C. Thermisch günstig zeigen sich auch Rasengittersteine. Sie zeigen eine Maximaltemperatur von ca. 33 °C.

Schon gegen 17:00 Uhr, also noch deutlich vor Sonnenuntergang, sinkt die Oberflächentemperatur der Wiesen-/Rasenfläche unter die Lufttemperatur ab und beginnt somit bodennah „Kaltluft“ zu bilden. Die Oberflächentemperatur der Rasengittersteine zeigt hingegen erst nach 20:00 Uhr niedrigere Werte als die Lufttemperatur. Asphalt- und Pflasterbeläge bleiben hingegen wärmer als die Lufttemperatur und tragen somit zu Wärmeinselbildung bei.

Verlauf der Oberflächenstrahlungstemperaturen unterschiedlicher Befestigungsmaterialien am 08.08.2016

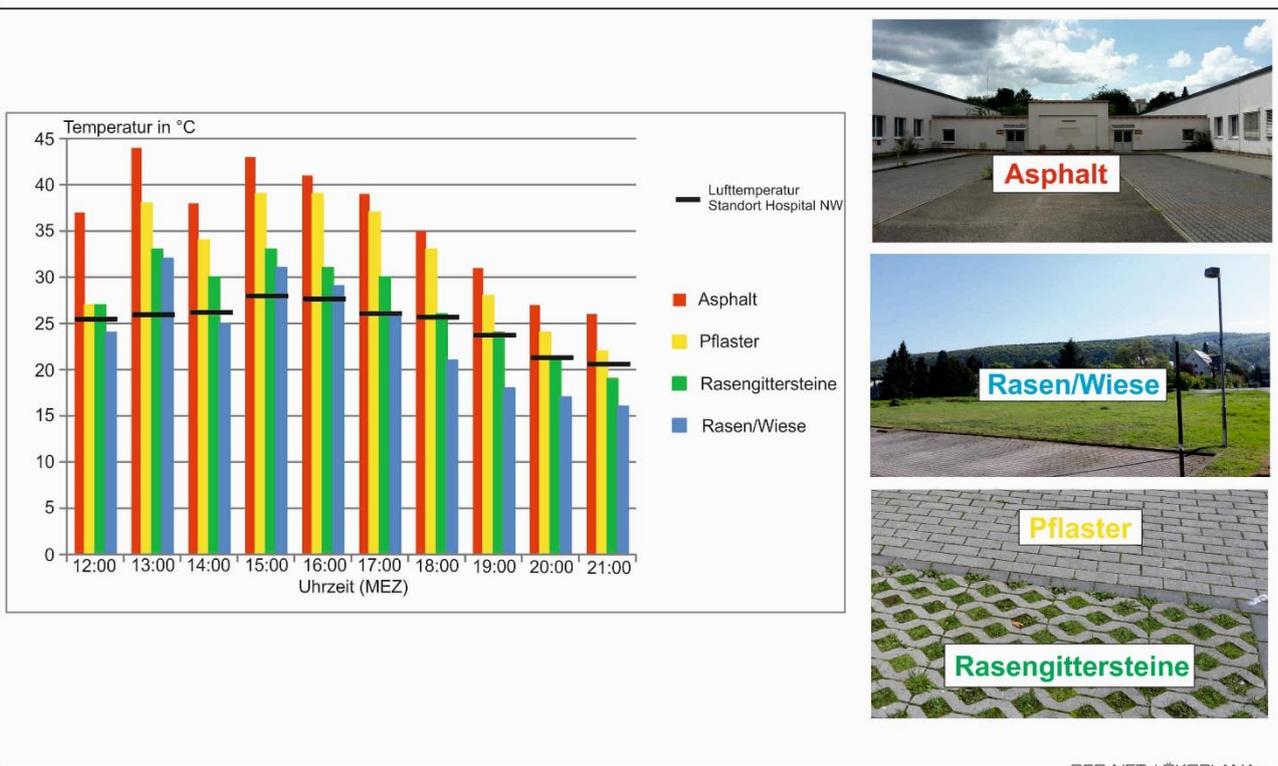


Abbildung 40 Verlauf der Oberflächenstrahlungstemperaturen unterschiedlicher Befestigungsmaterialien am 08.08.2016

Am 23.08.2016 wurden im Laufe eines heißen Sommertages auf des US Hospital-Gelände an ausgewählten Messstandorten Lufttemperaturen, Oberflächenstrahlungstemperaturen und Windgeschwindigkeiten erfasst. Die Daten geben Auskunft über die kleinklimatischen Variationen im Planungsgebiet.

Wie die Abbildung 41 und die Abbildung 42 dokumentieren, werden am 23.08.2016 auf der Konversionsfläche Lufttemperaturen bis über 30 °C gemessen. Der Wind weht nur schwach (≤ 2 m/s) aus unterschiedlichen Richtungen. Die relative Luftfeuchtigkeit zeigt am Tag max. Werte von ca. 52 %. Nach 18:00 Uhr setzt intensive Abkühlung ein, wobei die relative Luftfeuchtigkeit deutlich ansteigt und der Wind auf vermehrt östliche Richtungen dreht (Hangabwinde).

Tagesgang der Lufttemperatur, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 23.-24.08.2016

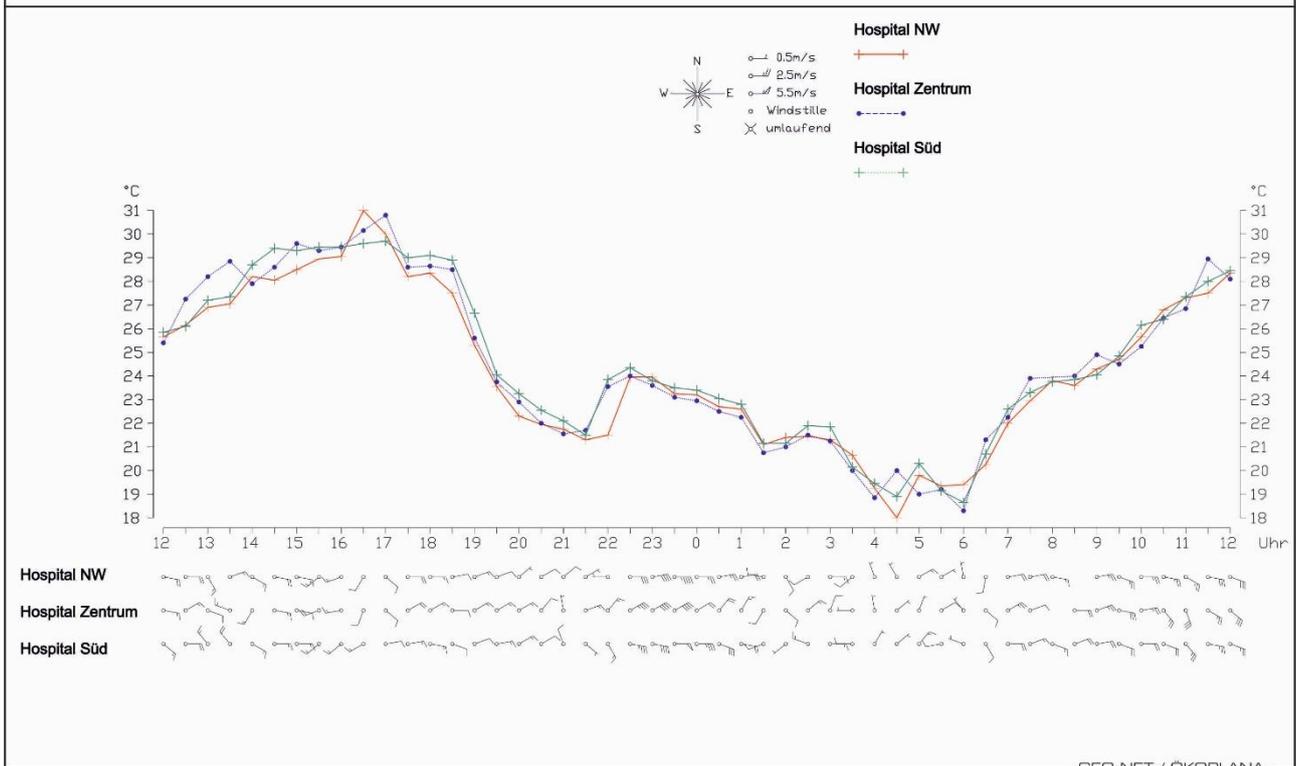


Abbildung 41 Tagesgänge der Lufttemperatur, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 23. – 24.08.08.2016

Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit am 23.-24.08.2016

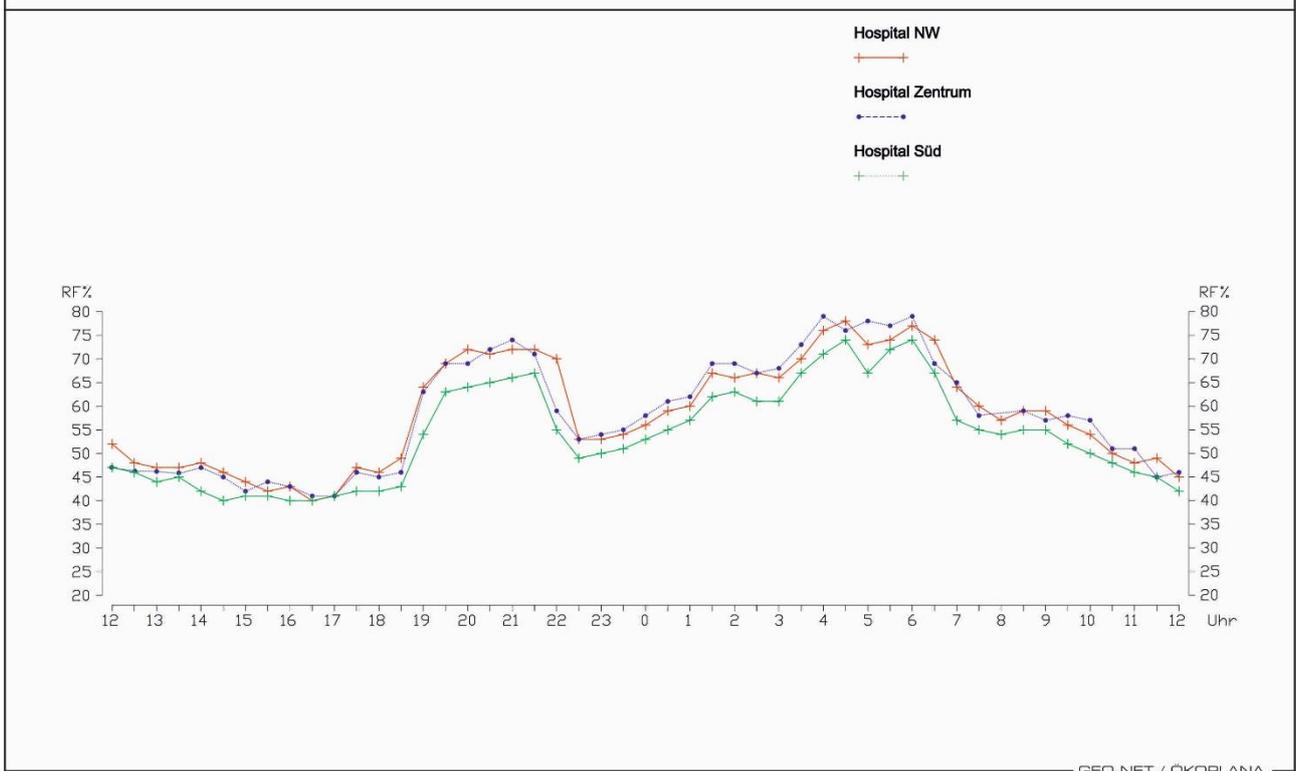


Abbildung 42 Tagesgänge der relativen Luftfeuchtigkeit am 23. – 24.08.08.2016

Wie bereits o.a. werden mit der Auswahl der Messstandorte (Abbildung 43 und Abbildung 44) die unterschiedlich genutzten Freiflächen im Plangebiet berücksichtigt. Dominant sind großflächig asphaltierte Stellplatzflächen und Straßenzüge (Messpunkte 1, 4, 5, 6, 7, 10). Prägnant ist zudem die zentrale Wiesen-/Rasenfläche mit Hubschrauberlandeplatz im nordwestlichen Teilbereich des US-Hospital-Areals (Messpunkt 3) und die Gehölzinsel im Norden (Messpunkt 2). Kleinere Grünflächen an Gebäuden (Messpunkte 8 und 9) ergänzen die Freiflächennutzung. Im Südwesten bilden überdachte Zufahrtsbereiche eine Sondernutzung (Messpunkt 11).

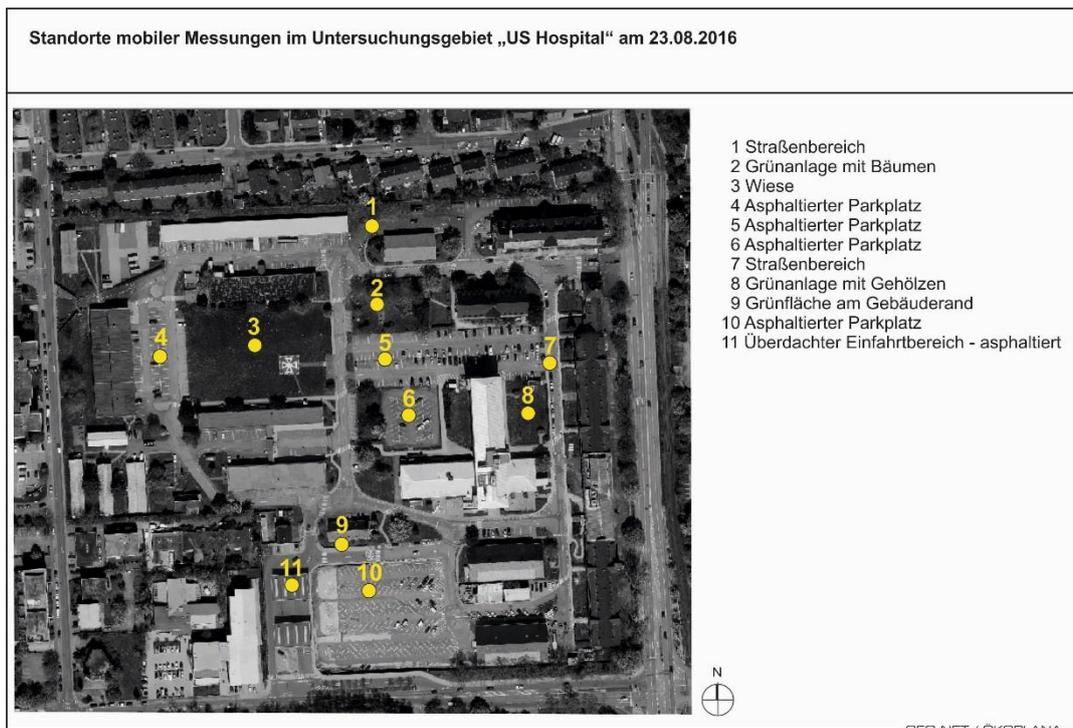


Abbildung 43 Standorte mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet US-Hospital am 23.08.2016

Standorte mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016 - fotografische Dokumentation ausgewählter Messpunkte

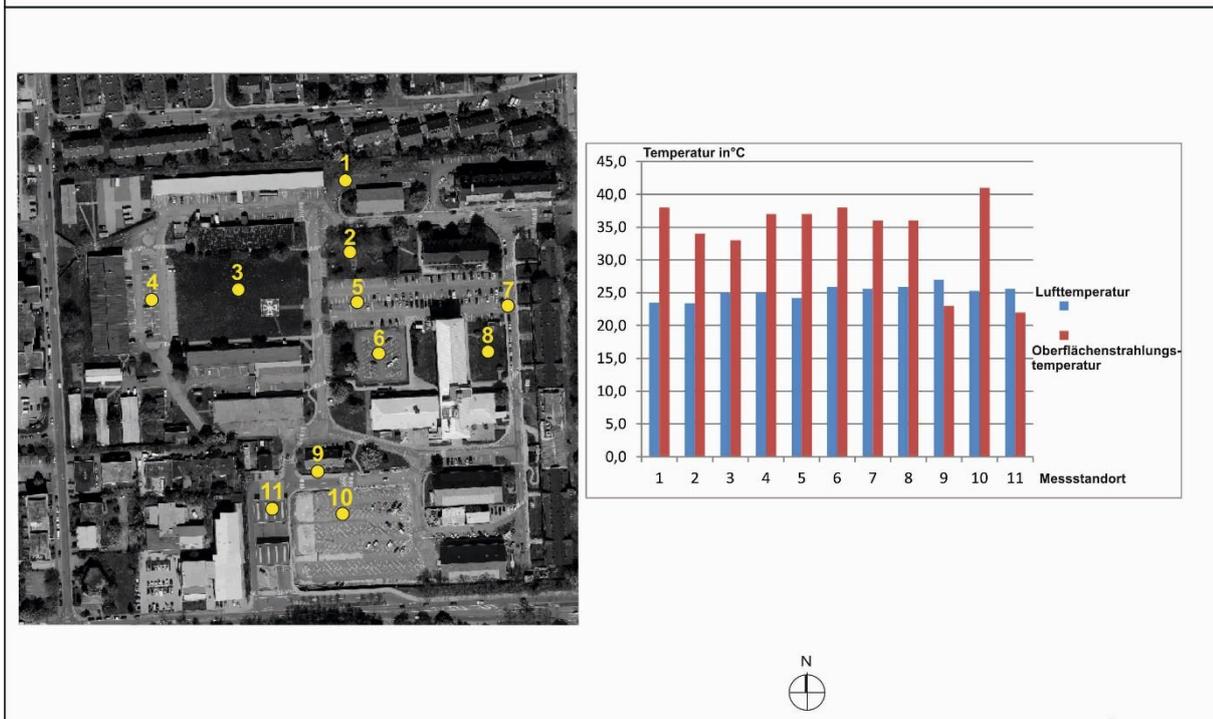


GEO-NET / ÖKOPLANA

Abbildung 44 Standorte mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet US-Hospital am 23.08.2016

Bei den Messungen zwischen 09:35 und 10:25 Uhr (Abbildung 45) werden die meisten Standorte direkt besonnt. Ausnahmen bilden die Messpunkte 9 und 11.

Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 09:35 - 10:25 Uhr (MEZ)



GEO-NET / ÖKOPLANA

Abbildung 45 Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 09:35 – 10:25 Uhr

Die punktuelle Erfassung der Lufttemperatur zeigt ihre kleinräumige Variation, die im Wesentlichen von der Einstrahlungsintensität der Sonne und der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Höchste Lufttemperaturen über 25 °C (1.5 m ü.G.) werden nicht nur über Asphaltflächen (Messpunkte 6, 7, 11) gemessen, sondern auch über Grünflächen (Messpunkte 8, und 9). Am Messpunkt 9, der sich im Nahbereich einer Gebäudewand befindet, führt die dortige Windruhe (< 0.5 m/s) und die Wärmeabstrahlung der Hauswand zu erhöhten Lufttemperaturwerten. Die Einflüsse des Ventilationsgeschehens und der gebäudebedingten Wärmeabstrahlung auf die thermischen Umgebungsbedingungen werden offenbar.

