

STADTKLIMAANALYSE STADT ZWEIBRÜCKEN



Auftraggeber: Stadtverwaltung Zweibrücken
- Stadtbauamt / Stadtplanung –
Herzogstraße 3
66482 Zweibrücken

Städtebauliches Handlungskonzept Klimaanpassung für die Stadt Zweibrücken

Stadtklimaanalyse

Projekt: 24-08-23-FR
Bericht: 1.0
Umfang: 94 Seiten
Datum: 10.09.2025

Bearbeiter: Dr. Christine Ketterer, M.Sc. in Climate Sciences
Dr. Tobias Gronemeier, M.Sc. in Meteorologie
Dr. Markus Hasel, Diplom-Meteorologe
Dr. Marcel Gangwisch, M.Sc. in Umweltwissenschaften
Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe

IMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Eisenbahnstraße 43
79098 Freiburg

Telefon: 0761/ 4000 77-09
E-Mail: ketterer@ima-umwelt.de
Internet: www.ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Gunstfaktoren.....	5
Belastungen	6
Planungshinweise	7
1 Einführung und Aufgabenstellung	10
2 Vorgehensweise	12
3 Datengrundlage und Methodik	12
3.1 Datengrundlage	12
3.1.1 Topografie	12
3.1.2 Nutzungsstruktur	13
3.1.3 Messdaten.....	16
3.1.4 Daten zu den Kaltluftabflüssen simuliert mit KLAM_21 (DWD).....	17
3.1.5 Daten zu den Cold- und Hotspots.....	17
3.1.6 Daten regionaler Klimamodelle	18
3.2 Methodik.....	22
3.2.1 Stadtklimasimulationen	22
3.2.2 Human-Biometeorologie	24
3.2.3 Berechnung der thermischen Empfindlichkeit.....	25
3.2.4 Berechnung der Betroffenheit	26
3.2.5 Erstellung der Klimatopkarte.....	27
3.2.6 Erstellung der Planungshinweiskarte.....	28
3.2.7 Identifikation des Ausgleichs-Wirkungsraumgefüges	28
4 Bestandsbeschreibung	30
4.1 Örtliche Verhältnisse	30
4.2 Klimatische Einordnung der Stadt Zweibrücken.....	35
5 Auswirkungen des Klimawandels	37
5.1 Lufttemperatur	38
5.2 Niederschlag	39
5.3 Klimatologische Kenntage	42
5.3.1 Heiße Tage, Sommertage und tropische Nächte	43
5.3.2 Frost- und Eistage.....	44
6 Ergebnisse	46
6.1 Kaltluftströmung.....	46
6.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen.....	46
6.1.2 Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen.....	47
6.1.3 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen.....	47
6.1.4 Ergebnisse der Modellierung	48
6.2 Thermische und human-biometeorologische Verhältnisse.....	51
6.2.1 Human-biometeorologische Verhältnisse	51
6.2.2 Urbane Wärmeinsel	57
6.3 Weitere Erkenntnisse	59

6.3.1 Kaltluftabflussmodellierung mit KLAM_21	59
6.3.2 Hotspots der Oberflächentemperatur.....	61
6.3.3 Mobile Beobachtungen der Lufttemperatur.....	63
6.4 Thermische Empfindlichkeit.....	64
6.5 Thermische Belastung.....	66
6.6 Thermische Betroffenheit.....	68
6.7 Hotspot-Analyse	70
7 Klimatopkarte.....	74
8 Planungshinweiskarte.....	74
9 Handlungsstrategien für die Stadtplanung	77
9.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung	77
9.2 Klimaangepasst bauen und sanieren.....	78
9.3 Grün- und Freiraumentwicklung.....	81
9.4 Prinzip „Schwammstadt“	82
9.5 Klimaanpassungsmaßnahmen für Industrie- und Gewerbegebiete.....	83
10 Literatur	85

Zusammenfassung

Die Stadt Zweibrücken plant bei zukünftigen Stadt- und Grünflächenplanungen verstärkt stadtklimatische Aspekte zu berücksichtigen. Grundlage hierfür bildet das integrierte Klimaanpassungskonzept (kurz: KAnK ZW), welchem eine Stadtklimaanalyse zugrunde liegt.

Aufgrund ihrer Lage in einer flachen Senke und der vergleichsweise geringen Höhenlage ist Zweibrücken an heißen Sommertagen häufig wärmebelastet. Die dadurch bedingte höhere Anzahl an Sommertagen^{*1} führt im Sommer vermehrt zu Hitzebelastungen. Tage mit Hitzestress werden im Rahmen des Klimawandels weiter zunehmen. Ziel ist es, sowohl die Bereiche mit hoher Belastung zu lokalisieren als auch die Gunstfaktoren und Raumschaften zu ermitteln, die für eine Entlastung sorgen.

In der Stadtklimaanalyse Zweibrücken werden die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum*) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen analysiert. Um diese Aspekte des Stadtklimas zu erfassen und aufzuarbeiten, wurde auf Daten von Messfahrten und Kaltluftströmungssimulationen zurückgegriffen. Dabei wird ein heißer Tag* betrachtet, der in der Regel bei wolkenarmen und windschwachen (autochthonen*) Wetterlagen auftreten kann. Bei diesen Wetterlagen prägen sich die lokal typischen klimatischen Eigenheiten am stärksten aus.

Eine Belastungssituation in den Wirkungsräumen ergibt sich sowohl tagsüber (Wärmebelastung/Hitze) als auch nachts (Überwärmung des Stadtgebietes). Um die Be- und Entlastungseffekte zu bewerten, wird die Betroffenheit der Bevölkerung herangezogen. Diese ergibt sich aus der Intensität der Belastung bzw. Entlastung und der Empfindlichkeit der betrachteten Fläche. Die Empfindlichkeit wird über die Bevölkerungsdichte und die Lage hitzesensibler Nutzungen, wie Krankenhäuser, Pflegeheime, Schulen oder Kindergärten, ermittelt. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische* Methoden herangezogen.

Die wesentlichen Faktoren für eine Entlastung stellen die Durchlüftung und im Siedlungsraum auch innerstädtische Grünflächen sowie Gewässer dar. Für die Durchlüftung sind insbesondere nächtliche Kaltluftabflüsse* maßgebend, die Kalt- und Frischluft* herantransportieren und die tagsüber entstandenen thermischen und lufthygienischen Belastungen verringern und die nächtliche Regeneration der Bevölkerung durch ein Absenken der Lufttemperatur im Außen- und Innenraum verbessern.

Die Ergebnisse wurden bewertungsfrei in der Klimatopkarte dargestellt. Abschließend wurden Planungshinweiskarten erarbeitet.

Gunstfaktoren

Durch das stark gegliederte Gelände mit Tälern und Erhebungen bildet sich in den Abend- und Nachtstunden bei autochthonen Wetterlagen ein komplexes Strömungssystem mit markanten Kaltluftabflüssen aus dem Tal des Schwarzbach dem Hornbach und der Bickenalbe aus. Diese fließen in Zweibrücken mit Abflüssen aus dem Tal des Bautzenbach, des Bombach, des Heilbach und des

¹ Fachbegriffe werden bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit „*“ gekennzeichnet und im Glossar erläutert.

Auerbach zusammen. Durch die Hinderniswirkung der Bebauung wird die Strömung im Bodenniveau abgeschwächt, überströmt Zweibrücken jedoch im Dach- und Überdachniveau, von wo aus sie durch gebäudeinduzierte Turbulenz herab gemischt wird. Die Stadtteile Mittelbach, Rimschweiler, Niederauerbach und Oberauerbach werden durch diese Kaltluftabflüssen größtenteils gut mit Frisch- und Kaltluft versorgt.

Belastungen

Die thermische Belastung wird vor allem durch die Tallage der Stadt Zweibrücken geprägt. Neben der, durch die großräumige Lage vorgegebenen thermischen Belastung, steigern aber auch ein erhöhter Anteil versiegelter Flächen sowie ein Mangel an klimatisch relevanten Grün-, Frei- und Wasserflächen innerhalb der städtischen Bebauung die Wärmebelastung*.

In den Abend- und Nachtstunden ist dies an den urbanen Wärmeinseln*, die die Überwärmung der verdichteten Siedlungs- und Gewerbebereiche gegenüber dem Umland zeigen, sichtbar. Die Überwärmung ist im Stadtzentrum mit +3,0 K (Kelvin) besonders ausgeprägt. Auch in den Industrie- und Gewerbegebieten, wie z. B. zwischen der Schillerstraße und Dinglerstraße, beträgt die Überwärmung bis zu > 3,2 K. In Wohngebieten in gut durchlüfteten Hangbereichen ist die Überwärmung mit 2 K deutlich geringer.

Die human-biometeorologische Belastung tagsüber ist hauptsächlich von der Sonnenexposition abhängig. In besonnten, windstillen und versiegelten Bereichen z. B. in Industrie- und Gewerbegebieten (in Ernstweiler/Bubenhausen) oder in Innenhöfen ist der größte Hitzestress vorzufinden. Auf dem Schlossplatz oder auf dem Platz vor der Alexanderskirche sind, im durch Bäume abgeschatteten Bereichen, zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitzestress vorzufinden. Auf den voll versiegelten, nicht abgeschatteten Bereichen der Plätze überschreitet die Physiologisch Äquivalente Temperatur* (PET) teilweise 45 °C.

Neben der Intensität der Wärmebelastung ist auch deren Häufigkeit entscheidend. Zur Bewertung der Häufigkeit der Wärmebelastung dient die Anzahl an Sommertagen pro Jahr. Im Mittel traten 1961 – 1990 in Zweibrücken etwa 32 Sommertage pro Jahr auf. Da die Anzahl an Sommertagen direkt von der Lufttemperatur* abhängig ist, treten mehr Sommertage in überwärmten Gebieten auf (z. B. in Gewerbegebieten) als in kühleren Bereichen (Waldgebieten). Bis Mitte des Jahrhunderts (2031 – 2060) kann die Anzahl an Sommertagen unter Berücksichtigung des RCP8.5 im Median um 20 Tage und bis Ende des 21. Jahrhunderts um 48 Tage ansteigen.

Die thermische Betroffenheit ergibt sich durch die Überlagerung der Dichte der Einwohnerinnen und Einwohner und der sensiblen Nutzungen (z. B. Seniorenheimen) mit der thermischen Belastung. Die thermische Belastung selbst setzt sich zusammen aus der nächtlichen Überwärmung und der human-bioklimatischen Belastung in den Tagstunden.

Durch die Berücksichtigung der Tag- und Nachtsituation und der Gewichtung mit der Bevölkerungsdichte ist die thermische Betroffenheit besonders im dicht bebauten und versiegelten Innenstadtbereich sehr hoch. Dies liegt daran, dass die Innenstadt sowohl von der nächtlichen Urbanen Wärmeinsel als auch tagsüber durch den hohen Versiegelungsanteil bei vergleichsweise geringer Abschattung betroffen ist.

Eine hohe thermische Betroffenheit findet sich dementsprechend überwiegend im Zentrum (abgesehen von der Grünfläche im Bereich der Wackenstraße), sowie in Niederauerbach (z.B. Pirmasenser Straße) und Ixheim. Bereiche mit erhöhter thermischer Betroffenheit umfassen insbesondere auch Einrichtungen der vulnerablen Infrastruktur, wie Schulen, Krankenhäusern, Kindertagesstätten sowie Seniorenheime, Pflegeeinrichtungen und Wohngemeinschaften. Dies betrifft in Zweibrücken vor allem das Nardini Klinikum, das Mehrgenerationenhaus, die Kindertagesstätte Arche Kunterbunt, sowie die Berufsbildende Schule.

Von der nächtlichen urbanen Wärmeinsel sind überwiegend die Menschen im dicht besiedelten Stadtzentrum zwischen Fruchtmarktstraße, Lammstraße und Poststraße sowie im Bereich der Herzog-Wolfgang-Straße betroffen. Wohngebiete in direkter Nähe zu Gewerbegebieten, wie z. B. in Ernstweiler/Bubenhausen oder im Bereich der Schillerstraße, Bismarckstraße und Dinglerstraße sind ebenfalls hohen thermischen Belastungen ausgesetzt.

Im Zuge des Klimawandels ist mit einer weiteren Zunahme der Wärmebelastungen zu rechnen. Um eine lebenswerte Stadt Zweibrücken zu erhalten, gewinnt die Berücksichtigung des Mikroklimas* und entsprechender Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen, sowohl in der Flächennutzungsplanung als auch in der Bauleitplanung, zunehmend an Bedeutung. Der Erhalt und die Schaffung von klimatisch wirksamen Ausgleichsräumen mit grün-blauer Infrastruktur* ist für die Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner im Zuge des Klimawandels von größter Bedeutung.

Planungshinweise

Im Hinblick auf Klimaanpassungsmaßnahmen gibt es in Zweibrücken insbesondere im innerstädtischen Bereich einen hohen Handlungsbedarf. In den dicht besiedelten Quartieren sind infolge hoher Versiegelung sowohl die nächtliche Wärmeinsel als auch die Überwärmung am Tag ausgeprägt, so dass hohe Betroffenheiten vorliegen. Um dem entgegenzuwirken, sollten versiegelte Flächen möglichst entsiegelt und durch die Pflanzung von Straßenbäumen sowie Straßenbegleitgrün aufgewertet werden. Solche Maßnahmen orientieren sich am Konzept der Schwammstadt und ermöglichen nicht nur die Verbesserung des Mikroklimas, sondern auch die Rückhaltung und Nutzung von Regenwasser zur Bewässerung.

Zur Reduzierung versiegelter Flächen können Kfz-Stellplätze in Tiefgaragen oder in aufgeständerten, beschatteten Anlagen untergebracht werden. Eine Bündelung mehrerer Stellplätze in Form von Tief- oder Quartiersgaragen trägt zur Flächeneffizienz und Kühlung des Siedlungsraums bei. Zudem bieten Flachdächer und flach geneigte Dächer Potenzial für eine kombinierte Nutzung durch Dachbegrünung und Photovoltaikanlagen. Diese Maßnahmen senken nicht nur die Umgebungstemperatur, sondern tragen auch zur Energiegewinnung bei. Bei stärker geneigten Dächern, oder wo statisch keine ausreichenden Tragfähigkeiten vorliegen, kann alternativ eine reflektierende Dachbeschichtung (sogenannte „Cool Roofs“) zur Reduktion der Hitzebelastung beitragen.

Vertikale Begrünung, insbesondere an süd- bis westorientierten Fassaden, unterstützt die Abkühlung von Innen- und Außenräumen. Im öffentlichen Raum sollten Gehwege, Innenhöfe und Plätze durch Verschattungselemente wie Laubbäume, Pergolen oder Sonnensegel klimawirksam gestaltet werden – insbesondere an sensiblen Standorten wie Kindertagesstätten, Bildungseinrichtungen, Pflegeheimen und Krankenhäusern (z.B. im Bereich des Nardini-Klinikums).

Die bestehenden innerstädtischen Grünflächen, beispielsweise der Rosengarten, sind als klimaökologische Ausgleichsräume essenziell und sollten daher zumindest erhalten, idealerweise jedoch

erweitert und durch zusätzliche Stadtbäume ökologisch aufgewertet werden. Eine gezielte Vernetzung von Grünflächen ab einer Größe von 0,5 Hektar kann die Durchlüftung der Stadt verbessern und den Hitzestress mindern. Ergänzend tragen Maßnahmen zur Erhöhung der Aufenthaltsqualität, etwa durch zusätzliche Parkbänke und Trinkwasserbrunnen, zur Nutzbarkeit und Akzeptanz öffentlicher Räume bei.

Neben dem öffentlichen Raum sollten auch private Flächen in die Klimaanpassungsstrategie einbezogen werden, da sie einen erheblichen Anteil der Stadtfläche ausmachen. Hier sind die Förderung kleinflächiger Begrünungsmaßnahmen (z. B. Urban Gardening) sowie die konsequente Vermeidung von Schottergärten zielführend. Neubauten sollten zudem mindestens dem aktuellen energetischen Standard gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) entsprechen, um den Energiebedarf und die Wärmebelastung dauerhaft zu senken.

Industrie- und Gewerbegebiete sind aufgrund dichter Bebauung, hohen Versiegelungsgraden, geringem Baumbestand und schlechter Wärmedämmung der Bauwerke häufig merklich überwärmt. Zur Verbesserung der thermischen Bedingungen sollten gezielt Maßnahmen umgesetzt werden. Besonders wirksam ist die Begrünung von Dächern mit ausreichender Substratdicke, vorzugsweise in Kombination mit Photovoltaikanlagen, um eine doppelte Flächennutzung zu ermöglichen. Süd- bis südwestorientierte Fassaden eignen sich für bodengebundene, aufgeständerte Fassadenbegrünungen, die das Mikroklima verbessern und zur Kühlung beitragen können. Eine zusätzliche Kühlwirkung lässt sich durch die Nutzung gespeicherten Regenwassers zur Bewässerung erzielen. Zur Reduktion der Hitzebelastung in Innenräumen ist zudem eine effektive Verschattung von Fensterflächen an süd- und westexponierten Fassaden erforderlich.

Weitere Maßnahmen umfassen die Verringerung des Versiegelungsgrads, beispielsweise durch den Bau von Tief- oder Quartiersgaragen anstelle großflächiger Parkplätze sowie durch gezielte Entsiegelung bestehender Flächen. Kleine Grünflächen bilden kleine, verschattete, grüne Freiräume und tragen zur lokalen Temperaturregulierung bei. Der Einsatz heller Oberflächenmaterialien mit hoher Reflexionsfähigkeit (hoher Albedo) und geringer Wärmespeicherkapazität wirkt der Aufheizung zusätzlich entgegen. Auch eine bessere Anbindung an den öffentlichen Nahverkehr sowie die Förderung des Fuß- und Radverkehrs – idealerweise durch baumbestandene und damit verschattete Wege – leisten einen Beitrag zur klimaresilienten Gestaltung dieser Gebiete.

Nicht zuletzt sollte eine maßvolle Nachverdichtung bestehender Gewerbebestände durch Aufstockung oder Bebauung bereits versiegelter Flächen Priorität vor der Erschließung neuer Flächen im Außenbereich haben. Die Ansiedlung von Betrieben mit hoher Abwärmeproduktion sollte nach Möglichkeit vermieden werden, um zusätzliche thermische Belastungen zu verhindern.

Zur Vermeidung einer weiteren nächtlichen Aufheizung und zur Sicherung des lokalen Luftaustauschs sollten die Tallagen im Süden und Osten Zweibrückens – insbesondere entlang des Hornbachs, der Bickenalbe und des Schwarzbachs – von zusätzlicher Bebauung freigehalten werden. Diese Bereiche fungieren als Kaltluftleitbahnen, über die die nächtlich gebildete Kaltluft aus den angrenzenden Hängen in das Stadtzentrum einströmt. Besonders die südlichen und östlichen Hänge sind als Kaltluftentstehungsgebiete von zentraler Bedeutung für das innerstädtische Mikroklima. Eine Bebauung dieser Flächen würde die nächtliche Abkühlung empfindlich beeinträchtigen.

Falls eine bauliche Entwicklung in diesen Bereichen dennoch erfolgt, ist zwingend darauf zu achten, dass die bodennahen Kaltluftströme nicht durch quer zur Fließrichtung angeordnete Riegelbebauung blockiert werden. Stattdessen sollte eine offene Bebauungsstruktur, die sich parallel zur Strömungsrichtung orientiert, Vorrang haben. Darüber hinaus sind Luftleitbahnen grundsätzlich von geschlossener Bebauung und riegelbildenden Strukturen freizuhalten.

Innerhalb des Siedlungskörpers sollte durch die Anlage von durchgrüntem Freiräumen und Grünzügen die Funktion als Belüftungsschneisen unterstützt und der Luftaustausch verbessert werden. Die Gebäudehöhen sind zu begrenzen, um die sogenannte städtische Rauigkeit zu minimieren und die Durchlüftung zu begünstigen. Eine offene Gestaltung der Siedlungsränder erhöht die Eindringtiefe der Frischluftströme, während die Ausrichtung von Straßenzügen in Längsrichtung zur vorherrschenden, für den Luftaustausch relevanten Windrichtung die Ventilation zusätzlich fördern kann.

Zudem ist die Ansiedlung von Betrieben mit hoher Abwärmeproduktion oder Emissionen von Gerüchen und Luftschadstoffen – insbesondere entlang der Luftleitbahnen – zu vermeiden. Auch der Einsatz offener Feuerstätten sollte in diesen Bereichen ausgeschlossen werden, um die Luftqualität bzw. Geruchsbelästigungen durch den nächtlichen Kaltlufttransport auszuschließen.

1 Einführung und Aufgabenstellung

Der Stadt Zweibrücken sind die zunehmenden Herausforderungen durch den Klimawandel präsent. Besonders die Themenfelder Starkregenereignisse und Hitzeperioden stellen die gegenwärtige Bevölkerung und die Stadtentwicklung immer mehr vor Herausforderungen (z.B. Hochwasser am 17. Mai 2024). Um diesen klimabedingten Gefahren besser zu begegnen und auf die geänderten Bedingungen reagieren zu können, hat die Stadt Zweibrücken das integrierte Klimaanpassungskonzept (KAnK ZW) in Auftrag gegeben.

Die Stadt Zweibrücken liegt im südwestlichen Teil von Rheinland-Pfalz, nahe der Grenze zum Saarland. Die Stadt befindet sich am westlichen Rand des Pfälzerwaldes und in der Nähe der französischen Grenze. Aufgrund ihrer Lage in einer flachen Senke und der vergleichsweise geringen Höhenlage ist Zweibrücken an heißen Sommertagen häufig von hoher Wärmebelastung betroffen. Zur Charakterisierung der Wärmebelastung kann die Zahl der Sommertage^{*2}, d. h. Tage mit Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C, herangezogen werden. Exemplarisch sind die langjährigen Mittel der Sommertage in Deutschland um Zweibrücken für die Zeiträume 1961 – 1990 und 1991 – 2020 dargestellt (Abbildung 1-1). Im Stadtgebiet Zweibrücken stieg im Zuge des Klimawandels die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 32 (1961 – 1990) auf 45 (1991 – 2020) Sommertage pro Jahr.

Durch den anthropogenen* Klimawandel wird im 21. Jahrhundert ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur, der Dauer, Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen und der Anzahl an heißen Tagen* erwartet (Schär et al. (2004); Christidis, Jones & Stott (2015)). Die Vulnerabilität* der europäischen und somit auch deutschen Bevölkerung wurde bereits bei der Hitzewelle 2003 offensichtlich, als die hitzebedingte Mortalität* europaweit mit mehreren zehntausend Fällen beziffert wurde (an der Heiden et al. (2019); Robine et al. (2008)). Dabei traf es weniger junge gesunde Menschen, Menschen mit einem guten sozialen Status oder die Landbevölkerung, sondern Kleinkinder, alte und vorbelastete Menschen oder Menschen mit niederem Sozialstatus, die in Städten leben (Basu (2009)). Des Weiteren entsteht durch das verringerte Leistungsvermögen ein volkswirtschaftlicher Schaden (Zander et al. (2015)).

Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist neben dem globalen Klima auch das lokale Klima weiter in den Fokus gerückt. Die Zielsetzungen der Sicherung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse erfordert die Berücksichtigung der klimatischen Belange bei zahlreichen planerischen Fragestellungen. Dies fängt bei der Flächennutzungsplanung an, wo es beispielsweise um die Erhaltung der Kalt- und Frischluftzufuhr geht und endet bei kleinräumigen Planungen im Bereich der Bauleitplanung oder lokalen Klimaanpassungsmaßnahmen. In jedem Fall ist die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen als auch der Entlastungen erforderlich, um mit der Planung richtig reagieren zu können.

Die Stadtklimaanalyse stellt deshalb eine wichtige Grundlage für planerische Entscheidungen dar. Sie basiert auf umfangreichen Modellierungen der thermischen Belastungen und des Human-Bioklimas sowie der entlastenden Momente durch Kaltluftabflüsse*. Die Wärmebelastung* der Wirkungsräume wird für die Tag- und Nachtsituation untersucht.

Tagsüber werden zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen human-biometeorologische Methoden herangezogen, da die Lufttemperatur alleine die

² Fachbegriffe werden bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit „*“ gekennzeichnet und im Glossar erläutert.

menschliche Wärmebelastung nicht vollständig erklärt. Mithilfe der auf der menschlichen Energiebilanz basierenden thermischen Indizes wie der PET kann unter Berücksichtigung der Lufttemperatur*, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse die Wärmebelastung flächendeckend und zusammenfassend quantifiziert werden.

Abends und nachts kühlt die Luft in Städten weitaus weniger ab als im ländlich geprägten Umland. Dieses Phänomen wird als urbane Wärmeinsel* bezeichnet und verstärkt den Hitzestress und damit die thermische Belastung in Städten. Die Ausprägung der thermischen Belastungen hängt jedoch von einer Vielzahl von lokalen Faktoren ab. Dazu zählen die geografische Lage, die Höhenlage, das Relief, Bebauungsdichten und -höhen, die Verteilung von versiegelten und durchgrünt Flächen usw.

Nach der Quantifizierung der thermischen Belastung erfolgt die Berechnung der thermischen Betroffenheit durch Überlagerung der thermischen Belastung mit der Bevölkerungsdichte und den hitzesensiblen Einrichtungen.

Eine Abkühlung bzw. Entlastung für die städtische Bevölkerung in Hitzeperioden kann durch Kaltluftabflüsse und Flurwinde* herbeigeführt werden. Diese tragen in der Nacht wesentlich zur thermischen Regeneration von Mensch und Umwelt bei. Die Zufuhr von – möglichst unbelasteter – Kaltluft in die urbanen Siedlungsräume ist daher von hohem Stellenwert für die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung. Um relevante Strömungssysteme* und die zugrunde liegenden Kaltluftentstehungsgebiete* und Luftleitbahnen* zu identifizieren, müssen die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum*) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen ermittelt werden.

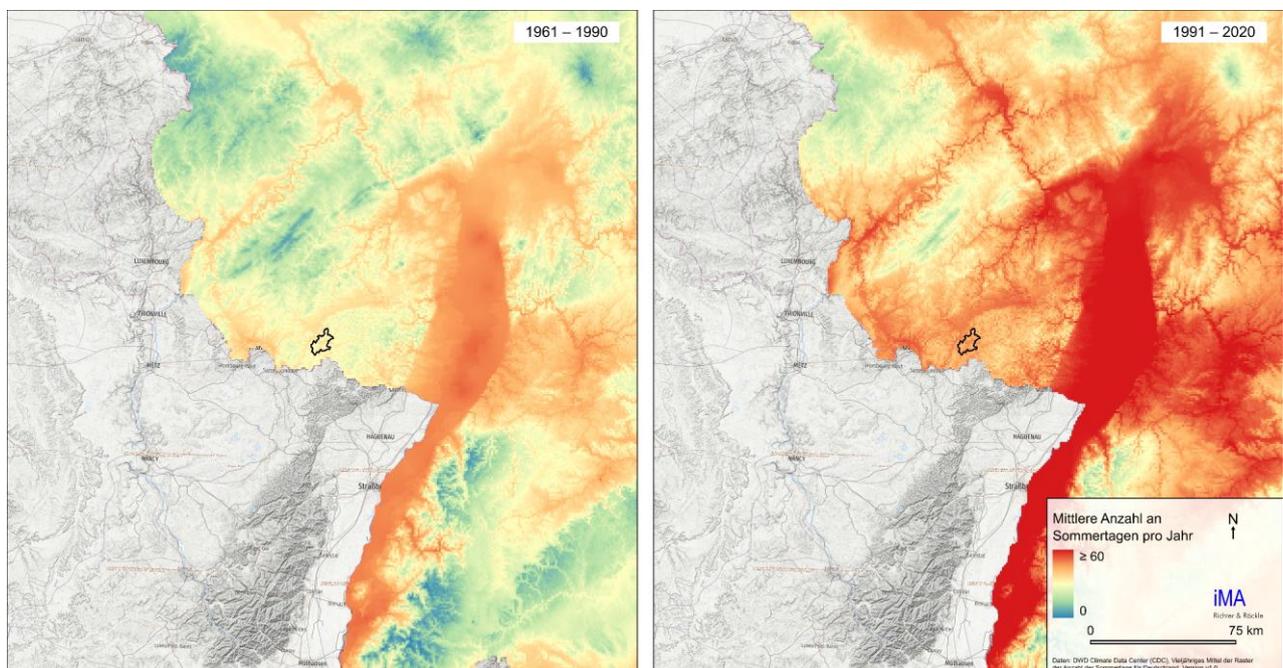


Abbildung 1-1: Langjähriges Mittel der Anzahl an Sommertagen. Klimazeitraum 1961 – 1990 (links) 1991 – 2020 (rechts). Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020, Jahresraster der Anzahl an Sommertagen für Deutschland, Version v1.0.

2 Vorgehensweise

Für die Stadtklimaanalyse Zweibrücken sind umfangreiche Datenanalysen und Modellierungen durchgeführt worden.

Erste Informationen zu den **Kaltluftabflüssen** liegen in Form von Modellergebnissen des Deutschen Wetterdienstes, welche das vertikal integrierte Flachwassermodell KLAM-21 verwendet haben, vor. Aufgrund der Lage Zweibrückens in komplexer Topographie und der Datenlage wurden zusätzliche Screeningsimulationen mit dem 3-dimensionalen, prognostischen Stadtklimamodell FITNAH in 25 m Auflösung durchgeführt.

Die **Messfahrten** wurden hinsichtlich der Lufttemperatur, der human-biometeorologischen Belastung und der städtischen Wärmeinsel ausgewertet und durch computergestützte Modellierung auf die Fläche gerechnet.

Aus der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit der Bevölkerung (Bevölkerungsdichte) ergibt sich die Betroffenheit. Aus der Zusammenschau der Gunstfaktoren und ihrer Intensität sowie der Betroffenheit werden die relevanten Grün- und Freiflächen für die Durchlüftung von Zweibrücken ermittelt.

Die **Klimatop-** und **Planungshinweiskarten** wurden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) erstellt. In der Klimatopkarte werden bewertungsfrei die einzelnen Klimatope der Stadt Zweibrücken in Zusammenschau mit den lokalen Kaltluftabflüssen dargestellt. Die Planungshinweiskarte enthält als informelle Hinweiskarte eine integrierende Bewertung der in der Klimatopkarte dargestellten Sachverhalte. Wichtiges Element der Planungshinweiskarte ist die Darstellung der Belüftungsfunktion und der thermischen Betroffenheit der Bevölkerung.

3 Datengrundlage und Methodik

Für die Erstellung der Stadtklimaanalyse konnte auf eine Vielzahl an geografischen Datensätzen der Stadt Zweibrücken zurückgegriffen werden. Auf Grundlage der Daten wurde ein digitales Stadtmodell erstellt, welches für die Simulationen und die Analyse verwendet wurde (Abbildung 3-1). Nachfolgend werden die verwendeten Datensätze aufgelistet.

3.1 Datengrundlage

3.1.1 Topografie

Für die meso- und mikroskaligen Simulationen werden ein digitales Geländemodell und ein digitales Oberflächenmodell verwendet.

Tabelle 3-1: Räumliche Daten für die Stadtklimaanalyse Zweibrücken.

Daten	Bereitgestellt durch	Aktualität
Digitales Geländemodell Gitterweite 1 m (DGM1) für Zweibrücken und angrenzende Landkreise von Rheinland-Pfalz	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	ALS-Befliegung 2023
Bildbasiertes digitales Oberflächenmodell (bDOM) und angrenzende Landkreise von Rheinland-Pfalz	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	ALS-Befliegung 2023

Digitales Geländemodell Gitterweite 1 m (DGM1) für angrenzende Landkreise des Saarlands	Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung - Land Saarland	ALS-Befliegung 2016
3D-Punktwolke für angrenzende Landkreise des Saarlands	Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung - Land Saarland	ALS-Befliegung 2016
Digitale Orthophotos (DOP) mit rotem, grünen, blauen und infrarot Kanal (RGBI)	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	ALS-Befliegung 2023

3.1.2 Nutzungsstruktur

Landnutzung (Abbildung 3-2) und Oberflächenbeschaffenheit spielen für die Ausbildung von Mikroklimaten und damit auch für die Klimamodellierung eine elementare Rolle. Abhängig von der Beschaffenheit der Erdoberfläche wird die Energie der einfallenden kurzwelligigen Strahlung verschieden umgesetzt. Die klimarelevante Oberflächenbeschaffenheit nimmt bei Flächen mit ähnlichen Landnutzungsstrukturen gleiche Werte an.

Die Landnutzungsdaten aus dem städtischen ALKIS-Datensatz liefert die Grundlage zur Bestimmung der Landnutzungsstruktur aus klimatischer Sicht (Abbildung 3-2). Die Landnutzungsstruktur wurde über weitere Daten, z.B. aus Informationen aus aktuellen Luftbildern sowie die zur Verfügung gestellten Bebauungspläne und weiteren Datensätzen verfeinert (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Räumliche Daten zur Nutzungsstruktur für die Stadtklimaanalyse Zweibrücken.