Niedrigste Oberflächenstrahlungstemperaturen werden zwischen 09:35 Uhr und 10:25 Uhr an den Messpunkten 9 und 11 erfasst. Beide Standorte befinden sich am Morgen im Schatten, so dass nicht nur die Grünfläche am Gebäuderand (Messpunkt 9), sondern auch die überdachte Asphaltfläche vergleichsweise kühl sind (23 bzw. 22 °C).

Zwischen 12:45 Uhr und 13:25 Uhr (Abbildung 46) erreichen die besonnten Asphaltflächen bei Lufttemperaturen von ca. 26.4 - 28.7°C Oberflächenstrahlungstemperaturen von ca. 42 – 49°C. Im Bereich der besonnten Wiesen-/Rasenfläche (Messpunkt 3) werden hingegen nur Oberflächenstrahlungstemperaturen von ca. 37°C gemessen. Auffallend niedrige Oberflächenstrahlungstemperaturen zeigen sowohl beschattete Grünbereiche (Messpunkte 2 und 9) als auch die ganztägige verschattete Asphaltfläche am Messpunkt 11. Sie weisen Oberflächenstrahlungstemperaturen von deutlich unter 30°C auf und unterschreiten sogar die dort gemessenen Lufttemperaturwerte. Die thermische/bioklimatische Gunstfunktion von schattenwerfenden Bäumen oder Bauelementen (z.B. Pergolen) kann mit diesen Messergebnissen bestätigt und quantifiziert werden.

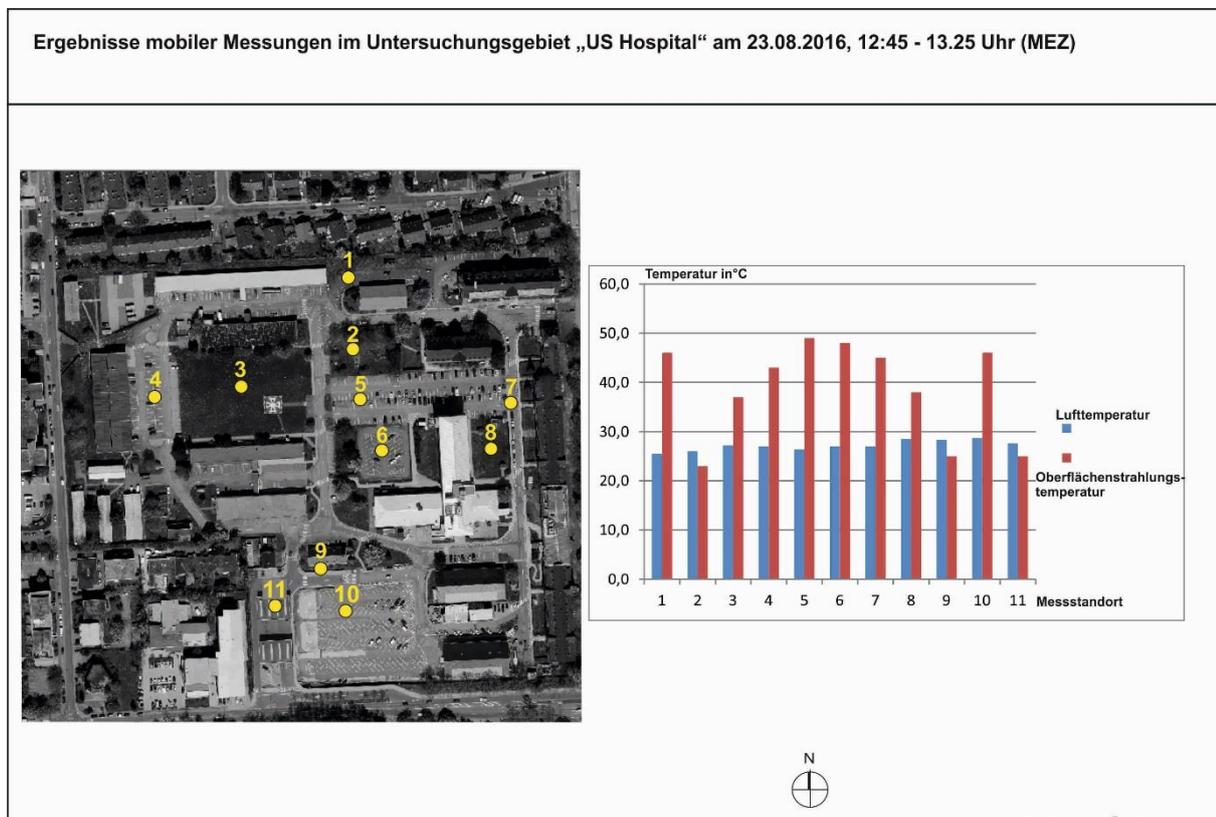


Abbildung 46 Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 12:45 – 13:25 Uhr

Die Abbildung 47 und die Abbildung 48 zeigen den weiteren Verlauf der Luft- und Oberflächenstrahlungstemperaturen bis in die ersten Nachtstunden. Sie zeigen, dass die Lufttemperaturen auf dem Kasernenareal nur recht geringe Differenzierungen aufweisen. So stellen sich beispielsweise während der Messungen zwischen 19:45 und 20:22 Uhr zwischen den Messstandorten nur max. Lufttemperaturdifferenzen von ca. 1.0 K.

Ein deutlich differenzierteres Bild liefern die Oberflächentemperaturmesswerte. Während zwischen 19:45 und 20:22 Uhr über Wiesenflächen (Standort 3) Oberflächentemperaturen von ca. 16 °C gemessen werden, sind über Asphaltflächen noch Werte bis 31 °C (Standort 6) zu erfassen.

Diese Resultate lassen den Schluss zu, dass sich im Untersuchungsgebiet die bioklimatische Gesamtsituation vor allem über die Oberflächenstrukturen (versiegelte Flächen, teilversiegelte Flächen, unversiegelte Flächen) steuern lässt.

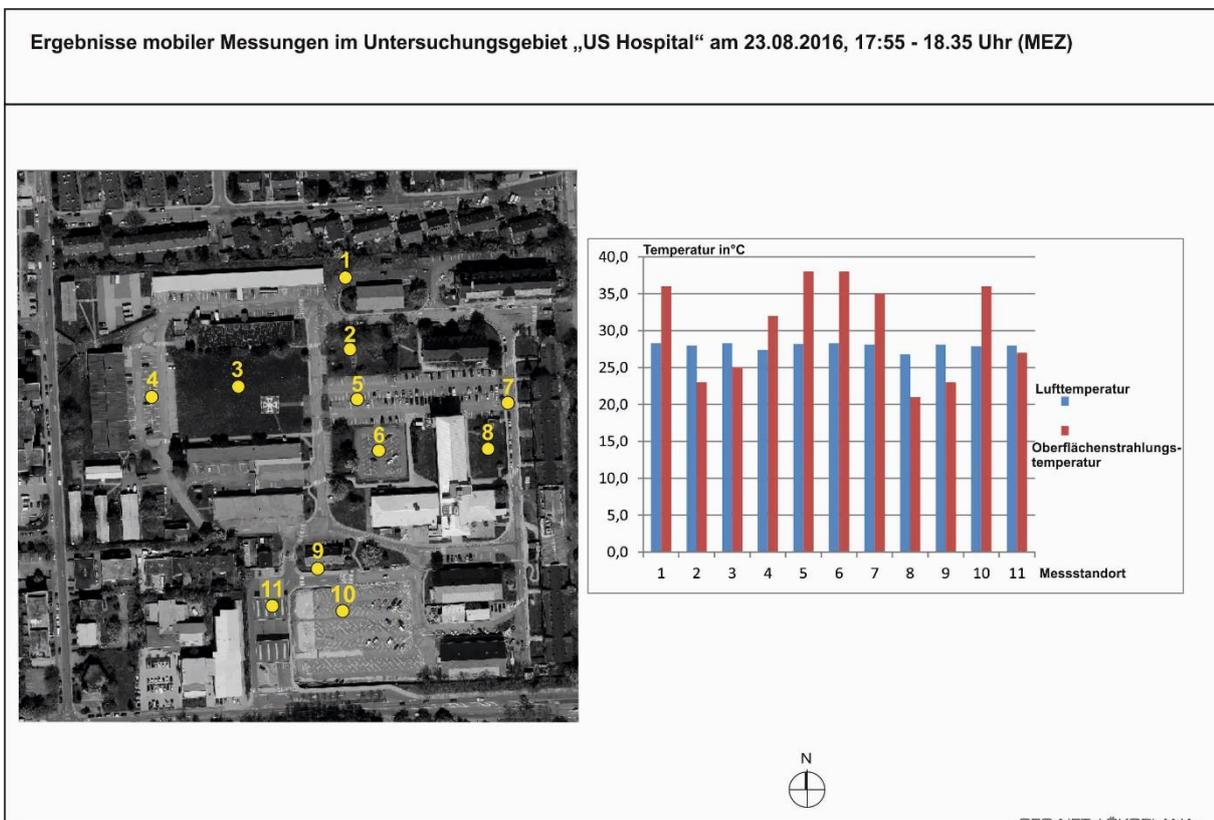


Abbildung 47 Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 17:55 – 18:35 Uhr

Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 19:45 - 20:22 Uhr (MEZ)

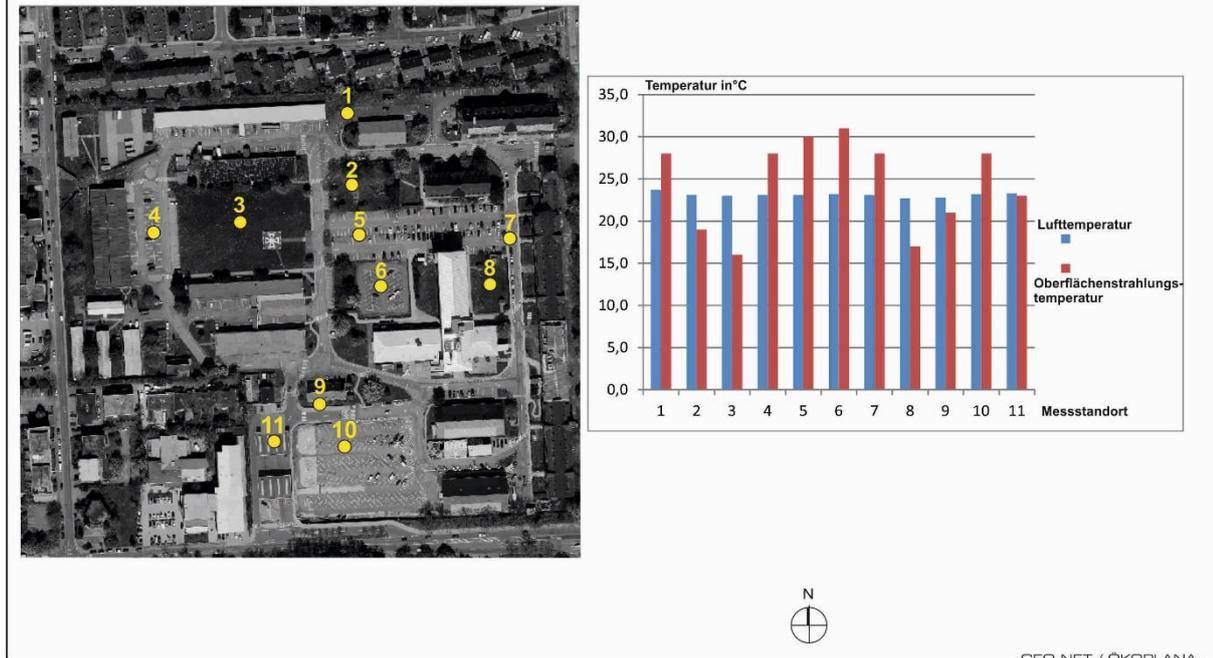
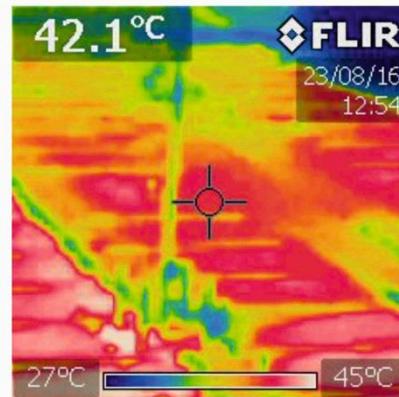


Abbildung 48 Ergebnisse mobiler Messungen im Untersuchungsgebiet „US Hospital“ am 23.08.2016, 19:45 – 20:22 Uhr

Zusätzliche IR-Aufnahmen (Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51) zeigen in plakativer Form die Wärmeabstrahlung unterschiedlicher Oberflächen. Sie dienen im weiteren Planungsprozess dazu, die thermische Gunstwirkung u.a. von Grünflächen, hellen Fassadenflächen bzw. hellen Oberflächenbelägen zu verdeutlichen. Abgeleitet von den Erkenntnissen können im anstehenden B-Planverfahren Festsetzungen zur Schaffung günstiger thermischer Umgebungsbedingungen formuliert werden.

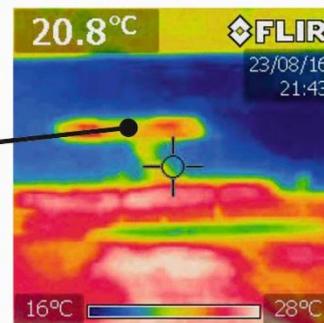
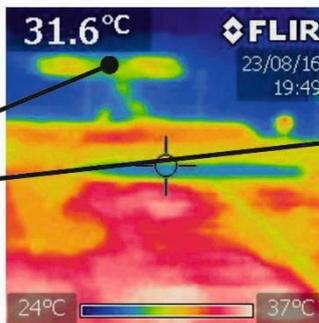
IR-Aufnahmen vom 23.08.2016, Asphaltflächen / Tagsituation



GEO-NET / ÖKOPLANA

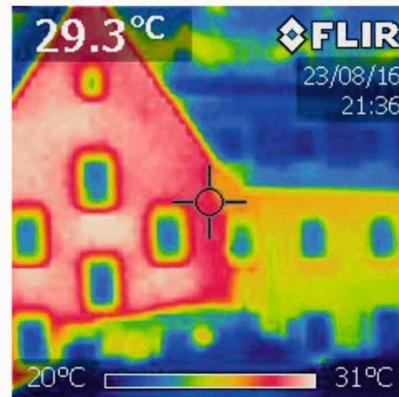
Abbildung 49 IR-Aufnahme von einer asphaltierten Parkplatzfläche

IR-Aufnahmen vom 23.08.2016, Asphalt- und Wiesenflächen / Abend- und Nachtsituation



GEO-NET / ÖKOPLANA

Abbildung 50 IR-Aufnahme von einer asphaltierten Parkplatzfläche und einer Wiesenfläche



GEO-NET / ÖKOPLANA

Abbildung 51 IR-Aufnahme von farblich unterschiedlich gestalteten Fassaden

5.3.2 AUSWIRKUNGEN AUF DIE THERMISCHE BELASTUNGSSITUATION

Die Flächennutzung und der Versiegelungsgrad haben einen direkten Einfluss auf die Lufttemperatur. Die versiegelten Flächen speichern tagsüber relativ viel Wärme und geben sie nachts im Vergleich zum natürlichen Boden in der Regel langsamer wieder ab. Die Konversionsfläche ist jedoch im Ist-Zustand größtenteils versiegelt und die relativ kleinen Grünflächen zeigen keine signifikante Abkühlungsrate nachts (Abbildung 52). Am Nachmittag sind die Unterschiede dagegen sichtbar. Während die Luftmassen über dem Asphalt sich um 14:00 Uhr bereits auf bis zu ca. 25 °C aufgeheizt haben, beträgt die Lufttemperatur über den Grünflächen 22,5 °C bis max. 24°C (Abbildung 53).