Daten	Bereitgestellt durch	Bereitgestellt in ²
ALKIS	Stadt Zweibrücken Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	2025 ²
ATKIS-Basis-DLM	Stadt Zweibrücken Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	2025 ²
Grünflächenkataster des Umwelt und Service Betriebs Zweibrücken	Stadt Zweibrücken	2025 ²
LoD1 und LoD2 Gebäudedaten für Zweibrücken	Stadt Zweibrücken Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz	2025 ²
Bebauungspläne	Stadt Zweibrücken	2025 ²
Bevölkerungsdaten gestaffelt nach Alter	Stadt Zweibrücken	2024 ²
Hitzesensible Nutzungen	Stadt Zweibrücken	2025 ²
CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover	European Environment Agency (EEA)	2025 ²



Abbildung 3-1: *Digitales Stadtmodell von Zweibrücken. In das Modell fließen Informationen über das Gelände, die Landnutzung, die Gebäudestrukturen und die Vegetation aus verschiedensten Datenquellen ein.*

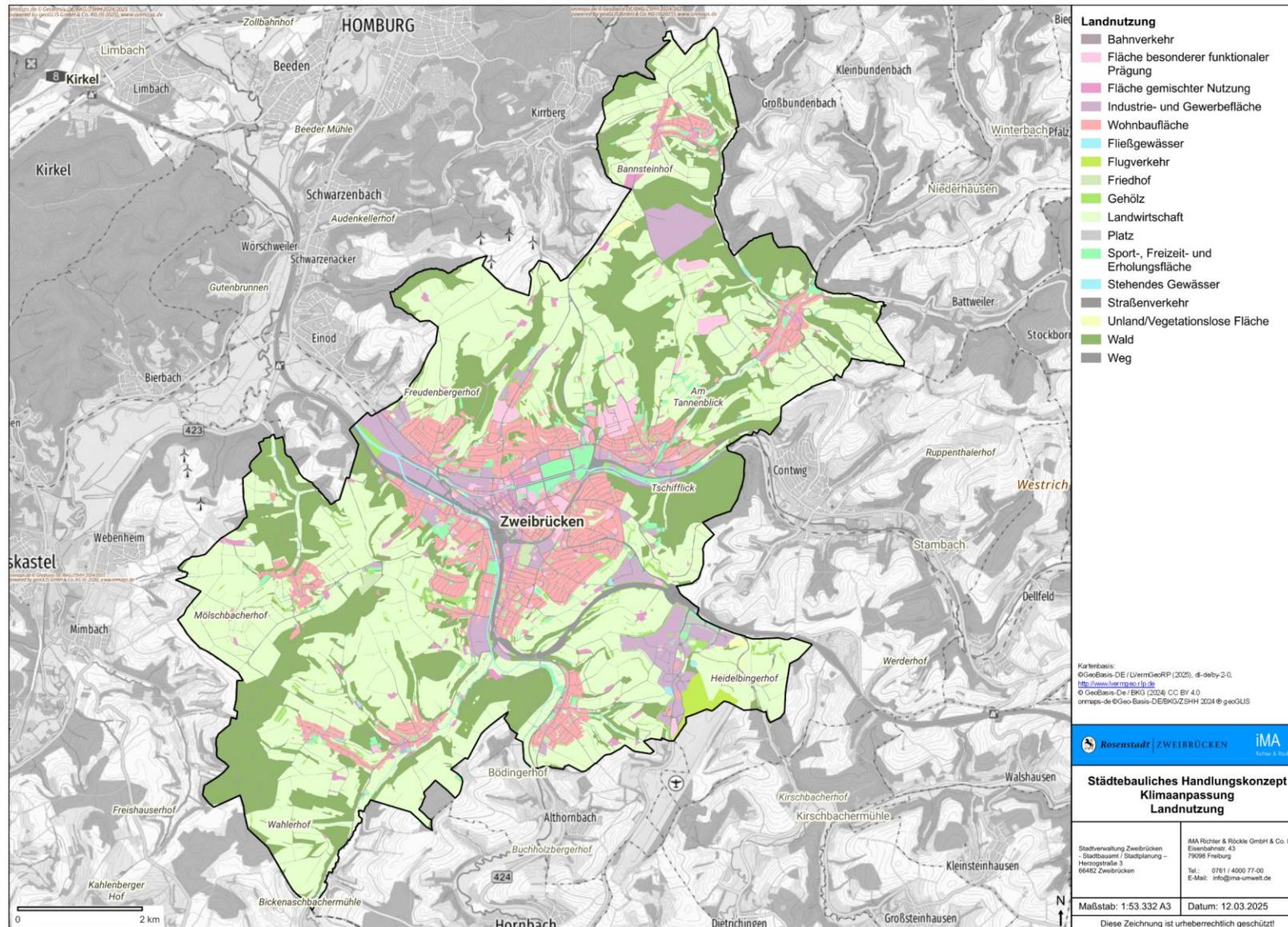


Abbildung 3-2: Aufschlüsselung der aktuellen Landnutzungsstruktur von Zweibrücken – basierend auf den ALKIS Daten.

Folgende weitere Datensätze wurden in der Stadtklimaanalyse zur Darstellung und Beschreibung der Ergebnisse verwendet (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Weitere Datensätze für die Stadtklimaanalyse Zweibrücken.

Daten	Bereitgestellt durch	Aktualität ¹ /Bereitgestellt im ²
Groß- und Unterbezirke	Stadt Zweibrücken	2025 ²

3.1.3 Messdaten

Zur klimatischen Einordnung der Stadt Zweibrücken und Analyse der Indikatoren wurden folgende Daten und Quellen herangezogen:

Tabelle 3-4: Messdaten und weitere klimatologische Daten.

Daten	Bereitgestellt durch	Aktualität ¹ /Bereitgestellt im ²
Rasterdatensätze (Karten) zur Klimahistorie	Deutscher Wetterdienst (DWD) https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/	März 2025 ²
Beobachtungsdaten/Stationsmessdaten	DWD https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/	April 2025 ²
Hotspot-/Coolspot-Karte	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz	
Messfahrten des Deutschen Wetterdienstes	Profilmessfahrten der Mobilen Messeinheit des Deutschen Wetterdienst (DWD)	durchgeführt am 21. – 22.08.2019

Die Lufttemperaturmessfahrten in Zweibrücken wurden mit einem Messfahrzeug der Mobilen Messeinheit (MME) des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. An einem Ausleger des Fahrzeugs in einer Höhe von ca. 1,9 m über Grund wurde mit einem Messfühler die Temperatur gemessen und mit einem Feuchtesensor die relative Feuchte ermittelt. Zwei weitere Temperaturmessfühler befanden sich in einer Höhe von 0,7 m über Grund. Die Messsignale wurden mit einer Abtastrate von einem Hertz aufgenommen und in einem Datalogger gespeichert. Mittels GPS konnten die Messwerte, während der gesamten Messfahrt, räumlich zugeordnet werden. Die maximale Fahrtgeschwindigkeit betrug 30 km/h, wodurch pro acht Meter Fahrtstrecke ein Datensatz vorliegt.

Für eine einheitliche, vergleichbare Datenaufnahme ist eine gleichmäßige Fahrtgeschwindigkeit am günstigsten. Deswegen werden Daten, die bei Wartezeiten und Staus aufgenommen werden, wieder eliminiert.

Während einer autochthonen Wetterlage wurden in Zweibrücken an zwei aufeinanderfolgenden Tagen 21.08.2019 und 22.08.2019 jeweils drei Messfahrten durchgeführt. Der hohe Luftdruck ging mit nur geringer Bewölkung einher, wobei sich im Tagesverlauf strahlungsbedingt wenige flache Quellwolken bildeten. Da die durchgeführten Fahrten am 22.08.2019 das mikroklimatische Geschehen besser widerspiegeln, wurden diese Ergebnisse durch den DWD ausgewertet.

3.1.4 Daten zu den Kaltluftabflüssen simuliert mit KLAM_21 (DWD)

Das Landesamt für Umwelt (Referat 61) hat mit dem vertikal integrierten Kaltluftmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes die Kaltluftabflüsse, ihre Höhe und Volumenstromdichte ausgerechnet. KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen.

Die physikalische Basis des Modells bilden eine vereinfachte Bewegungsgleichung und eine Energiebilanzgleichung, mit der der Energieverlust und damit der „Kälteinhalt“ der Kaltluftschicht bestimmt wird. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet.

Je nach Landnutzungstyp werden unterschiedliche Kaltluftmengen produziert, die der Geländeneigung folgend und durch die Rauigkeit verzögert abfließen. Die Ergebnisse wurden 2 h nach Sonnenuntergang ausgegeben. Betrachtet wird eine autochthone Wetterlage, d.h. eine windschwache, wolkenarme Nacht.

Als Eingangsdaten wurde das Corine Land Cover (CLC 2018, Version 2020_20u1) in einer Auflösung von 100 m für die Landnutzung und EU-DEM (Auflösung ca. 30 m) als Geländemodell verwendet. Jeder Landnutzungs-kategorie wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand sowie gegebenenfalls eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit von bebauten Flächen.

Die Volumenstromdichte ($\text{m}^3/(\text{m s})$) wurde in 5 Bereiche klassifiziert (≤ 1 , ≤ 10 , ≤ 20 , ≤ 30 , > 30) und räumlich gefiltert (Majority-Filter 2R).

Die Kaltluflhöhe (in m ü. Grund) wurde auf „keinen Wert“ (NA) auf den Flächennutzungen Wald, Park oder unversiegelte Freiflächen und Kaltluflhöhe kleiner 10 m und über Kuppen gesetzt.

3.1.5 Daten zu den Cold- und Hotspots

Die Daten zu den Cold- und Hotspots wurden durch das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz Referat 61³ erstellt. Die Karten/Layer zeigen die Bereiche innerhalb des gewählten Gebietes die kühler oder wärmer als die mittlere Oberflächentemperatur des gewählten Gebietes sind. Dabei wird die Differenz des jeweiligen Pixels zur mittleren Oberflächentemperatur des Gebietes dargestellt.

Für den Tag wurden 2 Szenen von Landsat8, welche am 02.06.21 um ca. 12:22 Uhr MESZ aufgenommen wurden, ausgewertet⁴.

Ausgewertet wurde die Oberflächentemperatur des Landsat 8 Level 2 mit einer Auflösung von 30 m. Die Landoberflächentemperatur (in Kelvin) wurde aus den Daten „ST_B10 Produkt“ wie folgt berechnet:

$$\text{LST/K} = \text{ST_B10} \cdot 0,00341802 + 149,0$$

Nachts werden thermale Aufnahme des Forest 2 Satelliten von Ororatech, aufgenommen am 06.08.2024 um ca. 02:32 Uhr MESZ mit einer Auflösung < 200 m zur Berechnung der Landoberflächentemperatur herangezogen⁵.

³ https://www.klimawandel.rlp.de/Kartenwerke_Klimaanpassung/#9/49.8460/7.8770, Stand 13.05.2025

⁴ https://www.klimawandel.rlp.de/Kartenwerke_Klimaanpassung/data/Download/Dokumentation-ColdHotSpots_LfU_RLP.pdf, Stand 13.05.2025

⁵ https://www.klimawandel.rlp.de/Kartenwerke_Klimaanpassung/data/Download/Dokumentation-ColdHotSpots_LfU_RLP.pdf, Stand 13.05.2025

3.1.6 Daten regionaler Klimamodelle

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen. Neben den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse erheblich zu Klimaveränderungen bei. So ist seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche hauptsächlich durch die anthropogen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen verursacht wird.

Um sich an das künftig geänderte Klima frühzeitig anzupassen, wurden Klimaprojektionen entwickelt, die die zu erwartenden zukünftigen klimatischen Bedingungen abbilden. Dabei werden basierend auf unterschiedlichen möglichen gesellschaftlichen Entwicklungen verschiedene Klimaprojektionen (und deren Strahlungsantriebe) betrachtet.

Eine wichtige Grundlage für die unterschiedlichen Klimaprojektionen sind die globalen Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die mögliche Entwicklung der Konzentrationen wird in sogenannten „Emissionsszenarien“ (Representative Concentration Pathways, RCP) klassifiziert. Die verschiedenen Szenarien wurden vom zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erarbeitet und im fünften Sachstandsbericht veröffentlicht (IPCC (2013)). Abbildung 3-3 zeigt die Entwicklung des Strahlungsantriebs* aus anthropogenen Quellen innerhalb der verschiedenen Szenarien. Dies ist indirekt ein Indikator für die mögliche Zunahme der globalen mittleren Lufttemperatur.

Jedes Emissionsszenario bündelt solche sozioökonomischen Entwicklungsszenarien, welche die zukünftige Energieversorgung, Bevölkerungsentwicklung, Nahrungsmittelproduktion, Weltwirtschaft und ihre Wechselwirkung mit dem Klimasystem und der Landnutzung berücksichtigen (Moss et al. (2008); van Vuuren et al. (2011)). Die Unsicherheiten, die durch die Annahmen der zukünftigen Entwicklungen innerhalb jedes Szenarios entstehen, werden in Abbildung 3-3 (dünne farbliche Linien) abgebildet.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade für den fünften Sachstandsbericht ausgewählt (IPCC (2013)): RCP2.6 (relativ niedriger Strahlungsantrieb), RCP4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb), RCP6.0 (hoher Strahlungsantrieb) und RCP8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb) (Abbildung 3-3, dicke Linien). Die Beschreibung der RCPs befindet sich in Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Beschreibung unterschiedlicher Klimawandelszenarien basierend auf den Representative Concentration Pathways (RCP).

Szenario	Beschreibung
RCP8.5	Bis über das Jahr 2100 ansteigender Strahlungsantrieb. Dieser beträgt im Jahr 2100 8,5 W/m ² oder 1370 ppm CO ₂ -Äquivalent. Die globale Oberflächentemperatur wird bis 2081 – 2100 im Vergleich zu 1986 – 2005 wahrscheinlich im 5 bis 95. Perzentil der CMIP-Modelle um 2,6 °C bis 4,8 °C ansteigen (IPCC (2013)).
RCP6.0	Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei ca. 850 ppm CO ₂ -Äquivalent. Die globale Oberflächentemperatur wird bis 2081 – 2100 im Vergleich zu 1986 – 2005 wahrscheinlich im 5 bis 95. Perzentil der CMIP-Modelle um 1,4 °C bis 3,1 °C ansteigen (IPCC (2013)).
RCP4.5	Moderate Entwicklung. Anstieg des CO ₂ -Äquivalents auf 650 ppm bis 2100. Das Modell MPI-ESM berechnet einen globalen Anstieg der Lufttemperatur um etwa 2,6 °C gegenüber 1986 – 2005. Die globale Oberflächentemperatur wird bis 2081 – 2100 im Vergleich zu 1986 – 2005 wahrscheinlich im 5 bis 95. Perzentil der CMIP-Modelle um 1,1 °C bis 2,6 °C ansteigen (IPCC (2013)).
RCP2.6	„Peak-Szenario“, d.h. Anstieg der Treibhausgasemissionen bis 2020 auf ca. 490 ppm, danach konstanter Treibhausgasemission- und Strahlungsantriebsrückgang auf etwa 2,6 W/m ²

im Jahr 2100. Die globale Oberflächentemperatur wird bis 2081 – 2100 im Vergleich zu 1986 – 2005 wahrscheinlich im 5. bis 95. Perzentil der CMIP-Modelle um 0,3 °C bis 1,7 °C ansteigen (IPCC (2013)). Durch den drastischen Rückgang der Emissionen wird eine globale Erwärmung um mehr als 2 °C im Jahr 2100 sehr wahrscheinlich nicht überschritten (IPCC (2013)). Das Szenario entspricht einem Ziel des Übereinkommens von Paris.

Auf Grundlage der verschiedenen RCP-Szenarien werden auf globaler Ebene Klimaprojektionen errechnet. Mit regionalen Klimamodellen werden die Ergebnisse anschließend für einzelne Regionen verfeinert. Dies erlaubt genauere Aussagen über die Änderungen der mittleren Zustände und der Wetterextreme. Das Verfahren wird als Downscaling-Verfahren bezeichnet und verwendet sowohl statistische als auch dynamische Methoden. Bei dem Downscaling werden komplexe Topografie und die jeweilige Landnutzung durch die feinere Auflösung (Gitterweite) besser repräsentiert als in den globalen Klimaprojektionen (Wang et al. (2004)).

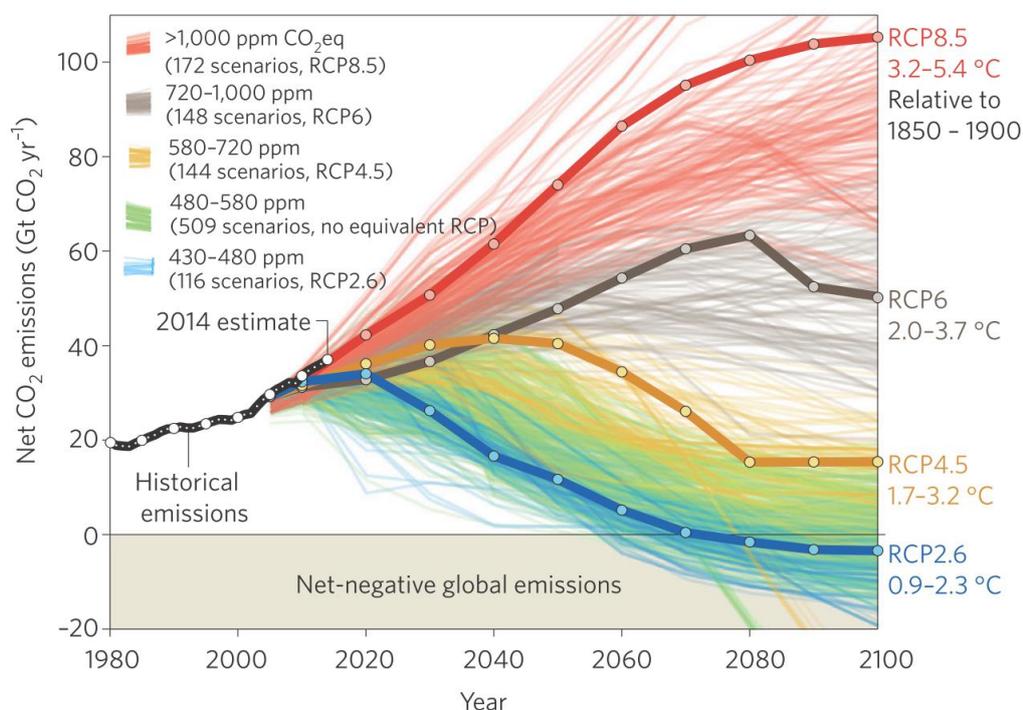


Abbildung 3-3: Zeitreihe des anthropogenen Strahlungsantriebs (W/m^2) für verschiedene Emissionsszenarien (RCP; Quelle: Fuss et al. (2014)).

Aus der Vielzahl an Ergebnissen unterschiedlicher Regionalmodelle und Szenarien werden Ensemble-Datensätze erstellt, sogenannte Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemblemodelle. Diese bündeln die Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle für verschiedene Regionen, z. B. Europa, und ermöglichen somit eine Abschätzung der Unsicherheiten in den Klimamodellen und deren Parametrisierungen (Hewitt (2004); Murphy et al. (2004)).

Konkrete, zeitlich eindeutig zuordenbare Vorhersagen sind mithilfe der Klimaprojektionen nicht möglich. Die hohe Unsicherheit in der Entwicklung lässt lediglich eine Aussage über die statistisch betrachtete wahrscheinliche Klimaentwicklung zu.

Im Jahr 2021/2022 veröffentlichten sechsten Sachstandsbericht (IPCC (2021)) werden die Zukunftsszenarien aktualisiert. Die Entwicklung des anthropogenen Strahlungsantriebs ist vergleichbar mit denen der RCP-Szenarien des fünften Sachstandsberichts, wobei das Szenario RCP2.6

als unwahrscheinlich eingestuft und nicht mehr betrachtet wird. Da die Ergebnisse des sechsten Sachstandsberichts erst vor kurzem veröffentlicht wurden, liegen noch keine Ensembledatensätze von regionalen Klimamodellen vor. Die Unterschiede in den betrachteten Szenarien zwischen dem fünften und sechsten Sachstandsbericht sind allerdings nur gering. Daher werden für die Stadtklimaanalyse weiterhin die RCP-Szenarien des fünften Sachstandsberichts verwendet.

Für die Auswertung wurden die Zukunftsprojektionen RCP4.5 und RCP8.5 verwendet. Diese stellen die beste mögliche Entwicklung (RCP4.5) und die schlechteste mögliche Entwicklung (RCP8.5) dar. Dadurch kann die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklung des zukünftigen Klimas in der Stadt Zweibrücken dargestellt werden.

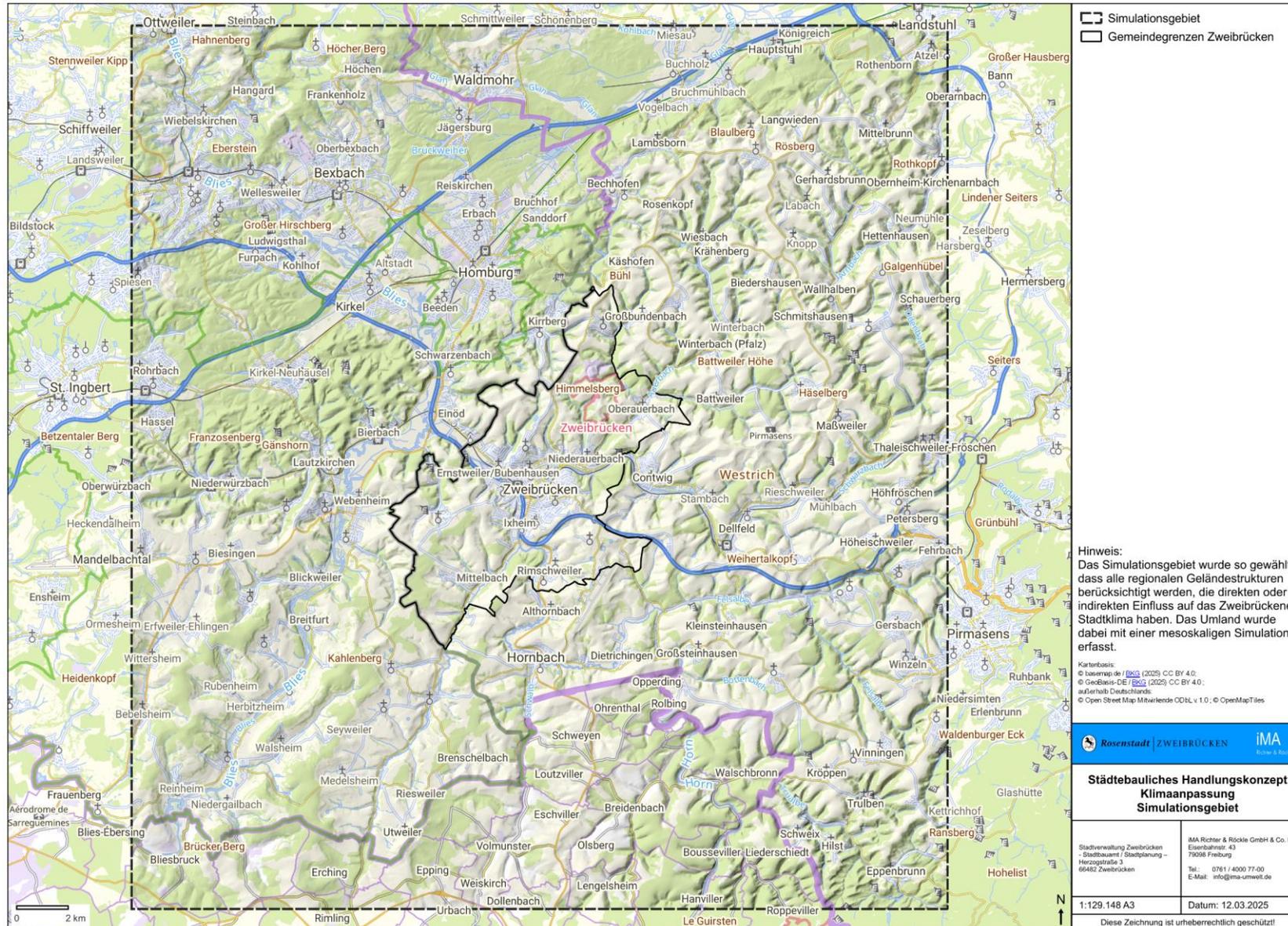


Abbildung 3-4: Simulationsgebiet für die Stadtklimasimulationen.

3.2 Methodik

3.2.1 Stadtklimasimulationen

Dreidimensionale prognostische Modelle

Zur Erfassung des Stadtklimas mittels computergestützter, numerischer Simulationen wurde das mesoskalige, 3-dimensionale, prognostische Modell FITNAH gewählt, um die Kaltluftströmungen und ihre Wechselwirkung mit der Lufttemperatur in Zweibrücken mit seiner äußerst komplexen Orographie darstellen zu können. Dieses Modell steht am oberen Ende der in der Praxis eingesetzten numerischen Verfahren (vgl. Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG) (2024)). Diese berechnen durch die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Impuls (Bewegungsgleichung), für Masse (Kontinuitätsgleichung), für Feuchte und für die innere Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik) die zeitliche Entwicklung der meteorologischen Größen (Temperatur, Feuchte, Strahlung, Wind) in Abhängigkeit vom Relief, der Landnutzung und der meteorologischen Ausgangssituation.

Flachwassermodelle

Einen anderen Modelltyp stellen Flachwassermodelle, wie KLAM_21 dar, welche die Erhaltungsgleichungen vertikal integriert (d.h. nicht in verschiedenen Höhenschichten, sondern gemittelt über die Kaltfluthöhe) lösen und auch als Kaltluftabflussmodelle bezeichnet werden.

Die Ergebnisse für die Strömung stellen deshalb vertikal über die Kaltluftmächtigkeit gemittelte Werte dar, während die dreidimensionalen Modelle die Ausweisung der Strömungsverhältnisse in verschiedenen Höhen ermöglichen. Außerdem sind Flachwassermodelle nur für die Untersuchung der Nachtstunden geeignet. Aufgrund der Modellvereinfachungen ist für Simulationen mit Flachwassermodellen der Rechenaufwand deutlich geringer als bei dreidimensionalen prognostischen Modellen. Sie weisen allerdings auch eine geringere fachliche Wertigkeit auf. So können Flachwassermodelle bei gering mächtigen Hangabwinden zum Einsatz kommen, da sie hier vergleichbare Ergebnisse zeigen zu dreidimensionalen prognostischen Modellen. Aussagen zur bodennahen Lufttemperatur oder Wärmebelastung können mit Flachwassermodellen nicht getroffen werden. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und der Strömung werden nicht explizit aufgelöst, sondern nur stark vereinfacht in ihrer Klimawirkung abgebildet. Auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen meteorologischen Größen werden nicht berücksichtigt.

Des Weiteren werde die Modelltypen in folgenden Publikationen behandelt: Gerhards et al. (2013) ab S. 23 ff., Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2023) auf S. 16 ff. oder das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023) auf S. 5.

In Zweibrücken treten aufgrund der komplexen Orographie und seiner Lage in der Senke komplexe Kaltluftströmungssysteme auf, um diese möglichst realitätsnah und unter Verwendung der aktuellen Landnutzung darstellen zu können, wurden computergestützte Simulationen mit dem prognostischen, 3-dimensionalen Modell FITNAH durchgeführt.

3.2.1.1 Das prognostische Modell FITNAH

FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources) ist ein mathematisch-physikalisches Strömungsmodell. Das Modell FITNAH löst die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung. Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur

werden bodenspezifische Parameter (Bodenart, Feuchte usw.) durch ein implementiertes Bodenmodell berücksichtigt. Des Weiteren werden auch Turbulenzparameter, Lufttemperatur und Luftfeuchte berechnet. Das Modell simuliert abhängig vom Sonnenstand die Erwärmung bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft.

Als sogenanntes „nicht-hydrostatisches, prognostisches“ Modell beruht es auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windkomponenten (Navier-Stokes-Gleichungen für die Komponenten des Windvektors im 3D-Raum, x-, y- und z-Richtung) sowie auf den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese (miteinander gekoppelten) Gleichungen werden auf einem numerischen dreidimensionalen Gitter in kleinen Zeitschritten gelöst, so dass sich die vielfältigen nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Topographiebereichen, vergleichbar der Natur, sukzessive einstellen und der von der Natur erzielte Gleichgewichtszustand zwischen den unterschiedlichen strömungsbeeinflussenden Effekten realistisch berechnet wird.

Ein großer Vorteil des Modells FITNAH ist die Berücksichtigung der Landnutzung. Die Daten gehen, differenziert nach Bewuchs- bzw. Bebauungshöhen und ihren jeweiligen Flächenanteilen in jede Rechenzelle ein. Das Modell FITNAH ist vielfach validiert und von zahlreichen Fachbehörden als eines der leistungsfähigsten Instrumente zur Simulation meteorologischer Phänomene im Bereich der Umweltmeteorologie anerkannt.

3.2.1.2 Meteorologische Situation und Anfangszustand

Ausgangslage der FITNAH-Simulation war entsprechend der Empfehlung der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) eine autochthone Wetterlage. Dies ist eine Wetterlage, bei der die großräumige Luftdruckverteilung kaum Druckunterschiede aufweist. Da aus diesem Grund keine dominierende übergeordnete bzw. überregionale Strömung auftritt, können sich lokale thermische Strömungssysteme wie z.B. nächtliche Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet besonders prägnant herausbilden.

Die Simulation wurde für einen typischen Hochsommertag durchgeführt, den 1. August. Die Sonne steht mittags um 12:00 Uhr (wahre Ortszeit WOZ) im Zenit (Sonnenhöchststand), der Sonnenuntergang erfolgt an diesem Tag um 19:30 Uhr WOZ, der Sonnenaufgang am nächsten Tag um 4:30 Uhr WOZ.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand sind:

- bodennahe Lufttemperatur um 15:00 Uhr im Mittel 29 °C,
- relative Feuchte (20 %),
- kein übergeordneter Wind und
- wolkenlos.

Die Ergebnisse der FITNAH-Simulation repräsentieren somit typische hochsommerliche Verhältnisse.

3.2.1.3 Rechengebiet, räumliche und zeitliche Auflösung

Um die lokalklimatischen Einflussfaktoren des Umlands wie die Kaltluftabflüsse von Zweibrücker Westrich bzw. der Westricher Hochfläche erfassen zu können, wurde ein größeres Gebiet in einer räumlichen Auflösung von 25 m betrachtet (Abbildung 3-4).

Die verwendeten Modelle rechnen mit einer feinen zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich. Aus dem berechneten Tagesgang werden folgende Zeiträume ausgewertet:

- Abend-/Nachtstunden (2 Stunden nach Sonnenuntergang, 22:00 und 4:00 Uhr wahre Ortszeit*),
- Thermische Bedingungen (Wärmebelastung) tagsüber (12:00 Uhr wahre Ortszeit).

Als Ergebnis liefern die Simulationen flächendeckend Daten, u.a. zur Berechnung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur und der urbanen Wärmeinsel, aber auch die Strömungsverhältnisse (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Volumenstromdichte*).

3.2.2 Human-Biometeorologie

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (engl.: „physiological equivalent temperature“, PET, Mayer & Höppe (1987)), berücksichtigen den integralen Effekt der meteorologischen Größen: Lufttemperatur (T_a), Luftfeuchte (VP), Windgeschwindigkeit (v) sowie der Strahlungsflüsse (T_{mrt}) auf die menschliche Energiebilanz (Abbildung 3-5). Die physiologischen Parameter Aktivität, Kleidung sowie weitere physische Faktoren werden dabei konstant gehalten.

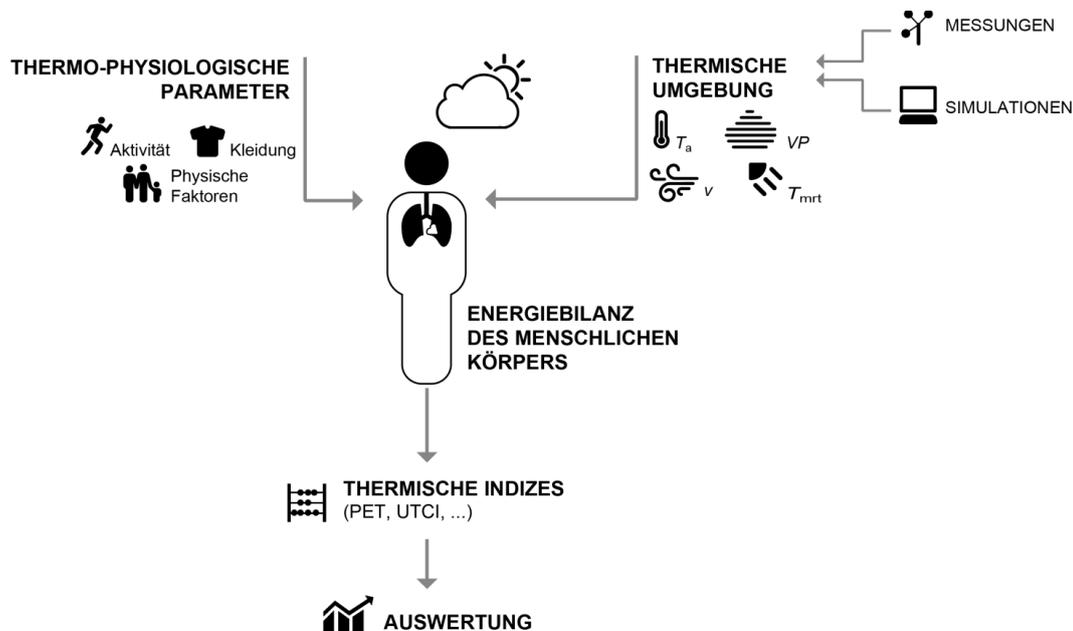


Abbildung 3-5: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältestress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts für den mitteleuropäischen Raum wurde die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis & Mayer (1997) verwendet (Tabelle 3-6).

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur ist konform mit der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022) und eignet sich aufgrund ihrer Definition besonders für die (Stadt-)Planung, wird aber auch im Bereich der Kurort-Zertifizierung (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010)) und im Bereich Tourismus angewandt.

Tabelle 3-6: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997); VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022)).

PET (°C)	Thermische Sensitivität	Physiologischer Stress
< 4,1	sehr kalt	extremer Kältestress
4,1 – 8,0	kalt	starker Kältestress
8,1 – 13,0	kühl	moderater Kältestress
13,1 – 18,0	leicht kühl	leichter Kältestress
18,1 – 23,0	komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
23,1 – 29,0	leicht warm	leichte Wärmebelastung
29,1 – 35,0	warm	moderate Wärmebelastung
35,1 – 41,0	heiß	starke Wärmebelastung/Hitze stress
> 41,0	sehr heiß	extrem starke Wärmebelastung/Hitze stress

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur wird maßgeblich durch die Strahlung beeinflusst. Deshalb wurden die FITNAH-Ergebnisse durch hochaufgelöste KI-gestützte Verfahren unter Berücksichtigung der Hindernisse und ihrer lokalklimatischen Auswirkungen verfeinert. Die Berechnung basiert u.a. unter Einbezug der Landnutzung, des Vegetations- und Versiegelungsdatensatzes, sowie des DOMs.