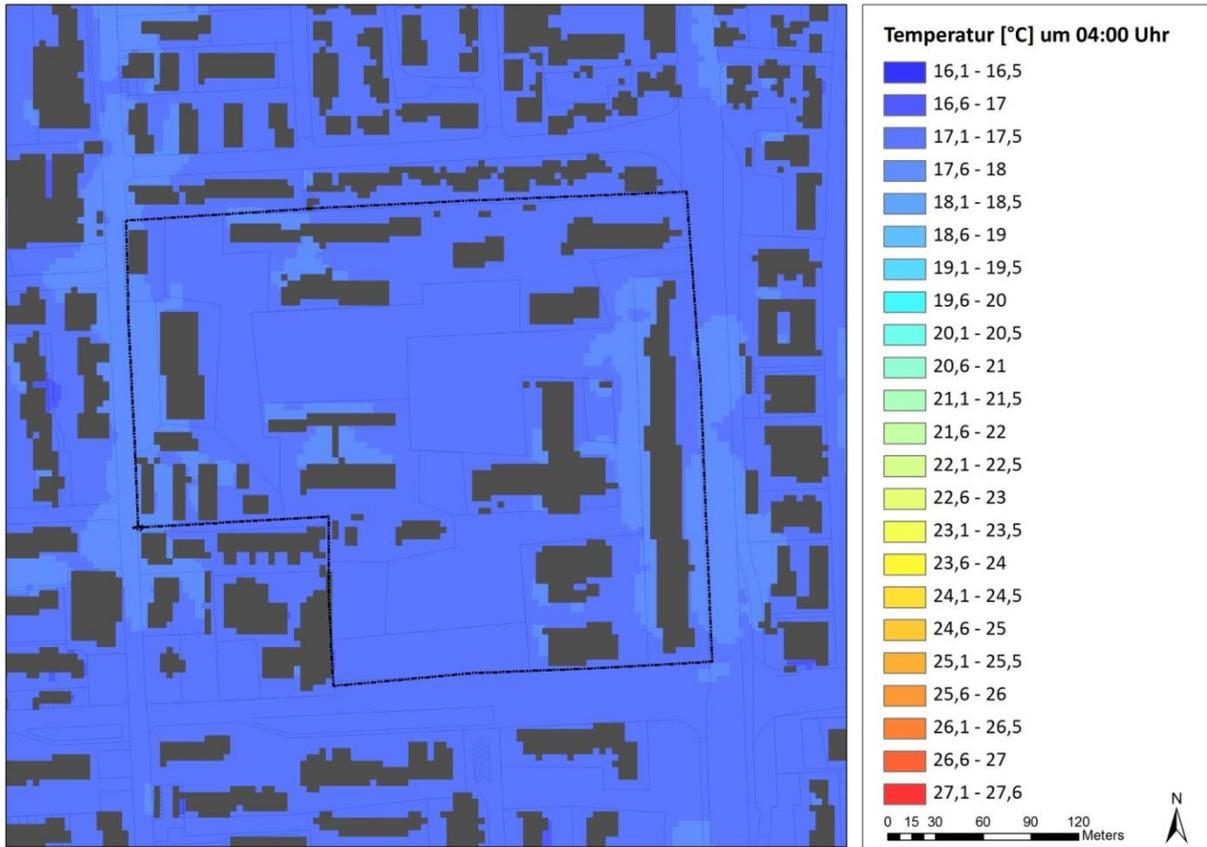


Abbildung 52 Temperaturfeld um 04:00 Uhr in 2 m Höhe im Ist-Zustand

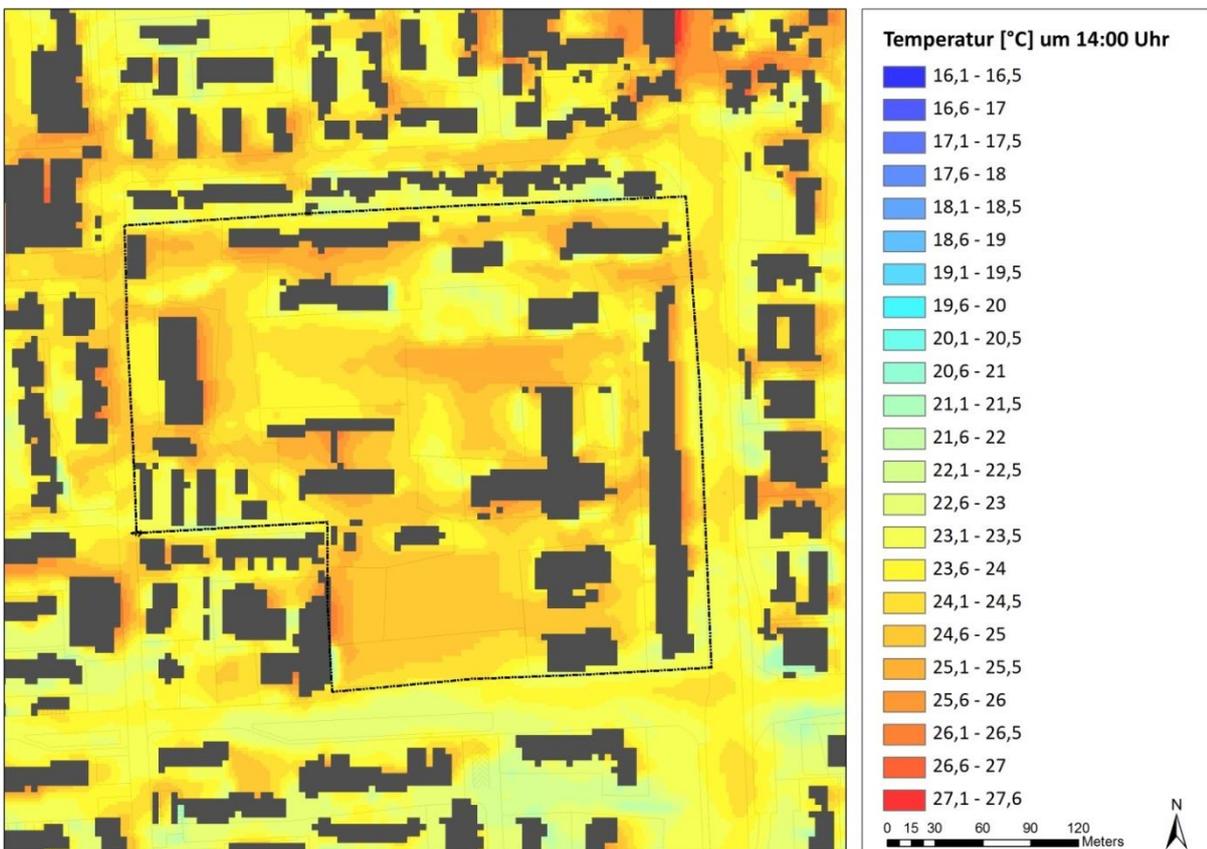


Abbildung 53 Temperaturfeld um 14:00 Uhr in 2 m Höhe im Ist-Zustand

Die leichte Erwärmung, um 0,2 °C der Luftmassen nachts westlich der Gebäude ist auf die östliche Anströmung zurückzuführen. Die Gebäude sind Hindernisse für die Strömung, weswegen die Luft davor aufsteigt um auf der anderen Seite den Transport der wärmeren Luftmassen von oben nach unten anzutreiben. Währenddessen bewegt sich die durch die nächtliche Inversion abgekühlte Luft direkt über dem Boden fort in die westliche Richtung.

Im Temperaturfeld um 14:00 Uhr ist eine Erwärmung der Luftmassen direkt an den östlichen Seiten mancher Gebäude sichtbar. Dieser Effekt ist auf die längere Exposition dieser Seite der Gebäude zur Sonneneinstrahlung bis zum Zeitpunkt 14:00 Uhr zurückzuführen. Zusätzlich wird er durch mangelnde Durchlüftung, bei enger oder quer zur Windrichtung angeordneter Bebauung verstärkt.

Die Lufttemperatur ist nicht automatisch ein Maß für das menschliche Wohlbefinden in Bezug auf das Klima. Zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit am Tage, wird der Universal Thermal Climate Index (UTCI) simuliert. Der UTCI-Wert stellt eine Art der „gefühlten Temperatur“ dar und berücksichtigt die physiologische Thermoregulation des Menschen und die Wirkung seiner Bekleidung. Der UTCI-Wert ist auf offenen, der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Plätzen höher als die Lufttemperatur. In beschatteten Bereichen bzw. nachts liegt er näher an der Lufttemperatur.

Der UTCI-Wert ist stark abhängig von der Sonneneinstrahlung und somit viel niedriger in beschatteten Bereichen als auf offenen Plätzen. Der Versiegelungsgrad und die Windverhältnisse vor Ort spielen dabei ebenfalls eine wichtige Rolle.

Die höchsten Werte im Ist-Zustand ergeben sich beim versiegelten Parkplatz im Zentrum des Gebietes mit 35,3 °C und im Bereich der Parkplätze im Süden des Gebietes mit 34,5 °C. Der um ein Grad niedrigere Wert im Süden ist auf die lockerere Bebauung und besserer Durchlüftung zurückzuführen. Über der Rasenfläche beträgt der UTCI ca. 31 °C, was auf den unversiegelten Untergrund und die Verdunstungskühlung der Vegetation zurückzuführen ist. Bäume garantieren den besten Hitzeschutz. Zusätzlich zur Evapotranspiration spenden sie Schatten, weswegen der UTCI dort bis auf 20,5 °C fällt. Es macht bis zu 15 °C weniger im Vergleich zu den offenen versiegelten Plätzen aus (Abbildung 54).

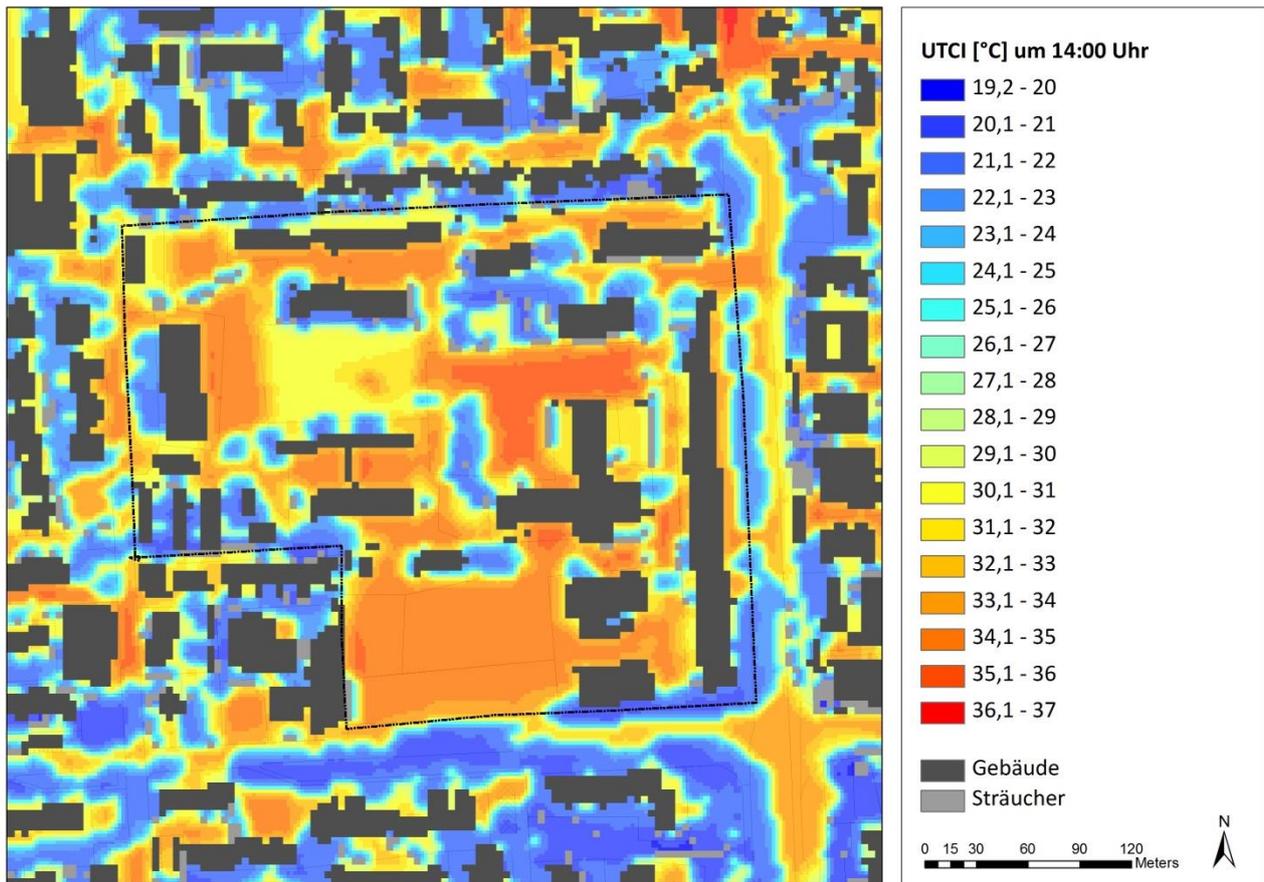


Abbildung 54 UTCI um 14:00 Uhr in 2 m Höhe im Ist-Zustand

Die Abbildung 55 stellt die nächtliche Strömungssituation während einer autochthonen Wetterlage im Untersuchungsgebiet dar. Darauf haben sowohl die übergeordneten Kaltluftströmungen, hauptsächlich aus den östlich gelegenen Waldhängen, als auch die thermisch bedingten Strömungen im Untersuchungsgebiet selbst, einen Einfluss. Während sich an der südlichen Grenze zum Gebiet US-Hospital die breiteste Leitbahn im Untersuchungsgebiet mit Windgeschwindigkeit von bis zu ca. 0,4 m/s bildet, herrscht im überwiegenden Teil des Hospital-Geländes Windstille. Das längst zur Karlsruher Str. liegende Gebäude und die restliche Bebauung östlich des Gebietes bilden eine wirksame Barriere für die östliche Anströmung. Eine Ausnahme ist der Norden des Geländes, der relativ gut durchströmt ist, auch wenn die Windgeschwindigkeit hier im Mittel nur 0,2 m/s beträgt.

Die Durchlüftungssituation wird genauer durch die Simulationsergebnisse des Modells MISKAM unter dem Punkt 5.3.3 beschrieben.

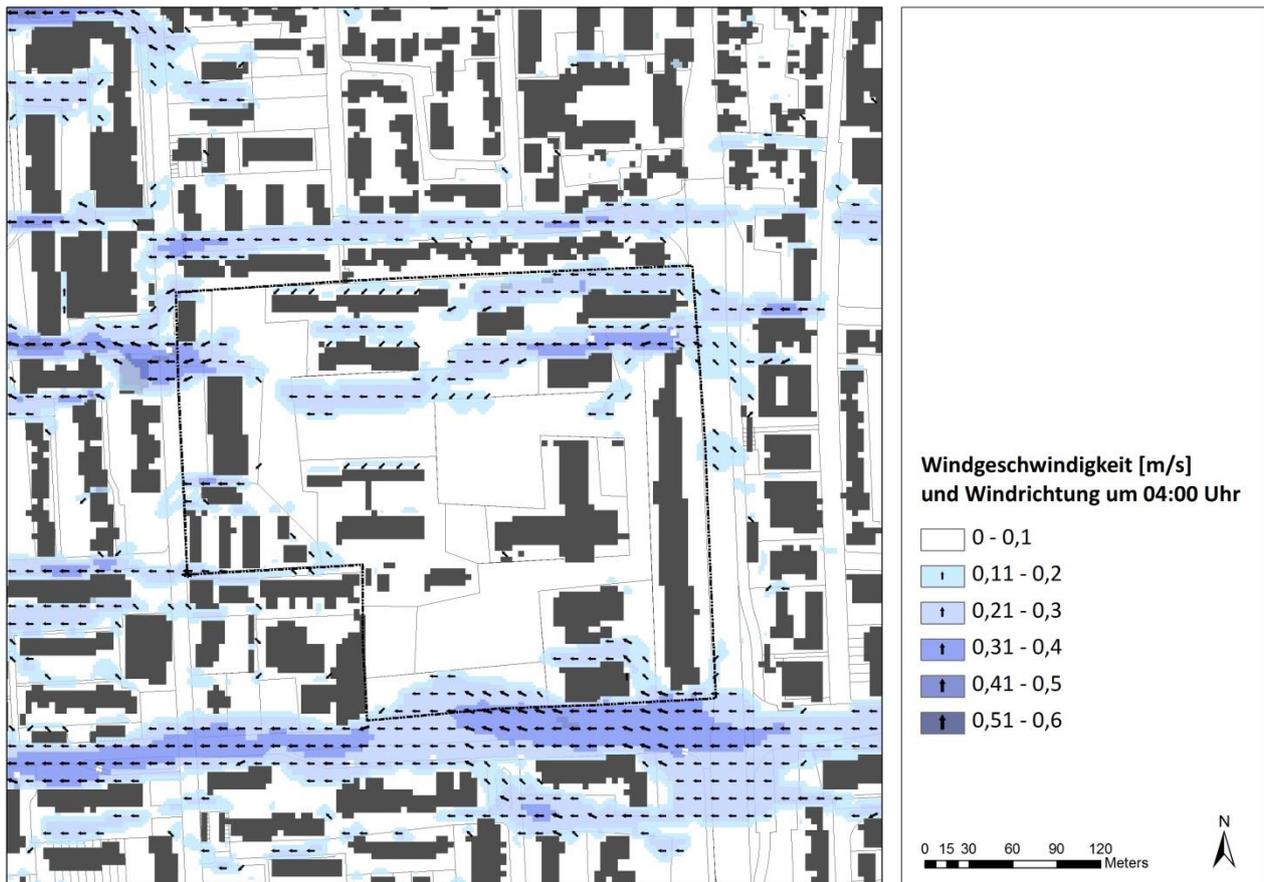


Abbildung 55 Nächtliches Windfeld um 04:00 Uhr in 2 m Höhe im Ist-Zustand

Im Planzustand bleibt die mittlere nächtliche Temperatur im Vergleich zum Ist-Zustand unverändert. Es ergibt sich jedoch ein lokaler Unterschied im Bereich des Teiches (Abbildung 56). Die Lufttemperatur über der Wasseroberfläche ist etwa 2 K höher als über der Rasenfläche im Park oder dem Platz im Süden. Bis zu ein paar Meter Entfernung vom Teich sind es dann nur noch maximal 0,4 K Unterschied zu den restlichen Flächen. Wasser hat eine hohe spezifische Wärmekapazität und speichert tagsüber relativ viel Energie der Sonneneinstrahlung. Es kühlt sich nachts langsamer als die restlichen Oberflächen ab.

Das Temperaturfeld um 14:00 Uhr sieht deutlich differenzierter als das der Ausgangssituation. Während in den Innenhöfen bzw. bei den dichter bebauten Bereichen Werte bis zu über 25,5 °C zu verzeichnen sind, ist die Lufttemperatur der grünen Flächen um gute 2 K niedriger. Der niedrigste Wert ist direkt über der Fontäne mit 22 °C zu verzeichnen. Über dem Teich beträgt die Lufttemperatur 22,5 °C und die abkühlende Wirkung ist bis zu ein paar Metern Entfernung, v.a. in die westliche Richtung, zusammenhängend mit der Strömung, zu sehen (Abbildung 57). Im Mittel über die gesamte Konversionsfläche ist die Lufttemperatur des Planzustands tagsüber um 0,6 K geringer als im Ist-Zustand.

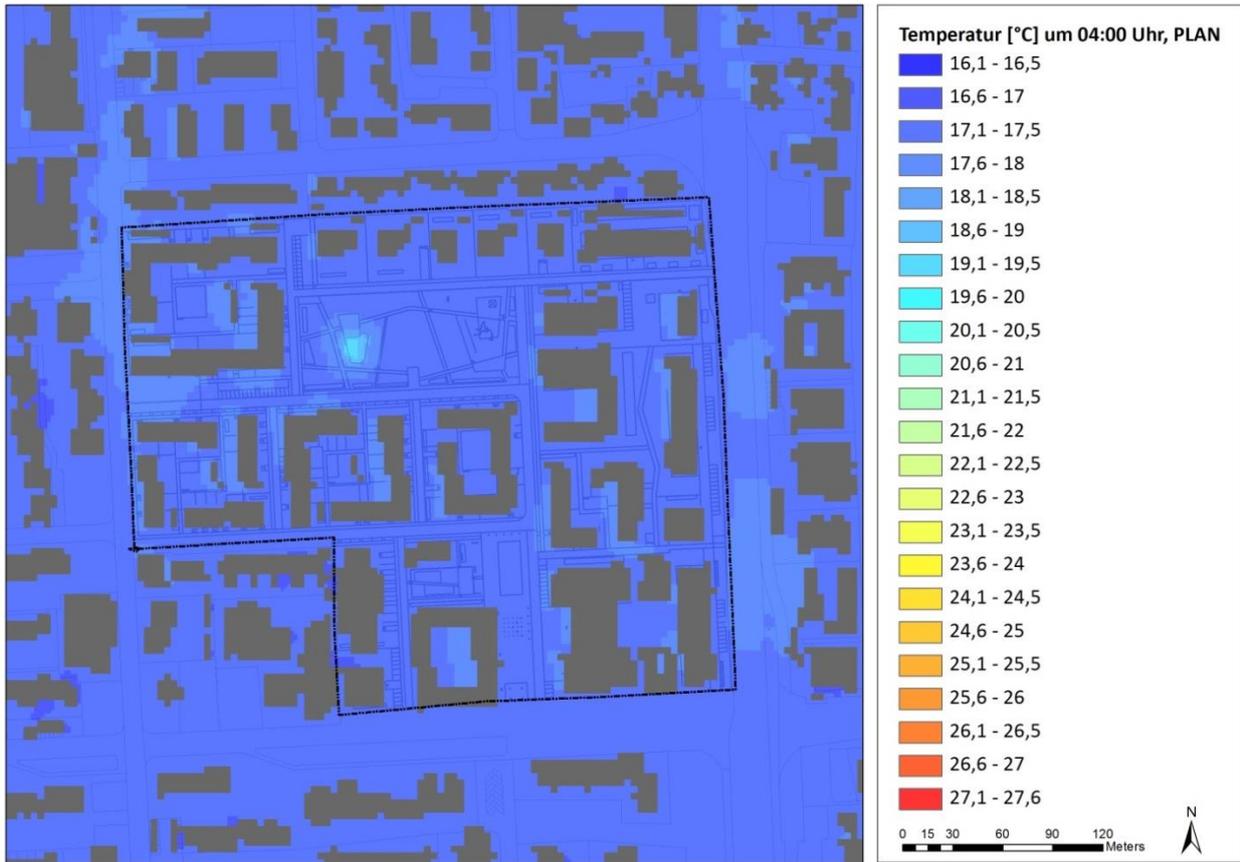


Abbildung 56 Temperaturfeld um 04:00 Uhr in 2 m Höhe im Planzustand

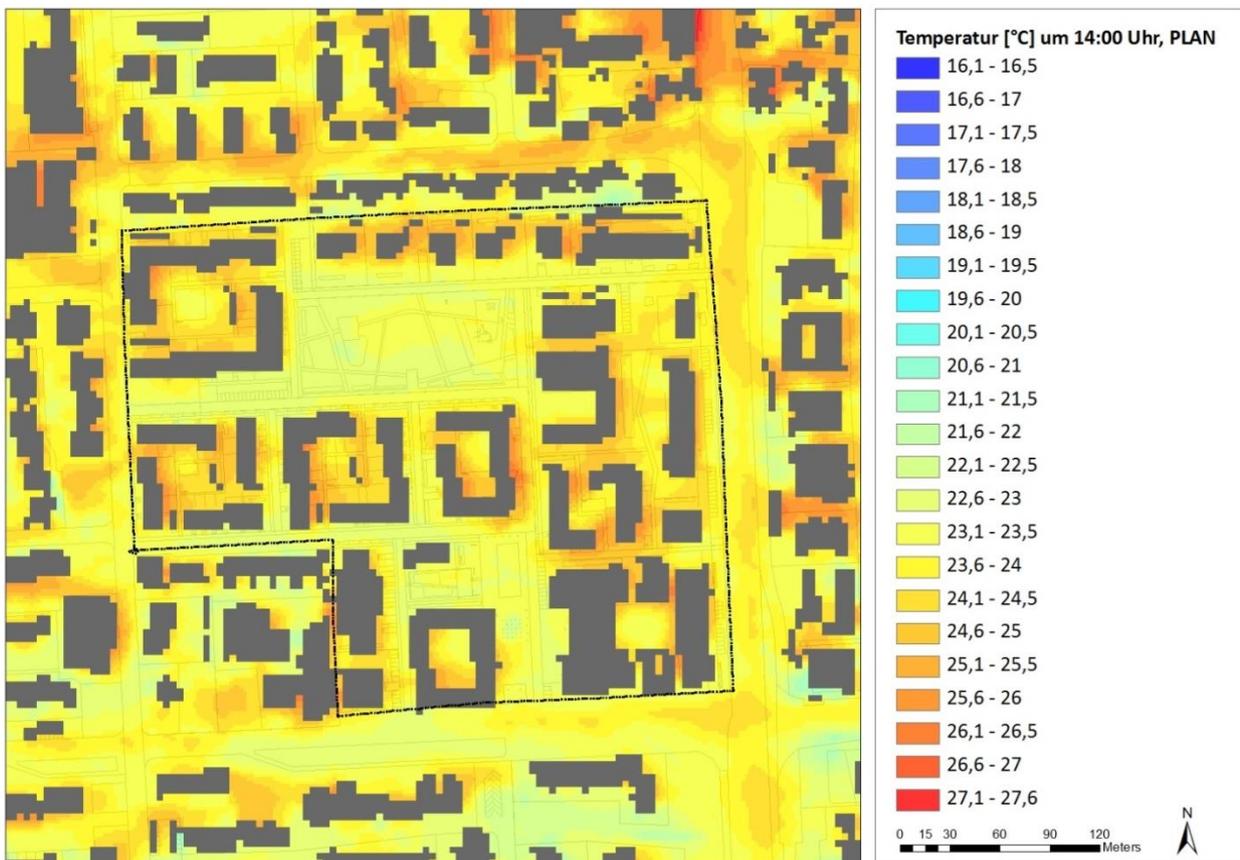


Abbildung 57 Temperaturfeld um 14:00 Uhr in 2 m Höhe im Planzustand

Im UTCI-Bild werden die Unterschiede zum Ist-Zustand bereits auf den ersten Blick sichtbar (Abbildung 58). Statt großer, Sonneneinstrahlung ausgesetzter Plätze, gibt es im Planzustand die Parkbäume und viele Bäume entlang der Wege. Sie alle spenden Schatten und bewirken eine Abkühlung unter den Bäumen bzw. in deren direktem Umfeld von ca. 2 K im Vergleich zu den Plätzen und Straßen im Planzustand. Diese Differenz ist deutlich geringer als die des ähnlichen Vergleiches aus dem Ist-Zustand. Dabei wird ersichtlich, dass auch Straßen, Wege und Plätze hier deutlich niedrigere UTCI-Werte als im Ausgangszustand aufweisen. Zu einem resultiert es aus der Teilversiegelung der Wege, anstatt 100% Asphalt und dem generell höheren Grünanteil im Gebiet. Im Mittel über die Konversionsfläche ist der UTCI um rund 5 K geringer als im Ist-Zustand.

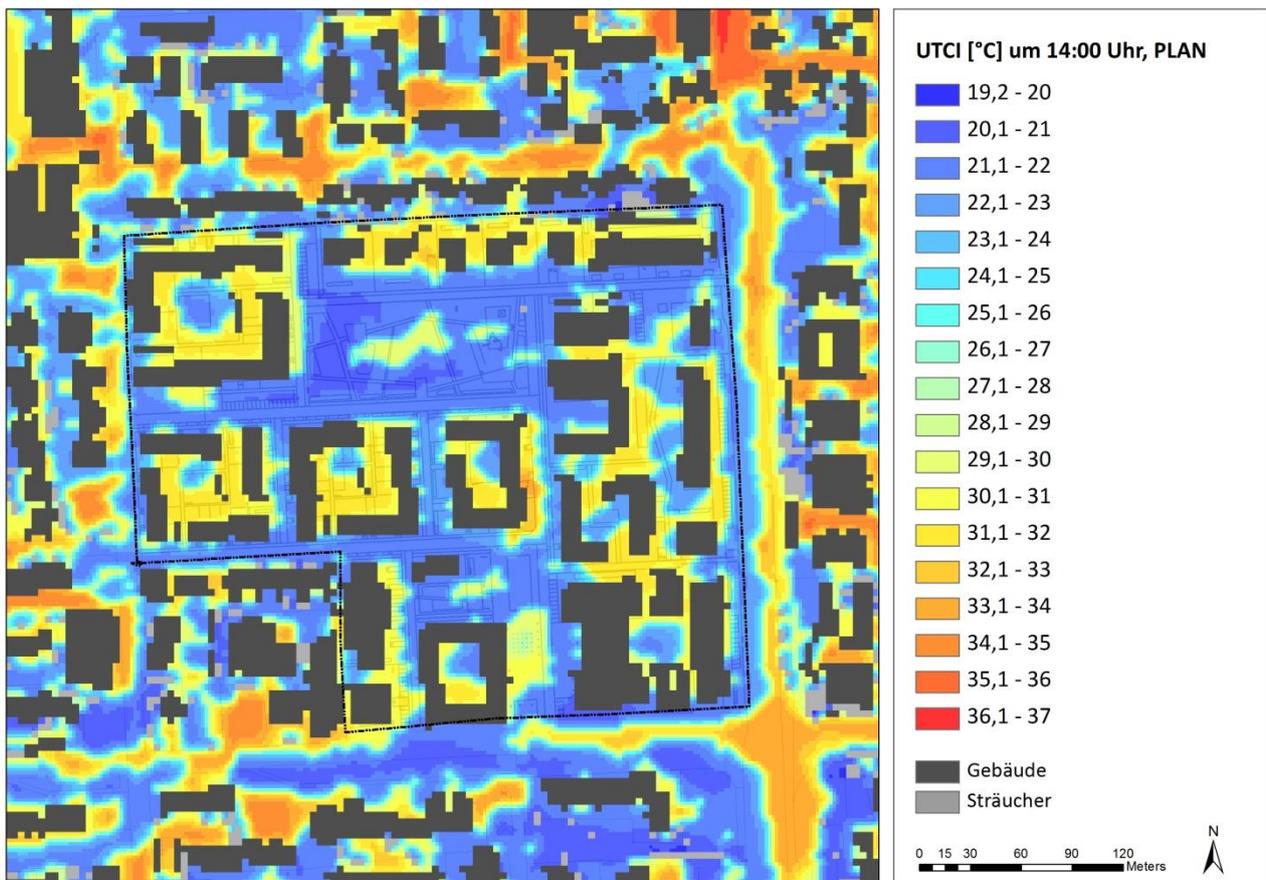


Abbildung 58 UTCI um 14:00 Uhr in 2 m Höhe im Planzustand

Trotz dichter Bebauung wird das Gebiet im Planzustand besser durchströmt. Die Luft findet Eingang durch die Öffnung der Gebäude entlang der östlichen Grenzen der Konversionsfläche. Die Windgeschwindigkeit bleibt gering, 0,1 - 0,2 m/s mit Höchstwerten von 0,3 m/s im Bereich des Parks und entlang der Freiburger Straße, direkt an der Grenze zur Konversionsfläche (Abbildung 59).

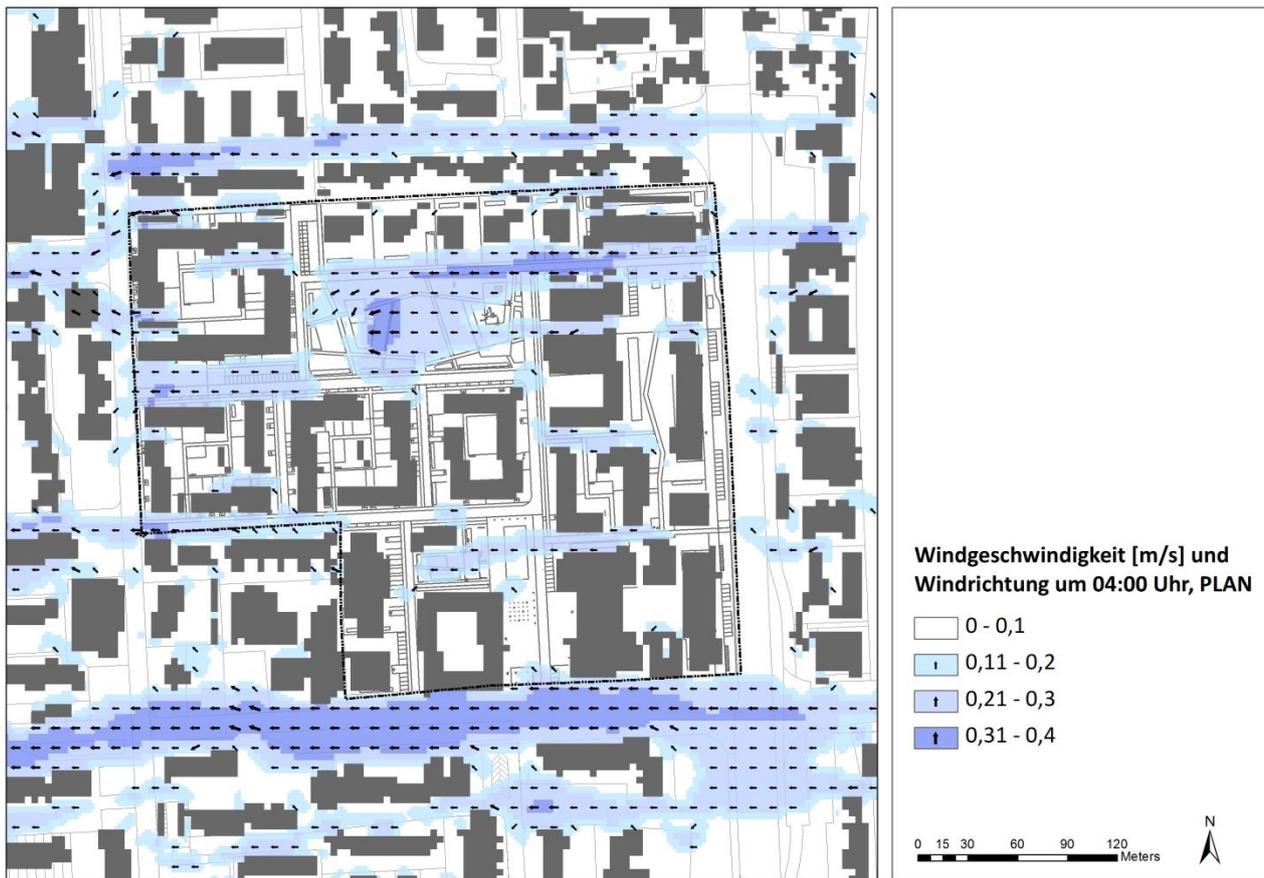


Abbildung 59 Windfeld um 04:00 Uhr in 2 m Höhe im Planzustand

Während die Gebäude- und Vegetationsstrukturen im Rahmenplan feststehen, wurde über die Art der Gebäudebegrünung noch nicht abschließend entschieden. Eine Entscheidungshilfe liefen die folgenden Differenzkarten. Sie stellen jeweils die Parameter-Differenzen zwischen dem Plan- oder Optionsplan-Zustand und dem Plan „Null“ (Vgl. 5.2.2 und Abbildung 28 bis Abbildung 30). Somit kann die Wirkung der Gebäudebegrünung, unbeeinflusst durch die Grünflächen und Bäume, aufgezeigt werden. Zusätzlich werden im Plan „Null“ keine Fontäne und kein Teich simuliert, um auch die Wirkung der Wassermaßnahmen zu bewerten.

Beim Vergleich der Ergebnisse des Plan- und des Optionszustands wird sichtbar, dass die Simulationsläufe geringfügig unterschiedliche Ergebnisse in Bereichen mit gleicher Nutzung liefern können. Zu einem hängt es mit den unterschiedlichen Maßnahmen-Komplexen im Planzustand und im Optionsplan zusammen. Die Temperatur des Teiches kann, z.B. durch die unterschiedliche Dachbegrünung südlich davon, beeinflusst werden. Zum anderen können die einzelnen Rechenläufe technisch bedingt minimale Unterschiede aufweisen, sodass sich bei Differenzbildung ein Rauschen einstellt (Veränderungen der Temperatur fern von geplanten Maßnahmen). Der Bereich des Rauschens wird daher in den folgenden Karten ausgeblendet (farblos dargestellt). In anderen Worten ausgedrückt, es werden nur die stärkeren Differenzen abseits des unsicheren Rauschen-Bereiches angezeigt. Das betrifft alle im Folgenden dargestellten Differenzkarten.

Die Differenzen der nächtlichen Lufttemperatur zwischen dem Plan- bzw. Optionsplan-Zustand und dem Plan „Null“ zeigen jeweils eine wärmende Wirkung des Teiches, die auf die hohe Wärmekapazität des Wassers zurückzuführen ist. Direkt über der Wasseroberfläche werden 2 K mehr im Vergleich zum Rasen no-

tiert, was die Ergebnisse aus dem Temperaturfeld des Planzustands bestätigt. Eine weiträumige Fernwirkung ist zwar zu sehen, beträgt jedoch maximal 0,3 K bei einer maximalen Entfernung von ca. 30 m im Simulationslauf des Optionsplans (Abbildung 60 und Abbildung 61).

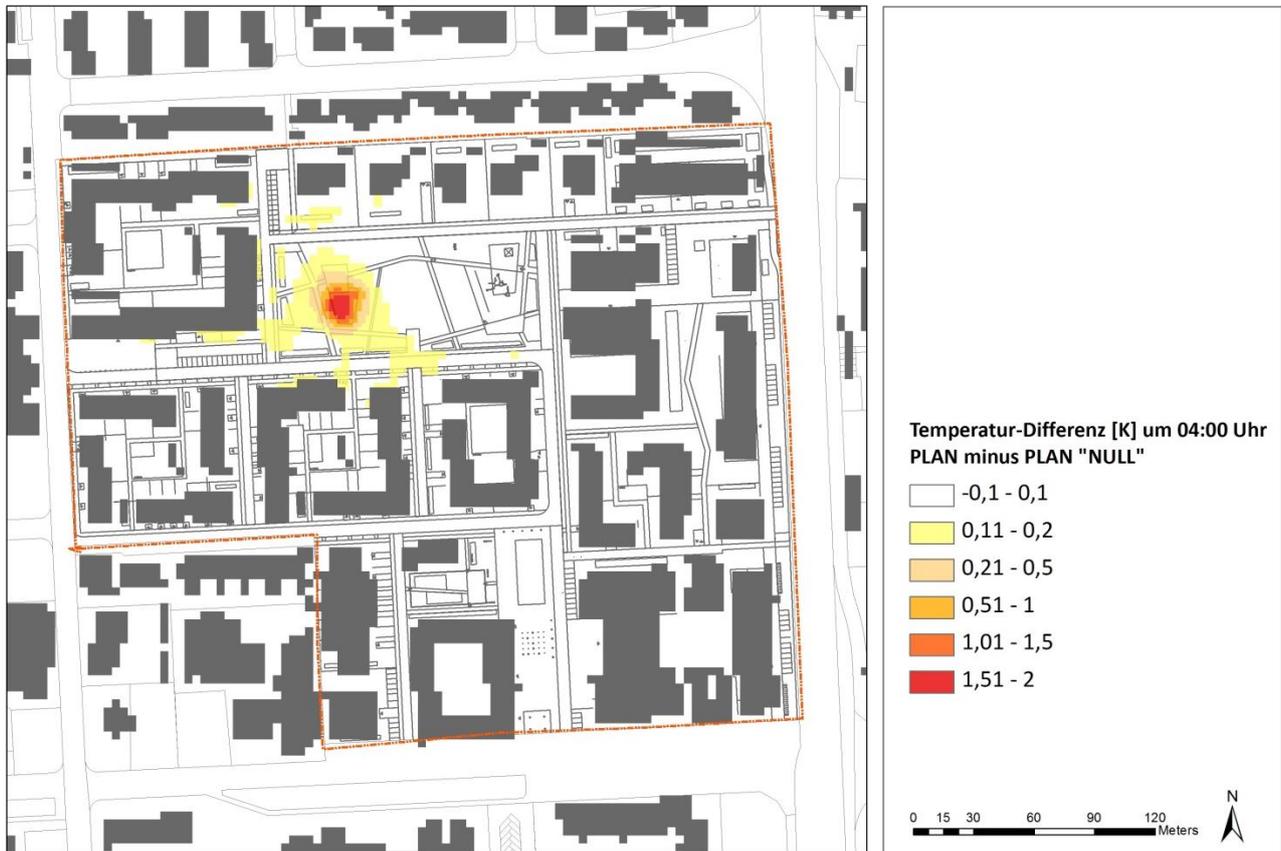


Abbildung 60 Temperatur-Differenz um 04:00 Uhr zwischen dem Planzustand und dem Plan „Null“