3.2.3 Berechnung der thermischen Empfindlichkeit

Die thermische Empfindlichkeit der Bevölkerung wird aus der Bevölkerungsdichte unter Berücksichtigung hitzesensibler Nutzung (z.B. Krankenhäuser, Seniorenheime, Pflegeeinrichtungen, Pflege-Wohngemeinschaften, Schulen und Kindertagesstätten) berechnet. Die Bewertung der Bevölkerungsdichte erfolgt relativ durch Berechnung der Perzentile bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Stadtgebiet (Tabelle 3-7). Die Berechnung der thermischen Empfindlichkeit erfolgt auf einem 25 m x 25 m Gitter.

Tabelle 3-7: Bewertung der Bevölkerungsdichte je 25 m · 25 m und der hitzesensiblen Nutzung.

Perzentil	Bevölkerung pro 25 m · 25 m	Bewertung
≤ 30.	≤ 0,6	sehr geringe Empfindlichkeit
> 30. – 70.	> 0,6 – 2,5	geringe Empfindlichkeit
> 70. – 85.	> 2,5 – 3,1	mittlere Empfindlichkeit
> 85. – 95.	> 3,1 – 5,0	hohe Empfindlichkeit
> 95.	> 5,0	sehr hohe Empfindlichkeit
Hitze sensible Nutzung		sehr hohe Empfindlichkeit

Die unterschiedlichen hitzesensiblen Nutzungstypen werden teilweise tageszeitabhängig genutzt. Während sich in Krankenhäusern oder Seniorenheimen rund um die Uhr vulnerable Personen aufhalten, werden Schulen und Kindertagesstätten in der Regel nur tagsüber genutzt. Daher werden Schulen und Kindertagesstätten nur bei der Betrachtung der Tagstunden in der thermischen Empfindlichkeit berücksichtigt.

3.2.4 Berechnung der Betroffenheit

Die Betroffenheit der Bevölkerung wird aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit mit der thermischen Belastung ermittelt. Die eingehenden Parameter zur Bestimmung der Betroffenheit sind

- **Empfindlichkeit** (Tabelle 3-7), bestehend aus
 - Bevölkerungsdichte,
 - Empfindliche Einrichtungen;
- **Thermische Belastung**, bestehend aus
 - Tagsüber: Physiologisch Äquivalenter Temperatur (Wärmebelastung, Tabelle 3-8),
 - Nachts: Urbane Wärmeinsel (Wärmebelastung, Tabelle 3-9),

Während sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der solaren Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet, korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur. Die nächtliche Wärmebelastung wird anhand der Lufttemperatur in Form der urbanen Wärmeinsel bewertet.

Die Bestimmung der thermischen Belastung am Tag erfolgt anhand der in Tabelle 3-10 aufgeführten Klassifizierung. Aus der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit der Bevölkerung bestimmt sich die thermische Betroffenheit gemäß Tabelle 3-12.

Tabelle 3-8: Bewertung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) angelehnt an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022).

PET (°C)	Belastungskategorie
≤ 29,0	leichte Wärmebelastung
> 29,0 – 35,0	moderate Wärmebelastung
> 35,0 – 41,0	starke Wärmebelastung
> 41,0 – 43,4 (98. Perzentil)	extrem starke Wärmebelastung
> 43,4 (98. Perzentil)	extrem starke Wärmebelastung

Tabelle 3-9: Bewertung der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI) – abendliche Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland in K.

Perzentil	UHI (K)	Bewertung
≤ 75.	≤ 0,2	keine Überwärmung
> 75. – 90.	> 0,2 – 0,7	geringe Überwärmung
> 90. – 95.	> 0,7 – 1,7	mäßige Überwärmung
> 95. – 98.	> 1,7 – 2,3	mittlere Überwärmung
> 98.	> 2,3	starke Überwärmung

Tabelle 3-10: Thermische Belastung tagsüber ermittelt aus PET.

Thermische Belastung tagsüber					
	PET (°C) um 14:00 Uhr (Tabelle 3-6)				
	≤ 29,0	> 29,0 – ≤ 35,0	> 35,0 – ≤ 41,0	> 41,0 – ≤ 43,4	> 43,4
Thermische Belastung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch

Tabelle 3-11: Thermische Belastung nachts ermittelt aus der UHI.

Thermische Belastung nachts					
	UHI (K) um 22:00 Uhr (Tabelle 3-9)				
	≤ 0,5	> 0,5 – ≤ 1,3	> 1,3 – ≤ 1,8	> 1,8 – ≤ 2,3	> 2,3
Thermische Belastung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch

Tabelle 3-12: Thermische Betroffenheit ermittelt aus der thermischen Belastung sowie der Empfindlichkeit der Bevölkerung

Thermische Betroffenheit						
		Thermische Belastung tagsüber + thermische Belastung nachts (Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11)				
		sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Empfindlichkeit der Bevölkerung (Tabelle 3-7)	sehr gering	sehr gering	gering	gering	mittel	mittel
	gering	gering	gering	mittel	mittel	hoch
	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
	hoch	mittel	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
	sehr hoch	mittel	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch

3.2.5 Erstellung der Klimatopkarte

Die Klimatopkarte zeigt eine bewertungsfreie, flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes. Dabei gibt sie in erster Linie die Verhältnisse während autochthonen Wetterlagen wieder. Die Klimatopkarte wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) vom LfU erstellt. Die Klimatope wurden automatisiert aus den flächendeckenden Daten aus ATKIS abgeleitet, dabei wurden Flächennutzungs-, Bebauungs- und Versiegelungsdaten berücksichtigt.⁶

⁶ https://www.klimawandel.rlp.de/Kartenwerke_Klimaanpassung/data/Download/Dokumentation-Klimatopkarte_LfU_RLP.pdf

3.2.6 Erstellung der Planungshinweiskarte

Während die Klimatopkarte eine weitgehend bewertungsfreie Darstellung der klimatischen und luft-hygienischen Verhältnisse repräsentiert, werden auf der Planungshinweiskarte zum einen die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und zum anderen die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung bewertet.

3.2.7 Identifikation des Ausgleichs-Wirkungsraumgefüges

Kalt- und Frischluftströmungen, die relevanten Kaltluftproduktionsgebiete und die Luftleitbahnen sind im planerischen Sinne dann von Bedeutung, wenn sie die Belüftung von Siedlungsgebieten (Wirkungsraum) bewirken. Je größer die Betroffenheit in diesen Siedlungsgebieten ist, desto wichtiger ist diese ausgleichende Funktion.

In Abbildung 3-6 ist eine idealisierte Situation skizziert. Die Grafik zeigt unterschiedlich belastete Wirkungsräume (hier charakterisiert durch die Bebauungsdichte) und einen Kaltluftstrom, der die Tallage von Westen her belüftet. In dieser idealisierten Darstellung ist ersichtlich, dass der Kaltluftstrom, der auf den belasteten Siedlungsraum trifft, eine höhere Ausgleichsrelevanz besitzt, als der identische Kaltluftstrom, der nur die mäßig belasteten Siedlungsgebiete oder das Umland belüftet.

In der Realität sind sowohl die Kaltluftabflussverhältnisse wie auch die Belastungssituation deutlich heterogener. Die Kaltluft kann aus unterschiedlichen Bereichen dem Siedlungsgebiet zuströmen, sie kann unterschiedliche Intensitäten aufweisen und unterschiedlich belastete Siedlungsbereiche treffen. Die lokal sehr differenzierten Kaltluftabflüsse werden aus den FITNAH-Simulationen entnommen.

Die Bewertung der Siedlungsbereiche geschieht anhand der thermischen Betroffenheit. Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in den Wirkungsräume zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, wird ein automatisierter, allgemein gültiger, objektiver Algorithmus angewandt.

Im ersten Schritt wird ein numerisch-physikalisches Analysemodell auf die simulierten Kaltluftabflüsse angewandt. Mit diesem Modell kann die Identifikation und Abgrenzung der komplexen Kaltluftströmungssysteme unter Berücksichtigung der Distanz zum Zielort durchgeführt werden. So ist eine erste Eingrenzung der für einen Wirkungsraum zu betrachtende Bereiche möglich.

Im zweiten Schritt werden Vorwärtstrajektorien auf Basis der Kaltluftströmungsfelder berechnet. Den Windfeldern werden mit dem Verlauf der Vorwärtstrajektorien die thermische Betroffenheit derer Flächen zugeordnet, die sie überstreichen. Mithilfe dieser Methode wird auch die Eindringtiefe in Zusammenhang mit der vorherrschenden Betroffenheit analysiert. Entlang der Trajektorie wird die thermische Betroffenheit addiert, die die Strömung vom jeweiligen Punkt erreicht (siehe Abbildung 3-7).

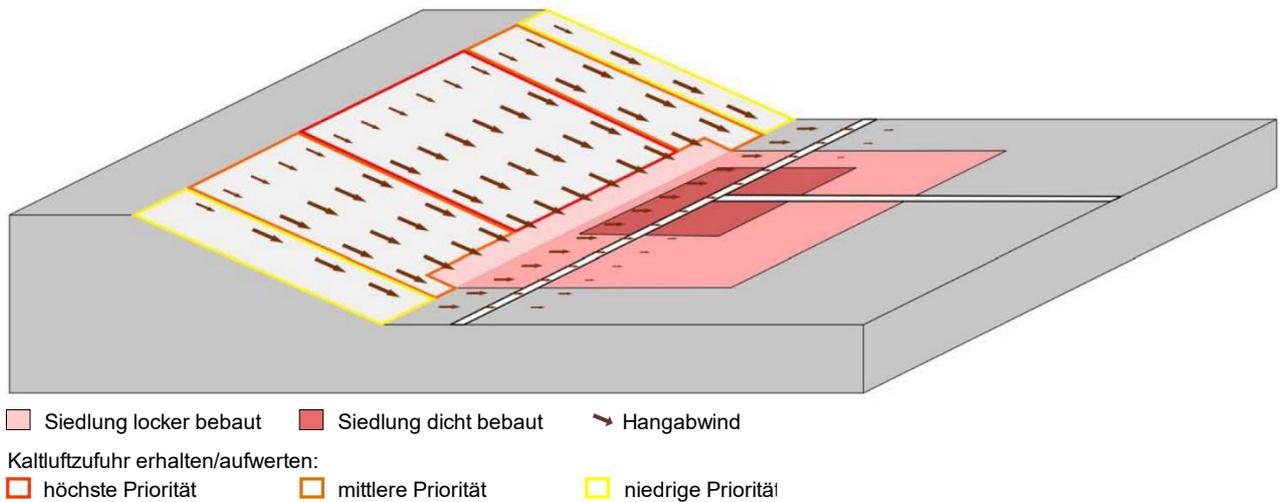


Abbildung 3-6: Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (Schwab & Zachenbacher (2009)).

Die beispielhafte Berechnung von Vorwärtstrajektorien zur Ermittlung der Bedeutung der Kaltluftströmung bK wird in Abbildung 3-7 dargestellt. Die blauen Kästchen markieren die Position eines Windpfeils, der bewertet werden soll. Die Betroffenheit der Siedlungen (S1 bis S3) wurde in der Stadtklimaanalyse Zweibrücken in 25 m · 25 m Rasterzellen ermittelt (rote Begrenzungen unterhalb der Siedlungen, z.B. Betroffenheitswert 2 in Siedlung S1). Die Einwohnerdaten lagen dabei nur auf Basis von Unterbezirken vor und wurden für die Betroffenheitsanalyse in Form einer Bevölkerungsdichte (Einwohner pro Hektar) auf das 25 m Gitter abgebildet.

Die Bewertung richtet sich nach der möglichen Belüftungswirkung der Strömung. Eine Strömung die mehrere oder stärker betroffene (empfindlichere) Siedlungsbereiche belüftet, erhält eine höhere Bewertungskennzahl. Die im oberen Hangbereich produzierte Kaltluft trägt dann zur Belüftung der nachfolgenden Siedlungsbereiche bei. Die Bewertungszahl ergibt sich als Summe der Betroffenheit der überstrichenen Siedlungen (hier z.B. 2 + 3 + 5 + 6).

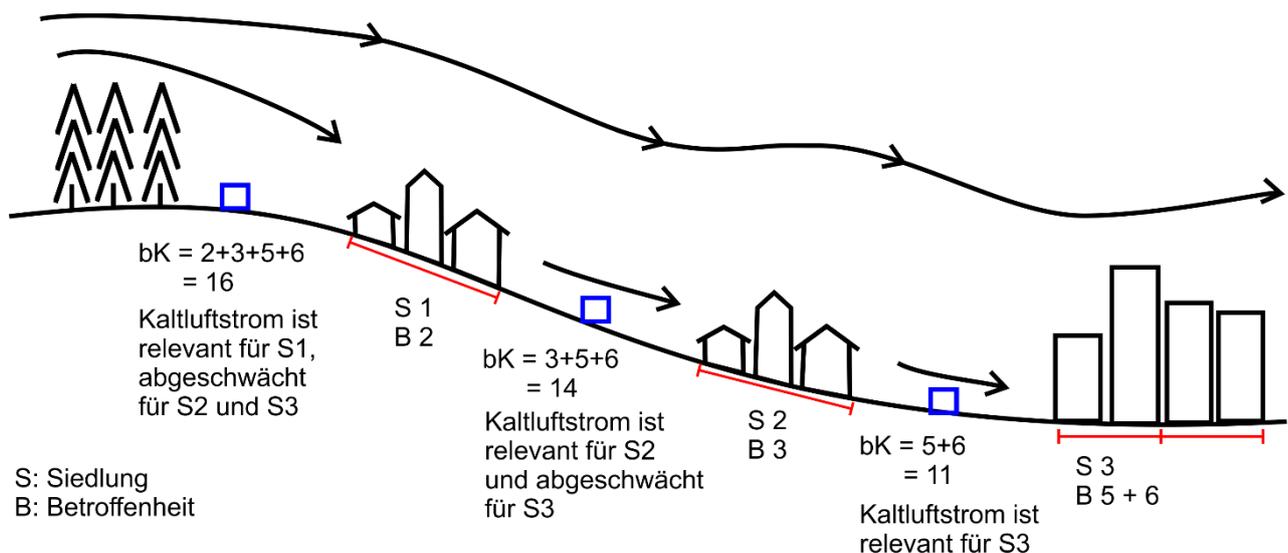


Abbildung 3-7: Beispielhafte Bewertung der Kaltluftströmung (bK) durch Vorwärtstrajektorien.

4 Bestandsbeschreibung

4.1 Örtliche Verhältnisse

Die Rosenstadt Zweibrücken (49 ° 15' N, 7 ° 22'E) liegt am Rande von Rheinland-Pfalz, direkt angrenzend an das Saarland und in direkter Nachbarschaft zu Frankreich (Abbildung 4-1). Die Gemarkung Zweibrücken erstreckt sich über 10 km von Osten nach Westen und über 15 km von Norden nach Süden. Das Gelände der Stadt Zweibrücken erstreckt sich über etwa 160 m zwischen dem Hallplatz mit 226 m ü. NHN und Kastenbühl/Mörsbach mit 385 m ü. NHN. Die durchschnittliche Geländehöhe liegt bei etwa 300 m ü. NHN. Die Gesamtfläche der Stadt unterteilt sich in Landwirtschaftsflächen (3.374 ha), Waldflächen (1.461 ha), Gebäude- und Freiflächen (1.083 ha), Verkehrsflächen (571 ha), Erholungsflächen (201 ha), Wasserflächen (62 ha), und Betriebsflächen (51 ha). Die Waldflächen in Zweibrücken gehören z.T. zum Staatsforst Westrich.

Zweibrücken gliedert sich in die Innenstadt, sowie mehrere Stadtteile. Zu den Stadtteilen gehören Bubenhausen, Ernstweiler, Ixheim, Niederauerbach, Mörsbach, Oberauerbach, Rimschweiler, Mittelbach-Hengstbach sowie Wattweiler. Das Stadtzentrum liegt in Tallage des Schwarzbaches, sowie des Hornbachs. Innerhalb der kreisfreien Stadt Zweibrücken gibt es einige Gewerbeflächen: z. B., im Bereich der Homburger Straße, zwischen Dinglerstraße und Schillerstraße, Wilkstraße und Gewerbepark Flughafen Zweibrücken. Der Flugplatz Zweibrücken selbst liegt nicht mehr auf Zweibrückener Gemarkung, sondern gehört zum Landkreis Südwestpfalz.

In Zweibrücken münden der Bautzenbach, der Bombach, der Heilbach, der Auerbach die Flüsse und Bäche aus mehreren Seitentälern von Norden her kommend in den Schwarzbach. Aus südlicher Richtung gibt es zusätzlich die Bickenalbe, die an Mittelbach vorbei ebenfalls im Hornbach und später im Schwarzbach mündet.

In Zweibrücken leben etwa 33.323 Menschen (Stand: 31.12.2024), die Bevölkerungsdichte beträgt damit 472 Einwohner je km² (Stand: 31.12.2023).

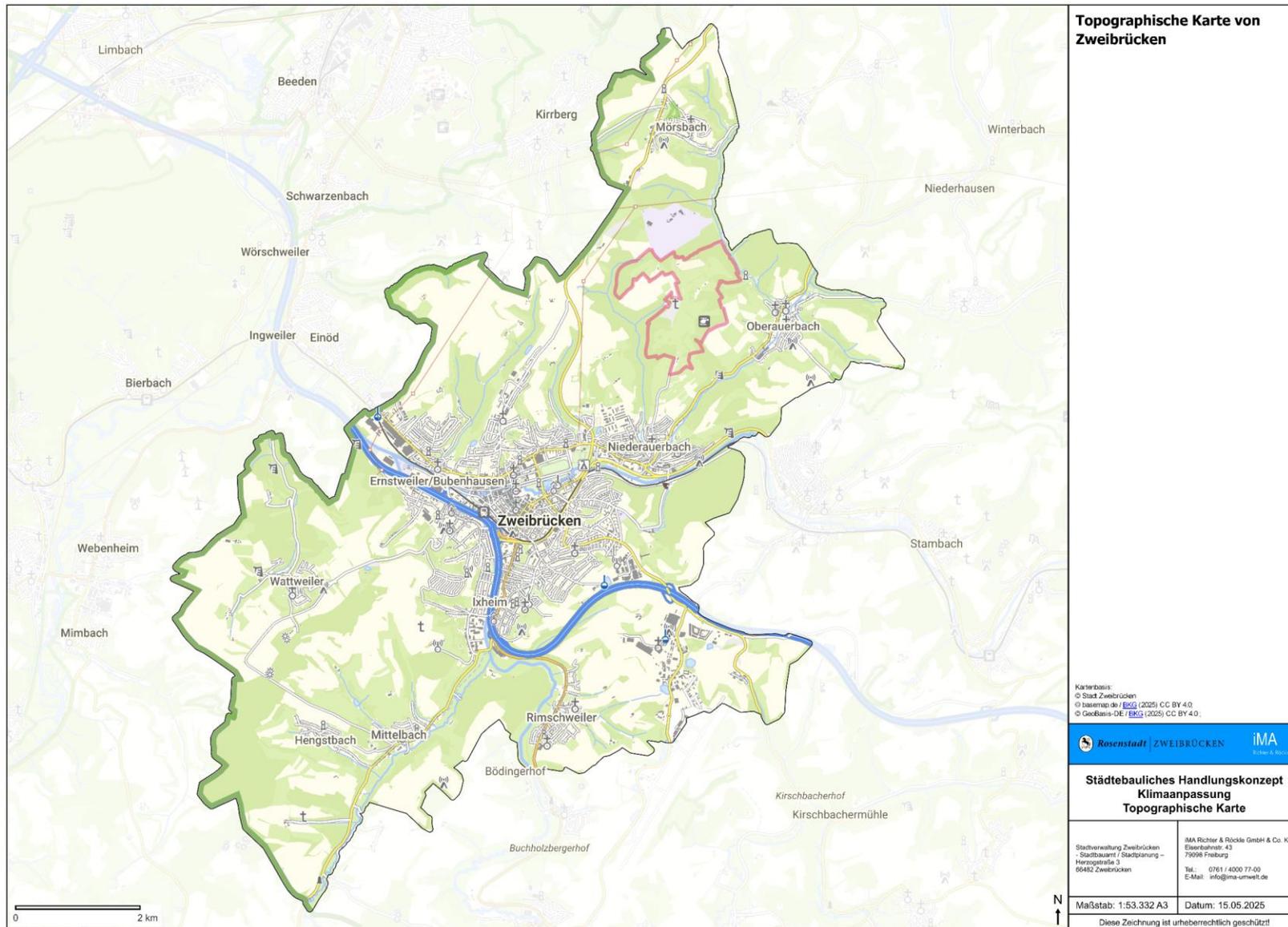


Abbildung 4-1: Übersicht über die Orts- und Stadtteile von Zweibrücken.

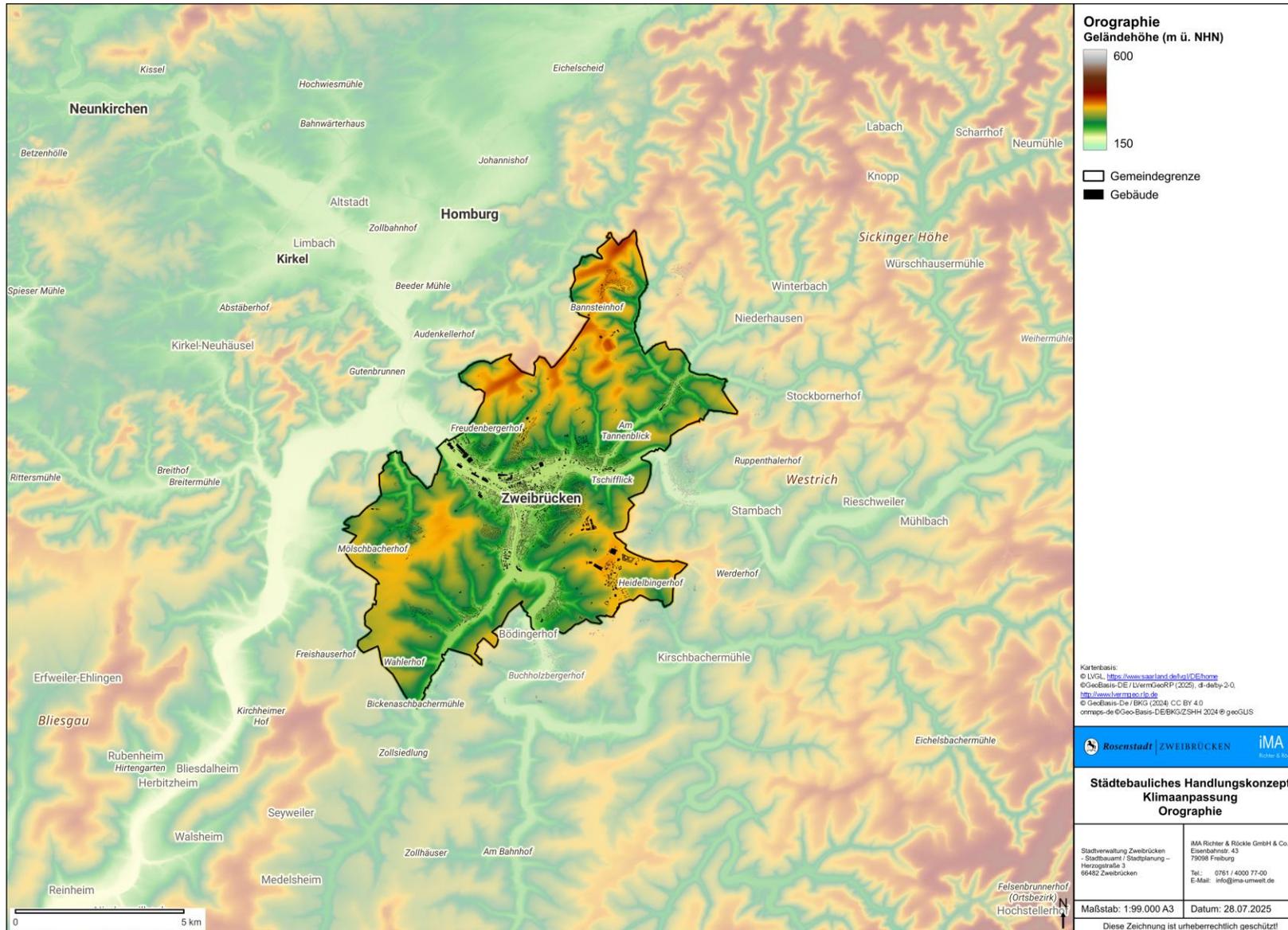


Abbildung 4-2: Topographie der Stadt Zweibrücken zwischen Bliesgau und Pfälzerwald (Westrich im Osten, Sickinger Höhe im Nordosten).

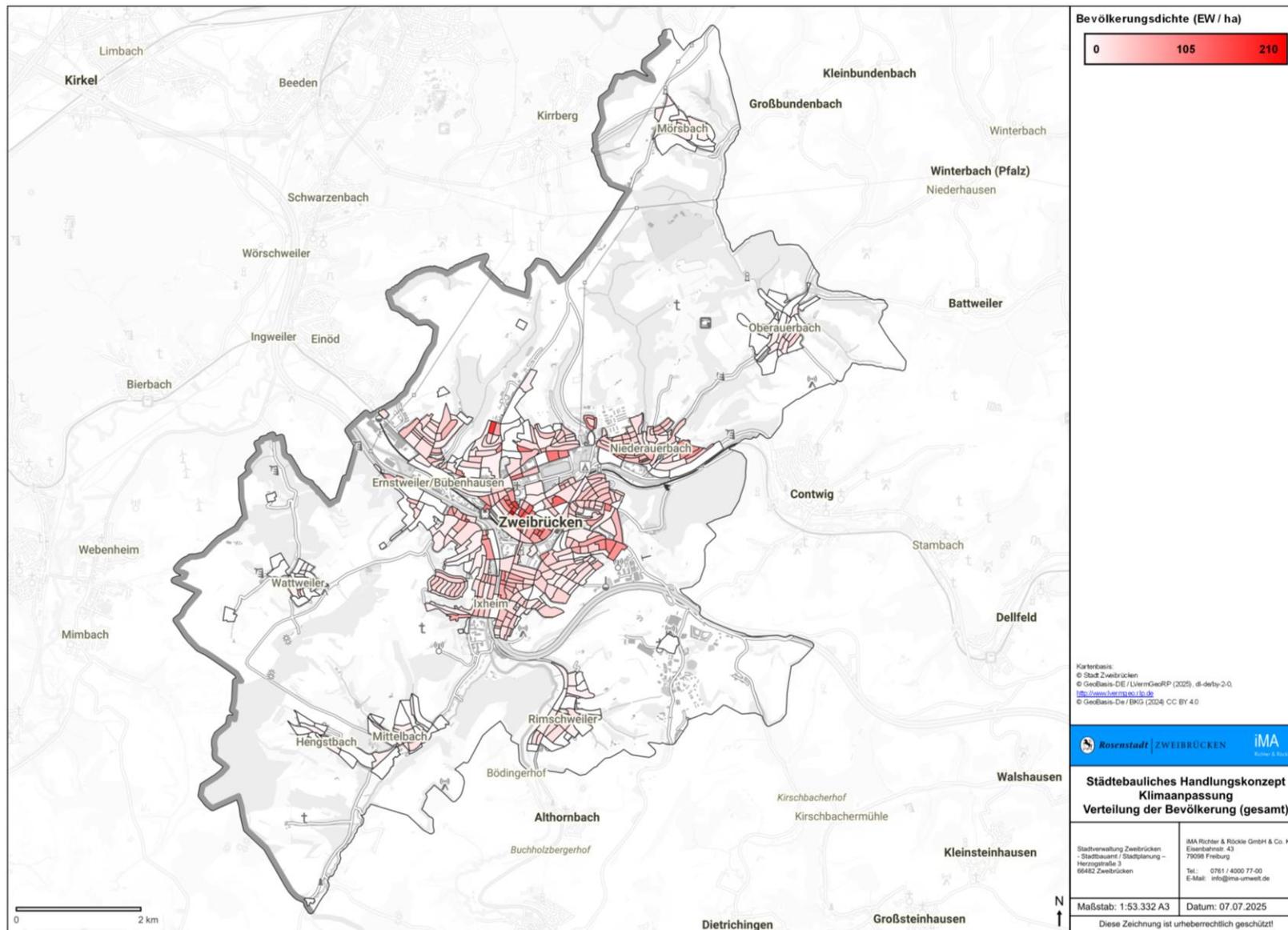


Abbildung 4-3: Gesamte Bevölkerungsverteilung in Zweibrücken. Dargestellt ist die Bevölkerungsdichte (Einwohner pro Hektar) pro Unterbezirk.

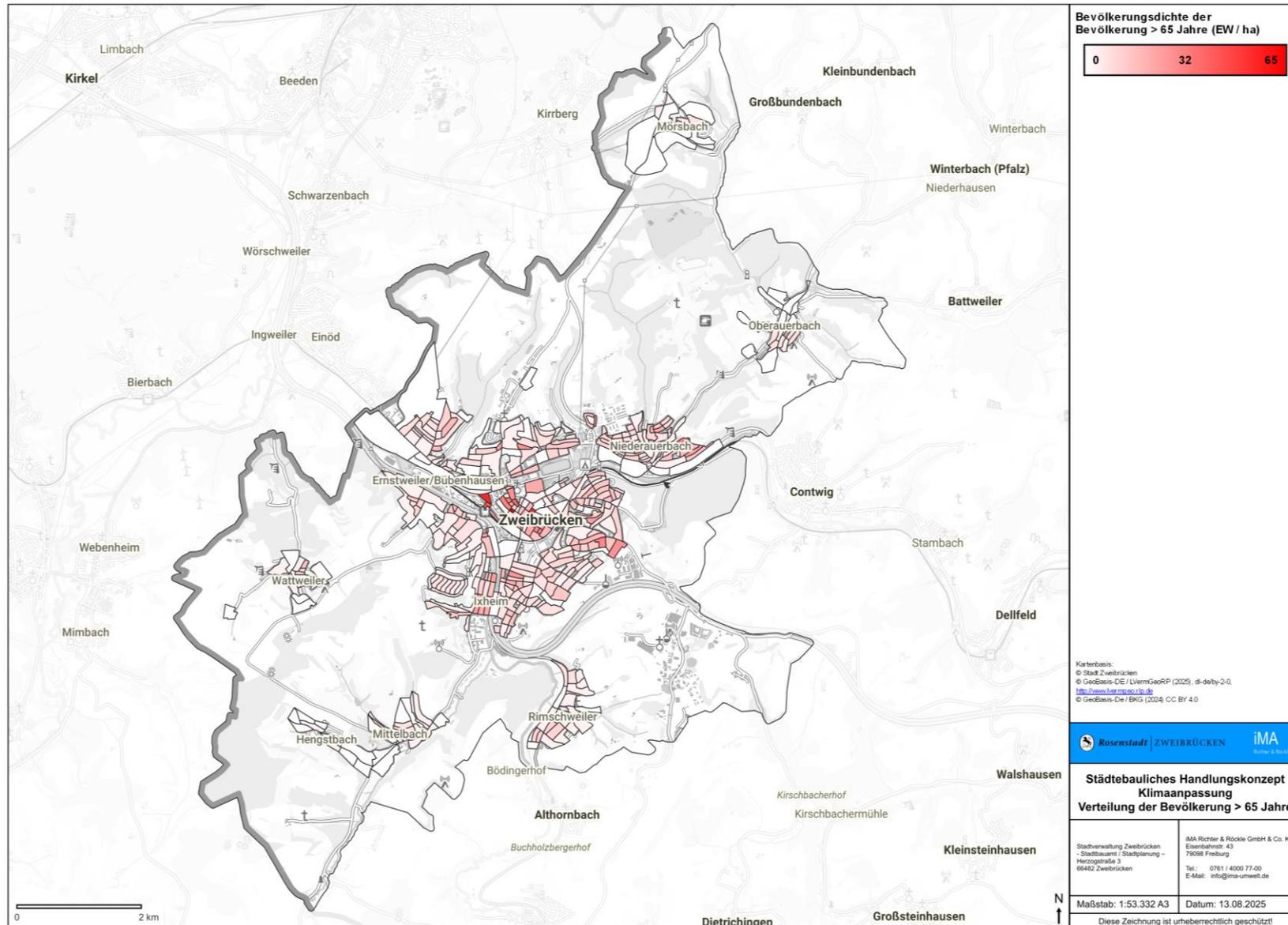


Abbildung 4-4: Bevölkerungsdichte (Einwohner pro Hektar) pro Unterbezirk in Zweibrücken der Bevölkerung zwischen 65 und 80 Jahren.

4.2 Klimatische Einordnung der Stadt Zweibrücken

Zweibrücken lässt sich dem Klima der gemäßigten Breiten unter maritimem Einfluss zuordnen, das sich durch ganzjährige Niederschläge und milde Temperaturen auszeichnet (Cfb nach Köppen und Geiger (Köppen (1936))). Die Lage zu den Vogesen und dem Pfälzerwald bedingen im Vergleich zu den mittleren Bedingungen in Rheinland-Pfalz eher hohe Niederschlagsmengen und eine ausgeglichene Temperaturlage.

Das Klima eines Ortes wird durch die Angabe statistischer Kennzahlen der Klimaelemente beschrieben, welche in der Regel über einen 30-jährigen Zeitraum (sog. „Klimanormalperiode“) erfasst werden. Für eine klimatisch feinere Einordnung werden thermische Indikatoren gewählt, wie sie in Tabelle 4-1 für die Klimanormalperiode 1961 – 1990 und 1991 – 2020 aufgeführt sind. Generell spielen die Höhenlage, die geografische Lage und lokale Nutzungsstruktur eine entscheidende Rolle für die thermischen Indikatoren.

Die erhobenen Daten beruhen auf Stationsmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die nächstgelegene DWD Station mit einer vollständigen Klimanormalperiode liegt in Saarbrücken-Ensheim. Hier liegen vollständige Daten von 1950 bis 2023 vor. Da sich diese Station in unmittelbarer Nähe zu Zweibrücken befinden, gibt die Auswertung der Messstation in Saarbrücken-Ensheim eine gute Abschätzung des Trends für Zweibrücken wieder.

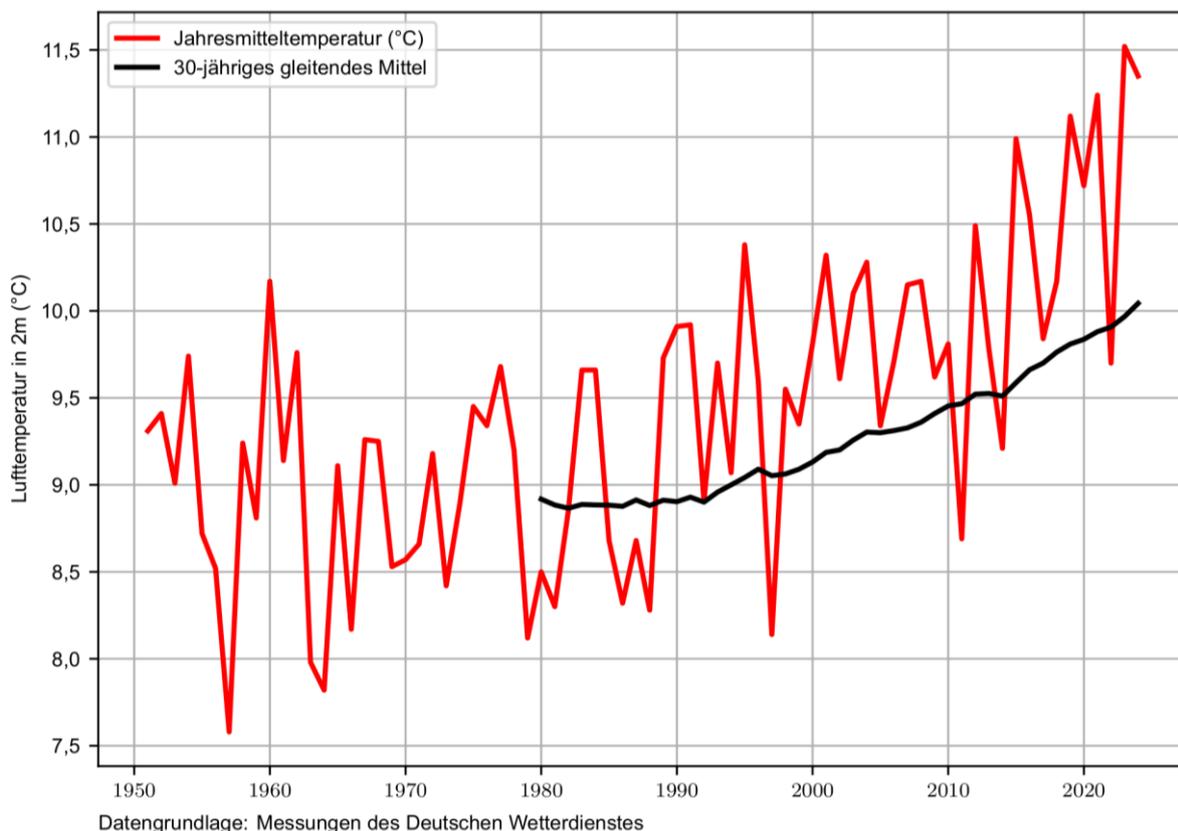


Abbildung 4-5: Lufttemperaturmessung in Saarbrücken-Ensheim von 1950 bis 2023.

In Tabelle 4-1 sind Klimaindikatoren für Saarbrücken-Ensheim (nächstgelegene DWD-Station mit langjähriger Messreihe) und für weitere ausgewählte Orte in Deutschland aufgeführt. An der Messstation Saarbrücken-Ensheim wurden im Mittel 20 Eistage* und 81 Frosttage* im Bezugszeitraum

1961 – 1990 beobachtet. Auf dem Feldberg im Schwarzwald, auf 1.490 m ü. NHN, liegt die Anzahl an Eistagen bei 85 und an Frosttagen bei 163.

Mit 25 Sommertagen und 3 Heißen Tagen in der Klimanormalperiode 1961 – 1990 weist die Messstation in Saarbrücken-Ensheim eine ähnlich hohe Wärmebelastung wie Hamburg-Fuhlsbüttel auf. Geringere Wärmebelastungen finden sich im z.B. in der Höhe des Schwarzwaldes (z. B. Feldberg ohne Sommertage oder Heiße Tage).

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei etwa 863 mm/a in Saarbrücken-Ensheim im Zeitraum 1961 bis 1990 und liegt somit etwas über dem deutschlandweiten Mittelwert von 789 mm. Der mittlere Jahresniederschlag blieb zwischen 1961 – 1990 und 1991 – 2020 nahezu konstant (Tabelle 4-1).

Die Sonnenscheindauer liegt bei etwa 1.661 Stunden in Saarbrücken-Ensheim zwischen 1961 – 1990 und stieg auf 1.749 Stunden im Zeitraum 1991 – 2020 an.

*Tabelle 4-1: Jahresmittelwerte verschiedener Indikatoren für die Umgebung von Zweibrücken und für ausgewählte Orte in Deutschland in den Zeiträumen 1961 – 1990 und 1991 – 2020. Datengrundlage: Messdaten des DWD aus dem Climate Data Center (CDC).
Eistag: $T_{max} < 0\text{ °C}$, Frosttag: $T_{min} < 0\text{ °C}$, Sommertag: $T_{max} \geq 25\text{ °C}$, Heißer Tag: $T_{max} \geq 30\text{ °C}$*

Ort/Messstation	Stationshöhe (m)	Eistage (d)	Frosttage (d)	Sommertage (d)	Heiße Tage (d)	Niederschlag (mm)	Lufttemperatur (°C)	Sonnenscheindauer (h)
1961 – 1990								
Saarbrücken-Ensheim (ID: 4336)	319	20	81	25	3	863	8,7	1.661
Echterdingen	378	21	94	33	5	719	8,7	1.741
Freiburg	236	16	61	49	10	908	10,0	–
Feldberg	1.490	85	163	0	0	1.909	3,3	1.641
Frankfurt/Main	100	17	82	42	9	658	9,7	1.586
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	21	77	20	3	770	8,6	1.557
1991 – 2020								
Saarbrücken-Ensheim (ID: 4336)	319	14	70	42	8	861	9,8	1.749
Echterdingen	378	15	82	48	10	681	9,8	1.858
Freiburg	236	12	51	66	19	909	11,1	1.748
Feldberg	1.490	70	145	1	0	1.589	4,3	1.655
Frankfurt/Main	100	10	64	60	16	599	11,0	1.725
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	13	65	30	6	771	9,6	1.617

Zwischen 1961 – 1990 und 1991 – 2020 stieg die Jahresmitteltemperatur in der Region um etwa 1,1 K an. Auch die Häufigkeit der Wärmebelastung erhöhte sich im selben Zeitraum. So stieg die in Saarbrücken gemessene Anzahl an Sommertagen um etwa 17 Tage.

Die Dauer und Intensität sommerlicher Wärmebelastung spiegelt sich nicht automatisch in hohen Jahresmittelwerten. Diese sind nicht nur auf heiße Sommer zurückzuführen, sondern können sich

auch durch warme Wintermonate ergeben. So sticht z. B. das Jahr 2003 trotz des sehr heißen Sommers bei den Jahresmittelwerten nicht hervor, da es gleichzeitig im Winter relativ kalt war.

Die Messstation des DWD in Zweibrücken wurde lediglich vom 01.01.1979 bis zum 01.04.1981 betrieben. Um vollständige Datenreihen für die ausgewerteten Bezugsperioden zu erhalten wurden daher homogenisierte Zeitreihen des DWD am ehemaligen Stationsstandort verwendet.

5 Auswirkungen des Klimawandels

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen, da die Witterungsabläufe während einzelner Jahre sehr unterschiedlich sein können. Deshalb werden immer sogenannte Klimanormalperioden, d.h. 30-jährige Zeiträume ausgewertet. Zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse zu Klimaveränderungen bei. So ist seit etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der anthropogen bedingten Freisetzung von Treibhausgasen ist (Deutsches Klima-Konsortium et al. (2023); Revi et al. (2014)).

Für die Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Klimas wurden die Klimaprojektionen auf Basis der ReKliEs-De -Daten ausgewertet (siehe Kapitel 3.1.6). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse in Bezug auf die Stadt Zweibrücken dargestellt. Dabei werden zunächst die Klimaelemente Lufttemperatur und Niederschlag und anschließend klimatologische Kennitage betrachtet.

In Tabelle 5-1 ist eine Übersicht der möglichen Änderungen der meteorologischen Größen im 21. Jahrhundert dargestellt.

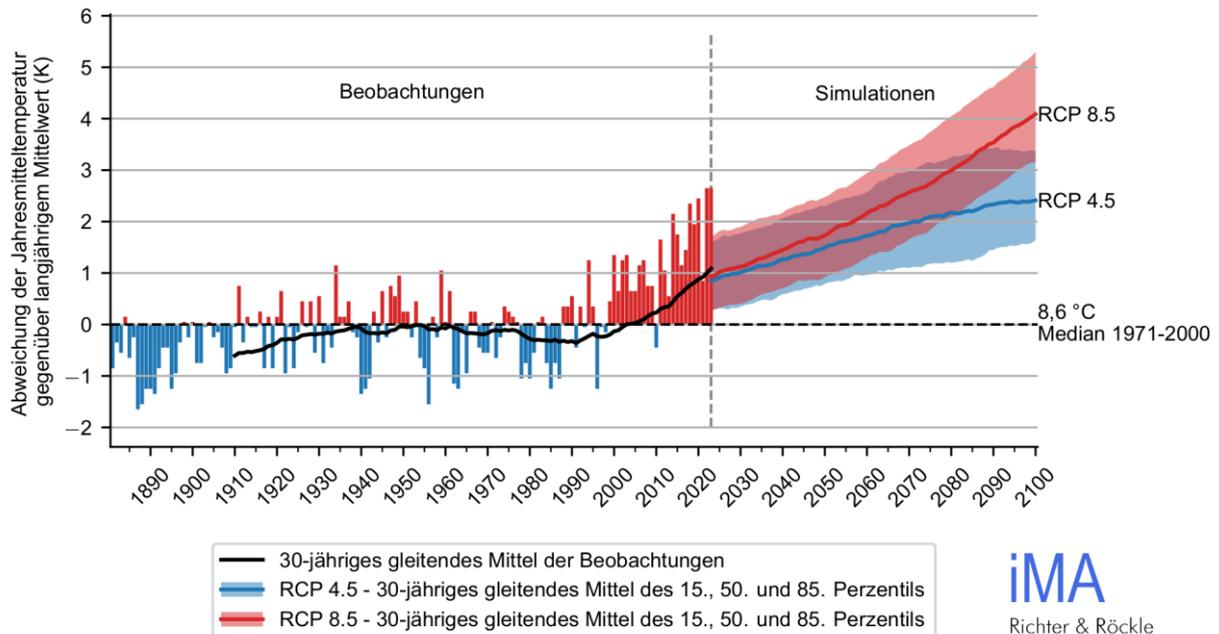
Tabelle 5-1: Übersicht über die Veränderungen meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts.

Meteorologische Größe	Erwartete Änderung im 21. Jahrhundert	
	RCP4.5	RCP8.5
Lufttemperatur Mitte des Jhd. Ende des Jhd.	+1,3 K +2,0 K	+1,8 K +3,9 K
Niederschlag Mitte des Jhd. Ende des Jhd.	+0,5 % +0,8 %	+0,4 % +0,3 %
Starkregen-Ereignisse	+1,6 Tage bis Ende des Jhd.	+2,4 Starkregentage bis Ende des Jhd.
Starkwind	Zunahme ⁷	
Vegetationsperiode Mitte des Jhd. Ende des Jhd.	Dauer: +19 Tage Dauer: +33 Tage	Dauer: +31 Tage Dauer: +58 Tage

⁷ Für Starkwind liegen keine belastbaren Prognosen vor. Quelle: Umweltbundesamt. Projekt-Nr. 24309; 2015, „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem-klimawandel>

5.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur (T_a in °C) ist die Temperatur der bodennahen Atmosphäre. Deren Messung soll nicht von der Sonnenstrahlung oder anderen Wärmeströmen beeinflusst werden. Klassischerweise wird die Lufttemperatur in einer Höhe von 2 m über Grund gemessen. Sie ist ein wesentlicher Parameter bei der Bestimmung der Wärmebelastung für den Menschen.

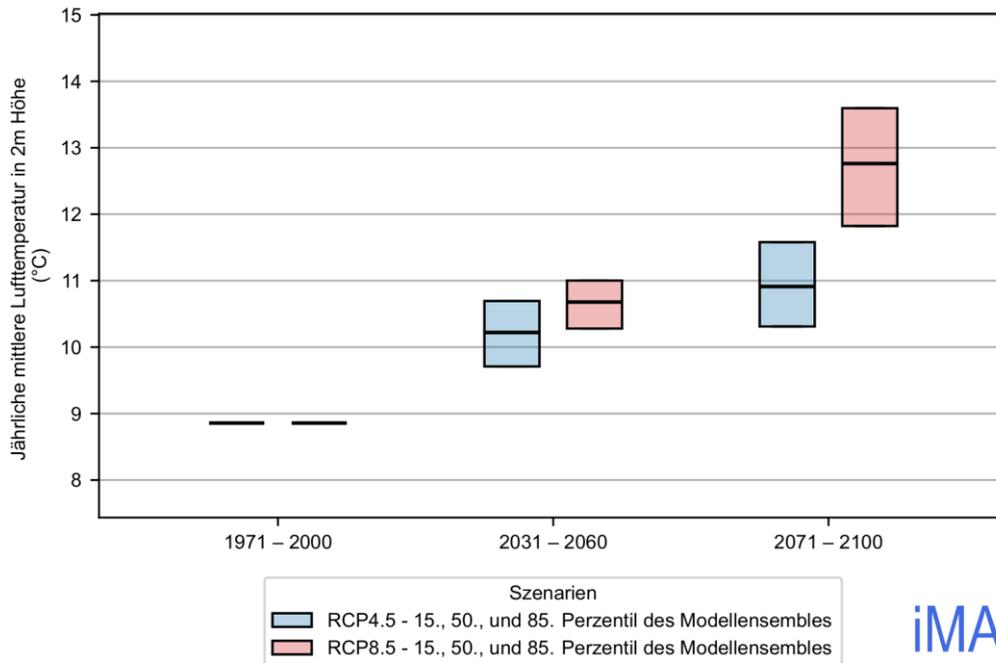


Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-1: Beobachtete und simulierte Änderung der Lufttemperatur für den Zeitraum 1881 – 2100 in Zweibrücken. Die Simulationsdaten entsprechen den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 und werden ab dem Jahr 2024 dargestellt.

Der Anstieg der Lufttemperatur seit Beginn des Industriezeitalters zeigt sich in der jährlichen Betrachtung der Lufttemperatur von 1881 – 2100 (Abbildung 5-1). Die Lufttemperatur nimmt insbesondere seit Beginn der 1990er Jahren rasch zu. Die Zeitreihe des Mittelwerts der Lufttemperatur in Abbildung 5-1 verdeutlicht nochmals die prognostizierte Zunahme der Lufttemperatur bis 2100. Im Jahr 2024 lag das beobachtete 30-jährige gleitende Mittel (das Mittel über die vergangenen 30 Jahre) über dem 30-jährigen gleitenden Mittel der RCP8.5 Simulationen. Es ist daher mit einer erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeit von RCP8.5 verglichen mit RCP4.5 zu rechnen. Der farblich hervorgehobene Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil*, zeigt, dass die Prognose zwischen den verschiedenen Regionalen Klimamodellen um etwa 1,5 K schwankt. Dabei ist die Eintrittswahrscheinlichkeit des Medians genauso hoch, wie die des 15. und 85. Perzentils.

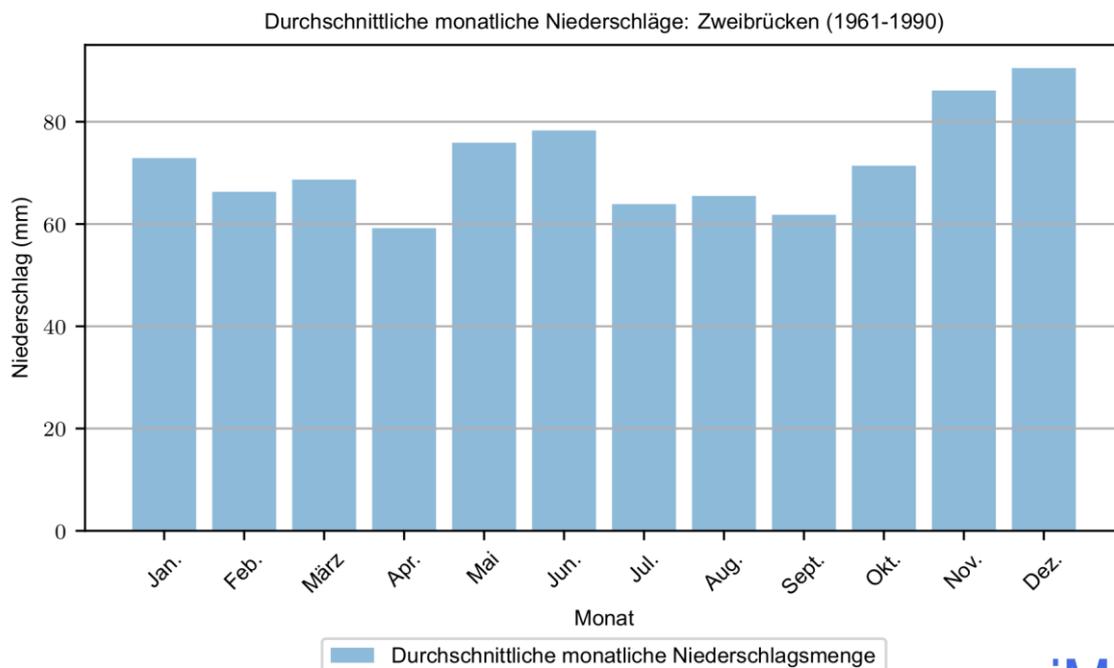
In Abbildung 5-2 ist die berechnete Entwicklung der absoluten Lufttemperatur für die Klimanormalperioden 2031 – 2060 und 2071 – 2100 dargestellt. In dem Szenario RCP8.5 tritt eine deutliche Temperaturerhöhung auf. Diese äußert sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts in einer Zunahme um 1,8 K. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird eine deutliche Zunahme von 3,9 K prognostiziert. Der Median im Szenario RCP4.5 zeigt eine Temperaturerhöhung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts um +1,3 K und bis zum Ende um +2,0 K. Die Spannweite der Lufttemperatur ergibt sich aus dem zugrundeliegenden Modelensemble von ReKliEs-De.



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

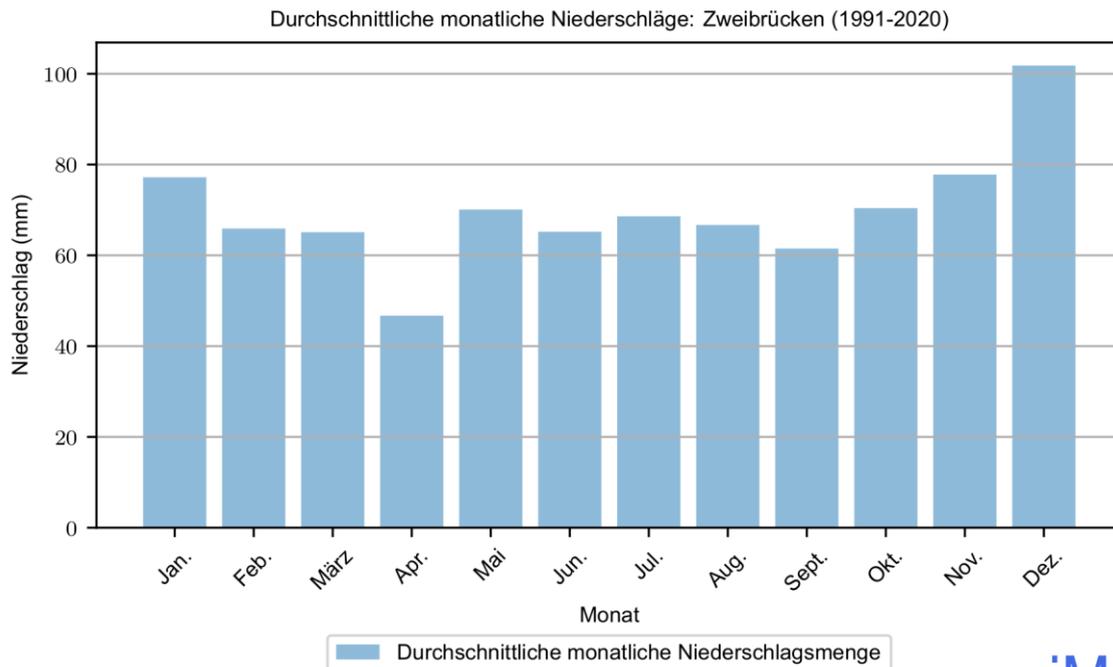
Abbildung 5-2: Absolute Entwicklung der 30-jährigen Jahresmitteltemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000 unter Berücksichtigung von RCP4.5 und RCP8.5. Die Spannweite der Lufttemperatur ergibt sich aus dem 15. und 85. Perzentil des zugrundeliegenden Modelensemble von ReKlieS-De.

5.2 Niederschlag



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 5-3: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1961 bis 1990 gemessen in Zweibrücken (Daten: DWD)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 5-4: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1991 bis 2020 gemessen in Zweibrücken (Daten: DWD).

Niederschlag ist das in flüssiger oder fester Form aus Wolken auf die Erde fallende Wasser. Die gefallene Menge an Niederschlag kann über die einzelnen Monate zusammengefasst werden, so dass sich eine durchschnittliche monatliche Niederschlagsverteilung ergibt.

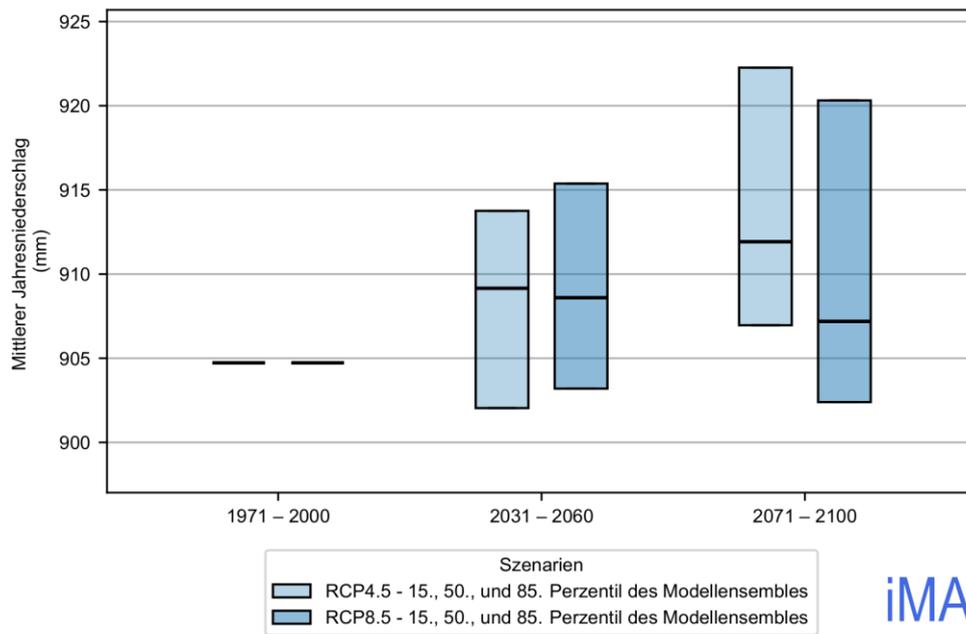
Innerhalb der Monate April, Juli, August und September sind in der Klimanormalperiode 1961 – 1990 die geringsten Niederschlagsmengen verzeichnet. Die höchsten Niederschlagsmengen wurden im Zeitraum von 1961 bis 1990 in den Monaten Mai, Juni, November und Dezember verzeichnet (Abbildung 5-3).

Im 30-jährigen Zeitraum von 1991 bis 2000 zeigte sich eine ähnliche Verteilung der Niederschlagsmenge wie im Zeitraum von 1961 bis 1990 (Abbildung 5-4). Lediglich der Monat April wies eine deutliche Verringerung der Niederschlagsmenge auf, während im Dezember deutlich mehr Niederschlag gefallen ist. Generell hat sich die monatliche Niederschlagsverteilung dieser beiden Zeiträume nur geringfügig geändert.

Für das 21. Jahrhundert wird im Mittel eine geringe Zunahme von etwa 1 % zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts berechnet, allerdings lässt sich durch die hohe Variabilität der Niederschlagsverteilung keine gesicherte Aussage über die Entwicklung treffen (Abbildung 5-5).

Für die Vorsorge einer Stadt wie Zweibrücken gegenüber Trockenheit und Starkregen ist die Veränderung des Jahresniederschlags nicht so bedeutsam. Wichtiger ist die Beurteilung der Intensität und die Häufigkeit der Starkregenereignisse bzw. der Anzahl der Tage mit starkem und extremem Starkregen (Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm bzw. ≥ 30 mm). Es ist zu erwarten, dass die Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm um ein Tag bis Mitte und um zwei Tage bis Ende des Jhds. zunehmen werden. Jedoch ist gerade die Vorhersage von extremem Starkregen besonders schwierig, da diese Ereignisse sehr selten eintreten. Auch die Intensität der Starkniederschlagsereignisse wird

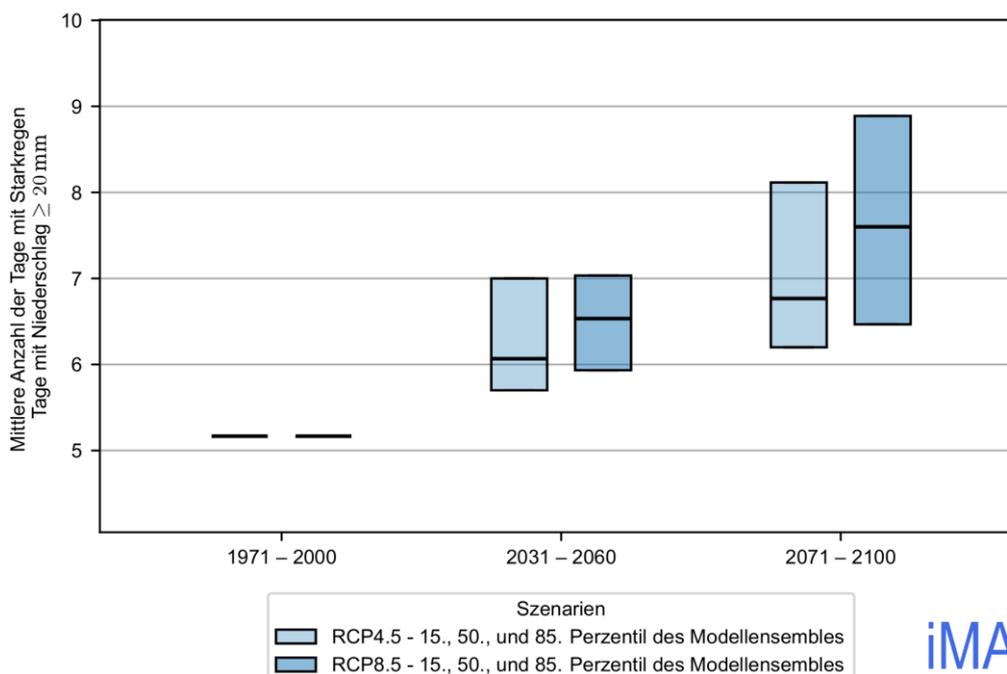
zunehmen, da mit einem Anstieg der Lufttemperatur pro Kelvin die Atmosphäre 7 % mehr Wasserdampf aufnehmen kann (Clausius-Clapeyron-Effekt).



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-5: Prognostizierte Veränderung des mittleren Jahresniederschlags im 30-jährigen Mittel bis Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentils des Model Ensembles dar.

Bis Ende des Jahrhunderts wird es unter Berücksichtigung des RCP8.5 im Mittel etwa 6 bis 9 Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm geben (Abbildung 5-6). Die Änderungen im Niederschlag fallen im RCP4.5 ähnlich aus, wobei Starkniederschläge gegen Ende des 21. Jahrhunderts geringfügig seltener auftreten als im RCP8.5.



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-6: Prognostizierte Entwicklung der Anzahl an Starkregentagen im 30-jährigen Mittel bis Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000 basierend auf RCP4.5 und RCP8.5. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. Und 85. Perzentils des Modellensembles dar.

5.3 Klimatologische Kenntage

In Tabelle 5-2 sind die klimatologischen Kenntage aufgeführt, die sowohl für den Zeitraum 1971 – 2010 (siehe Kapitel 4.2), als auch mit den Multi-Modell-Multi-Szenario-Klimadaten für die 30-jährigen Zeiträume (Klimanormalperioden) 2031 – 2060 und 2071 – 2100 ermittelt wurden.

Tabelle 5-2: Klimatologische Kenntage für verschiedene Klimanormalperioden ermittelt aus ReKliEs-De (DWD) Klimamodelldaten auf dem Gebiet von Zweibrücken (9 Gitterzellen). Kenntage für zukünftige Perioden basieren auf RCP4.5 und RCP8.5.

Klimatologischer Kenntag	1971 – 2000	2031 – 2060		2071 – 2100	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Frosttage	88	70	63	57	38
Eistage	15	7	6	5	2
Sommertage	34	48	52	55	80
Heiße Tage	5	11	13	16	32

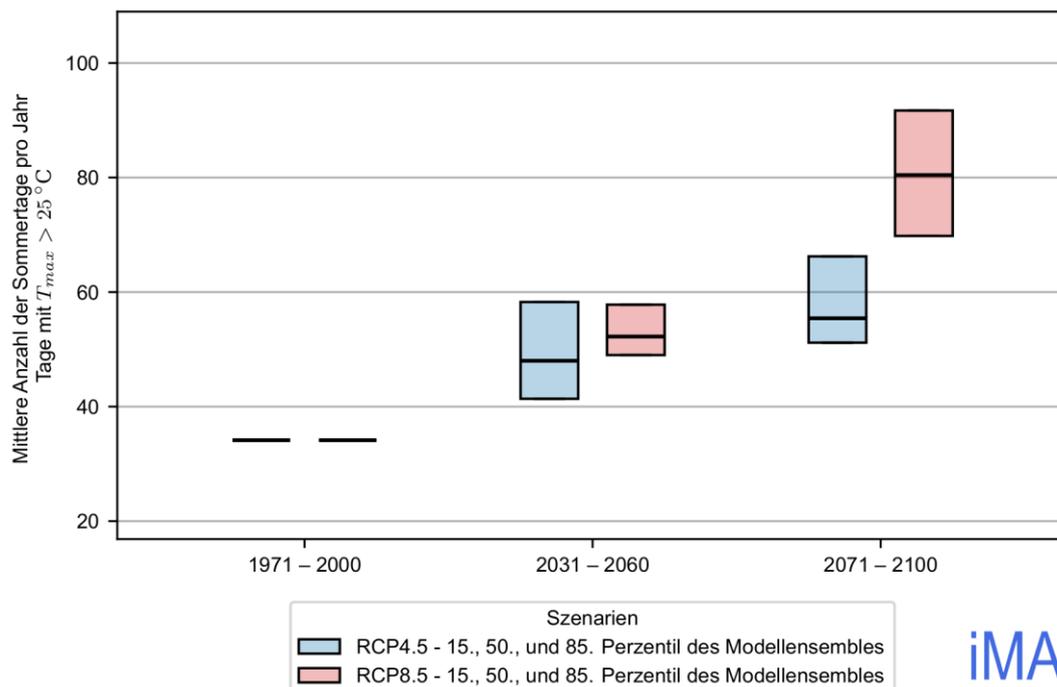
Die hier untersuchten klimatologischen Kenntage beziehen sich direkt auf Zweibrücken.

5.3.1 Heiße Tage, Sommertage und tropische Nächte

Die Anzahl an heißen Tagen entspricht in erster Linie einem Gütekriterium für den Sommer, was durch die Anzahl an Sommertagen ergänzt wird⁸.

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird prognostiziert, dass die Anzahl der heißen Tage um etwa 8 Tage (RCP8.5) ansteigt (Abbildung 5-8). Bis 2100 wird ein Anstieg um 27 Tage auf dann 32 Tage jährlich (RCP8.5) erwartet.

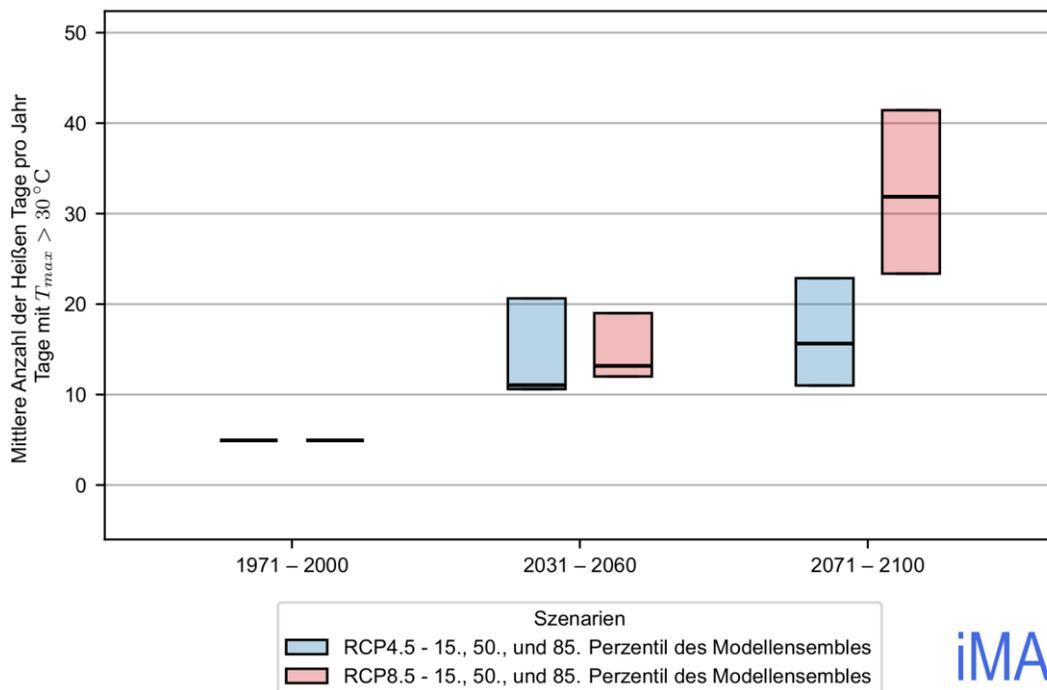
Bis Mitte des 21. Jahrhunderts könnte die Anzahl der Sommertage um etwa 18 Tage (RCP8.5) ansteigen (Abbildung 5-7). Bis 2100 könnten es letztlich etwa 46 Tage (RCP8.5) mehr sein als im Zeitraum 1971 – 2000, sodass hier insgesamt im Mittel 80 Sommertage zu erwarten sind.