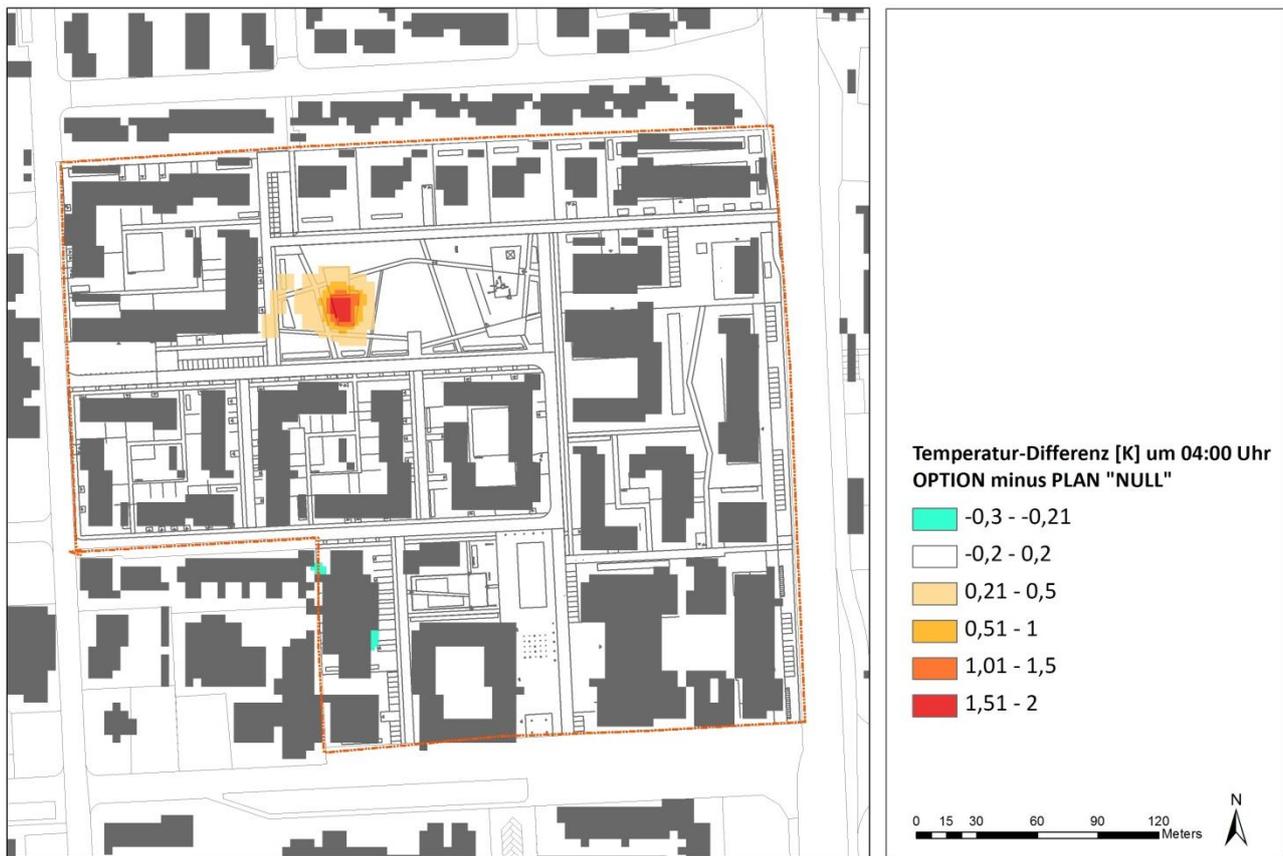


Abbildung 61 Temperatur-Differenz um 04:00 Uhr zwischen dem Optionsplan und dem Plan „Null“

Nachts ist eine geringfügige, bis zu $-0,3$ K, punktuelle Wirkung der Fassadenbegrünung zu sehen. Tagsüber macht sie sich durch die Evapotranspiration besser bemerkbar. Es kommt zu einer Abkühlung von bis zu 5 K direkt an der westlichen Fassade, von über ca. 2 K in einer Entfernung von ca. 12 m von der Fassade und bis hin zur minimalen Fernwirkung von $-0,4$ K in einer Entfernung von bis zu 50 m von der Fassade (Abbildung 63). Die westliche Anordnung der kühleren Luftmassen deutet auf eine strömungsabhängige Wirkung der Fassadenbegrünung hin.

Während die extensive Dachbegrünung weder nachts noch tagsüber eine Wirkung in 2 m zeigt, wird eine Veränderung bei den blaugrünen Dächern im Optionsplan am Nachmittag deutlich. In dem nahen Umfeld des Gebäudes bewirkt sie eine Abkühlung von bis zu fast 1 K. Eine geringe Fernwirkung, von ca. $0,4$ K macht sich sogar in einer Entfernung von bis zu 100 m bemerkbar. Auch hier ist der Einfluss der östlichen Anströmung deutlich zu sehen (Abbildung 63).

Auch der Teich und noch stärker die Fontäne zeigen eine kühlende Wirkung am Tag. Bis zu ein paar Metern Entfernung vom Teich kann eine um etwa 1 K kühlere Luft, als über dem Rasen, genossen werden. In einer Entfernung von bis zu ca. 30 m vom Teich wird eine Abkühlung um maximal einen halben Grad notiert. Das Wasser der Fontäne kann sich tagsüber, im Gegensatz zum Teich, kaum aufwärmen, da dauerhaft kühles Wasser nachläuft. Der Unterschied ist hauptsächlich direkt über der Maßnahmenfläche zu sehen. Die Differenz zum Plan „Null“ beträgt über der Fontäne fast 2 K, d.h. doppelt so viel, wie über dem Teich. In der Simulation des Planzustands wird auch in der direkten Umgebung der Fontäne ca. $0,4$ K kühler als in der Teichnähe (Abbildung 62 und Abbildung 63).

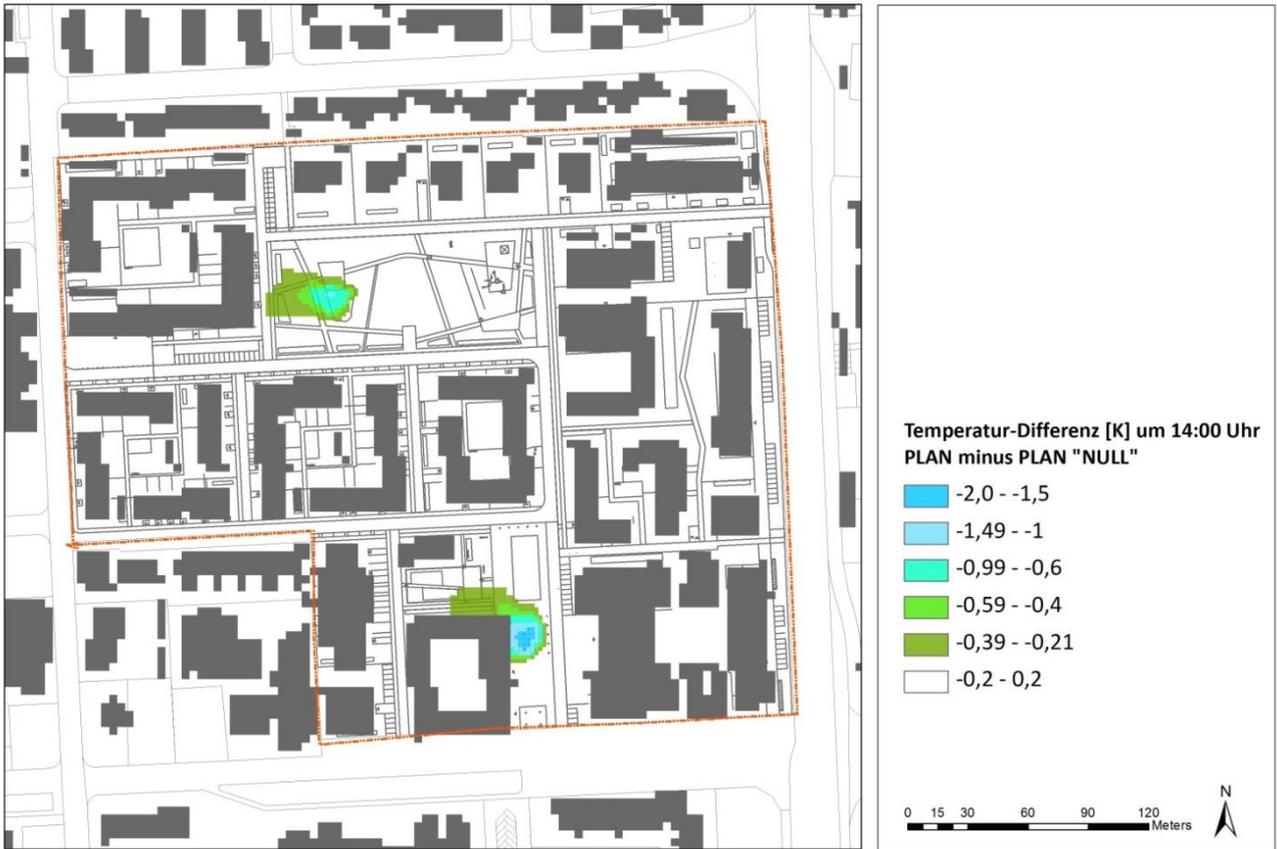


Abbildung 62 Temperatur-Differenz um 14:00 Uhr zwischen dem Planzustand und dem Plan „Null“

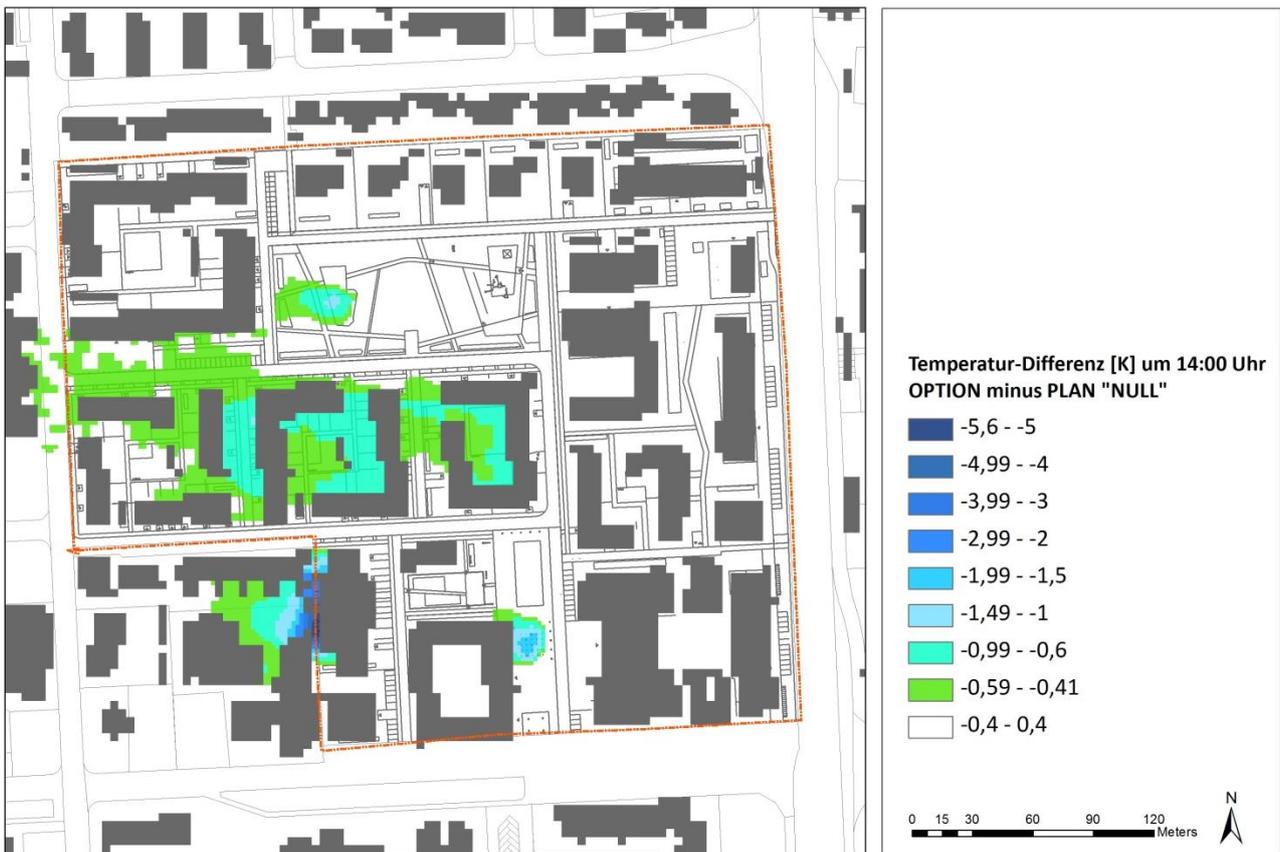


Abbildung 63 Temperatur-Differenz um 14:00 Uhr zwischen dem Optionsplan und dem Plan „Null“

Die Simulationsergebnisse des Parameters UTCI bestätigen die Erkenntnisse aus den Temperaturdifferenzen um 14:00 Uhr. Auch hier ist die Wirkung der Wassermaßnahmen, der blaugrünen Dächer und der Fassadenbegrünung deutlich zu sehen. Dabei sinkt der UTCI direkt über der Wasseroberfläche jeweils um ca. 1 K tiefer im Vergleich zur Temperatur, nämlich um 2 K über dem Teich und um 3 K über der Fontäne. Die mit der UTCI-Differenz aufgezeichnete Fernwirkung ist der aus dem Temperatur-Vergleich ähnlich (Abbildung 64 und Abbildung 65).

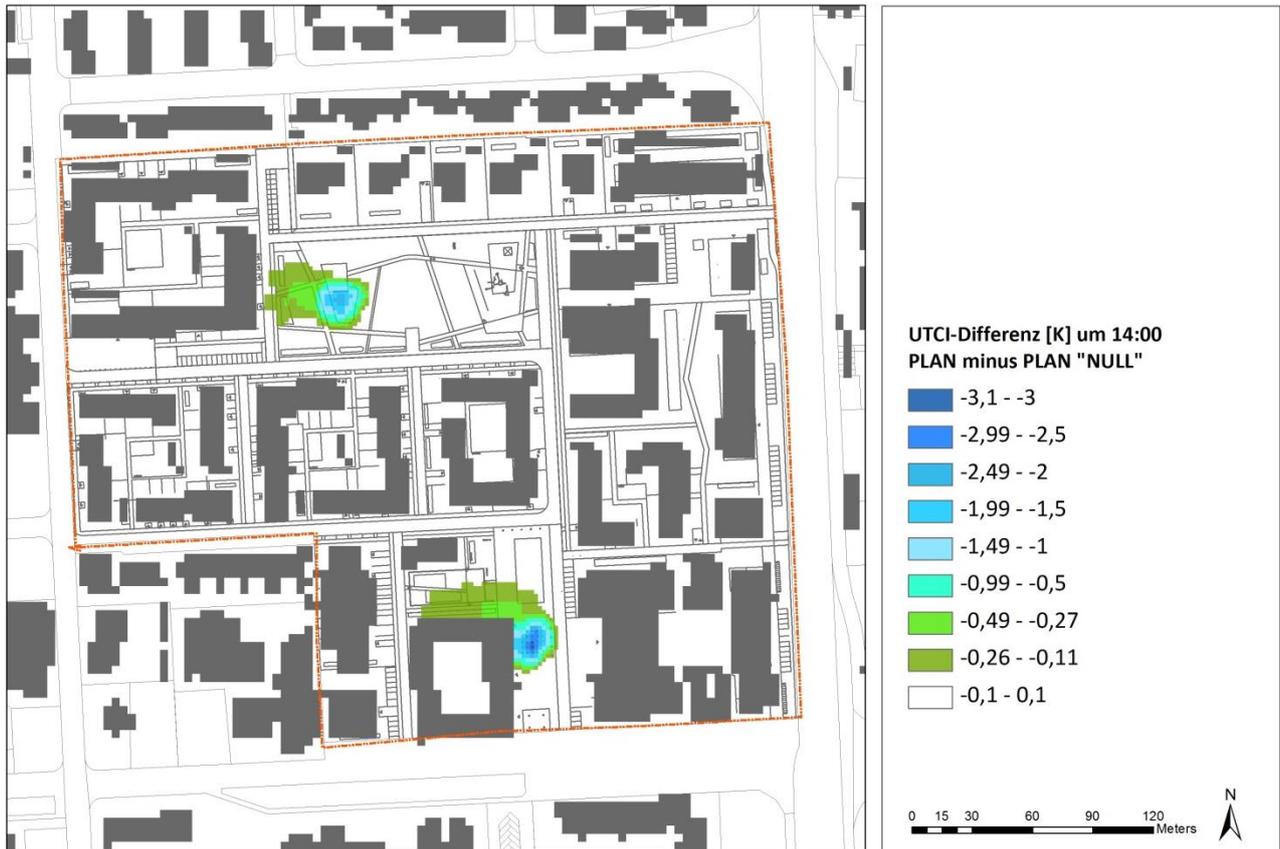


Abbildung 64 UTCI-Differenz um 14:00 Uhr zwischen dem Planzustand und dem Plan „Null“

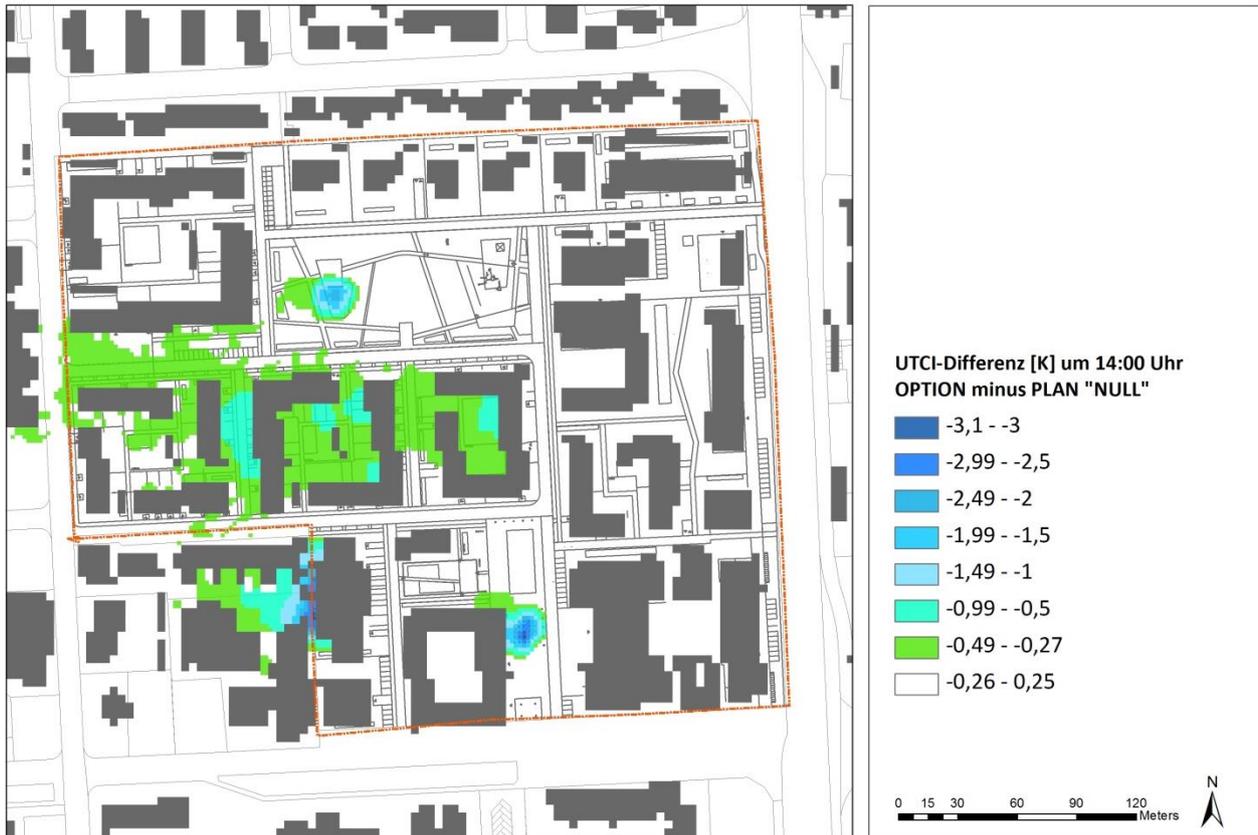


Abbildung 65 UTCI-Differenz um 14:00 Uhr zwischen dem Optionsplan und dem Plan „Null“

5.3.3 AUSWIRKUNGEN AUF DIE DURCHLÜFTUNG

Auf Grundlage einer mehrjährigen Windstatistik wurde der vorgelegte städtebauliche Entwurf für die Konversionsfläche „Rohrbach ehemaliges Hospital“ hinsichtlich seiner Durchlüftungsintensität analysiert. Wie Abbildung 66 zeigt, herrschen an der Freiburger Straße im Allgemeinen südwestliche bis südöstliche und nördliche Windrichtungen vor. Eine prägnante Häufung von Winden aus östlichen Richtungssektoren tritt zumeist in sog. Strahlungsnächten auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit (10 m ü.G.) beträgt an diesem Messstandort ca. 1,7 m/s (ca. 2,0 m/s am Tag und ca. 1,5 m/ in der Nacht).