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-7: Anzahl der Sommertage (ST) für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf RCP4.5 und RCP8.5.

⁸www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

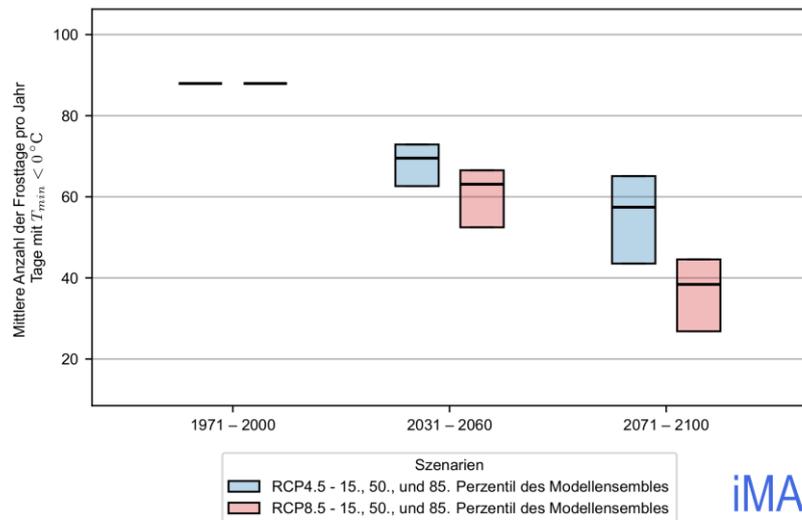
Abbildung 5-8: Anzahl der heißen Tage (HT) für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf RCP4.5 und RCP8.5.

5.3.2 Frost- und Eistage

Die Anzahl an Frosttagen wird tendenziell abnehmen (Abbildung 5-9). Von etwa 88 Frosttagen im Jahr des Referenzzeitraums 1971 – 2000, wird sich deren Anzahl bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts um etwa 25 Tage (RCP8.5) verringern. Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die Anzahl um bis zu 50 Tage (RCP8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 auf dann lediglich 38 Frosttage jährlich.

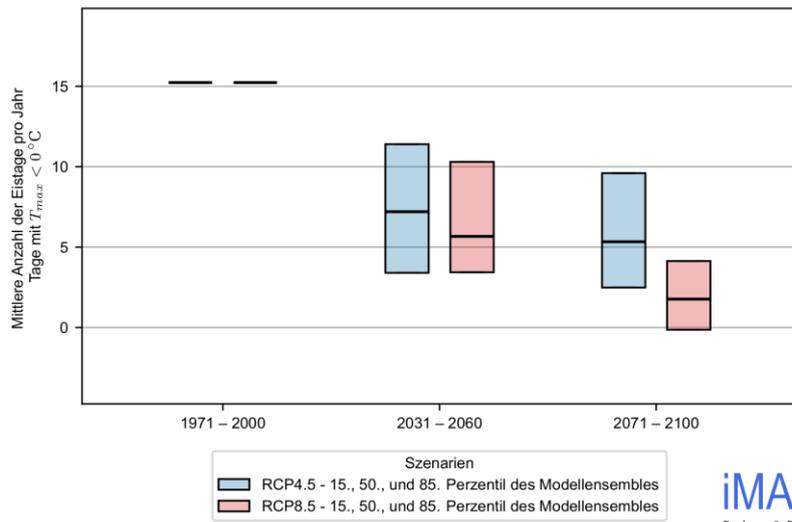
Die Anzahl der Eistage wird im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 mit damals etwa 15 Eistagen ebenfalls abnehmen (Abbildung 5-10). Bis Mitte des 21. Jhds. wird eine Abnahme um etwa 10 Tagen und bis Ende des Jhds. um bis zu 13 Tagen erwartet. Sodass gegen Ende des 21. Jhds. im Mittel noch 2 Eistage pro Jahr auftreten werden.

In der Landwirtschaft (speziell im Weinbau) sind insbesondere Spätfröste im April und Mai von Bedeutung, da diese zu Erfrierungen im Austriebs- und Blühstadium führen. Obwohl ein Rückgang der Frosthäufigkeit die Frostschäden reduzieren könnte, führen die milden Winter häufig schon zu einem verfrühten Austrieb der Pflanzen, sodass die kritische phänologische Phase* in Monate mit erhöhter Frostrate fällt.



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-9: Anzahl der Frosttage (FT) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf RCP4.5 und RCP8.5.



Datengrundlage: Beobachtungen: Deutscher Wetterdienst, Simulation: ReKlieS-De

Abbildung 5-10: Anzahl der Eistage (ET) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Ende des 21. Jahrhunderts basierend RCP4.5 und RCP8.5.

6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten meteorologischen Größen und Parameter beschrieben.

6.1 Kaltluftströmung

Bei Tiefdruckwetterlagen (bewölkt, windig, regnerisch) herrschen in der Regel gute Austauschbedingungen. Die lokalen Strömungsverhältnisse werden im Wesentlichen durch das Gelände geprägt. In Tallagen treten z.B. Kanalisierungen der Strömung auf. Lufttemperaturunterschiede sind bei diesen Wetterlagen zwischen bebauten und unbebauten Flächen vergleichsweise gering.

Hochdruckwetterlagen können dagegen mit geringen übergeordneten Windgeschwindigkeiten und geringer Bewölkung verbunden sein. Bei diesen sogenannten autochthonen Wetterlagen stellt sich meist ein ausgeprägter Tagesgang der Lufttemperatur ein, d.h. die Luft kann sich nachts stark abkühlen und am Tag stark aufheizen. Aufgrund des geringen großräumigen horizontalen Luftaustausches beeinflussen die lokalen topografischen Verhältnisse (sowohl das Geländere relief als auch die Realnutzung) signifikant die lokale Strömung.

In reliefiertem oder gegliedertem Gelände bilden sich während autochthoner Wetterlagen tagesperiodische Windsysteme aus. In den Tagstunden sind dies tal- und hangaufwärts gerichtete, meist böige Winde, in den Nachtstunden dagegen eher turbulenzarme Kaltluftabflüsse. In Ebenen sind insbesondere nachts nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden. Die nächtliche Inversion unterdrückt zusätzlich den Luftaustausch. Deshalb zählen Kaltluftabflüsse in gegliedertem Gelände zu den klimatischen Gunstfaktoren einer Region. Kaltluftabflüsse transportieren in den Abend- und Nachtstunden kühlere und meist frischere Luft in die Siedlungsbereiche, wodurch thermische und lufthygienische Belastungen spürbar reduziert werden.

Zur Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse ist deshalb der Erhalt und die Verbesserung dieser Strömungssysteme relevant.

6.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen

In klaren, windschwachen Nächten ist die Energieabgabe der Boden- und Pflanzenoberflächen aufgrund der Wärmeausstrahlung größer als die atmosphärische Gegenstrahlung*. Dieser Energieverlust verursacht eine Abkühlung der Boden- und Pflanzenoberfläche, sodass die Bodentemperatur niedriger als die Lufttemperatur ist. Der kühlere Boden kühlt daraufhin die bodennahen Luftschichten ab und es entsteht eine bodennahe Kaltluftschicht. Diese ist umso ausgeprägter, je negativer die Strahlungsbilanz*, je geringer die Wärmezufuhr aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche und je schwächer der Luftaustausch mit der darüber liegenden Atmosphäre ist.

In ebenem Gelände bleibt die bodennahe Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände setzt sie sich infolge von horizontalen Dichteunterschieden (kalte Luft besitzt eine höhere Dichte als warme Luft) hangabwärts in Bewegung. Die Geschwindigkeit der Luftmassen ist letztlich von der Hangneigung und dem Dichte- und Temperaturunterschied abhängig. Die Reibungskraft bremst die abfließende Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind in der Regel zeitlich nicht konstant, d.h. es kommt zu „pulsierenden“ Kaltluftabflüssen.

In Geländeeinschnitten fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Bergwind* (Talabwind) entstehen. Die vertikale Mächtigkeit des Bergwinds und die Geschwindigkeit hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebiets, der Kaltluftproduktionsrate*, dem Talgefälle und den Rauigkeiten, d.h. den Strömungshindernissen und der Bodenbeschaffenheit, im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Talwärts führende Einsenkungen des Geländes, wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen, beeinflussen einen Kaltluftabfluss.

In tiefer gelegenen konkaven Geländeformen, wie z.B. in Tälern, Talkesseln, Schluchten und Mulden kann sich die Kaltluft sammeln und es kann sich ein Kaltluftsee ausbilden. In dieser stagnierenden Kaltluft können sich intensive Inversionen ausbilden, die den vertikalen Luftaustausch deutlich reduzieren. Dadurch können sich Luftschadstoffe oder Gerüche in der Kaltluftschicht anreichern.

Die Kaltluftentstehung und der Kaltluftabfluss hängen somit von folgenden Faktoren ab:

- meteorologische Verhältnisse
- Flächennutzung
- Geländeform und -exposition.

6.1.2 Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen

Hangabwinde setzen ein, wenn sich der Erdboden eines Hanges deutlich abkühlt. Dies ist, abhängig von der Exposition des Hanges, in den Nachmittags- und Abendstunden der Fall. An nicht besonnten Hängen setzen die Hangabwinde bereits vor Sonnenuntergang ein. Sie dauern die Nacht über an, sofern sie nicht von einem stärkeren Bergwind überlagert werden. Wenn der Hang am Morgen wieder besonnt wird, endet der Hangabwind durch thermische Überlagerung.

Bergwinde setzen gegenüber den Hangabwinden später ein. Sie beginnen meist erst nach Sonnenuntergang. In den Morgenstunden dauern sie länger an.

6.1.3 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen

Kaltluftabflüsse treten bei autochthonen Wetterlagen auf, da in diesen Fällen gute Ausstrahlungsbedingungen vorliegen und die bodennah gebildete Kaltluftschicht nicht durch Turbulenz zerstört wird. Dies entspricht der Ausbreitungsklasse* I, die in Zweibrücken laut IfU in etwa 12 % der Jahresstunden vorkommt. Auch bei Ausbreitungsklasse II, die in etwa 18 % der Jahresstunden auftritt, können noch Kaltluftabflüsse auftreten, die aber stärker von den übergeordneten Windrichtungen beeinflusst werden.

Das Maximum von Kaltluftabflüssen wird im Spätsommer/Frühherbst beobachtet, da dann die größten Tagesgänge der Lufttemperatur erfolgen. In den Wintermonaten ist die Wahrscheinlichkeit, auch aufgrund der stabilen Nebellagen, am geringsten.

Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftabflüsse ist abhängig vom Weg, den die Kaltluft nimmt. Liegen entlang der Zugbahn der Kaltluft mehrere Kaltluftproduktionsflächen, können sich schnell große Kaltluflhöhen ergeben.

Trifft die Kaltluft auf die Bebauung, dringt diese bodennah in die Bebauungsschicht ein (vgl. Abbildung 6-1, links). Der größere Teil der Kaltluft überströmt jedoch die Bebauung und wird durch die gebäudeinduzierte Turbulenz in die Bebauung herabgemischt (vgl. Abbildung 6-1, rechts). Für die

innerstädtische Belüftung ist deshalb die Überdachströmung die relevante Größe. Die Strömung in Überdachniveau kann nur auf Grundlage der Ergebnisse des 3-dimensionalen, prognostischen Modells FITNAH ausgewiesen werden.

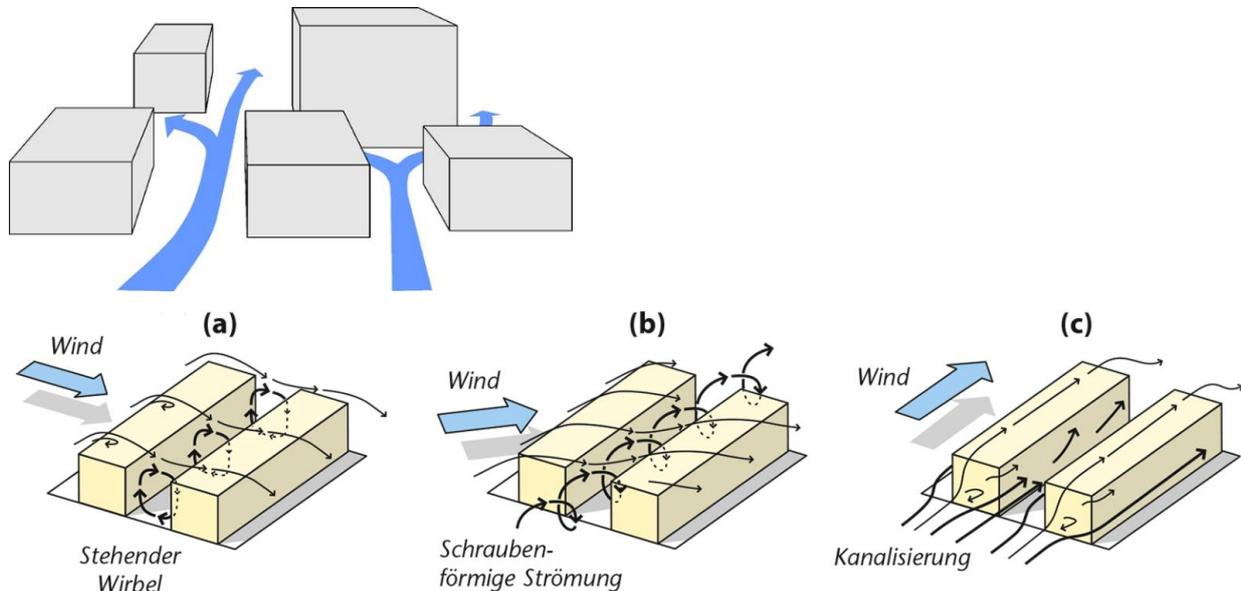


Abbildung 6-1: Bodennahe Belüftung in den peripheren Bereichen (oben, eigene Abbildung) und Herabmischung der mittleren Strömung in einer Straßenschlucht ((a) bis (c), Christen (2019) modifiziert nach Oke et al. 2017).

6.1.4 Ergebnisse der Modellierung

Durch das stark gegliederte Gelände mit Tälern und Erhebungen bildet sich in den Abendstunden ein komplexes Strömungssystem mit markanten Kaltluftabflüssen aus (Abbildung 6-2).

Die Kaltluft aus dem Tal des Hornbach überströmt dabei die südlichen Gebiete von Ixheim und fließt weiter in Richtung Stadtzentrum. Durch die vorhandene Bebauung im Tal wird die Strömung im Bodenniveau abgeschwächt und ist hauptsächlich im Dach- und Überdachniveau aktiv.

In Zweibrücken fließen die Kaltluftflüsse aus mehreren Tälern (Bautzenbach, Hornbach, Bombach, Heilbach, Bundenbach, Seilbach) geländefolgend zusammen. Genauso fließt auch die Kaltluft aus diesen Tälern zusammen und sammelt sich entsprechend in Zweibrücken. Für das Stadtzentrum von Zweibrücken sind dabei die Kaltluftabflüsse aus dem Tal der Bickenalbe, sowie des Hornbach, die in Ixheim zusammenfließen, am bedeutsamsten. Diese Kaltluftabflüsse belüften das südliche Gebiet des Zweibrückener Stadtzentrums. Der östliche Teil Zweibrückens wird ebenfalls sehr gut durch die Kaltluftabflüsse des Schwarzbach-Tals entlang der L471 belüftet. Einzig der westliche Teil Zweibrückens (zur Saarländischen Grenze hin) wird weniger stark belüftet.

In der 2. Nachthälfte (04:00 Uhr) verstärken sich die bodennahen Kaltluftabflüsse insbesondere in den Tälern. Auch die Hangabwinde bleiben ausgeprägt. Die Verteilung der bodennahen Kaltluftabflüsse bleibt im Vergleich zur 1. Nachthälfte in ihrer Form erhalten. Im Überdachniveau ist der Kaltluftstrom aus Süden des Hornbachtals am ausgeprägtesten (Abbildung 6-3).

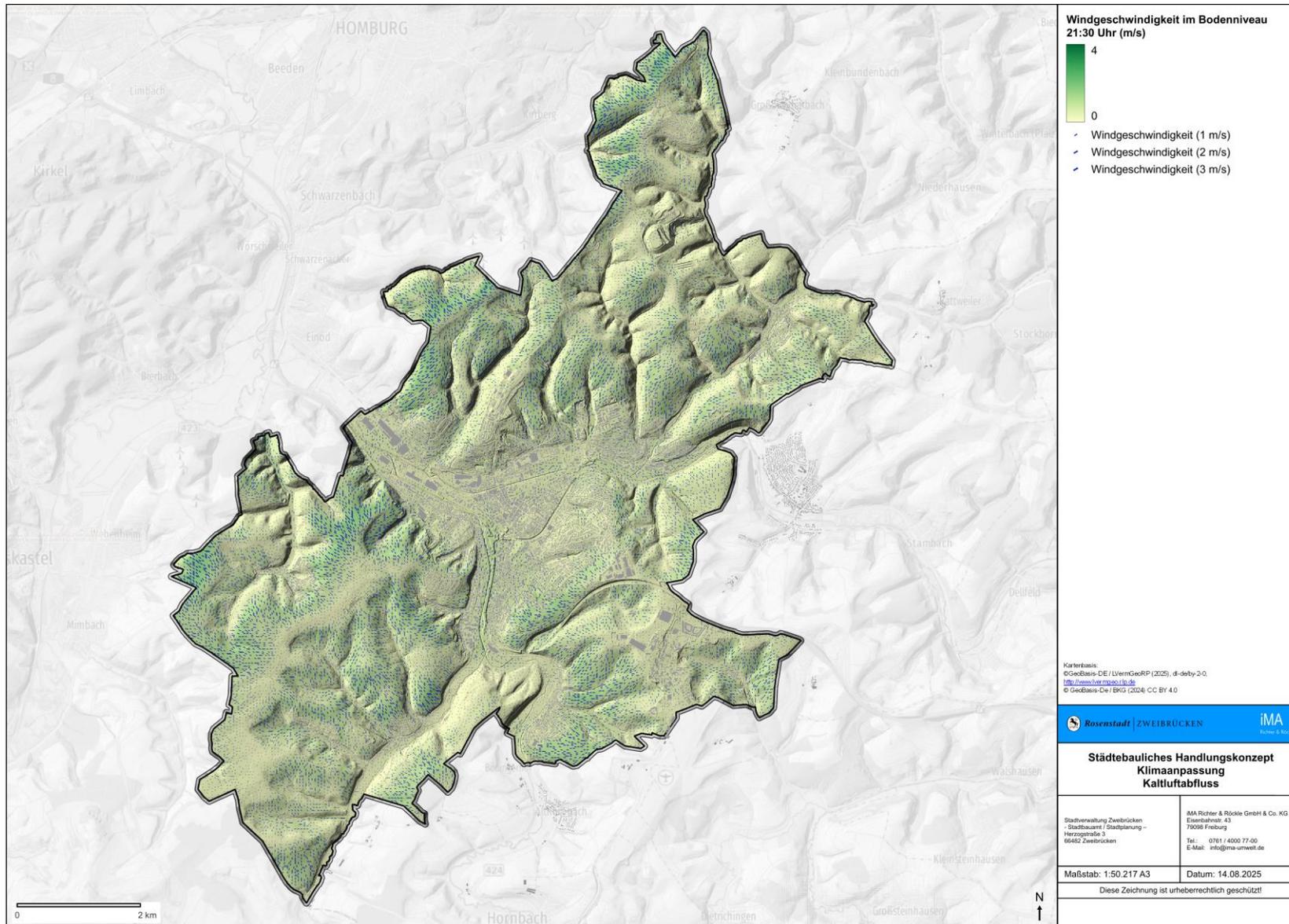


Abbildung 6-2: Bodennahe abendliche Hangabwinde in Zweibrücken um 21:30 Uhr.

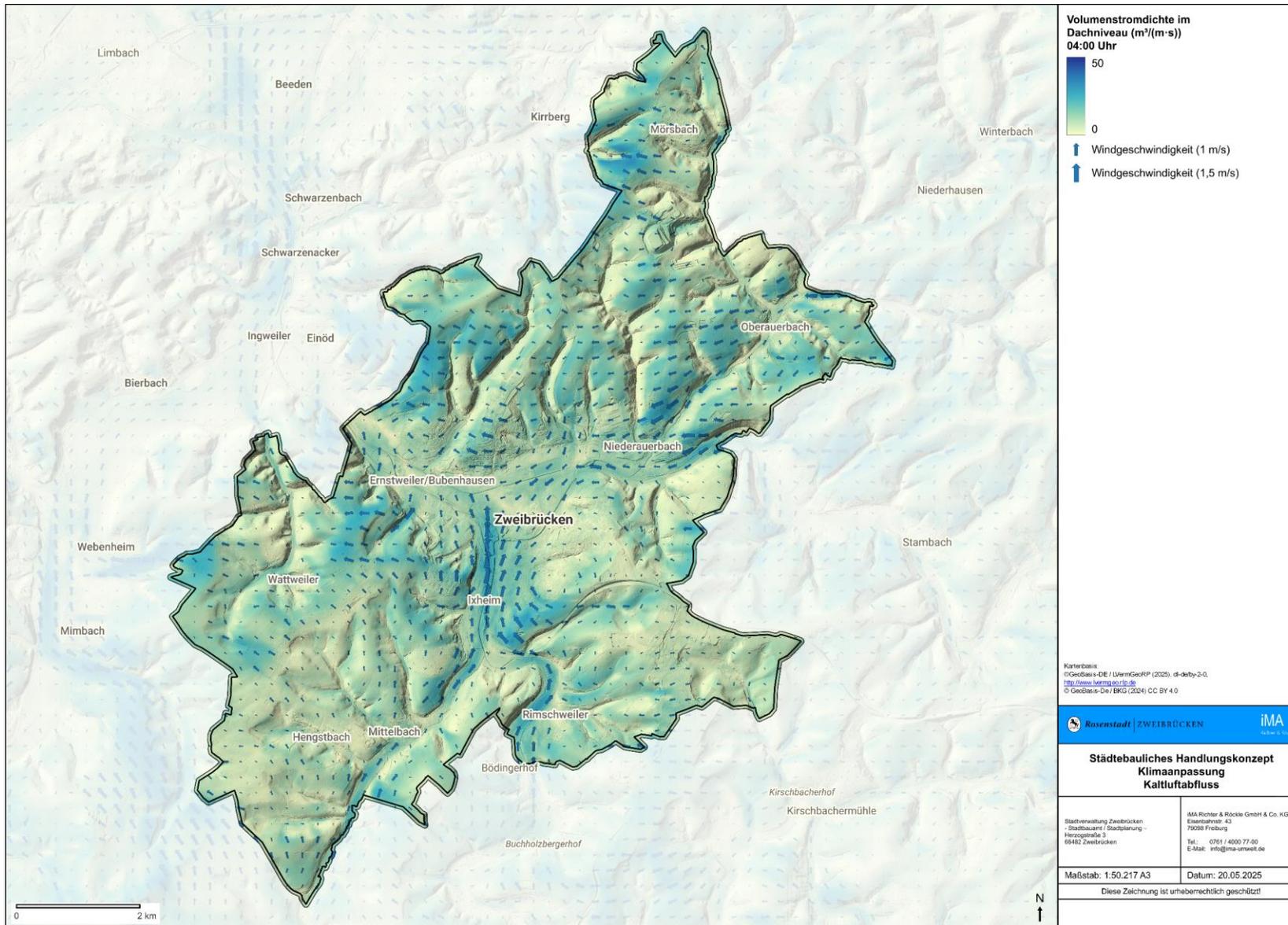


Abbildung 6-3: Übersicht über die Kaltluftströmung in Überdachniveau in der zweiten Nachthälfte in Zweibrücken.

6.2 Thermische und human-biometeorologische Verhältnisse

Für die Bewertung der human-biometeorologischen Verhältnisse tagsüber ist die Betrachtung der Lufttemperatur nur bedingt geeignet, da neben der Temperatur auch die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und die Strahlungsflüsse einen erheblichen Einfluss auf das thermische Befinden haben. Als Indikator für die thermische Belastung wird daher die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) betrachtet (siehe Kapitel 3.2.2).

Nachts korrelieren die PET und die Lufttemperatur stark, da vor allem der Einfluss der Sonnenstrahlung entfällt. Deshalb wird nachts die Lufttemperatur oder genauer die Überwärmung des Stadtgebiets gegenüber dem ländlichen Umland, die sog. urbane Wärmeinsel, betrachtet (siehe Kapitel 6.2.2).

6.2.1 Human-biometeorologische Verhältnisse

In Bezug auf das menschliche Empfinden bzw. auf die menschliche Gesundheit sind Strahlung und Wind die wichtigsten Faktoren. Die vorangegangenen Ergebnisse zur Oberflächentemperatur eignen sich hierzu nur bedingt, da diese nur eine grobe Auflösung aufweisen und die Energieumsatzfläche (die betrachtete Fläche zur Oberflächentemperatur) nicht dem Straßenraum entspricht, in dem sich die Menschen aufhalten.

Eine genauere modellhafte Untersuchung des Schattenwurfs gibt nochmals detaillierte Einblicke, wie sich urbane Strukturen (Gebäude und Vegetation) unter Berücksichtigung der solaren Strahlung auf das menschliche thermische Empfinden auswirken können. Die Auswirkungen des Schattenwurfs sind teilweise sehr kleinteilig und beschränken sich auf die direkte Umgebung einer Nachbarschaft (Schattenwurf einzelner Bäume und Gebäude) oder teilweise auch sehr großflächig (z.B. Schattenwurf in einem engen Tal) (Abbildung 6-4). Gleichzeitig variiert der Schattenwurf je nach Tages- und Jahreszeit sehr stark, sodass sich die nachfolgenden Analysen auf den 01. August 12:00 Uhr Ortszeit beziehen (vgl. Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5).

Die Analyse zeigt, dass vor allem auf Freiflächen (sowohl innerstädtisch als auch auf dem Land) eine besonders hohe solare Einstrahlung erfahren. Im Zentrum von Zweibrücken betrifft das vor allem den Herzogplatz, den Schlossplatz, den Innenhof der Justizvollzugsanstalt Zweibrücken, die Sportflächen im Bereich des Westpfalzstadions, und teilweise die Flächen vor der Alexanderskirche.

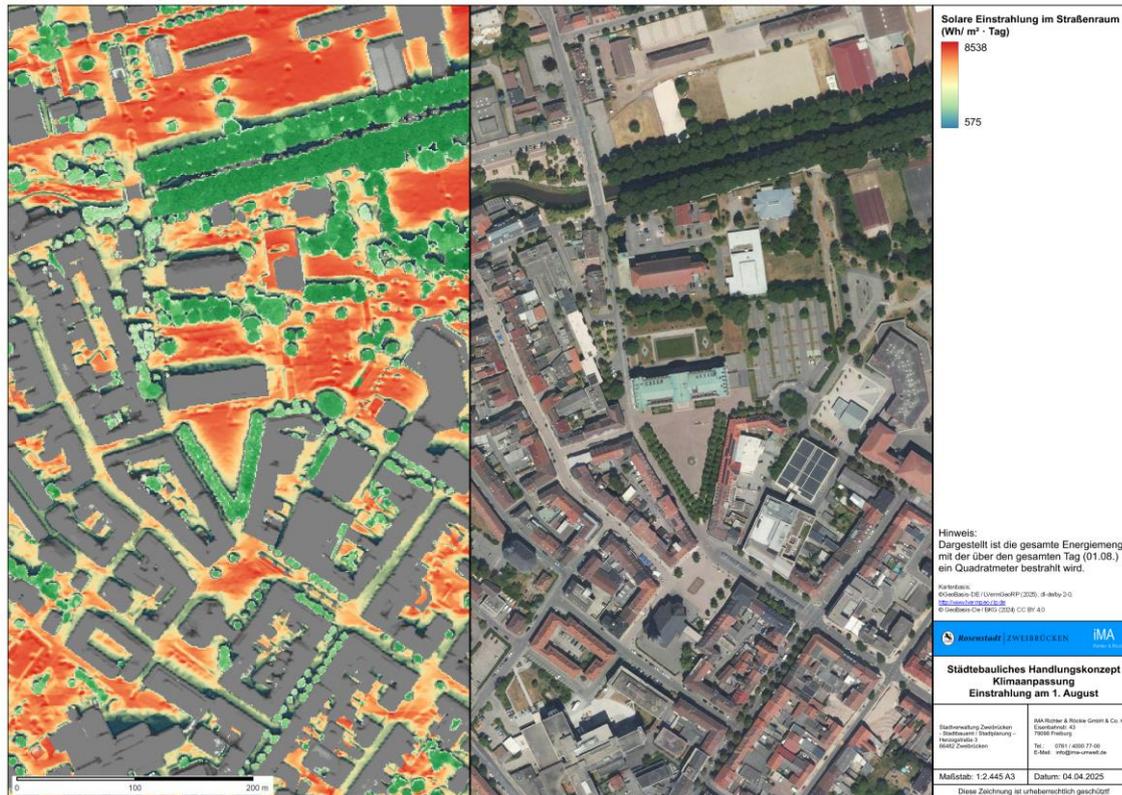


Abbildung 6-4: Schattenwurf im Detail im Bereich des Zweibrückener Schlosses am 1. August.



Abbildung 6-5: Schattenwurf im Detail im Bereich des Zweibrückener Schlosses am 20. März (Tag- und Nachtgleiche).

In der Mittagszeit ist die Wärmebelastung des Menschen stark von der Sonneneinstrahlung abhängig. Daher spielen schattenspendende Hindernisse wie Gebäude und Bäume eine wesentliche Rolle. In durch Bäume abgeschatteten Bereichen beträgt die PET weniger als 27 °C, sodass lediglich „leicht warme“ Bedingungen und somit an einem heißen Sommertag nur eine leichte Wärmebelastung vorzufinden sind (Bewertung s. Tabelle 3-6, Seite 25). Ebenso sind Gebiete mit hohem Grünflächen- oder Gewässeranteil weniger stark hitzebelastet (PET ca. 35 – 40 °C). Hier wird die Einstrahlung der Sonne in Verdunstungsenergie umgewandelt und die Oberflächen heizen sich im Vergleich zu versiegelten Flächen weniger stark auf.

Heiße Bereiche sind in Zweibrücken insbesondere in stark versiegelten und unverschatteten Bereichen vorzufinden. Diese befinden sich in dem luG-Gebiet in Ernstweiler/Bubenhausen (PET teilweise > 51 °C), im Bereich der Niederauerbach-Kaserne (PET teilweise > 53 °C), im luG-Gebiet zwischen der Landesstraße L480/Steinhauser Straße und der Bundesautobahn A8 (PET teilweise > 52 °C), sowie nördlich des Flugplatzes Zweibrückens der Verbandsgemeinde Zweibrücken-Land (PET teilweise > 52 °C). Auch besonnte Bereiche wie die Freiflächen Herzogplatz (PET teilweise > 47 °C), Schlossplatz (PET teilweise > 52 °C) weisen eine deutlich höhere thermische Belastung auf als die verschatteten Gebiete des Rosengartens entlang des Schwarzbaches (PET größtenteils < 25 °C) (Abbildung 6-6). Auf dem Platz vor der Alexanderskirch und dem Schlossplatz sind im durch Bäume abgeschatteten Bereichen, zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitze stress vorzufinden. Auf den voll versiegelten, nicht abgeschatteten Bereichen der Plätze überschreitet die Physiologisch Äquivalente Temperatur* (PET) 45 °C. In den Plangebieten wurde die Nutzung im Eingangsdatensatz (Versiegelungsgrad, Gebäude, Baumkronen) zwar aufgeprägt, da das DOM aber keine Hangkanten etc. aufweist, beeinflusst dies die Ergebnisse der Berechnung.

Neben den heißen Bereichen in Zweibrücken gibt es auch einige kühle Orte, die den städtischen Bewohnern der Erholung und der Abkühlung dienen können. So sorgen z.B. die angrenzenden Bereiche der Rosengartenstraße oder der Gestütsallee, der Rosengarten und der Hauptfriedhof für eine Abkühlung. Die Grünflächen der Wackerstraße wirken ebenfalls kühlend, können allerdings nicht als Ausgleichsraum für die städtischen Bewohnerinnen und Bewohner dienen, da sie nicht öffentlich zugänglich sind.

Im Detail sind die thermischen Verhältnisse für die Kernstadt, sowie für die nördlichen und südlichen Stadtteile separat ausgewiesen (Abbildung 6-6, Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8).

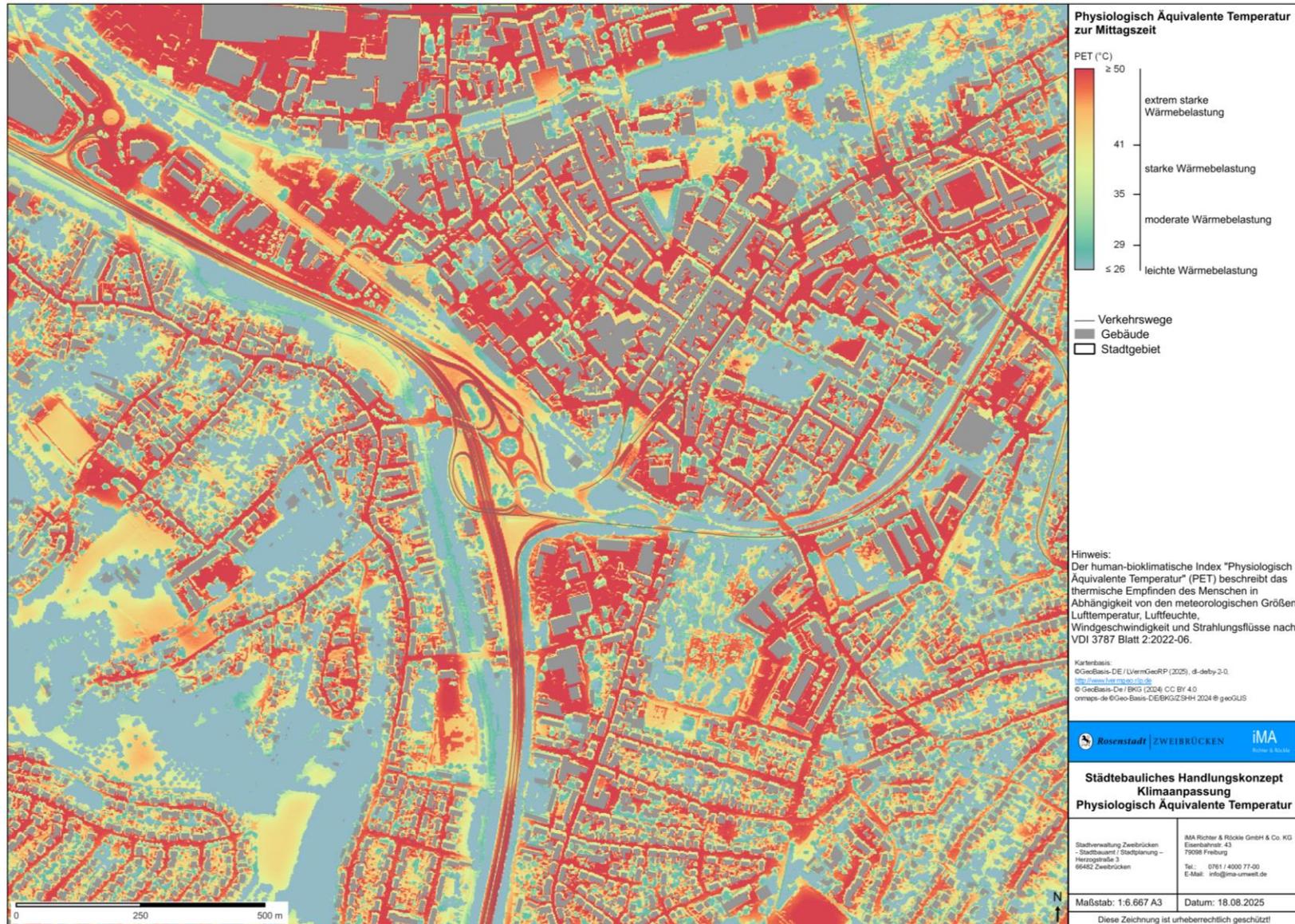


Abbildung 6-6: Ausprägung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur im Zentrum von Zweibrücken. Besonders beschattete Bereiche stellen häufig kühle Orte dar, während vollversiegelte Flächen heiße Orte darstellen.

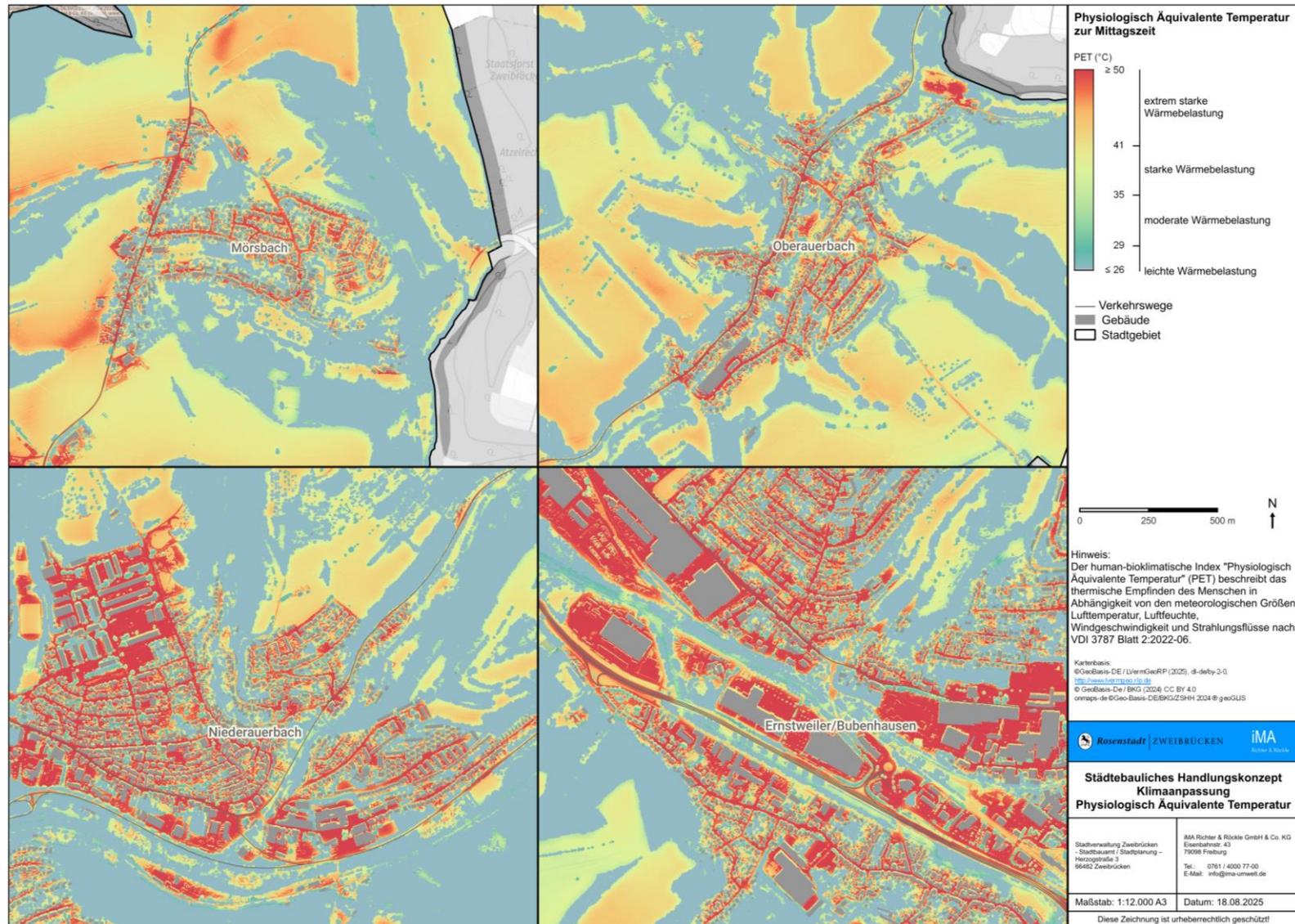


Abbildung 6-7: Ausprägung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur in den nördlichen Stadtteilen von Zweibrücken (Mörsbach, Auerbach und Ernstweiler).

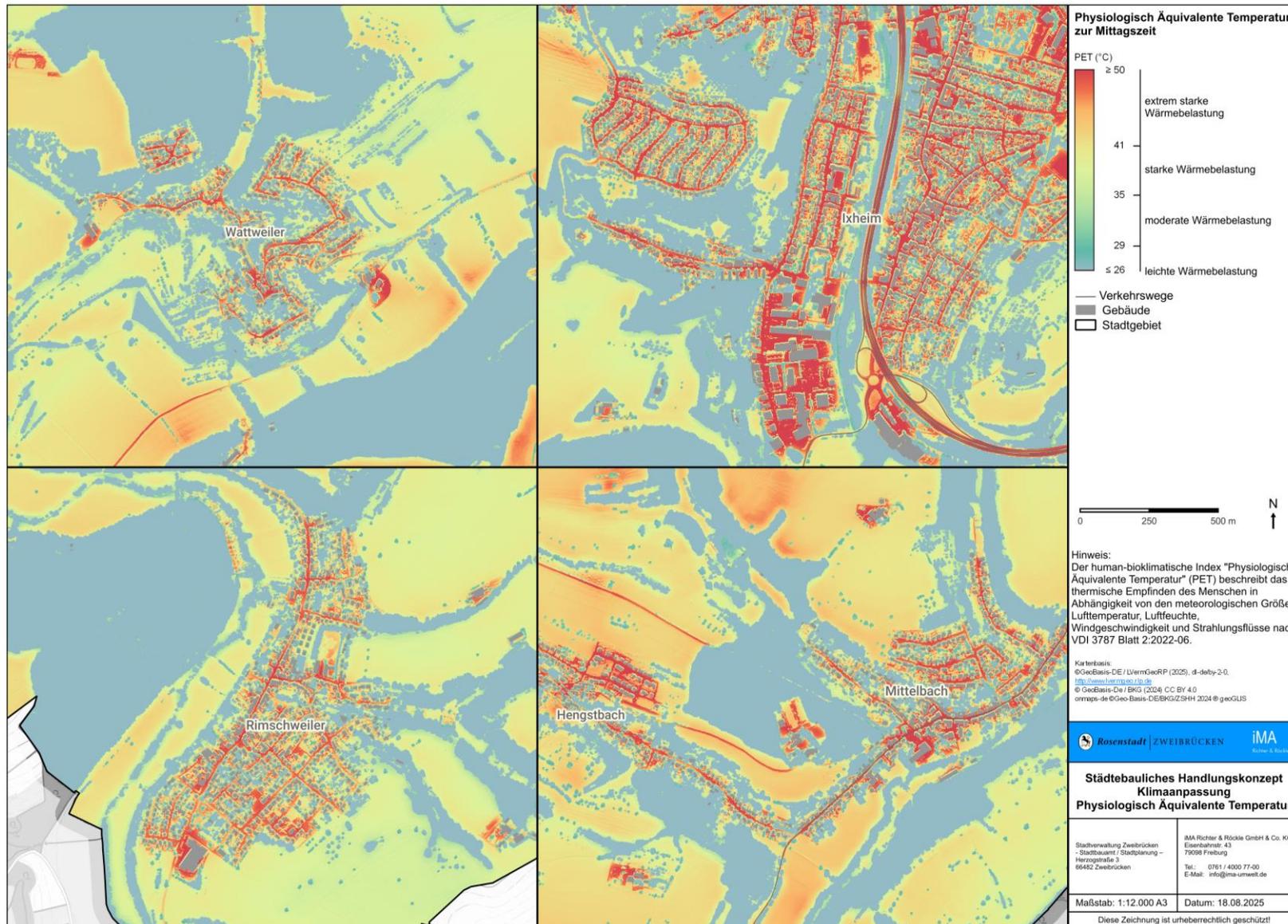


Abbildung 6-8: Ausprägung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur in den südlichen Stadtteilen von Zweibrücken (Wattweiler, Ixheim, Rimschweiler und Mittelbach-Hengstbach).

6.2.2 Urbane Wärmeinsel

Als urbane Wärmeinsel (engl.: „urban heat island“, UHI) wird die Überwärmung des Siedlungsbereichs gegenüber dem Umland bezeichnet. Die UHI ist insbesondere in der frühen Nacht stark ausgeprägt, während sie am Tage nicht oder nur schwach ausgebildet ist. Die Überwärmung des Siedlungsbereichs entsteht durch Unterschiede in der Energieumsetzung der unterschiedlichen Oberflächen zwischen Stadt und Umland. Die überwiegend versiegelten Flächen im Siedlungsgebiet wie Asphaltflächen, gepflasterte Wege und Plätze oder die Bebauung nehmen tagsüber mehr Energie durch die Sonneneinstrahlung auf als Vegetationsflächen. Diese gespeicherte Energie wird nach Sonnenuntergang in Form von Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Das führt lokal zu höheren Lufttemperaturen im Siedlungsbereich als im Umland.

Neben den unterschiedlichen Oberflächen spielen weitere Aspekte bei der Entstehung der UHI eine Rolle. Ein wichtiger zusätzlicher Faktor ist die Abgabe anthropogener Wärme an die Umgebung, d.h. Abwärme aus Kfz-Verkehr, Produktionsverfahren oder aus der Innenraumkühlung (Abwärme durch Klimaanlage). Diese Wärme erhöht zusätzlich die Lufttemperatur. Auch spielt die Horizontüberhöhung (engl.: „sky view factor“, SVF) eine wichtige Rolle. Sie beschreibt die Sichtbarkeit des Himmelsgewölbes von einer Oberfläche aus und kann als Maß für die Wärmeabstrahlung herangezogen werden. Bei stark eingeschränkter Himmelsicht (geringem SVF) wie in Straßenschluchten oder in verschatteten Bereichen wird weniger Wärme in höhere Luftschichten abgestrahlt und es verbleibt mehr Wärme in den bodennahen Luftschichten. Außerdem trägt die verringerte Durchlüftung durch die dichte Bebauung zur Bildung der UHI bei (erwärmte Luft verbleibt im Stadtgebiet).

In Zweibrücken ist die UHI in den Abendstunden besonders im Stadtzentrum ausgeprägt und erreicht im Maximum 3,3 K (Abbildung 6-9). Die Innenstadt, Ernstweiler/Bubenhausen und Niederauerbach zeigen eine deutliche urbane Wärmeinsel auf (UHI > 2,3 K). In Tabelle 3-9 sind die Bewertungsstufen aufgeführt.

Die Stadtteile Wattweiler, Hengstbach, Mittelbach, Rimschweiler, Oberauerbach und Mörsbach weisen ebenfalls eine Überwärmung auf, die aber mit 1,7 K als gering einzustufen ist. Die Orts- und Stadtteile sind nur locker bebaut und gering versiegelt, sodass es hier nur zu einer geringen UHI Intensität kommt. Mittelbach, Rimschweiler und Ixheim profitieren hier besonders von den Kaltluftabflüssen des Hornbach bzw. der Bickenalbe. Oberauerbach und der östliche Teil von Niederauerbach profitieren ebenfalls von Kaltluftabflüssen entlang des Auerbachs.

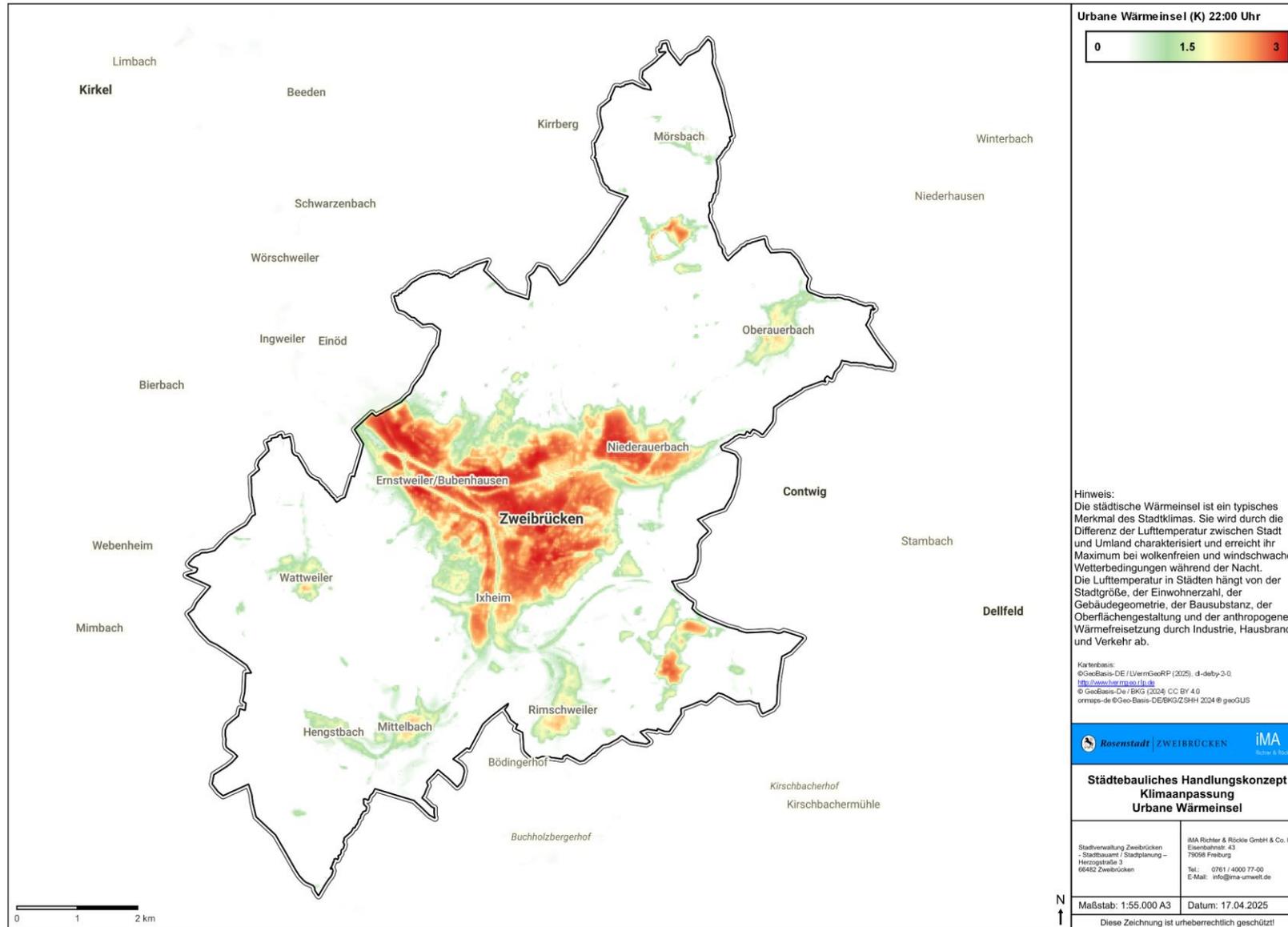


Abbildung 6-9: Räumliche Ausprägung der städtischen Wärmeinsel in Zweibrücken.

6.3 Weitere Erkenntnisse

6.3.1 Kaltluftabflussmodellierung mit KLAM_21

Durch das stark gegliederte Gelände mit Tälern und Erhebungen bildet sich in den Abendstunden ein komplexes Strömungssystem mit markanten Kaltluftabflüssen aus (Abbildung 6-10).

Die Kaltluft aus dem Tal des Hornbach überströmt dabei die südlichen Gebiete von Ixheim und fließt weiter in Richtung Stadtzentrum. Durch die vorhandene Bebauung im Tal wird die Strömung im Bodenniveau abgeschwächt und ist hauptsächlich im Dach- und Überdachniveau aktiv.

In Zweibrücken fließen die Kaltluftflüsse aus mehreren Tälern (Bautzenbach, Hornbach, Bombach, Heilbach, Bundenbach, Seilbach) geländefolgend zusammen. Genauso fließt auch die Kaltluft aus diesen Tälern zusammen und sammelt sich entsprechend in Zweibrücken. Für das Stadtzentrum von Zweibrücken sind dabei die Kaltluftabflüsse aus dem Tal der Bickenalbe, sowie des Hornbach, die in Ixheim zusammenfließen am bedeutsamsten. Diese Kaltluftabflüsse belüften das südliche Gebiet des Zweibrückener Stadtzentrums. Der östliche Teil Zweibrückens wird ebenfalls sehr gut durch die Kaltluftabflüsse des Schwarzbach-Tals entlang der L471 belüftet.

Einzig der westliche Teil Zweibrückens (zur Saarländischen Grenze hin) wird tendenziell nur geringfügig belüftet.

In den Tälern in und um Zweibrücken ist die Übereinstimmung der FITNAH Ergebnisse mit den KLAM21 Ergebnissen sehr gut. Hier stimmen die Strömungsrichtungen sowie die Volumenstromdichten größtenteils überein. KLAM21 zeigt zum Großteil, wie für ein Flachwassermodell typisch, nur die geländefolgenden Strömungssysteme auf. Da die Kaltluftvolumenstromdichten auf den Bergen und im Bereich der Hänge gering sind, werden die Pfeile in Abbildung 6-10 nicht dargestellt.

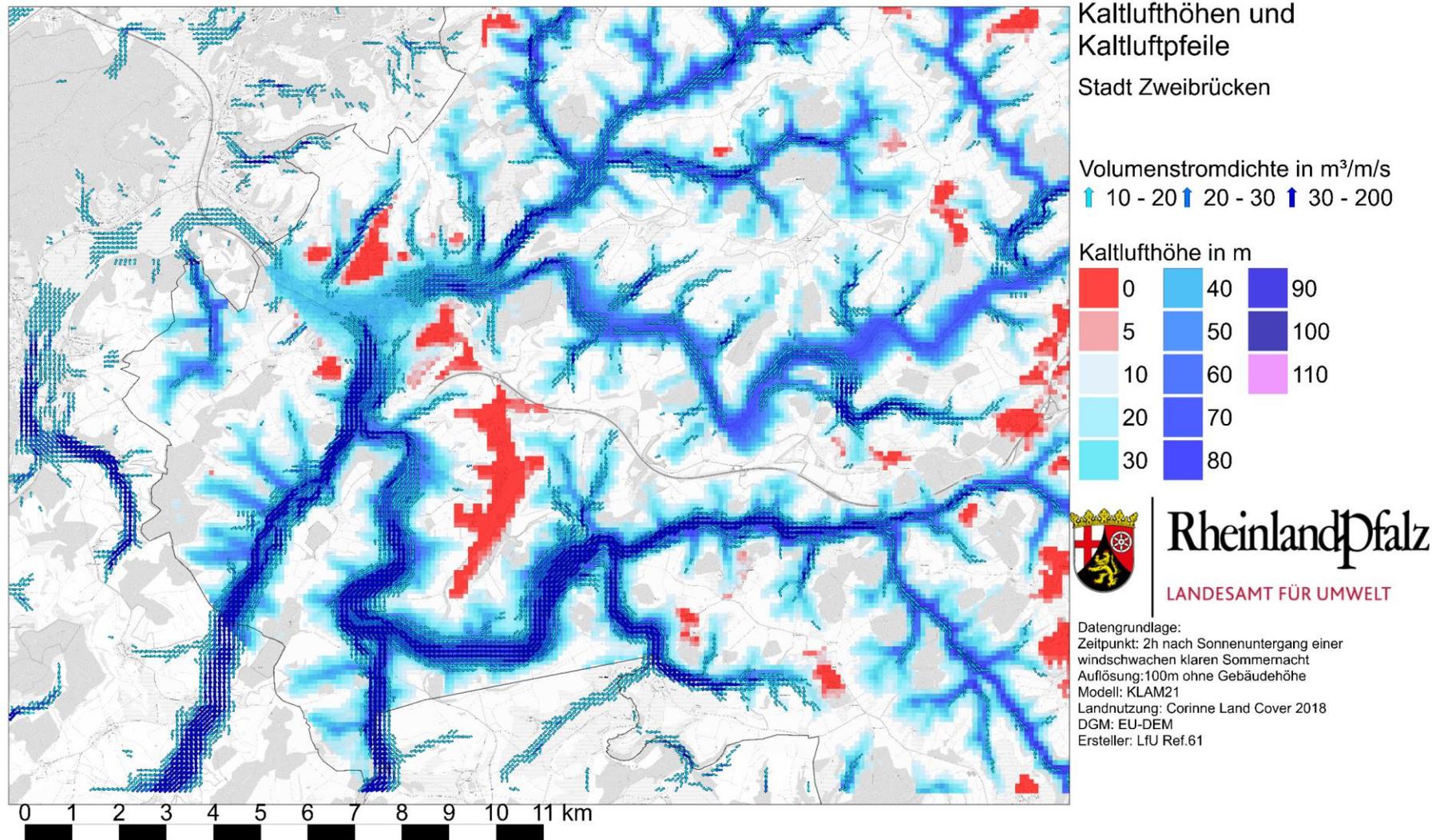


Abbildung 6-10: Kaltluftströmung 2 Stunden nach Sonnenuntergang in Zweibrücken. Berechnet mit KLAM_21 (Abbildung: LfU Rheinland-Pfalz).

6.3.2 Hotspots der Oberflächentemperatur

Basierend auf Satellitenmessungen kann die Oberflächentemperatur in Zweibrücken räumlich aufgelöst betrachtet werden. Die Oberflächentemperatur stellt dabei nicht die Lufttemperatur dar und ist insbesondere von den Eigenschaften der örtlichen Oberflächen abhängig. Dadurch kann die Oberflächentemperatur innerhalb der Stadt räumlich stark variieren. Hinsichtlich einer Datengrundlage für die Erstellung des Klimaanpassungskonzeptes ist die alleinige Betrachtung der Oberflächentemperatur unzureichend, da diese nur eine grobe Auflösung aufweisen und die Energieumsatzfläche (die betrachtete Fläche zur Oberflächentemperatur) nicht dem Straßenraum entspricht, in dem sich die Menschen aufhalten. Zur Quantifizierung der menschlichen Wärmebelastung müssen alle meteorologischen Größen (Wind, Lufttemperatur, Strahlung und Feuchte) im Zusammenschluss betrachtet werden. Dies kann nur über die Quantifizierung thermischer Indizes erfolgen.

Für Zweibrücken gibt es vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz eine Auswertung zweier Satellitenbilder sowohl für die Tag- als auch für die Nachtsituation. Diese zeigen allerdings nur die Situation eines ganz bestimmten Zeitpunktes: 06.08.2024 um 02:32 MESZ, sowie des 02.06.2021 um 12:22 MESZ. Ausgewertet wurde nachfolgend die Abweichung vom Gebietsmittel (des ATKIS-Layer Ortslage).

Die Hotspots der Oberflächentemperatur in Zweibrücken der Tagsituation liegen vor allem in vollversiegelten Bereichen der Industrie- und Gewerbegebiete zwischen Homburger Straße und Schwarzbach (bis zu 12 K), zwischen Schwarzbach/Wilkstraße und Hornbach (bis zu 9 K) sowie im Bereich zwischen der Dinglerstraße und Schillerstraße (bis zu 10 K) (Abbildung 6-11). Das Gewerbegebiet südlich der Hofenfelsstraße, östlich der Bauwerkerstraße bildet ebenfalls einen Hotspot mit einer hohen Oberflächentemperatur aus (bis zu 9 K). Ein weiterer Hotspot liegt im Bereich des Friedhofs Bubenhausen (bis zu 7 K).

Demgegenüber stellen der Rosengarten (bis zu -5 K), großflächig die grünen Wiesen westlich der Canadastraße (bis zu -4 K), sowie die Bereiche östlich und westlich der Hochschule Kaiserslautern, Standort Zweibrücken (bis zu -7 K) kühle Orte für Zweibrücken dar. Besonders kühl ist es in den forstlich geprägten Bereichen östlich der Kreuzbergstraße, sowie südlich der Albert-Einstein-Straße.

Nachts konzentriert sich die Überwärmung der Bebauung hauptsächlich auf das dicht bebaute innerstädtische Gebiet Zweibrückens (Abbildung 6-12). Die heißen Bereiche liegen hier vor allem im Bereich des Nardini Klinikum St. Elisabeth, sowie im Bereich des Wertstoffhofs (bis zu 1,8 K).

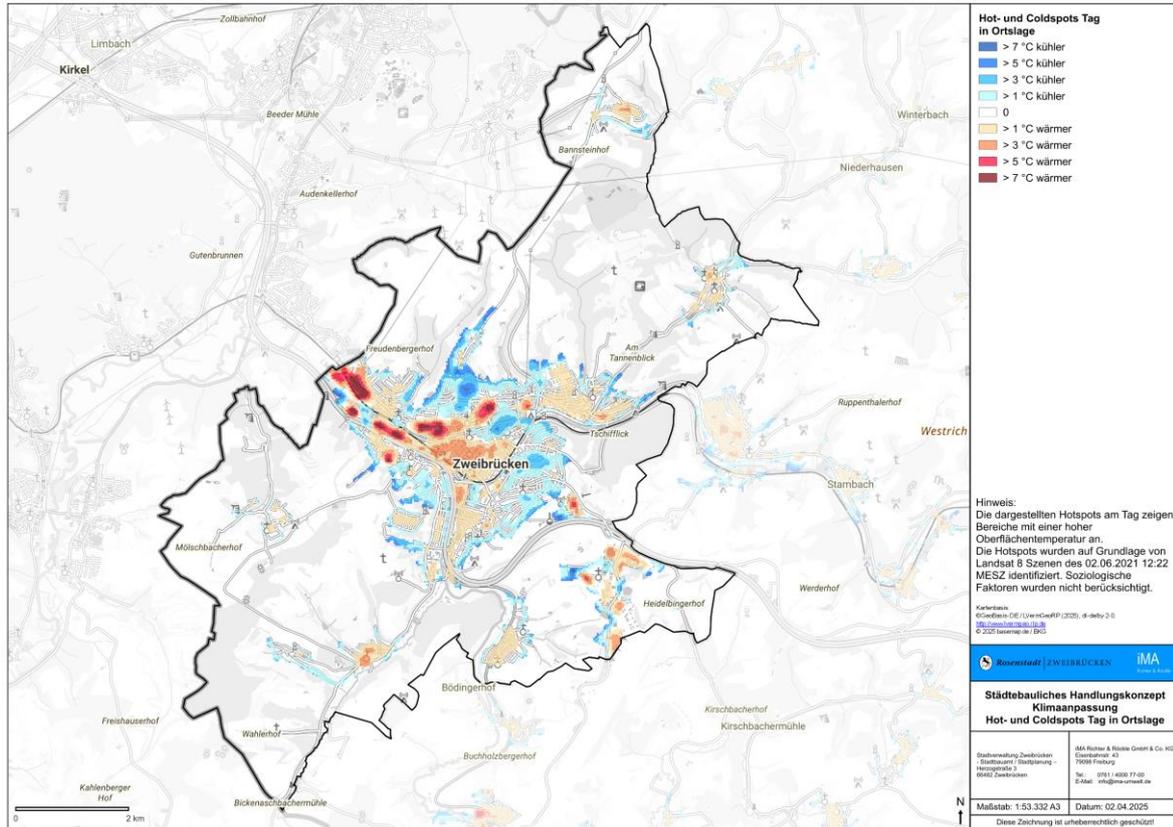


Abbildung 6-11: Ausprägung der Oberflächentemperatur in Zweibrücken am 02.06.2021 um 12:22 MESZ.

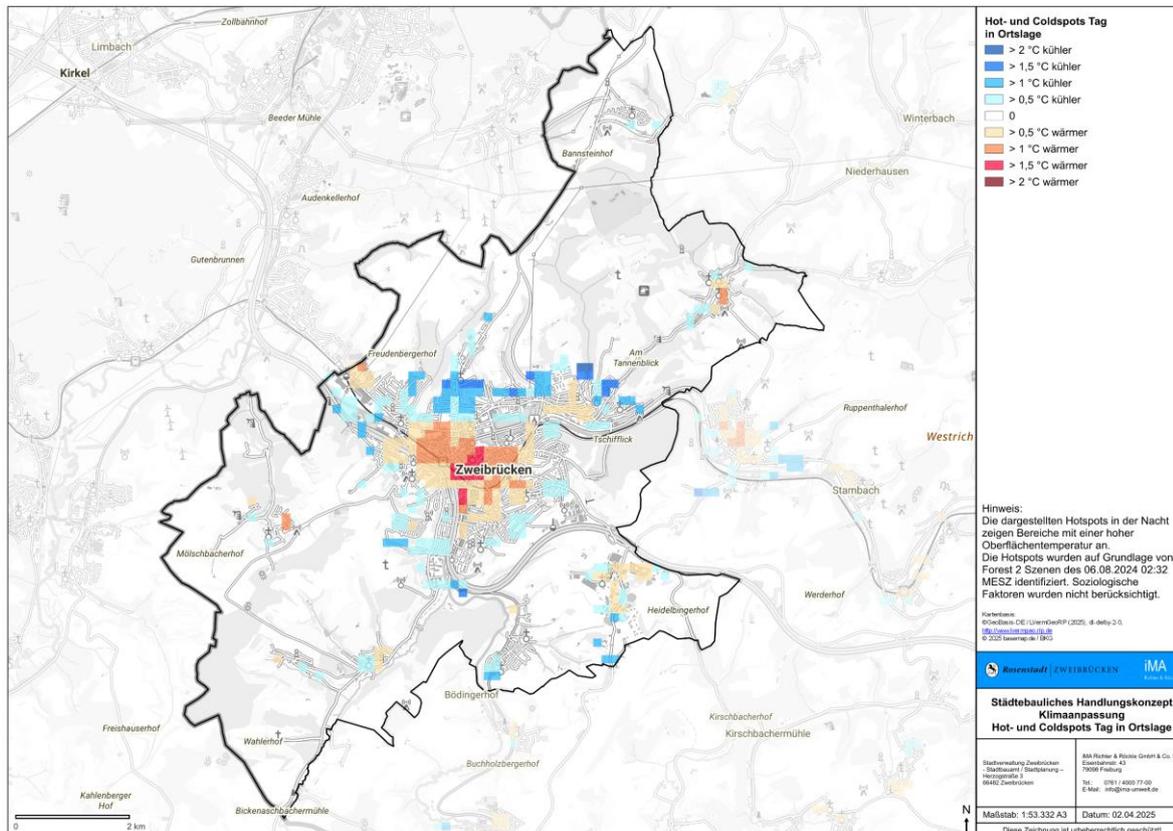


Abbildung 6-12: Räumliche Ausprägung der Oberflächentemperatur am 06.08.2024 um 02:32 MESZ. Zweibrücken bewirkt bzgl. der Oberflächentemperatur eine Urbane Wärmeinsel.

6.3.3 Mobile Beobachtungen der Lufttemperatur

In Zweibrücken wurden im Jahr 2019 mobile Messfahrten durch den Deutschen Wetterdienst durchgeführt, die unter anderem die kleinräumige Variation der Lufttemperatur entlang einer Messroute aufgezeichnet haben. Die Messfahrten wurden linear korrigiert, um den zeitlichen Trend der Messung bzgl. dem Tagesgang der Lufttemperatur herauszurechnen. Die Messfahrten bilden nicht die gesamte städtische Innenstadt ab, führen aber durch Gebiete mit unterschiedlicher Landnutzung, sowie über die Höhenstufen Zweibrückens (Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14). Der Einfluss der nächtlichen Kaltluftabflüsse, sowie der resultierenden Inversionslage ist in der mobilen Beobachtung der nächtlichen Lufttemperatur bereits auszugswise zu sehen. Vor allem die Zuflüsse aus den nördlichen Seitentälern und Tobeln sind für Zweibrücken maßgeblich (z.B. aus dem Ernstweilertal, Heilbachtal und Auerbachtal).