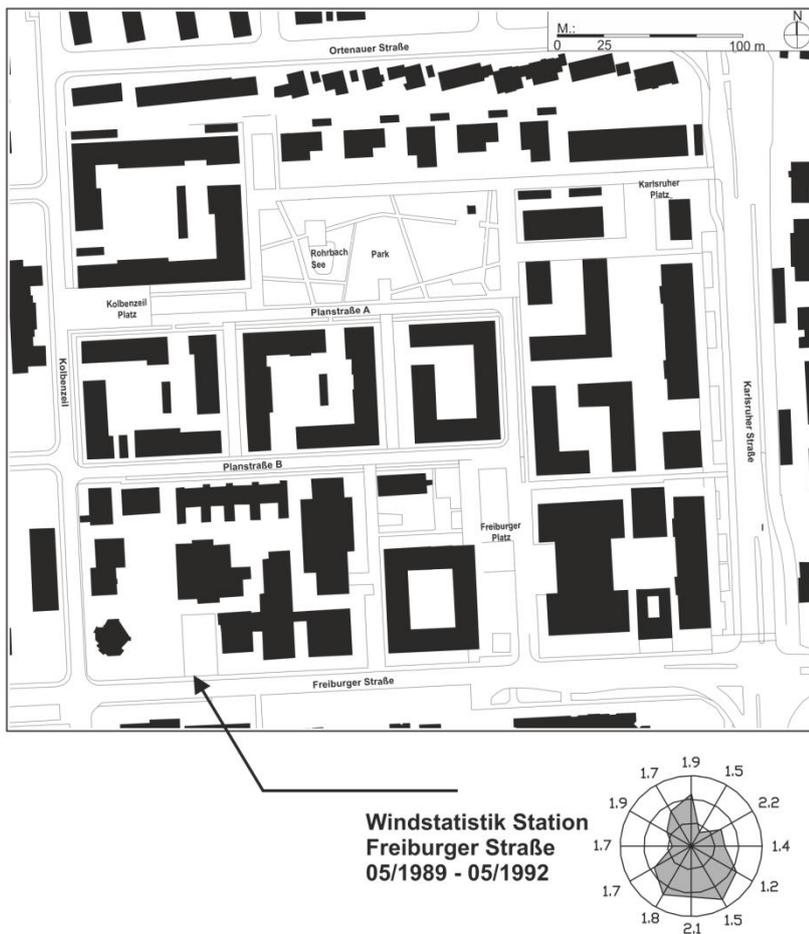


Abbildung 66 Windstatistik für die Station Freiburger Straße für den Zeitraum 05/1989 – 05/1992 – Kartengrundlage: Städtebaulicher Planungsentwurf für die Konversionsfläche „Rohrbach ehemaliges Hospital“

In Abbildung 67 ist das berechnete Windfeld für eine nördliche Anströmungssituation (2,0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G.) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die N-S-orientierten Straßenzüge am Rande des Planungsgebiets (Karlsruher Straße und Kolbenzeil) als wirksame Ventilationsachsen mit vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeiten fungieren. Innerhalb des Planungsgebiets ist die mittlere Windgeschwindigkeitsverteilung kleinräumig differenziert. Günstige Belüftungsverhältnisse zeigen auch hier N-S-orientierte Erschließungswege und Abstandsflächen. Hier kann der vorherrschende nördliche Gradientwind vermehrt bodennah durchgreifen. Die thermische und lufthygienische Belastung kann hierdurch effektiv begrenzt werden.

Vorteilhaft zeigen sich auch die geplanten Platzstrukturen (z.B. Freiburger Platz und Kolbenzeil Platz) sowie der zentrale Park im nördlichen Planungsteilbereich. Die gewählte Baumdichte sichert großflächig eine ausreichende bodennahe Belüftung mit mittleren Windgeschwindigkeiten über 0,2 m/s. Mittlere Windgeschwindigkeiten von unter 0,2 m/s, die auf Luftstagnation hindeuten, bleiben im Wesentlichen auf Teilbereiche der Blockinnenlagen und auf unmittelbaren Gebäudelelagen (= Windschattenwirkung) begrenzt.

Vergleicht man die unterschiedlichen Baublockstrukturen zwischen den Planstraßen A und B, so zeigt sich deutlich die strömungsdynamische Gunstwirkung mehrerer Blocköffnungen. Sie sichern einen rascheren Luftmassenwechsel, wodurch in windschwachen Sommertagen die Tendenz zu Wärmestaus minimiert wird.

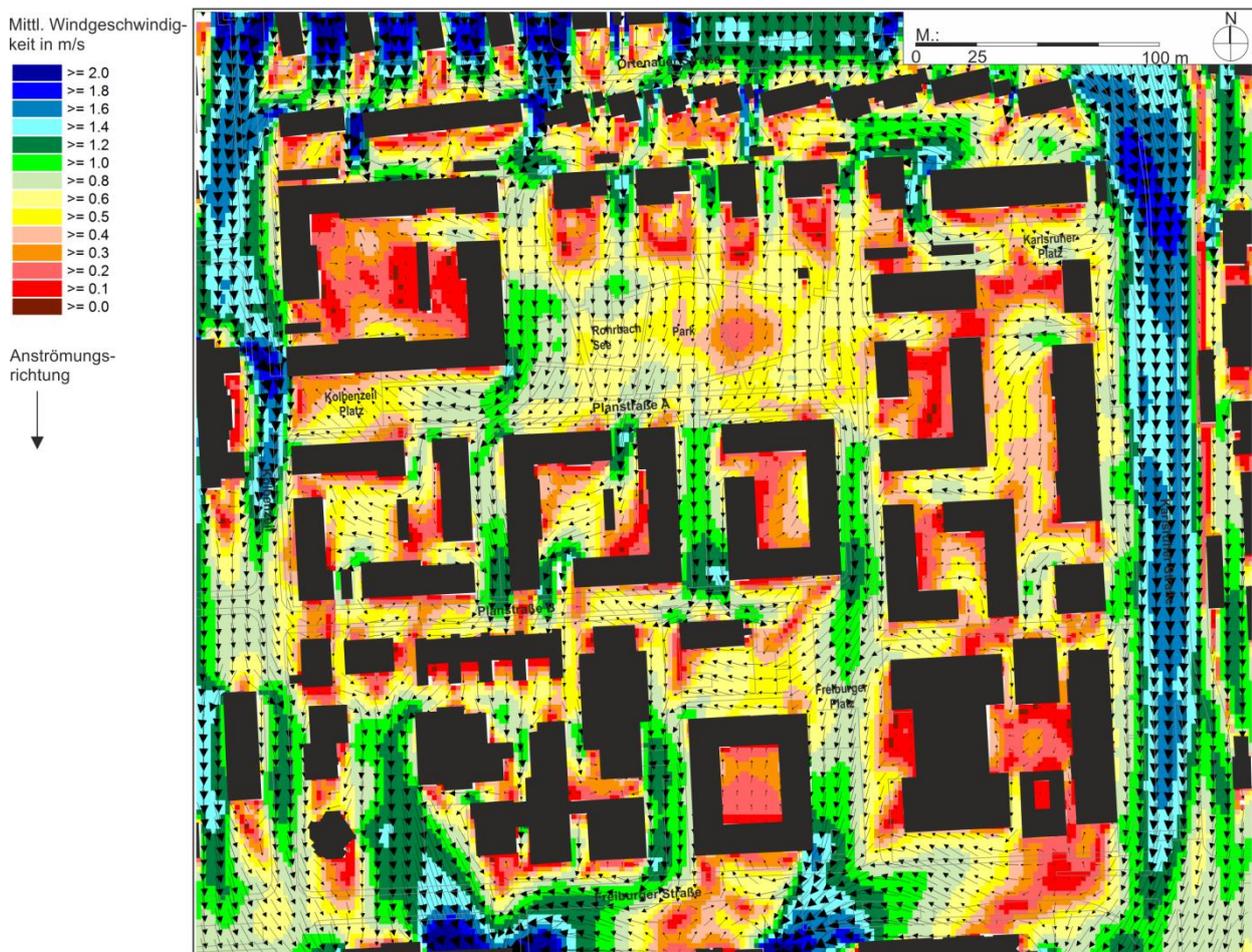


Abbildung 67 Ergebnisse der Windfeldmodellierung für eine nördliche Anströmung mit 1.9 m/s (10 m ü.G.)- Horizontalschnitt 1.5 m ü.G.

Legt man den Strömungssimulationen eine ostnordöstliche Anströmung (2,2 m/s 10 m ü.G.) zu Grunde, so treten die Öffnungen der geplanten Gebäudestruktur entlang der Karlruher Straße als kleinräumige Belüftungsachsen hervor (Abbildung 68). Durch das Zusammendrängen der Stromlinien zwischen den Gebäuden kommt es dort zu Windbeschleunigungen, wodurch im Planungsgebiet in direkter Leelage zur östlichen Randbebauung großflächige Luftstagnationserscheinungen unterbunden werden. Einer prägnanten Zunahme der lufthygienischen und bioklimatischen Belastung (trotz Öffnung zur Hauptverkehrsachse Karlruher Straße) kann hierdurch entgegengewirkt werden.

Innerhalb des Planungsgebiets zeigen sich auch in den geplanten Blockinnenbereichen keine großflächigen Bereiche mit mittleren Windgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s (= Luftstagnation). Die Flächengröße der Blockinnenhöfe ist daher aus klimaökologischer Sicht ausreichend groß dimensioniert. Auch die gewählte Freiflächenstruktur mit einem feingliedrigen Wechsel von Plätzen, baumüberstellten Grünflächen, Erschließungswegen und -straßen ist aus klimaökologischer Sicht vorteilhaft.

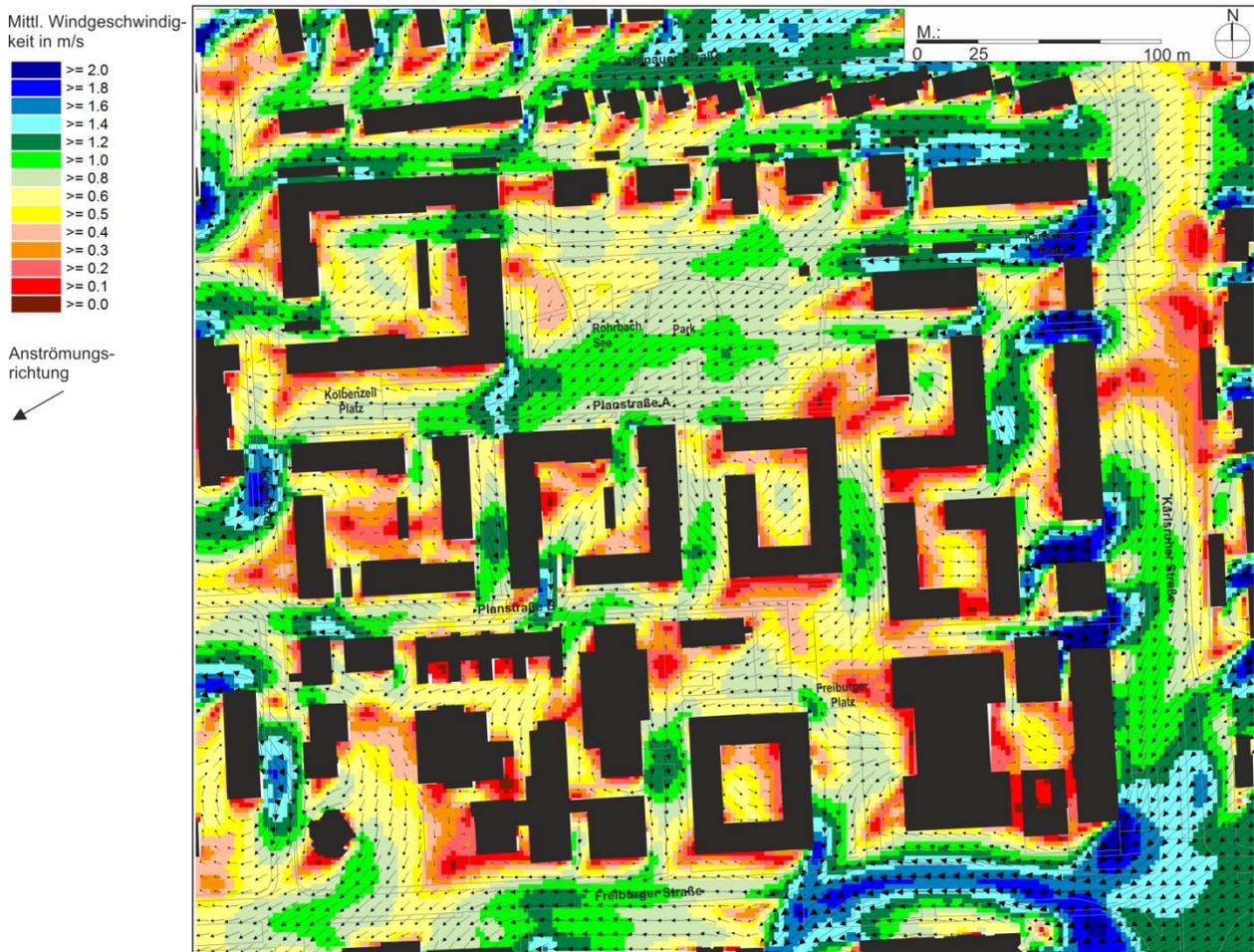


Abbildung 68 Ergebnisse der Windfeldmodellierung für eine ostnordöstliche Anströmung mit 2.2 m/s (10 m ü.G.)- Horizontalschnitt 1.5 m ü.G.

Abbildung 69 zeigt die Ergebnisse der Strömungssimulationen für eine typische Situation mit Südsüdwestwind. Die berechnete flächenhafte Verteilung der bodennahen Windgeschwindigkeiten dokumentiert, dass bei der vorgegebenen Situation im Planungsgebiet recht günstige Belüftungsbedingungen zu erwarten sind. Eine großflächige Ausprägung von Arealen mit mittleren Windgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s (= Luftstagnation) ist nicht zu bilanzieren. Die Anordnung der Freiflächen und Erschließungswege sowie die gewählten Tiefen der Abstandsflächen und Dimensionen der Blockinnenbereiche ermöglichen einen ausreichenden bodennahen Luftaustausch.

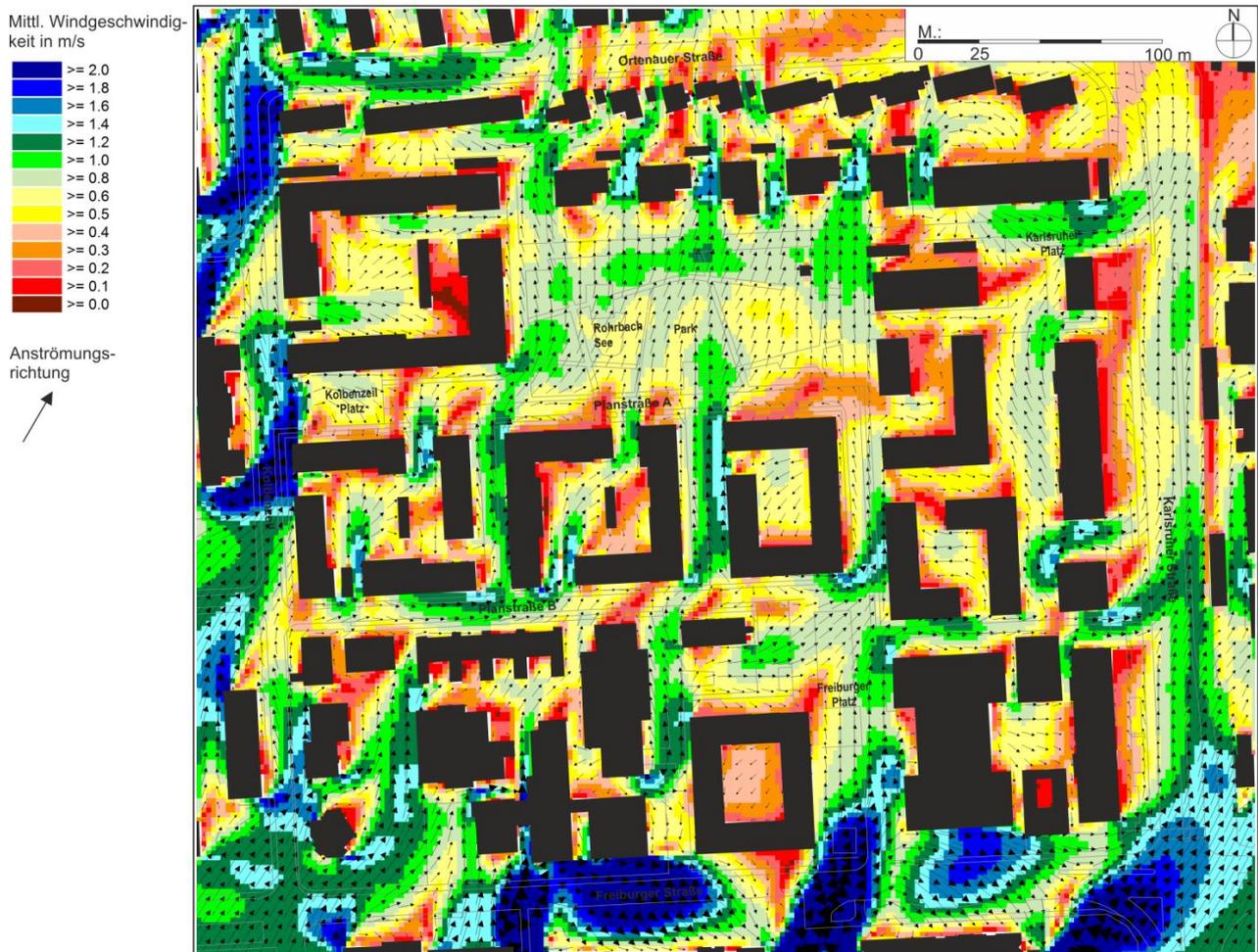


Abbildung 69 Ergebnisse der Windfeldmodellierung für eine südsüdwestliche Anströmung mit 2.1 m/s (10 m ü.G.)- Horizontalschnitt 1,5 m ü.G.