Die mobilen Beobachtungen stimmen mit dem Modellierungen größtenteils überein. So sind in beiden Ergebnissen kühlere Bereiche im Geländeeinschnitt des Bautzenbachs, sowie in der Umgebung des Rosengarten zu erkennen. Auch die Temperaturdifferenz der mobilen Messung zwischen Fasanerie/Tschifflik (etwa 19 °C) und der Zweibrückener Stadtzentrum (etwa 22 °C) entspricht mit etwa 3 K dem simulierten Urbanen Wärmeinsel Effekt.

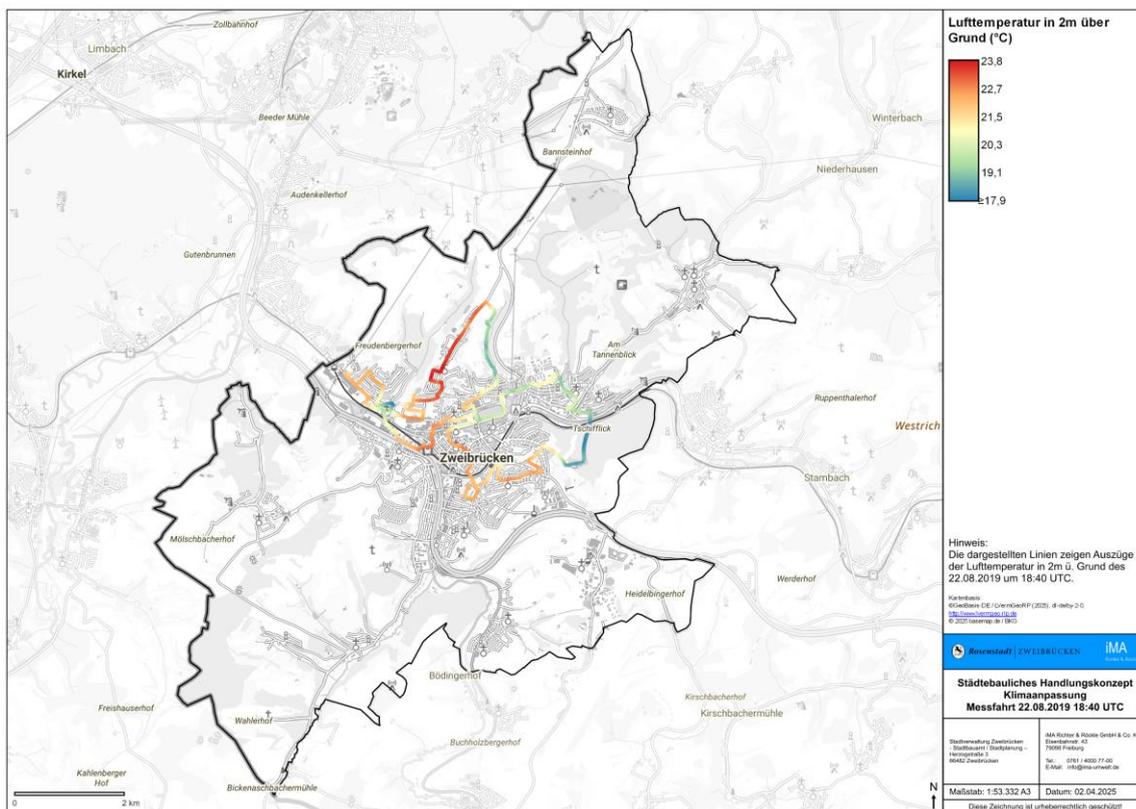


Abbildung 6-13: Abendliche Ausprägung der Lufttemperatur in 2m Höhe ü. Grund. Es ist deutlich der Einfluss der Kaltluftabflüsse im Bereich des Bautzenbachs und des Bombach zu sehen.

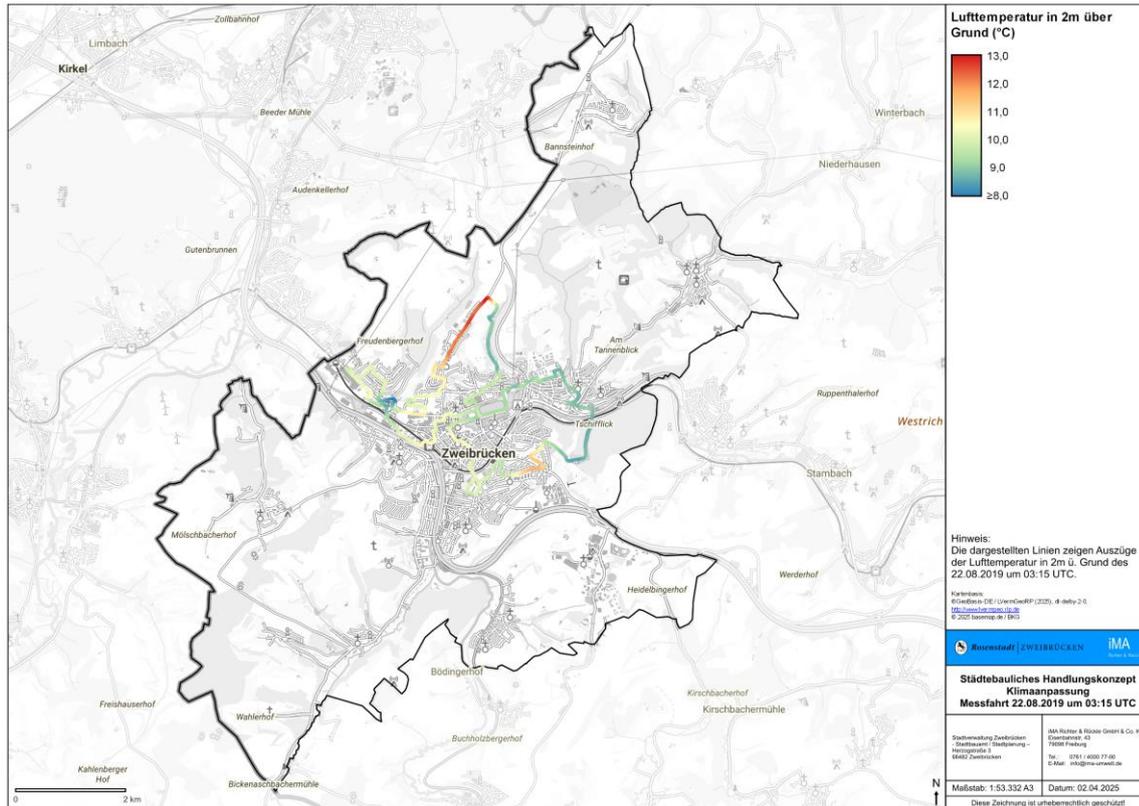


Abbildung 6-14: Nächtliche bzw. morgendliche Ausprägung der Lufttemperatur in 2m Höhe ü. Grund. Die Inversion aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung ist entlang des Höhenrückens der Amerikastrasse deutlich zu erkennen.

6.4 Thermische Empfindlichkeit

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit wird die Dichte der Einwohnerinnen und Einwohnern für Flächen von 25 m · 25 m (Abbildung 6-15) berechnet.

Zweibrücken weist sowohl Bereiche mit niedriger Bevölkerungsdichte, wie z.B. in Wattweiler, Hengstbach, Mittelbach, Rimschweiler, Oberauerbach und Mörsbach als auch mit hoher Bevölkerungsdichte, wie z.B. im Zentrum Zweibrückens oder im östlichen Teil der Steinhauser Straße auf.

Besonders alte oder kranke Personen reagieren empfindlich auf Hitzestress und weisen dementsprechend hohe Mortalitäts- und Morbiditätsraten* während Hitzewellen auf (Grize et al. (2005); Robine et al. (2008)). Babys und Kleinkinder reagieren empfindlicher auf Hitzestress als Erwachsene. Daher werden neben der Bevölkerungsdichte auch hitzesensible Nutzungsstrukturen in die Bestimmung der thermischen Empfindlichkeit einbezogen. Zu diesen Einrichtungen zählen Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen, Seniorenheime, Pflege-Wohngemeinschaften, Obdachlosenunterkünfte, sowie Kindertagesstätten und Schulen.

Neben der Bevölkerungsdichte wurden auch hitzesensible Einrichtungen berücksichtigt. Da Schulen und Kindertagesstätten in der Regel in der Nacht nicht genutzt werden, wurden diese Einrichtungen zur Bestimmung der thermischen Empfindlichkeit in den Nachtstunden nicht berücksichtigt.

Die Methodik zur Bewertung der Empfindlichkeit wurde an die Bevölkerungsverteilung der Stadt Zweibrücken angepasst und ist in Kapitel 3.2.3 (Seite 25) näher beschrieben.

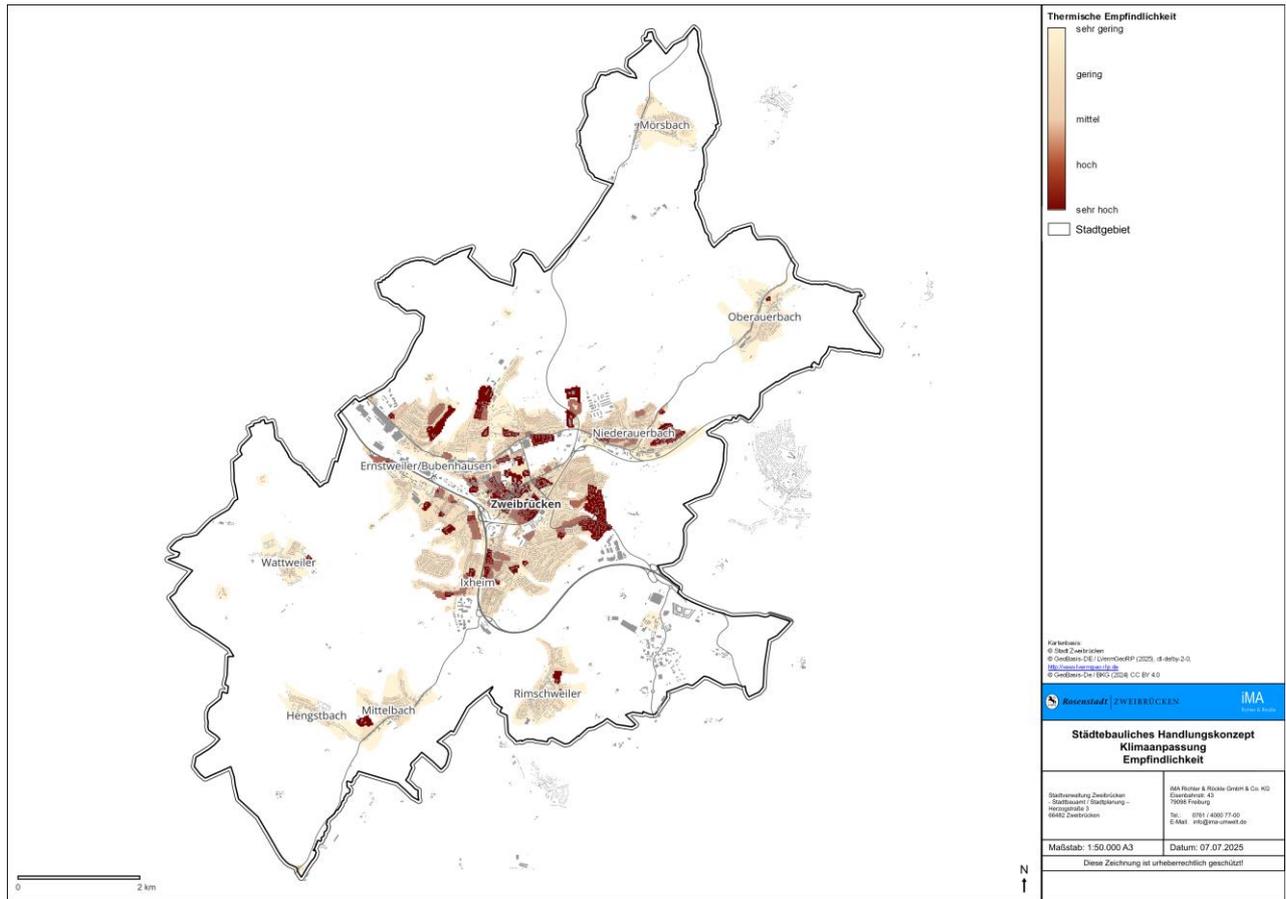


Abbildung 6-15: Thermische Empfindlichkeit in Zweibrücken basierend auf der Dichte der Bevölkerung sowie der sensiblen Nutzung.

6.5 Thermische Belastung

Die thermische Belastung wird auf Grundlage der human-biometeorologischen Belastung im Stadtgebiet bestimmt. Da sich die Belastungssituation am Tag und in der Nacht stark unterscheiden können, werden diese Zeitpunkte getrennt voneinander betrachtet. Nachts bestimmt sich die thermische Belastung über die nächtliche Überwärmung (UHI) des Stadtgebiets (siehe Kapitel 6.2.2). Am Tag bestimmt sich die thermische Belastung über die Verteilung der Hitzebelastung, d.h. über die PET (siehe Kapitel 6.2.1).

In der Nacht ergibt sich die thermische Belastung, dargestellt in Abbildung 6-16, aus der urbanen Wärmeinsel. Nachts konzentriert sich die hohe Belastung v.a. im Bereich der Innenstadt (z.B. in der Herzog-Wolfgang-Straße), den überwärmten Industrie- und Gewerbegebieten von Ernstweiler/Bubenhausen, den westlich gelegenen Wohngebieten von Niederauerbach sowie den versiegelten Bereichen der Umwelt- und Servicebetrieben Zweibrückens. In der Herzog-Wolfgang-Straße wurden bereits erste Klimaanpassungsmaßnahmen durch zusätzliche Straßenbäume initiiert; diese sind zum betrachteten Zeitpunkt allerdings noch nicht so ausgeprägt um einen umfassenden kühlenden Effekt zu erzielen.

Am Tag ist die thermische Belastung in den Gewerbegebieten von Ernstweiler/Bubenhausen erhöht. Auch im Bereich der Sportflächen, zwischen Geschwister-Scholl-Allee und Landauer Straße (z.B. Westpfalz Station) herrscht eine hohe thermische Belastung (Abbildung 6-16). Thermisch stark belastet ist auch die Niederauerbach-Kaserne. Aber nicht nur z. B. Gewerbegebiete, sondern auch z. T. dicht bebaute und stark versiegelte Wohngebiete weisen eine hohe bis sehr hohe thermische Belastung auf. So ist z.B. die thermische Belastung auf den Parkplatzflächen der Kaiserstraße/Ritterstraße bzw. im Bereich des Nardini-Klinikum erhöht.

Tagsüber weniger belastete Gebiete sind die verschatteten Grünflächen im Stadtgebiet, sowie die locker bebauten Stadtteile Wattweiler, Hengstbach, Mittelbach, Rimschweiler, Oberauerbach und Mörsbach.

Auf den Freiflächen außerhalb der Siedlungsbereiche wird eine mittlere thermische Belastung erreicht. Dies hängt damit zusammen, dass sich die thermische Belastung am Tag überwiegend aus der Verschattung ergibt. Größere Ackerflächen weisen zwar keine Versiegelung auf, hohe schattenspendende Vegetation ist allerdings größtenteils auch nicht vorhanden. Die geringste thermische Belastung wird in den Schatten der umliegenden Waldflächen und in den Gehölzflächen entlang der Bachläufe erreicht.

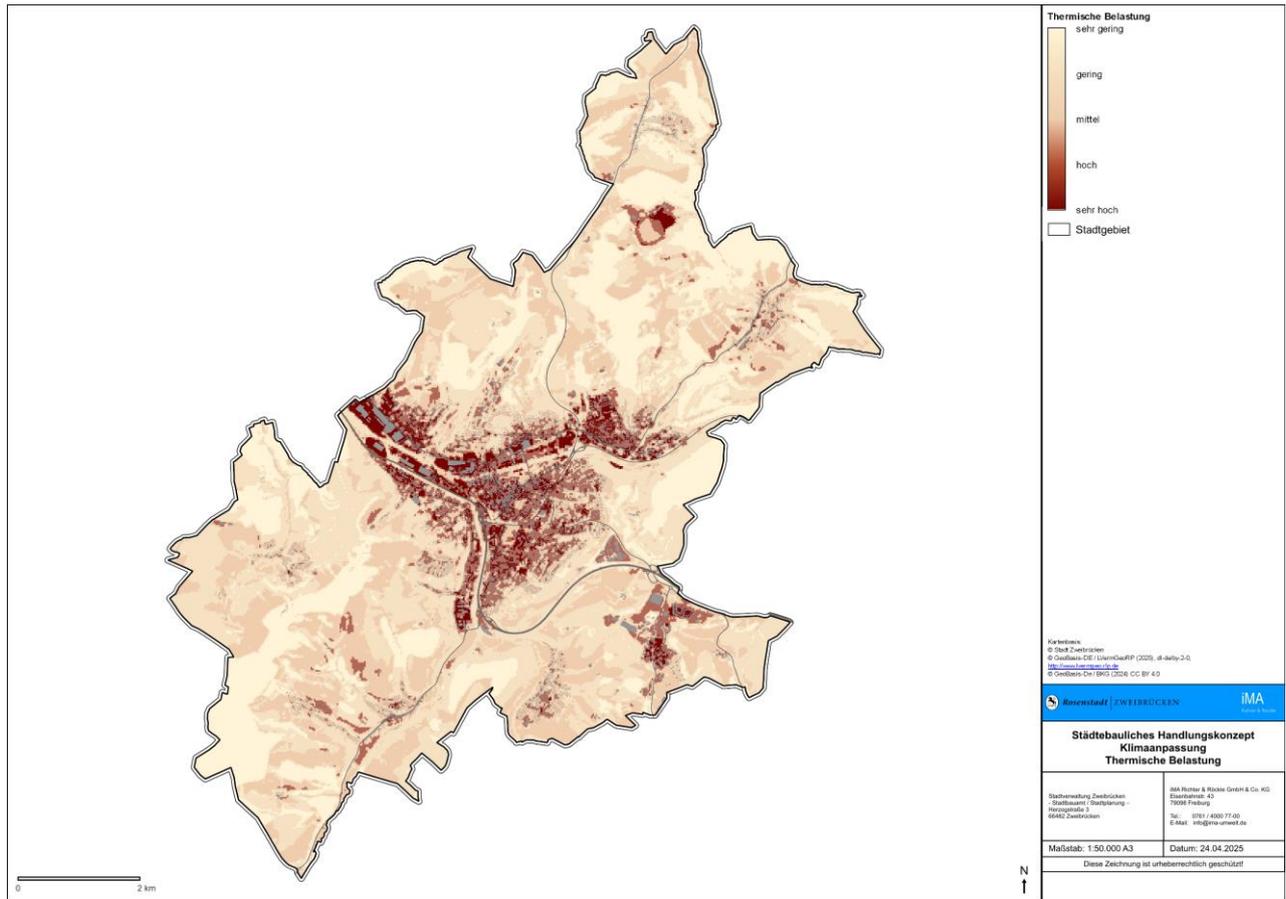


Abbildung 6-16: Thermische Belastung in Zweibrücken basierend auf der Physiologisch Äquivalenten Temperatur, sowie der Urbanen Wärmeinsel.

6.6 Thermische Betroffenheit

Die thermische Betroffenheit (auch Vulnerabilität) weist darauf hin, wie stark ein Bereich durch die lokalklimatischen Bedingungen in Abhängigkeit von der thermischen Empfindlichkeit der Bevölkerung betroffen ist. Als Grundlage der thermischen Betroffenheit dienen zum einen die Empfindlichkeit (s. Kapitel 6.3), zum anderen die thermische Belastung (s. Kapitel 6.5). Nach Verschneidung der thermischen Belastung mit der Empfindlichkeit ergibt sich die thermische Betroffenheit (Abbildung 6-17). Eine hohe thermische Betroffenheit ist deswegen vorwiegend an Orten mit einer hohen thermischen Belastung und einer hohen Empfindlichkeit anzutreffen.

Eine hohe thermische Betroffenheit liegt in der Innenstadt Zweibrückens hauptsächlich in den Bereichen der Landauer Straße bzw. Alte Ixheimer Straße, des Nardini Klinikum bzw. Von-Rosen-Straße sowie der Hauptstraße vor. Diese Straßen sind zum Teil sehr schmal gebaut, voll versiegelt und weisen kaum Verschattung durch zusätzliche Straßenbäume auf. Betroffen ist auch der Block zwischen Maxstraße und Bleicherstraße des Behördenzentrums. Hier spielt insbesondere die hohe Bevölkerungsdichte eine entscheidende Rolle. Je höher die Bevölkerungsdichte, desto höher ist die thermische Empfindlichkeit, was sich wiederum in einer potenziell hohen thermischen Betroffenheit widerspiegelt. Trotz der partiell hohen thermischen Belastung z.B. in Hengstbach/Mittelbach, Rimschweiler und Oberauerbach, ist die thermische Betroffenheit in diesen Bereichen aufgrund der geringen Bevölkerungsdichte überwiegend gering.

Bereiche mit erhöhter thermischer Betroffenheit umfassen insbesondere auch Einrichtungen der vulnerablen Infrastruktur, wie Schulen, Krankenhäuser, Kindergärten sowie Pflegeeinrichtungen und Seniorenheime. Dies betrifft in Zweibrücken vor allem das Nardini Klinikum, das Mehr Generationen Haus, die Kindertagesstätte Arche Kunterbunt, sowie die Berufsbildende Schule (BBS). Die Kindertagesstätte Weltentdecker ist ebenfalls stark betroffen, teilweise sind zusätzliche Schattenspendende Maßnahmen bereits umgesetzt.

Die locker bebauten und entsprechend bevölkerungsärmeren Ortsteile Hengstbach/Mittelbach, Rimschweiler, Wattweiler, Oberauerbach und Mörsbach besitzen nur eine geringe bis überwiegend sehr geringe thermische Betroffenheit. Jedoch ist auch gerade in diesen Stadtteilen die ältere, vulnerable Bevölkerung wohnhaft (vgl. Abbildung 4-4 und Abbildung 6-17).

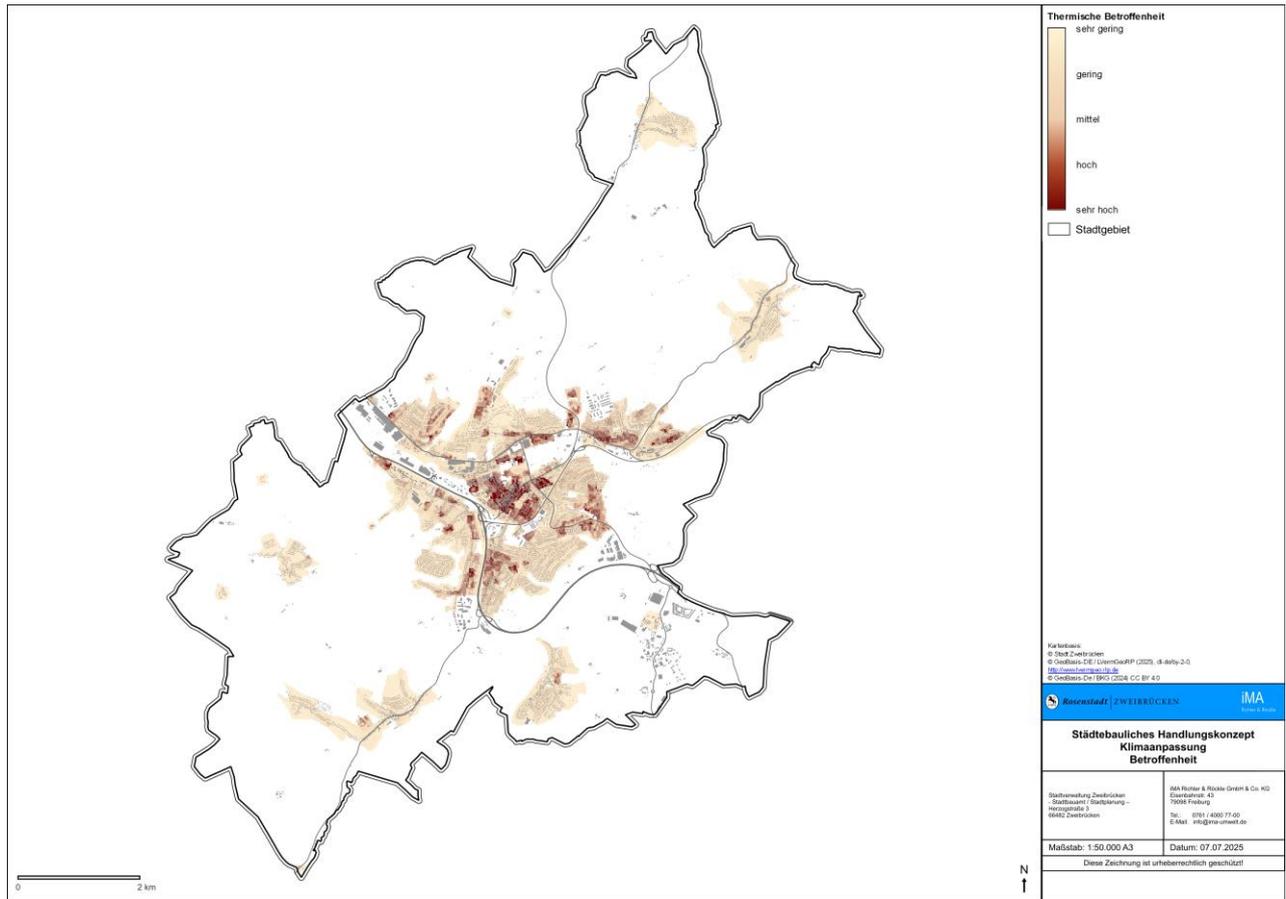


Abbildung 6-17: Thermische Betroffenheit in Zweibrücken basierend auf der Empfindlichkeit und der thermischen Belastung.

6.7 Hotspot-Analyse

Aus der thermischen Belastung lassen sich die Bereiche mit dem größten Handlungsbedarf, die Hotspot-Bereiche, für den Tag (Abbildung 6-18) und für die Nacht (Abbildung 6-19) aus den Datensätzen zur thermischen Belastung räumlich identifizieren.

Tagsüber liegen die Hotspotbereiche von Zweibrücken hauptsächlich in den voll versiegelten Industrie- und Gewerbegebieten, die kaum Möglichkeit der Verschattung aufweisen. Dazu zählen die luG Gebiete im Westen entlang der Homburger Straße, die Gebiete nördlich der Bundesautobahn 8, die großen Gebiete zwischen Dinglerstraße und Schwarzbach. Die Niederauerbach-Kaserne in Niederauerbach ist ebenfalls ziemlich dicht versiegelt und weist kaum Bereiche mit Schatten auf. Innerstädtisch sind vor allem die versiegelten Flächen westlich des Nardini Klinikum St. Elisabeth problematisch.

Die Grünflächen (insbesondere der Hauptfriedhof, der Rosengarten und die Grünfläche im Bereich der Wackenstraße) sorgen für einen wichtigen Ausgleich. Allerdings ist z.B. die Zugänglichkeit der Grünfläche im Bereich der Wackenstraße (Abgesehen von dem öffentlichen Spielplatz) stark eingeschränkt.

Nachts ist die Überwärmung hauptsächlich auf das dicht bebaute und versiegelte Gebiet der Innenstadt mit einem großen Gebäudevolumen begrenzt. Die Randbereiche erfahren ausreichend Kühlung durch die vorherrschenden Kaltluftabflüsse. Im innerstädtischen Bereich betrifft das vor allem die Poststraße, Karlstraße, und die Johann-Schwebel-Straße im Bereich der Justizvollzugsanstalt Zweibrückens. In Niederauerbach erfahren vor allem die südlich ausgerichteten Flächen eine starke Überwärmung tagsüber mit einer geringen nächtlichen Abkühlung, da diese nicht im direkten Einzugsgebiet eines Kaltluftstroms liegen.

Die äußeren Stadtteile (Wattweiler, Hengstbach, Mittelbach, Rimschweiler, sowie Oberauerbach und Mörsbach) sind sowohl tagsüber als auch nachts nur geringfügig betroffen.

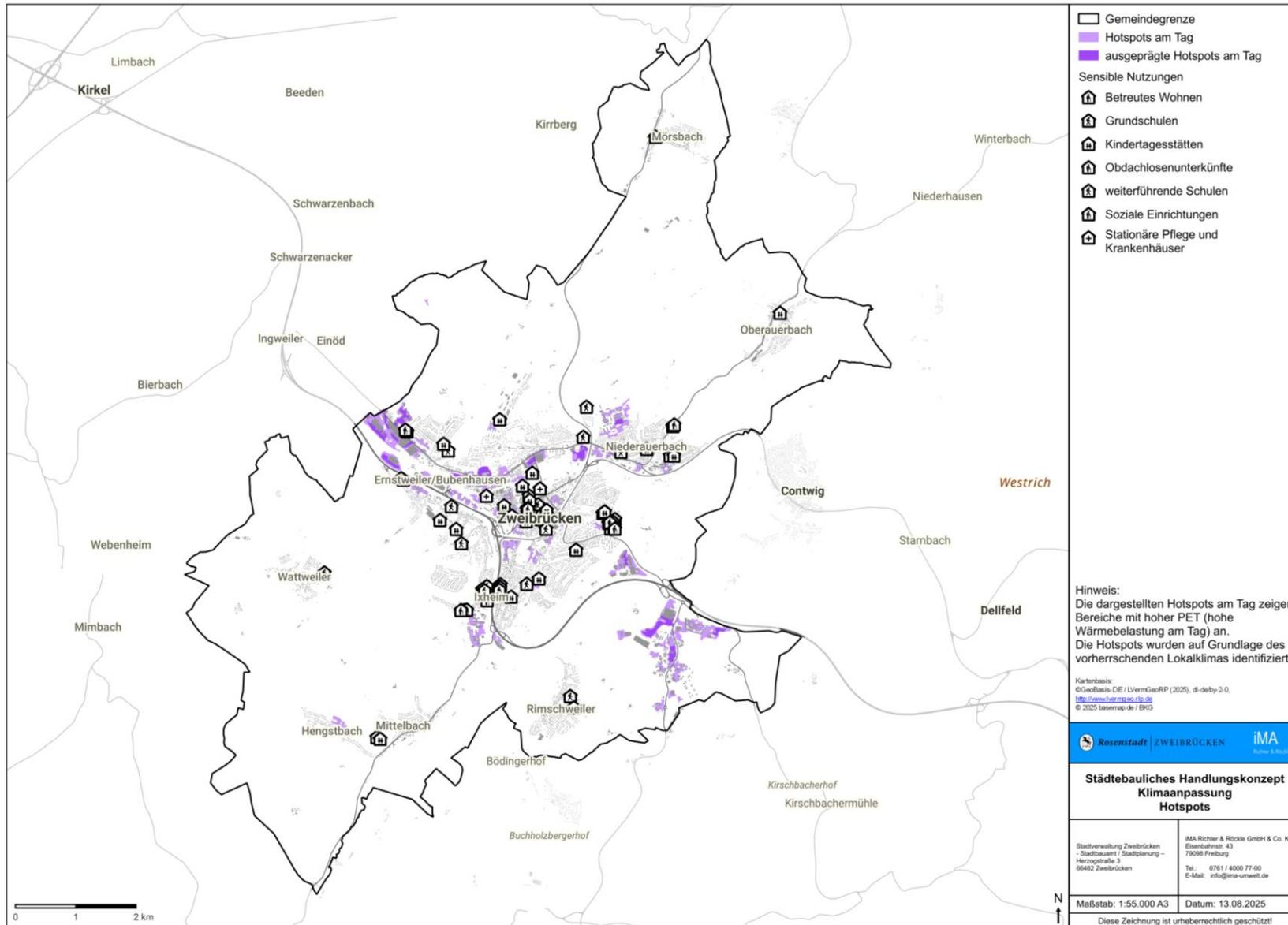


Abbildung 6-18: Hotspots in Zweibrücken am Tag unter Berücksichtigung aufgelöster Siedlungsstrukturen (insbesondere Gebäude und Vegetation).

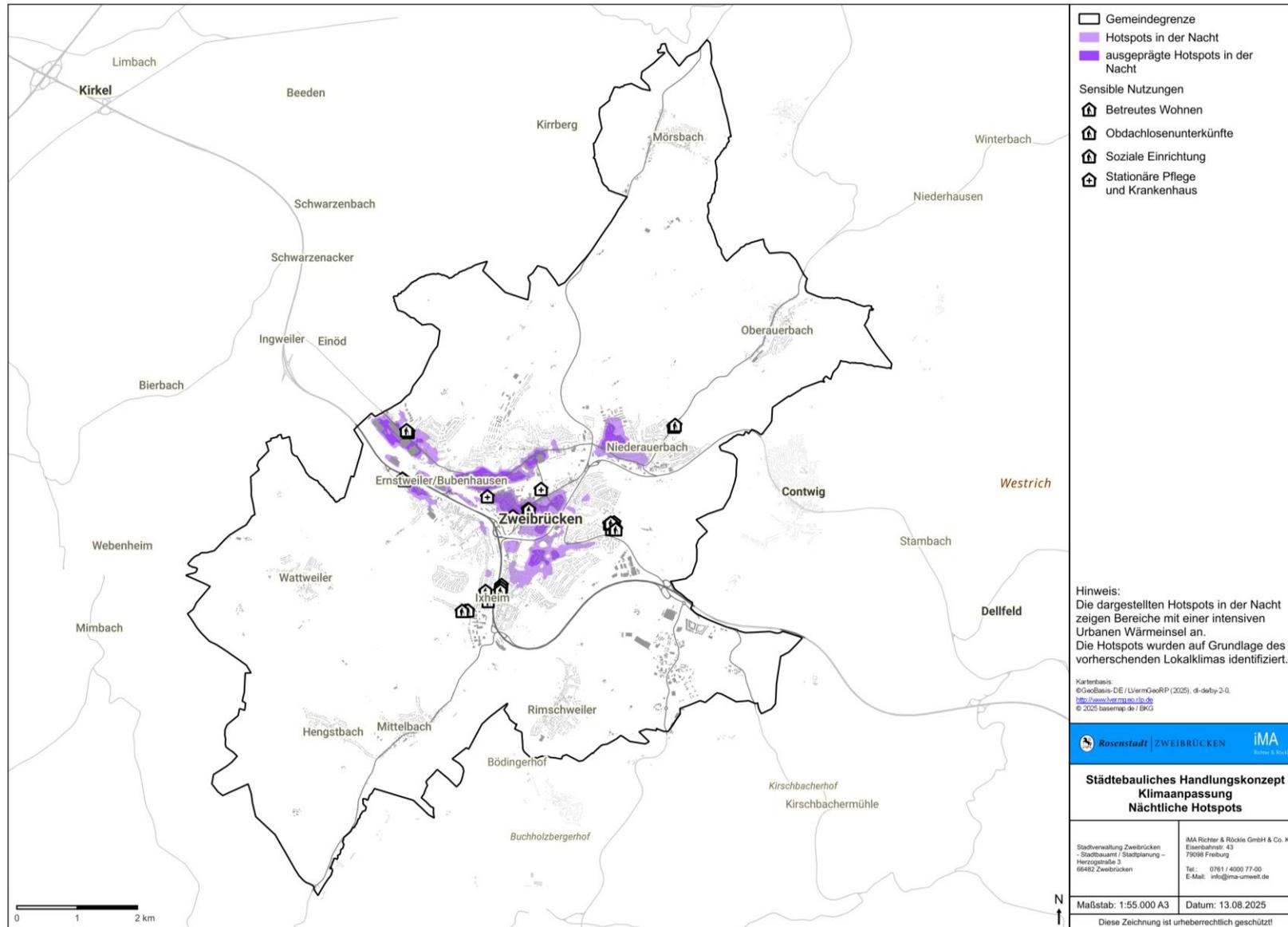


Abbildung 6-19: Hotspots in Zweibrücken in der Nacht unter Berücksichtigung aufgelöster Siedlungsstrukturen (insbesondere Gebäude und Vegetation).