Zur zusammenfassenden Bewertung der Durchlüftungsverhältnisse innerhalb des Planungsgebiets „Rohrbach ehemaliges Hospital“ erfolgt nachfolgend eine Betrachtung der über alle Windrichtungen (30°-Schritte) gemittelten bodennahen Windgeschwindigkeit (Abbildung 70). Hierbei fand die Windrichtungst Statistik der Station Freiburger Straße Eingang in die Berechnungen. Die 3-jährigen Messungen von 05/1989 – 05/1992 können als repräsentativ für das Planungsgebiet angenommen werden. Die Windrose zeigt die in Tabelle 7 aufgelistete Häufigkeitsverteilung.

Tabelle 7 Häufigkeitsverteilung über alle Windrichtungen, Windstatistik der Station Freiburger Straße

Windrichtung	Häufigkeit in %	Mittlere Windgeschwindigkeit in m/s
0° (N)	6.6	1.9
30° (NNE)	3.6	1.5
60° (ENE)	7.3	2.2
90° (E)	7.5	1.4
120° (ESE)	11.2	1.2
150° (SSE)	13.1	1.5
180° (S)	10.7	2.1
210° (SSW)	12.3	1.8
240° (WSW)	9.0	1.7
270° (W)	4.6	1.7
300° (WNW)	5.7	1.9
330° (NNW)	8.4	1.7

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der vorgelegte Planungsentwurf zur baulichen Entwicklung des Konversionsgeländes eine ausreichende bodennahe Durch-/ Belüftung gewährleistet. Vergleichsweise windschwache Bereiche beschränkten sich im Wesentlichen auf die angedachten Baublockstrukturen.

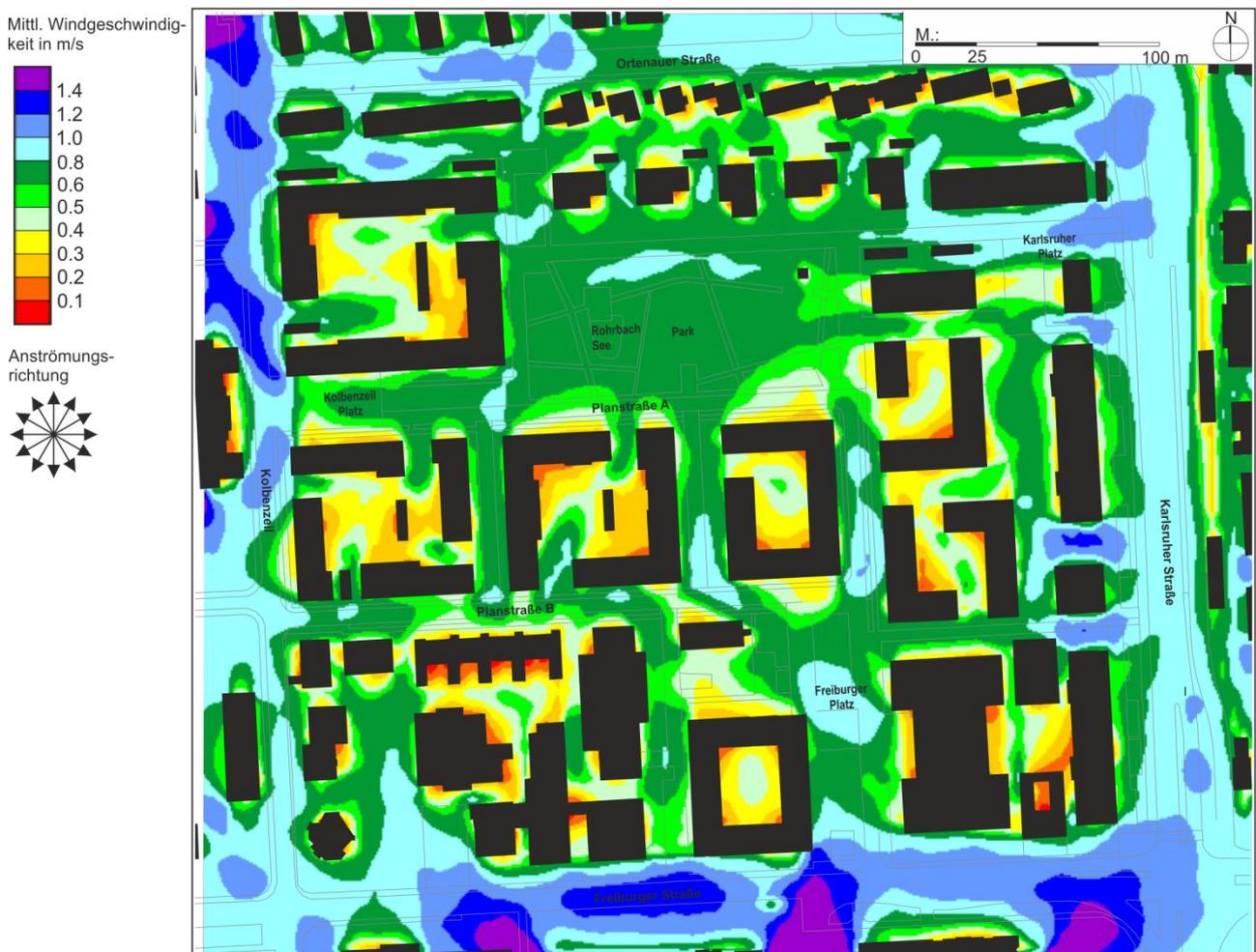


Abbildung 70 Ergebnisse der Windfeldmodellierung über alle Windrichtungen gemittelt (gem. Windstatistik an der Station Freiburger Straße) - Horizontalschnitt 1,5 m ü.G.

5.4 PLANUNGSHINWEISE FÜR EINE STADTKLIMA(WANDEL)GERECHTE KONVERSION

Die Ergebnisse der mikroskaligen Modellierung mit ASMUS zeigen eine Verbesserung der bioklimatischen Situation des Geländes US-Hospital im Rahmen dessen Konversion. Trotz der dichteren Bebauung ist eine deutliche Senkung der **thermischen Belastung** durch die Entsiegelung der unbebauten Bereiche und Erhöhung des Vegetationsanteils zu verzeichnen. Die Veränderung bezieht sich hauptsächlich auf die thermische Situation am Tag und macht sich in dem um ca. 5 K geringeren mittleren UTCI-Wert bemerkbar. Die großflächigen Parkplätze, die einer Aufheizung ausgesetzt sind, verschwinden zu Gunsten der Parkanlage, grüner Innenhöfe und Bäumen entlang teilversiegelter Wege. Damit sind die wichtigsten Regeln einer klimawandelgerechten Bebauung befolgt, nämlich die Erhöhung des Grünanteils und Verschattung. Die stärkste kühlende Wirkung ist den Bäumen zuzuschreiben.

Auch die Fontäne ist eine effektive Maßnahme, um lokal den Hitzestress zu senken. Mit unterschiedlichen technischen Ausführungen kann die Wirkung variieren. Die Simulationen der Fontäne, angenommen als flaches Wasserbecken, ergeben eine Reduktion von bis zu 2 K direkt über der Maßnahme und ca. 0,5 K in der direkten Umgebung der Fontäne. Zum Vergleich kann die Studie von Xue et al. (2014) zitiert werden, im Rahmen derer eine Messung an einer Fontäne mit hohen Wassersäulen durchgeführt wurde (Abbildung 71). Dabei wurde eine Senkung der Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um max. 7,8 K gegen 14:30 Uhr bzw. durchschnittlich um 4,7 K von der Lee-Seite nahe der Fontäne festgestellt. Als Referenz-/ Umgebungstemperatur wurde die Lufttemperatur der Luv-Seite in 6 m Höhe und einer etwas weiteren Entfernung von der Fontäne angenommen ($T_{\text{mittl.}} = 32,5 \text{ °C}$)



Abbildung 71 Fontänenfeld aus der Studie von Xue F. et al., 2014. Rot umkreist ist hier der Standort der Messung für die Referenzparameter (Bildquelle: Xue F. et al., 2014)

Der Optionsplan ist dem Plan-Szenario klimaökologisch überlegen, was auf die wirksame Dachbegrünung und zusätzliche Fassadenbegrünung zurückzuführen ist. Die extensive Dachbegrünung zeigt sich als schwächste Maßnahmen in der bodennahen Wirkung. Eine zusätzliche Wasserfläche auf dem Dach erhöht den kühlenden Effekt. Eine eventuelle Aufwärmung des Wassers über mehrere Tage und somit vor allem bei großflächiger Umsetzung eine Wärmeabgabe nachts ist denkbar, konnte aber im Rahmen des Projektes nicht simuliert werden. Die Fassadenbegrünung ist durch die Transpirationskühlung sowohl am Boden als auch in der Höhe wirksam. Die mit ASMUS simulierte östliche Anströmung deutet zwar auf eine verstärkte

Wirkung der Fassadenbegrünung westlich des Parkhauses hin, also eigentlich außerhalb der Konversionsfläche, aber die Simulationsergebnisse des Modells MISKAM und die Windmessung am Tag lassen (strömungsbedingt) auch von den anderen Gebäudeseiten eine Wirkung vermuten.

Ergebnisse aus dem BMBF-Forschungsprojekt KURAS zeigen eine verstärkte Wirkung der Fassadenbegrünung, sowohl tagsüber als auch nachts bei großflächiger Umsetzung und vor allem in Innenhöfen (Leßmann D., von Tils R., 2016). Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Simulationen mit dem Modell AS-MUS_Green zeigen eine Reduktion des Hitzestresses ($UTCI > 32\text{ °C}$) in den begrünnten Innenhöfen im Mittel um ca. 50 Stunden im Jahr, was etwa eine 30 %-ige Reduktion des Hitzestresses im Vergleich zum unbegrünnten Zustand ergibt. Zusätzlich ist eine Reduktion um ca. 1 – 2 Tropennächte im Jahr zu erwarten. Für den unbegrünnten Zustand wurden ca. 2 - 4 Tropennächte simuliert. Die verstärkte Wirkung in den Innenhöfen lässt sich am Tag durch die große Verdunstungsrate in Bezug auf ein relativ kleines Luftvolumen, das kaum Austausch mit wärmeren Luftmassen von außen hat, erklären. In der Nacht bleibt der Innenhof weiterhin kühl, weil die tagsüber durch die Begrünung beschatteten Fassaden keine nennenswerte Menge an Wärme speichern, die sie nachts ausstrahlen könnten.

Gebäudebegrünung hat zusätzlich einen positiven Einfluss auf das Innenraumklima. Sie wirkt dämmend und lässt die Räume im Sommer weniger stark aufwärmen bzw. im Winter abkühlen. Falls technisch und finanziell möglich, wäre eine Begrünung weiterer Fassaden auf der Konversionsfläche empfehlenswert. Es gibt verschiedene Ausführungsmöglichkeiten, wie die klassische bodengebundene oder systemgebundene Fassadenbegrünung (z.B. in Kübeln). Die Pflanzen können direkt an der Fassade oder an einer vor der Fassade aufgestellten Vorrichtung hochklettern (z.B. auf Seilen).

Zur klimatischen Aufwertung des Planszenarios kommen noch weitere Maßnahmen in Frage, wie Verschattung bzw. sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden oder auf Plätzen, die zusätzlich zur Begrünung auch durch bautechnische Maßnahmen erfolgen können. Großen Einfluss haben die Art und die Albedo des Baumaterials für Gebäude und Wege. Tabelle 8 erhält einen Überblick der Maßnahmen auf Gebäude- und Quartiersebene, die für das Gelände des ehemaligen US-Hospitals relevant sein könnten. Die meisten Maßnahmen beziehen sich auf die Reduktion der thermischen Belastung, ein paar wenige auf die Verbesserung der Durchlüftung. Aufgrund der begrenzten Größe des Gebietes sind Maßnahmen zum Schutz von größeren Kaltluftentstehungsgebieten oder –Leitbahnen zu vernachlässigen.

Nichtsdestotrotz ist die lokale **Durch-/ Belüftungssituation** wichtig für den bioklimatischen Komfort vor Ort und für die benachbarten Quartiere. Die Ergebnisse der Simulationen mit MISKAM verdeutlichen, dass der vorgelegte Planungsentwurf eine ausreichende bodennahe Durchlüftung gewährleistet. Die offene räumliche Verzahnung mit der benachbarten Bebauung ist ausreichend, um auch dort eine Zunahme extrem windschwacher Situationen zu unterbinden. Die zentrale Parkanlage fungiert bei allen vorherrschenden Windrichtungen als wirksamer Klimameliorationsraum, der nicht nur thermische, sondern auch strömungsdynamische Gunsteffekte bewirkt.

Vergleichsweise windschwache Bereiche beschränkten sich im Wesentlichen auf die angedachten Baublockstrukturen. Die Dimensionierung der Innenhöfe und die Ausprägung der Blocköffnungen sind derart gewählt, dass Luftstagnationsbereiche (mittlere Windgeschwindigkeiten unter $0,2\text{ m/s}$) nur äußerst kleinräumig auftreten. Optimierungsmöglichkeiten bieten sich beim Baublock nördlich des Freiburger Platzes, der nur eine Öffnung in Richtung Westen zeigt. Wie die Simulationen für nördliche Anströmungssituationen zeigen, neigt der Blockinnenbereich gegenüber den westlich angrenzenden Baublöcken mit mehreren Öff-

nungen vermehrt zu Windruhe, wodurch an heißen Sommertagen Wärmestaus nicht ausgeschlossen werden können. Durch eine zusätzliche Öffnung in Richtung Freiburger Platz könnte die Be- und Entlüftung des Blockinnenbereichs forciert werden.

Bei allen Maßnahmen ist zu berücksichtigen, dass sich ihre Wirkung mit größer werdender Maßnahmenfläche verstärkt. Genauso intensiviert sich die Wirkung, wenn verschiedene Maßnahmen räumlich nebeneinander kombiniert werden (Abbildung 72). Bei allen Maßnahmen spielen die Standortgegebenheiten und die Witterung vor Ort eine entscheidende Rolle. So kann z.B. eine Fassadenbegrünung in windstillen geschlossenen Innenhöfen einen stärker kühlenden Effekt haben, als in gut durchströmten Straßen. Eine Dachbegrünung macht sich im Bodenniveau bemerkbar, wenn die Gebäude entsprechend niedrig sind. Bei Gewässern ist zu beachten, dass sie unter Umständen nachts lokal zu einer Erwärmung der Luft führen können. Modellgestützte Simulationen des Planzustands, wie sie im Projekt durchgeführt wurden, bieten daher eine gute Auswertungsmethode und eine Entscheidungsgrundlage im Planungsprozess.

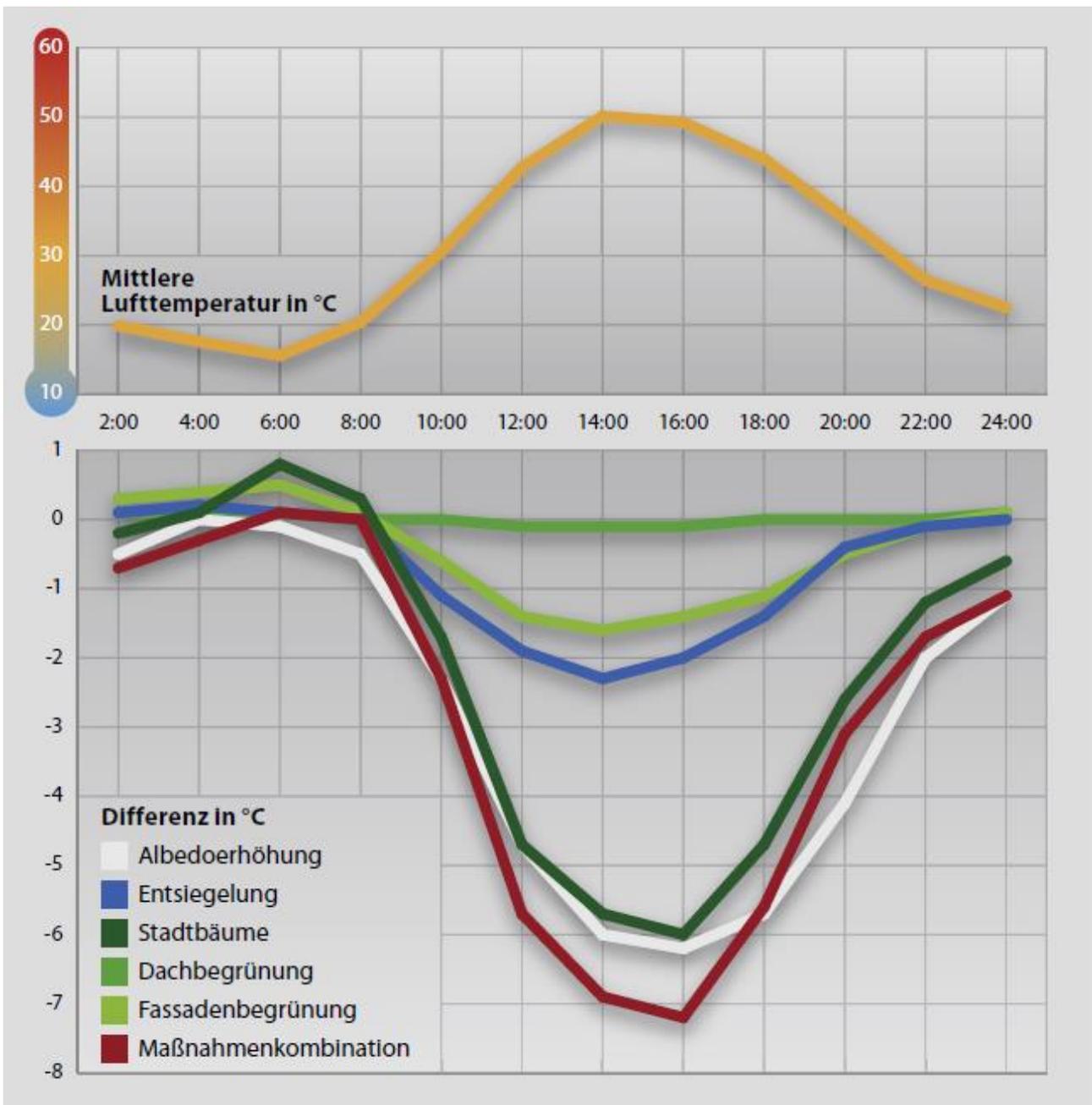


Abbildung 72 Tagesverlauf der modellierten Lufttemperatur in 2 m Höhe am Standort Charlottenburg in Berlin (GEO-NET Umweltconsulting GmbH im StEP Klima Berlin der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung)

Tabelle 8 Quartiers- und Gebäudebezogene Maßnahmen zur Verbesserung des Humanbioklimas

Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Umsetzung	„Ehemaliges Hospital-ge-lände“
Schaffung von Pocket-Parks	Kleine Parks und gärtnerisch ge-staltete Grünflächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelas-tung ▪ Biotopvernetzung ▪ Erholung 	Öffentliche Grünflächen, Baulücken, größere Hinter-höfe	✓ geplant
Erhöhung der mikroklimate-schen Vielfalt	Vielfältigkeit der Grünflächen (of-fene Wiesenflächen neben Bäu-men, Hügel, Wasserflächen, Pflanzungen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelas-tung tagsüber und nachts ▪ Erholung 	Parks	✓ geplant
Verschattung im öffentlichen Raum	Bäume oder bautechnische Maß-nahmen (Sonnensegel, Überdachung der Haltestellen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelas-tung tagsüber und nachts 	Straßen, Wege, Plätze	✓ geplant
Verschattung von Parkplät-zen	Bäume, Sträucher oder Über-dachung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelas-tung tagsüber und nachts ▪ Deposition und Filterung von Luftschadstoffen durch Pflan-zen 	Parkplätze	✓ geplant
Verschattung von Gebäuden	Fassadenbegrünung, Bäume, bau-technische Maßnahmen (Sonnensegel, Vordächer, Balkongestal-tung, Sonnenschutzglas etc.)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung tagsüber und nachts ▪ Verbesserung des Innen-raumklimas 	Gebäude, v.a. Südfassaden	✓ geplant (Fassadenbe-grünung am Parkhaus) ➔ Erweiterungsmöglich-keiten prüfen (Wohn-gebäude)
Entsiegelung	Rasenflächen oder Teilversiege-lung (Schotter, Rasengittersteine etc.)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelas-tung tagsüber und nachts 	Wege, Plätze, Hinterhöfe	✓ geplant

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Synergien mit der Regenwasserbewirtschaftung denkbar (Versickerung) 		
Hinterhofbegrünung	Vegetation und Entsiegelung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts, ▪ Erholung 	Hinterhöfe	✓ geplant ➔ Erweiterungsmöglichkeiten prüfen
Erhöhung der Oberflächenalbedo und Nutzung entsprechender Baumaterialien	Helle Baumaterialien, helle Gebäudefarben, Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Gebäude, Straßen, Wege, Plätze	➔ Umsetzungsmöglichkeiten prüfen
Wasserflächen im öffentlichen Raum	Teiche, Fontänen, Wasserspielplätze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber ▪ Wärmeabgabe nachts (stehende Wasserbecken) ▪ Synergien mit Regenwasserbewirtschaftung denkbar 	Plätze, Spielplätze, Parks	✓ geplant
Energetische Gebäudesanierung	Dämmung von Gebäuden, Albedoerhöhung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber, v.a. in Innenräumen 	Baubestand	➔ Umsetzungsmöglichkeiten prüfen
Dachbegrünung	extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten auf Dächern), blaugrüne (im Wasser stehende Pflanzen) und blaue Dächer (Wasserdächer)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts ▪ Verbesserung des Innenraumklimas 	Neubau	✓ geplant ➔ Erweiterungsmöglichkeiten der blaugrünen Dächer prüfen
Fassadenbegrünung	Bodengebundene oder systemgebundene Fassadenbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts ▪ Verbesserung des Innenraumklimas 	Neubau und Baubestand (so weit rechtlich zugelassen)	✓ geplant ➔ Erweiterungsmöglichkeiten prüfen

Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Optimierung des Nutzungskonzeptes/ Grundrisses von Innenräumen (z.B. Schlaf- und Arbeitsräume nicht nach Süden ausgerichtet)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	hauptsächlich Neubau	➔ Umsetzungsmöglichkeiten prüfen
Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Bebauungsdichte	Gebäudeanordnung nach Möglichkeit parallel zu Kaltluftströmung und/ oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung der Kaltluftströmung und Durchlüftung, Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe; Bei der Umsetzung ist auf die winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen zu achten	✓ geplant ➔ Verbesserungsmöglichkeiten prüfen (zusätzliche Öffnung des südöstlich vom Park gelegenen Baublocks)
Vernetzung von Grünflächen	Begrünung von Wegen, kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Luftaustauschsystems ▪ Biotopvernetzung 	Wege, Parks	✓ geplant

6 Einbindung der Projektergebnisse in die Planungsprozesse

6.1 PLANUNG IM DIALOG: RAHMENPLAN ROHRBACH – HOSPITAL

Der Heidelberger Gemeinderat hat für die Flächen der Amerikanischen Liegenschaften am 10.11.2011 die Durchführung von Vorbereitenden Untersuchungen nach § 141 Baugesetzbuch beschlossen. Gegenstand der Vorbereitenden Untersuchungen ist die Ausarbeitung einer städtebaulichen Rahmenplanung.

Um für die ehemals militärisch genutzte Fläche ein städtebauliches Gesamtkonzept zu entwickeln, das Ansätze für die Verzahnung mit der Umgebung liefert sowie die Erschließung und Gestaltung des öffentlichen Raumes thematisiert, wurde im Oktober 2014 ein städtebaulicher Ideenwettbewerb ausgelobt. Der Auslobung lagen die Ergebnisse von zwei Bürgerforen im November 2013 und April 2014 sowie eines öffentlichen Rückfragenkolloquiums und einer Begehung im September 2014 zugrunde. Im Wettbewerbsverfahren gingen im November 2014 insgesamt 33 Arbeiten ein. Die Wettbewerbsjury hat sich am 10. Dezember 2014 einstimmig für den Entwurf eines Planungsbüros aus Tübingen in Zusammenarbeit mit einem Landschaftsarchitekten aus Dettenhausen entschieden. Der Gemeinderat hat am 07.05.2015 die Ergebnisse des Wettbewerbs als Grundlage für die weitere Planung der Konversionsfläche Rohrbach Hospital bestätigt und dem weiteren Beteiligungskonzept zugestimmt.

Die weiteren Planungsschritte wurden auf der Grundlage des Wettbewerbsergebnisses im Rahmen des dialogischen Planungsprozesses im steten Wechsel zwischen Fachplanung und Bürgerbeteiligung entwickelt. Der Siegerentwurf wurde nach Anregungen aus einem Stadtteilgespräch im März 2015 und einer Planungswerkstatt im Juli 2015 weiterentwickelt zu dem Entwurf, der den Untersuchungen und Planungsempfehlungen im Rahmen des KLIMOPASS-Projekts (vergl. Kap. 5) zugrunde liegt.

Der letzte Stand des Rahmenplan-Entwurfs, den der Heidelberger Gemeinderat am 18.05.2017 beschlossen hat (Drucksache 0073/2017/BV), beinhaltet mit der neu geschaffenen Parkfläche, dem vorgesehenen hohen Grünvolumen in den Blockinnenbereichen und entlang der Erschließungswege, der Öffnung der Blockrandbebauung für eine bessere Durchlüftung, der Dachbegrünung und dem Einsatz von Wasser wesentliche Aspekte einer bioklimatisch optimierten Gestaltung, die auch der zukünftigen Überwärmung des Siedlungsraums Rechnung trägt. „Trotz einer baulichen Verdichtung des Areals wird eine wesentliche Verbesserung des Stadtklimas und damit der Aufenthaltsqualität im gesamten Plangebiet erreicht, wie durch Messungen und dreidimensionale Simulationen des Temperaturfeldes im Rahmen des Modellprojektes ‚Planungsempfehlungen für die (stadt-)klimawandelgerechte Entwicklung von Konversionsflächen – Modellvorhaben Heidelberg‘ nachgewiesen wurde. Positiv wirkt sich das hohe Grünvolumen auf der Parkfläche und in den Innenhöfen aus sowie die Dachbegrünung und der Einsatz von Wasser (Parkteich, Fontänenfeld). Durch die Öffnung der Riegelbebauung an der Karlsruher Straße können Kaltluftabflüsse vom Odenwald das Plangebiet besser belüften und kühlen.“ (Drucksache 0073/2017/BV, S. 3.5f)

Weitere bioklimatische Optimierungsvorschläge, wie zum Beispiel Empfehlungen zur Verwendung und Einfärbung von Baustoffen, können auf der Grundlage des Rahmenplans im Bebauungsplanverfahren sowie in die Beratung der Bauherren eingebracht werden.

6.2 KLIMAWANDEL-ANPASSUNGSKONZEPT FÜR HEIDELBERG

Für Heidelberg wurde im Rahmen des Projektes erstmals eine räumlich differenzierte Prognose der Temperaturentwicklung für den Zeitraum 2041 bis 2070 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 bis 2000 berechnet und kartographisch dargestellt. Hieraus geht hervor, dass sich die Zahl der Tage mit einer gesundheitsschädlichen Hitzebelastung im Siedlungsgebiet bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppeln wird und die Zahl der „Tropennächte“ mit Temperaturen nicht unter 20°C um den Faktor vier zunimmt. Diese Darstellung soll der Sensibilisierung der politischen Entscheidungsträger, der Fachplanungsämter der Verwaltung und der Bürgerinnen und Bürger dienen und den Bedarf an technischen und planerischen Konzepten zur Minderung der Hitzebelastung in Heidelberg unterstreichen. Dies wird vom Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie als einer von drei entscheidenden Aspekten eines „Klimawandel-Anpassungskonzepts für Heidelberg“ betrachtet und unter diesem Titel den gemeinderätlichen Gremien zum Beschluss empfohlen (Drucksache 0212/2017/BV, Behandlung im Juli 2017).

In der Vorlage wird ausgeführt: „Die Gesundheitsschäden durch Hitzestress reichen von Sonnenstich und leichten Kreislaufbeschwerden über Hitzekollaps bis zum lebensgefährlichen Hitzschlag. Das Risiko von Hitzetoten während sommerlicher Hitzeepisoden wird auch in Heidelberg deutlich steigen. Einen wichtigen Beitrag zur Risikominderung kann die städtebauliche Planung und die Freiflächenplanung leisten, indem bioklimatische Aspekte wie Belüftung, Beschattung, Frischluftbildung durch hohes Grünvolumen, Kühlung durch Wasserverdunstung und Dachbegrünung berücksichtigt werden. Im Rahmen des KLIMOPASS-Projekts wurden auf der Grundlage des Rahmenplans Rohrbach-Hospital die bioklimatischen Positiv- und Negativ-Aspekte untersucht und Optimierungsvorschläge erarbeitet. Der aktuelle Entwurf des Rahmenplans zeigt vorbildlich, wie der Planbereich trotz baulicher Verdichtung bioklimatisch aufgewertet wurde.

In der projektbegleitenden Verwaltungsarbeitsgruppe unter Beteiligung des Stadtplanungsamts und des Landschafts- und Forstamts wurde angeregt, die KLIMOPASS-Projektergebnisse zu einem allgemeinen technischen und planerischen Anpassungskonzept zur Minderung der Hitzebelastung weiterzuentwickeln. Hierzu sollen die vorgeschlagenen bioklimatischen Optimierungsmaßnahmen in der Art eines multifunktionalen Baustein-Systems nach ihrer Wirksamkeit und Kombinierbarkeit mit anderen Fachplanungselementen und umweltrechtlichen Planungsvorgaben dargestellt werden. Als Beispiele können die Dachbegrünung (Minderung der Wärmeabstrahlung, Verdunstungskühlung, Regenwasserretention, Artenschutz), die Baumpflanzung (Beschattung, Verdunstungskühlung, Artenschutz, Gestaltungselement) oder der Einsatz von Wasser (Wasserspielplatz, Verdunstungskühlung, Regenwasserretention) genannt werden.

Auch eine angepasste Gebäudetechnik mit den Aspekten Gebäudekühlung, Fassadenbeschattung und Dämmung kann einen wichtigen Beitrag zu einer Minderung der Hitzebelastung leisten.“ (Drucksache 0212/2017/BV, S. 3.2f).

Das zu erarbeitende Baustein-System sollte bei zukünftigen Planungen berücksichtigt werden. Insbesondere die Überplanung der Konversionsfläche Patrick-Henry-Village, für die im Rahmen der Internationalen Bauausstellung IBA Heidelberg unter dem Motto „Wissensstadt von morgen“ bereits erste Ideen entwickelt wurden, bietet die Möglichkeit, die Bausteine modellhaft umzusetzen.

Aber auch die städtischen Bestandsstrukturen sollen auf Klimawandel-gerechte Optimierungsmöglichkeiten geprüft werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie alle Groß- und Mittelstädte in Baden-Württemberg stellt auch für Heidelberg die Anpassung an den Stadtklimawandel eine der größten Herausforderungen einer zukunftssicheren Stadtentwicklung dar. Von besonderer Bedeutung ist dabei die zunehmende thermische Belastung, die sich in der Universitätsstadt durch einen allmählichen Anstieg der Auftrittshäufigkeit von Hitzeperioden, Tropennächten und Heißen Tagen auszeichnet. So wird sich der Anteil der Gebiete im Siedlungsbereich (Wohn-, Misch- und Gewerbenutzung) mit einer thermischen Belastung von gegenwärtig rd. $\frac{1}{4}$ im Laufe des Jahrhunderts allmählich auf über 50% erhöhen. Eine intensive innerstädtische Nachverdichtung kann diese Entwicklung noch verschärfen. Das größte Flächenpotential besitzen in Heidelberg in diesem Zusammenhang die ehemaligen Liegenschaften des US Militärs, so dass deren klimaangepasste Konversion eine zentrale Aufgabe für alle beteiligten Institutionen darstellt.

Am konkreten Beispiel der Konversionsfläche US Hospital konnte mithilfe eines mikroskaligen Klimamodells gezeigt werden, mit welchen gebäude- und freiraumplanerischen Maßnahmen dem Stadtklimawandel entgegengewirkt werden kann, ohne den wohnungspolitischen Entwicklungszielen entgegen zu stehen. Hervorzuheben ist hier zum einen die mit der Konversion einhergehende großflächige Entsiegelung in Verbindung mit Begrünungsmaßnahmen der Erschließungsstraßen, Wege und Plätze. Die Verschattung des öffentlichen Raumes stellt eine der effektivsten Maßnahmen der lokalen Klimafolgenanpassung an die Hitze am Tage in der Konversionsfläche dar. Um die nächtliche Belastung insbesondere auch in Gebäudeinnenräumen zu reduzieren konnte im Modell für das Untersuchungsgebiet zusätzlich die Wirksamkeit von gebäudegebundenen Maßnahmen nachgewiesen werden. Hier zeigt die Fassadenbegrünung gegenüber der Dachbegrünung im Vorteil: Sie besitzt zum einen ein größeres Flächenpotential und wirkt zum anderen stärker auf den bodennahen Bereich.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Forschungsvorhabens „Planungsempfehlungen für die (stadt-) klimawandelgerechte Entwicklung von Konversionsflächen – Modellvorhaben Heidelberg“ konnte erstmals in Heidelberg ein städtebaulicher Rahmenplan in hoher räumlicher Auflösung auf seine bioklimatischen Auswirkungen überprüft und optimiert werden. Die Planungsempfehlungen sind auch für zukünftige städtebauliche Planungen – nicht nur in Heidelberg - insbesondere von Nachverdichtungen und Bestandssanierungen, aber auch Überplanungen von öffentlichen Freiflächen nutzbar.

Gleichzeitig wurde erstmals für Heidelberg eine räumlich differenzierte Darstellung der zukünftigen Überwärmung des Siedlungsbereichs als Folge des Klimawandels präsentiert, die eindrucksvoll den Handlungsbedarf für bioklimatische Optimierungsmaßnahmen aufzeigt.

Damit liegen für das Handlungsfeld Stadt- und Raumplanung im Sinne der „Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg“ für Heidelberg alle relevanten Grundlagen für eine Risikoabschätzung und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen vor. Zusammen mit weiteren Erkenntnissen zum Handlungsbedarf im Bereich Hochwasserrisikomanagement und Starkregenrisikomanagement sollen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens daher für einen Sachstandsbericht zu den Folgen des Klimawandels in Heidelberg und zur Entwicklung eines eigenen Anpassungskonzepts genutzt werden.

Quellenverzeichnis

- Benestad R.E.**, Hanssen-Bauer I., Chen D. (2008): Empirical-Statistical downscaling. World Scientific Publishing, Singapore
- Buchholz, S.** (2006): Einfluss meteorologischer und luftchemischer Parameter auf die NO₂-Immissionskonzentration am Beispiel von ausgewählten Luftmessstationen in Baden-Württemberg, Diplomarbeit im FB Geografie/ Geowissenschaften der Universität Trier
- Christensen J.H.**, Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P. (2007): Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 847 – 940.
- DKRZ** (2017): <https://www.dkrz.de/Klimaforschung/konsortial/ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur>. Deutsches Klimarechenzentrum, Abruf 26.01.2017
- DWD** (2016): Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland
- DWD** (2017): http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadt/pl/projekt_koeln/stadtpl_koeln_node.html, Abruf 26.01.2017
- Eichhorn J.** (2014): MISKAM. Handbuch zu Version 6, Wackernheim
- Fischer A. M.**, Weigel A. P., Buser C. M., Knutti R., Künsch H. R., Liniger M. A., Schär C., Appenzeller C. (2012): Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int. J. Climatol.*, 32: 2348–2371. doi:10.1002/joc.3396
- Früh B.**, Becker P., Deutschländer T., Hessel JD., Kossmann M., Mieskes I, Namyslo J., Roos M., Sievers U., Steigerwald T., Turau H., Wienert U. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *JAMS*, doi: 10.1175/2010JAMC2377.1
- Giorgi F.**, Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58(3):175-183.
- Groß G.** (2012): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift* 21, 399-412
- Günther R.** (2014): The role of soil water content for microclimatic effects of green roofs and urban trees – a case study from Berlin, Germany, *Journal of Heat Island Institute International*, Vol. 9-2
- Klimanavigator** (2017): www.klimanavigator.de/dossier/artikel/012038/index.php, Abruf 26.01.2017.
- Leßmann D., von Tils R.** (2016): Effekte von Regenwasserbewirtschaftung auf das Stadtklima, Poster im Rahmen der Abschlussveranstaltung zum Forschungsprojekt KURAS, Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, GEO-NET Umweltconsulting GmbH, http://www.kurasprojekt.de/fileadmin/Dokumente_Verwaltung/pdf/06_KURAS_Poster_20161026_Abschlusskonferenz_Stadtklima_rev02a.pdf, Abruf 23.03.2017

LUBW (=Landeanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg)(2015): Klima in der Zukunft

<http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/231622/>

UMBW (=Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg) (Hrsg., 2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg - Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern

Pavlik D., Söhl D., Pluntke T., Mykhnovych A., Bernhofer C. (2012): Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km. *Environ Earth Sci* 65(5): 1475–1482
doi:10.1007/s12665-011-1081-1

Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4–6. doi:10.1038/nclimate1783

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (2011): Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern

Stadt Heidelberg (2015): Stadtklimagutachten für die Stadt Heidelberg. Fortschreibung des Gutachtens von 1995

VDI (2008): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima

Xue F., Li X., Ma J. Zhang Z. (2014): Modelling the influence of fountain on urban microclimate, *Building Simulation*, 2015 Vol. 8: 285 – 295