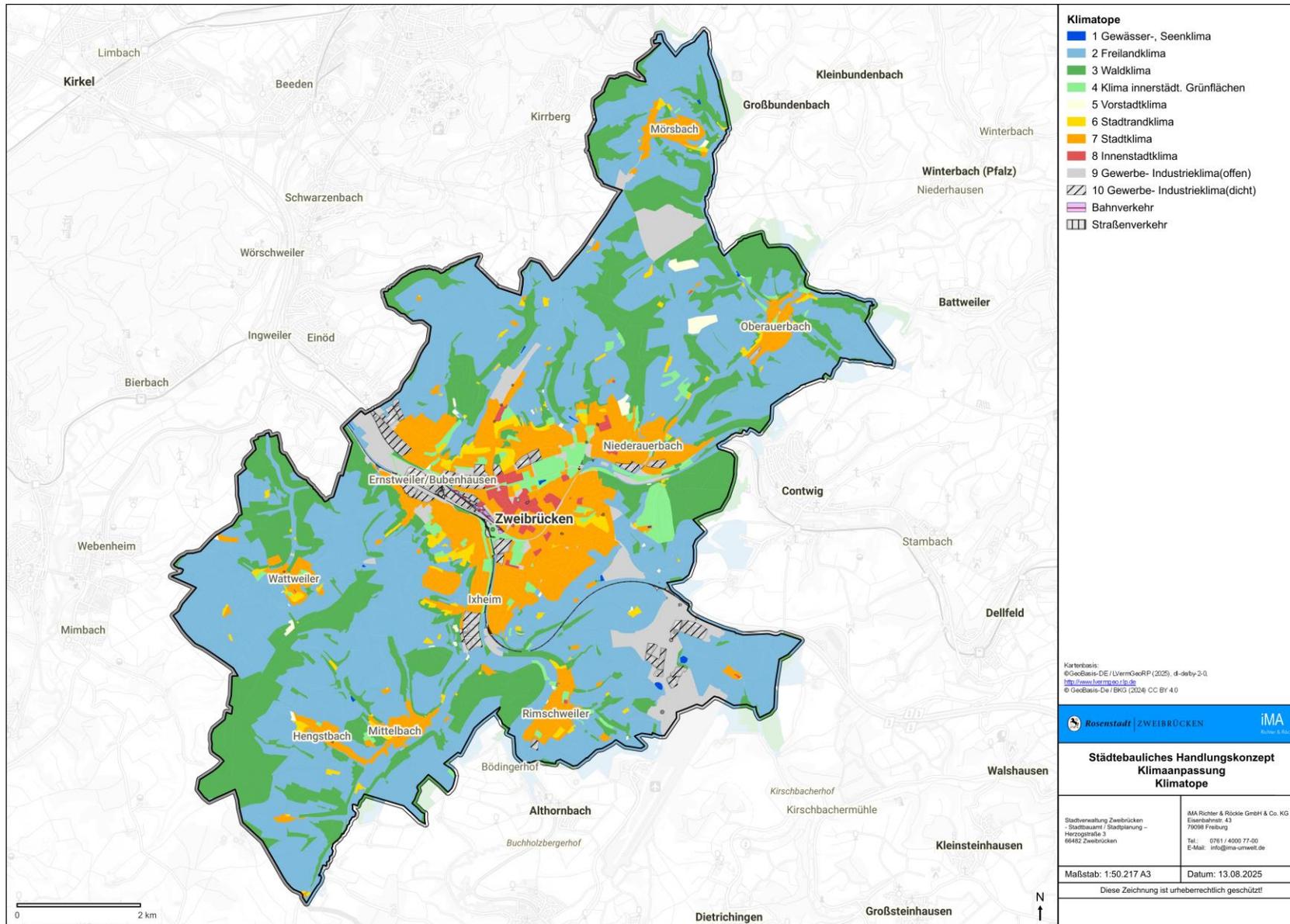


Abbildung 6-20: Klimatopkarte der Stadt Zweibrücken basierend auf den Klimatopen ermittelt durch das LfU RLP.

7 Klimatopkarte

Die Klimatopkarten (Abbildung 6-20) wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) durch das LfU RLP erstellt. Die Klimatopkarten wurden anhand der ATKIS-Landnutzungsdaten erstellt (s. Kapitel 3.2.5).

Da Vorgänge in der unteren Atmosphäre betrachtet werden, sind die Übergänge zwischen den einzelnen Stadtstrukturtypen fließend, d.h. die Abgrenzungen in der Klimatopkarte sind nicht als „scharfe“ Grenzen, sondern eher als „Grenzsäume“ zu sehen.

8 Planungshinweiskarte

Während die Klimatopkarte eine wertfreie Darstellung der der Landnutzung zugeordneten thermischen Eigenschaften repräsentiert, werden auf der Planungshinweiskarte zum einen die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und zum anderen die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung klassifiziert bewertet (Abbildung 8-1).

Die Siedlungsbereiche sind je nach thermischer Betroffenheit eingefärbt. Je dunkler die Farbe, desto höher ist dort die Betroffenheit. Dargestellt werden auch die thermischen Hotspots während des Tages und während der Nacht. Tagsüber halten sich die Menschen hauptsächlich an ihrem Arbeitsplatz sowie in Betreuungs- und Bildungseinrichtungen auf. Doch gerade die Industrie- und Gewerbegebiete sind tagsüber besonders thermisch belastet.

In den stark belasteten Bereichen ist anzustreben, die Wärmebelastung durch Bebauung und Versiegelung nicht weiter zu erhöhen und stattdessen Minderungsmaßnahmen in Betracht zu ziehen. Dies kann in Form von Ausgleichsflächen erfolgen, die stärker begrünt werden. Aber auch eine Verringerung des Versiegelungsgrades z.B. durch Fassaden- und Dachbegrünung, Bäumen sowie Pocket-Parks mindern die Wärmebelastung. Nachverdichtungen –in Form von Anbauten bei Reduzierung des Grünanteils– in diesen Bereichen sind eher kritisch zu sehen. Der Anpassungsbedarf zur Optimierung des Klimakomforts nimmt von den dunkelroten Bereichen zu den orangefarbenen Bereichen ab. In den gelben Bereichen ist der Anpassungsbedarf eher gering.

Um einen thermischen Ausgleich für die Außenräume zu schaffen, eignen sich vor allem städtische, öffentlich zugängliche Grün- und Parkanlagen mit einer hohen Aufenthaltsqualität. Die Zugänglichkeit sowie die Aufenthaltsqualität können relativ einfach gesteigert werden, indem zusätzliche Schattenplätze geschaffen werden und das Konzept der Stadt der kurzen Wege verfolgt und umgesetzt wird. Die Wege innerhalb der Stadt sollten dabei möglichst entsiegelt sein und gleichzeitig mit großkronigen, Schatten spendenden Bäumen versehen werden. Gleichzeitig sollten die vorhandenen Parks erhalten bleiben und nach Möglichkeit miteinander vernetzt werden.

In der Nacht sind die Kaltluftabflüsse die wesentlichen lokalklimatischen Faktoren für ein angenehmes Stadtklima. Daher liegt nachts der Fokus auf der Bewertung der Freiflächen mit Blick auf ihre Relevanz für die Durchlüftung der Siedlungsbereiche. Die Freiflächen sind nach aufsteigender Relevanz für die nächtliche Durchlüftung eingefärbt. Je blauer die Fläche, desto wichtiger ist diese für die Belüftung von Siedlungsgebieten. Um ihre Funktion zu erhalten, sollten diese Flächen von geschlossener Bebauung freigehalten werden. Planungen sind dort im Einzelfall abzuwägen. Dabei sind einzelne Bauwerke in diesen Bereichen möglich, sofern sie die Höhe der angrenzenden oder

umliegenden Bebauung nicht übersteigen und diese keine Riegel quer zur Strömung darstellen. In Bereichen mit geringer Rauigkeit (z.B. Wiesen, Ackerland) sind die möglichen bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten höher als in rauem Gelände (z.B. Siedlung, Wald). Hindernisse machen die Strömung turbulenter und schwächen damit die mittlere Windgeschwindigkeit. Damit sind Wasserflächen und Acker- und Grünflächen mit niedriger Vegetation und damit geringer Rauigkeit gute Luftleitbahnen. Aber auch breite langgestreckte Gleisanlagen oder breitere geradlinige Ausfallstraßen können Luftleitbahnen darstellen.

Wenn eine Luftleitbahn dazu dient, thermisch oder lufthygienisch belastete Gebiete bodennah zu belüften, wird von einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn gesprochen. Nach Mayer & Matzarakis (1992) sollen stadtklimarelevante Luftleitbahnen mindestens 1 km lang und 50 m breit und weitgehend hindernisfrei sein. Die Bedeutung der Luftleitbahnen hängt von den vorherrschenden Windrichtungen und der Durchlüftungsfunktion in thermisch belasteten Siedlungsbereichen ab. Kaltluftleitbahnen beschreiben Flächen, über die Kaltluftströmungen bodennah entlastend wirksam werden. Aber auch Kaltluftströmungen, die sich im Überdachniveau fortsetzen und in weiter stadteinwärts liegende Bereiche reichen, tragen zur Entlastung bei.

Zweibrücken wird hauptsächlich über zwei größere Kaltluftströmungen aus dem Süden über Ixheim entlang der Bickenalb und aus dem Osten, südlich von Niederauerbach belüftet. Die Luftleitbahn führt dabei über freie Wiesen und Felder, sodass sie als lufthygienisch unbelastet bewertet wird. Dabei reicht die Leitbahn bis zur Mittelbacher Straße und sorgt dort im Gewerbegebiet Süd für eine Durchlüftung. Die Wiesen und Freiflächen, die von diesen Strömungen überströmt werden sollten von weiterer Bebauung freigehalten werden, um eine nächtliche Abkühlung zu gewährleisten.

Weitere Kaltluftabflüsse verlaufen entlang des Hornbach im Bereich von Rimschweiler und entlang des Schwarzbaches. Die Kaltluftabflüsse sammeln sich im Bereich des Zweibrückener Zentrums. Ein weiterer bedeutsamer Kaltluftabfluss verläuft entlang des Bautzenbach, der tief in das Zentrum Zweibrückens eindringt und dabei vor allem die Homburger Straße, sowie die angrenzenden LuG-Gebiete belüftet.

Der Fokus der Klimaanpassung hinsichtlich nächtlicher Hitze sollte vor allem auf den roten und dunkelroten Flächen mit einer besonders hohen Betroffenheit zugutekommen. Klimaanpassung innerhalb dieser Bereiche kommt einer größeren Anzahl an Menschen zu Gute. Nachts liegt der Fokus aber vor allem auf der Kühlung der Wohnbebauung, da die Menschen sich zu dieser Zeit meist zu Hause aufhalten. Die Innenräume können dabei durch zusätzliche Fassaden- und Dachbegrünung gekühlt werden, sodass sich diese über den Tag bereits nicht so stark aufheizen. Um für eine nächtliche Abkühlung im Außenraum zu sorgen, eignet sich vor allem eine offene Bauweise und damit die Schaffung von zusätzlichen Freiflächen.

Kaltluftstau kann an Siedlungsrändern oder riegelbildenden Vegetationsstrukturen auftreten. Durch den an Barrieren auftretenden Stau von Kaltluft kann sich ein Kaltluftsee ausbilden, dessen vertikale Mächtigkeit in etwa durch die Hindernishöhe begrenzt wird. Das Frostrisiko ist in diesem Bereich erhöht, da sich die bodennahe Luft in Stagnationsbereichen stärker abkühlen kann als in Fließbereichen. Die Kaltluftstaubereiche wurden unter Berücksichtigung der bodennahen Strömung und Lufttemperatur ausgewiesen. So bilden die südlichen Siedlungsränder von Ixheim ein Hindernis für die dortige Kaltluftströmung. Weitere Hindernisse für die Kaltluftströmung finden sich im südlichen Bereich des Bautzenbachs im Übergang zu den städtischen Strukturen.

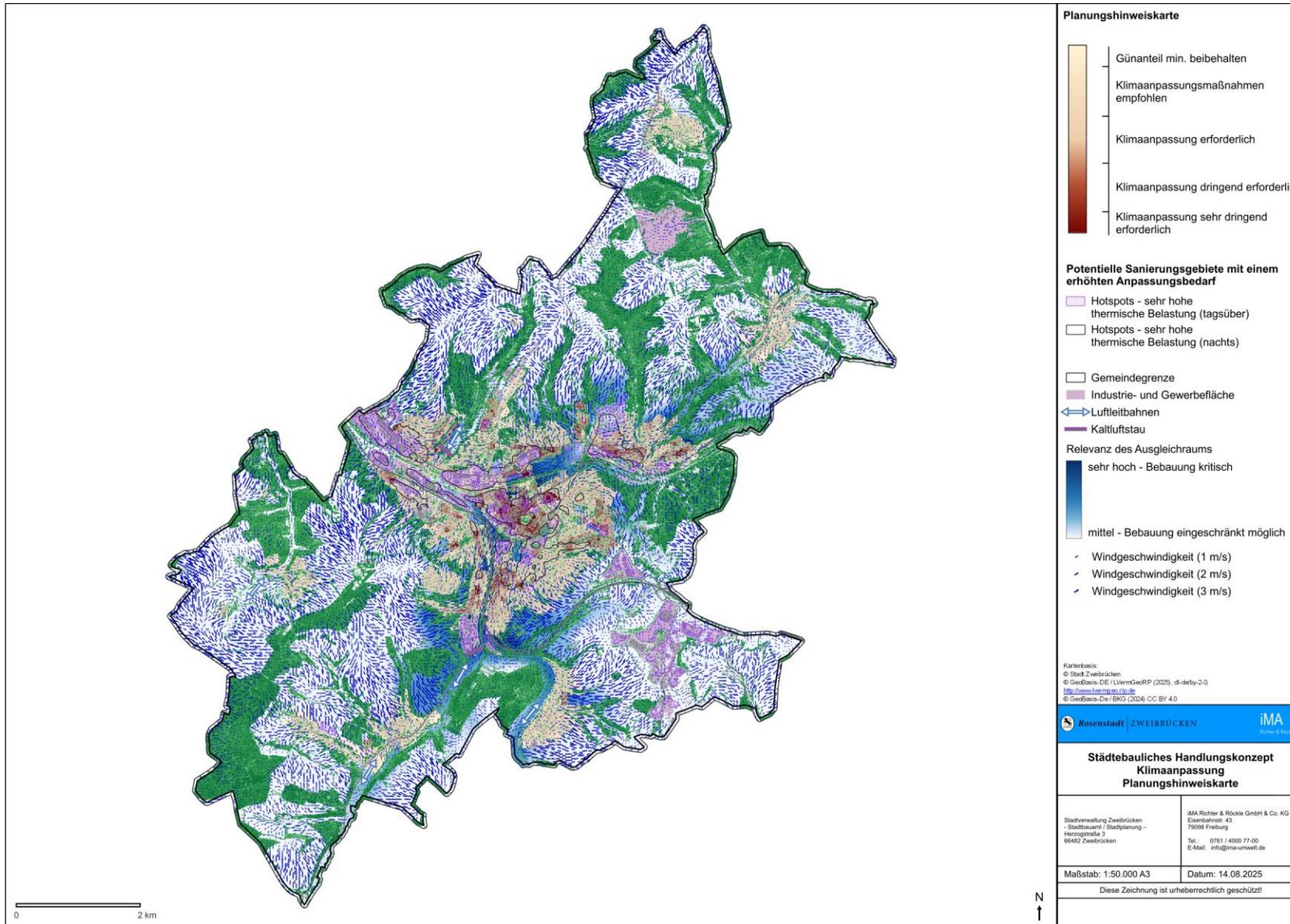


Abbildung 8-1: Planungshinweiskarte mit der bewerteten, thermischen Betroffenheit unter Berücksichtigung der Kaltluftabflüsse in Zweibrücken.

9 Handlungsstrategien für die Stadtplanung

Das Klimaanpassungskonzept ist nur ein Baustein in einem anzustrebenden Gesamtkonzept, wie mit den Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler Ebene umzugehen ist.

Hilfreich ist hierfür die Erarbeitung von Leitbildern. Diese sollen die Ziele des Klimaschutzes und der Klimaanpassung mit den Anforderungen der Menschen an ihren Wohn-, Arbeits- und Erholungsraum verknüpfen⁹.

Dieses Kapitel stellt Handlungsstrategien für die klimarelevanten Aspekte der Durchlüftung und der thermischen und der lufthygienischen Belastung zusammen. Die Strategien bzw. Empfehlungen beruhen auf den Modellergebnissen, der wissenschaftlichen Literatur, aber auch auf den Inhalten der Städtebaulichen Klimafibel (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart (2012)) oder der Regionalen Klimaanalyse der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO, Schwab & Zachenbacher (2009)).

Da es für lokalklimatische Größen keine Grenzwerte gibt und auch die Ziele (z. B. Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse, BauGB §34 Absatz 1 oder §136 Absatz 2 Punkt 1) nicht konkret formuliert sind, können Maßnahmen nicht zwingend gefordert werden. Vielmehr gilt ein Minimierungsgebot, d.h. unerwünschte Auswirkungen sind unter Beachtung anderer Anforderungen weitgehend zu reduzieren.

Bei den Handlungsstrategien handelt es sich um voneinander unabhängige Optionen. Diese können für unterschiedliche Zielsetzungen zueinander in Konflikt stehen. Zum Beispiel kann eine Begrünung des Straßenraumes mit Bäumen human-bioklimatisch positiv sein, da Wege im Schatten zurückgelegt werden können. Jedoch reduzieren Bäume den Luftaustausch im Straßenraum wodurch die Luftbelastung erhöht wird. Im Einzelfall ist daher die Wahl der Maßnahmen zu prüfen und abzuwägen, welche Ziele die größere Priorität haben.

9.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung

Eine ausreichende Durchlüftung vermeidet oder reduziert die Akkumulation von thermischen und lufthygienischen Belastungen. Dies ist insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen (z.B. autochthonen Wetterlagen) relevant. Zum einen sind hier Kaltluftproduktionsflächen und Geländeneigungen, zum anderen möglichst hindernisarme Fließwege zu belasteten Bereichen erforderlich.

Folgende Punkte tragen zum Erhalt des Luftaustauschs bei oder verbessern diesen (vgl. hierzu auch Abbildung 9-1):

- M1. Luftschneisen sollten erhalten und bei Neugestaltungen der Bebauung mit eingeplant werden. Breite Luftschneisen erhöhen die Durchlüftung und sorgen für den Abtransport von Luftbelastung. Sie ermöglichen so den Austausch aufgeheizter Luft mit kühlerer Umgebungsluft.
- M2. Siedlungsränder sollten offen gestaltet sein. Dadurch wird eine möglichst hohe Eindringtiefe der Kalt- und Frischluft erreicht.

⁹ https://www.ke-a-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Klimaanpassung/LUBW_Leitfaden_Landschaftsplan_Klimaanpassung_2018.pdf

- M3. Bei geplanter Neugestaltung eines Gebiets sollten Neubauten möglichst so ausgeführt werden, dass sich Belüftungsachsen parallel zu der vorherrschenden Windrichtung ergeben. So kann eine maximale Eindringtiefe der vorhandenen Kaltluftströmung erreicht und eine gute Durchlüftung auch der angrenzenden Gebiete gesichert werden.
- M4. Die maximale Bauhöhe sollte die umliegenden Bauhöhen nicht übersteigen. Gebäude, die über die mittlere Bauhöhe hinausragen, beeinflussen die Überdachströmung, was Auswirkungen auf die Durchlüftung der Umgebung haben kann.
- M5. Luftbelastungen wie Luftschadstoffe oder Abwärme, die im Gebiet freigesetzt werden, werden durch die Kaltluftströmung in die angrenzenden Gebiete transportiert. Wird die Kaltluft in einem solchen Fall in Wohngebiete transportiert, sollten emissionsarme Betriebe angesiedelt und/oder emissionsarme Feuerungsanlagen verwendet werden, um eine hohe Luftqualität für die Anwohner zu sichern.

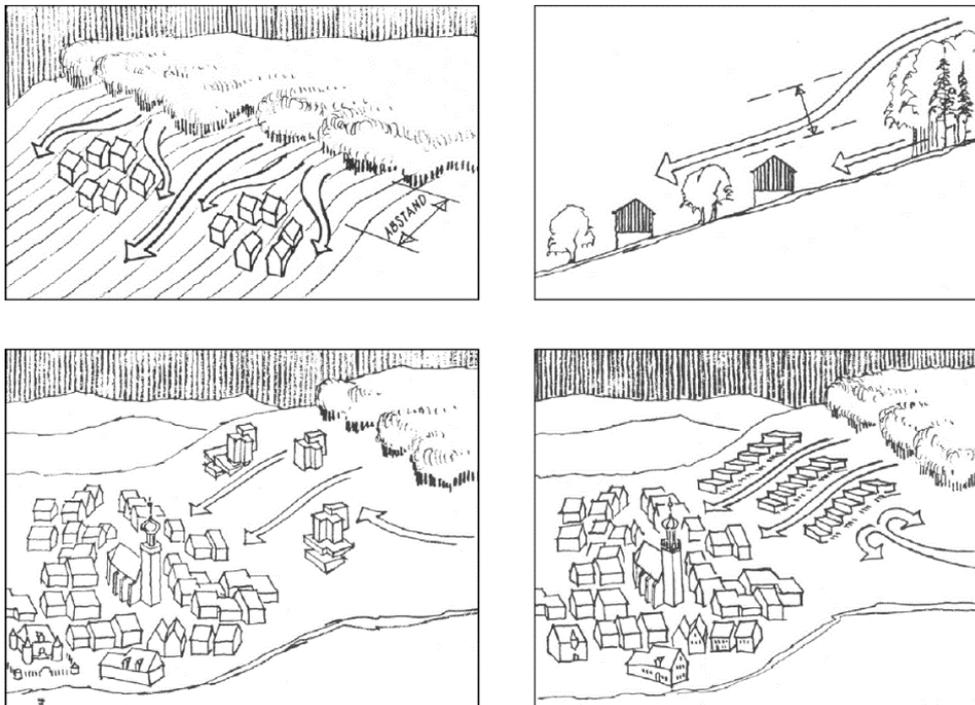


Abbildung 9-1: Empfehlungen zur Bebauung von Hanglagen aus der Städtebaulichen Klimafibel: Einhaltung eines möglichst großen Abstands von Waldrändern (oben links), Unterschreitung der Gebäudehöhe bezüglich der Höhe bestehender Hindernisse (oben rechts), bevorzugt punktförmige Bebauung (unten links) und Ausrichtung der Gebäude längs der Richtung von Hangabwinden unter Berücksichtigung anderer dominierender Windrichtungen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart (2012)).

9.2 Klimaangepasst bauen und sanieren

Neben der Gestaltung städtischer Gebiete spielt auch die bauliche Gestaltung der Gebäude selbst eine Rolle für das innerstädtische Lokalklima. Eine klimaangepasste Bauweise bzw. Sanierung von Bestandsbauten führt in erster Linie zu einer Verbesserung des Innenraumklimas des jeweiligen Gebäudes. Dies ist ein nicht zu unterschätzender Faktor, da sich die Menschen überwiegend in Innenräumen aufhalten. Die Maßnahmen haben allerdings auch Einfluss auf das Außenklima, ins-

besondere bei großflächiger Umsetzung innerhalb ganzer Stadtquartiere oder Stadtviertel. Sie tragen somit nicht nur zur Verbesserung der Situation in den einzelnen Gebäuden, sondern auch in der näheren Umgebung bei.

Maßnahmen für klimaangepasstes Bauen und Sanieren sind:

- M6. Um die Wärmespeicherwirkung der Gebäude gering zu halten, sollten Neubauten nach aktuellem GEG-Standard (GEG (2023), Artikel 18a) errichtet werden. Solche Neubauten haben in der Regel eine geringere Wärmespeicherwirkung als Bestandsgebäude. Die Gebäudeoberflächen können sich an sonnenreichen Tagen zwar stärker aufheizen, kühlen in den Nachtstunden aber schneller ab und belasten den nächtlichen Luftstrom dadurch weniger.
- M7. Eine Fassaden- oder Dachbegrünung kann helfen die Oberflächentemperaturen und somit die Lufttemperatur zu reduzieren (siehe Abbildung 9-2). Vorteile sind eine kühlere Fassaden- bzw. Dachoberfläche, zumindest solange die Vegetation die Möglichkeit der Verdunstung hat. Ausgetrocknete Begrünungen können die Temperatur nicht mehr senken und heizen sich ebenfalls auf, allerdings weniger stark als Ziegel-, Kies- oder Blechdächer. Weitere Vorteile sind die Retention von Niederschlag. Auch die Biodiversität wird gefördert. Der Effekt einer Fassaden- oder Dachbegrünung ist sehr lokal. Dachbegrünungen auf mehrgeschossigen Gebäuden können zwar für ein angenehmes Raumklima im Gebäude sorgen, der Effekt auf das Klima im Straßenraum auf Fußgängerniveau ist hingegen kaum spürbar. Die mögliche Vegetation und Retentionsfähigkeit steigt mit der Aufbaudicke an. Nachteile sind höhere Baukosten und Aufwand für die Pflege.
- M8. Eine Photovoltaik-Anlage kann in Kombination mit einer Dachbegrünung installiert werden. Die PV-Anlage schattet die Dachbegrünung ab und verringert die Verdunstung sowie den Wasserbedarf. Die dadurch kühlere Oberfläche trägt zu einer Effizienzsteigerung der PV-Anlage bei. Gleichzeitig isoliert die Dachbegrünung das Gebäude, wodurch Energie zur Heizung und Kühlung des Gebäudes eingespart werden kann. Somit stellen diese Maßnahmen eine Kombination von Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel dar.
- M9. Helle Oberflächen (z.B. Gebäudefassaden) heizen sich weniger stark auf als dunkle Oberflächen, da sie mehr kurzweilige Sonnenstrahlung zurückstreuen. Dadurch kann die Aufheizung und die Wärmespeicherung im Siedlungsgebiet weiter reduziert werden und erhöhten Lufttemperaturen in der Nacht entgegengewirkt werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es aufgrund der höheren Rückstrahlung des Sonnenlichts zu einer höheren lokalen Wärmebelastung des Menschen, der sich tagsüber auf der Fläche aufhält, kommen kann. Helle Oberflächen haben zudem eine höhere Blendwirkung als dunkle Oberflächen. Verschattende Elemente wie Gebäude und laubwerfende Bäume sind daher eine wichtige Entlastung für die sich im Siedlungsgebiet aufhaltenden Personen.

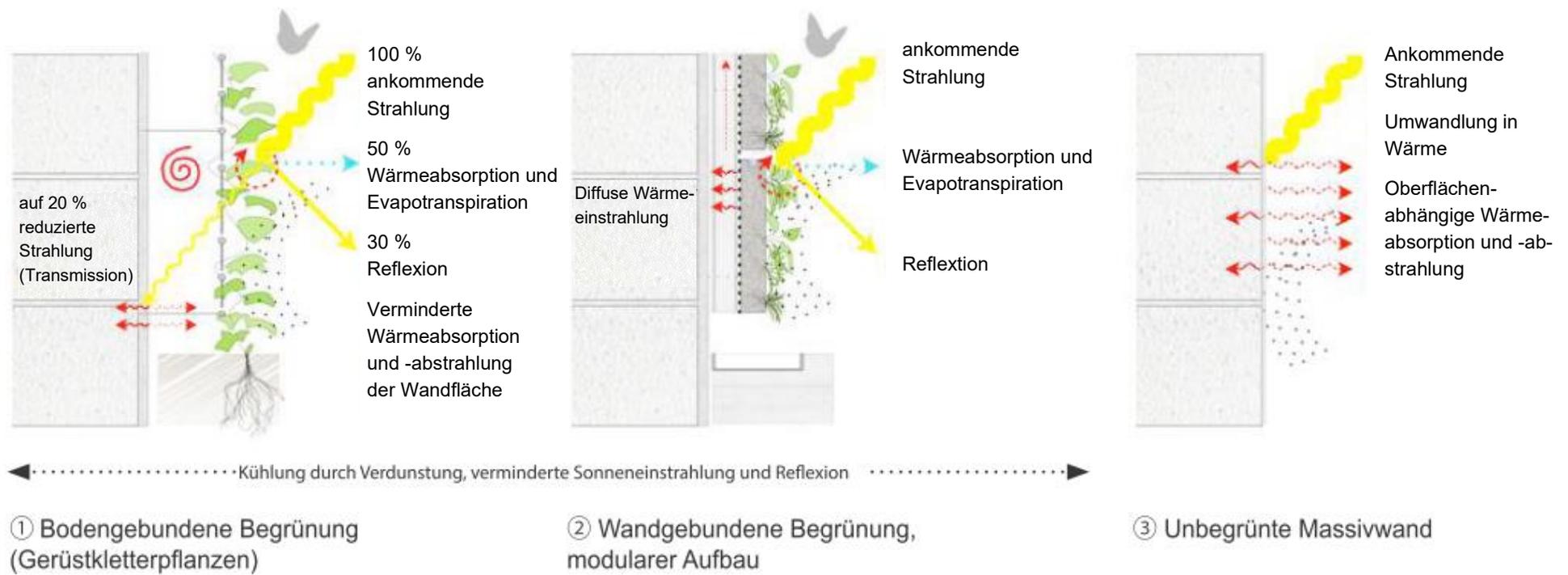


Abbildung 9-2: Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima. Erhöhte Lebensdauer der Fassade durch reduzierte Sonneneinstrahlung/UV-Belastung und Schlagregenschutz der Außenwand (© Nicole Pfoser, Dettmar, Pfoser & Sieber (2016)).

9.3 Grün- und Freiraumentwicklung

Für die Reduktion von thermischen Belastungen sollte vorrangig die Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen betrachtet werden. Die in Kapitel 9.1 genannten Handlungsstrategien zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Durchlüftung können sich darüber hinaus ebenso positiv auswirken (z.B. durch Kalt- und Frischluftzufuhr und Abtransport der Wärme). Eine höhere Windgeschwindigkeit hingegen kann die thermische Belastung des Menschen sowohl reduzieren (erhöhte Schweißverdunstung bei Hitzestress) als auch erhöhen (Auskühlung bei Kältestress).

Die hier betrachteten Handlungsstrategien beziehen sich hauptsächlich auf sommerliche Wärmebelastung. Hinsichtlich winterlicher Kältestresssituationen können Maßnahmen der REKLISO-Untersuchung (Parlow, Scherer & Fehrenbach (2006)) entnommen werden.

Generell sind Maßnahmen, die das innerstädtische Grünvolumen erhöhen und Schattenplätze schaffen, zielführend. Auch Entsiegelung, Wasserrückhaltung und Wasserspiele sind geeignete Maßnahmen, die Aufenthaltsqualität zu verbessern. Eine Erhöhung der Albedo kann die Aufheizung der Baumaterialien verringern und dadurch die urbane Wärmeinsel in den Abend- und Nachtstunden verringern. Für Mensch und Tier kann eine geringe Albedo in den Tagstunden durch die höhere Reflexion von kurzwelliger Strahlung zu einer erhöhten Wärmebelastung führen.

Folgende Punkte fokussieren sich auf die Reduktion der thermischen Belastung durch die Verbesserung der innerstädtischen Grün- und Freiflächen:

- M10. Freiflächen sollten möglichst begrünt werden. Grünflächen heizen sich tagsüber weniger stark auf als versiegelte Oberflächen. Dies führt in den Abend- und Nachtstunden zu kühleren Oberflächen und somit zu geringeren Lufttemperaturen. Wenig frequentierte Kfz-Stellflächen können beispielsweise mit Rasenpflaster o.ä. ausgeführt werden, um den Anteil an versiegelten Flächen weiter zu reduzieren. Auch die Verlagerung von Kfz-Stellflächen in begrünte Tiefgaragen oder Quartiersgaragen ermöglicht die Schaffung von mehr Grünflächen.
- M11. Um ein starkes Aufheizen von versiegelten Flächen an sonnigen Tagen vorzubeugen, können verschattende Elemente wie Bäume eingesetzt werden. Diese verringern durch ihren Schattenwurf ein übermäßiges Aufheizen und sorgen so in den frühen Nachtstunden zu niedrigeren Lufttemperaturen.
- M12. Baumbestand schützen und entwickeln (auch in Bebauungsplänen oder auf Baustellen; angepasste Baumartenwahl und offene Baumscheibe von min. 6 m² gemäß DIN 18916:2016-06 (2016)). Der Schutz des bestehenden Baumbestands ist von großer Bedeutung, da neu gepflanzte Bäume ihre Wirkung erst nach Jahrzehnten des Wachstums voll entfalten können.
- M13. Zur Reduzierung der thermischen Belastung sollten öffentliche Parkanlagen mit guter Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen (z.B. gut verschattet durch Baumbestand) zur Verfügung stehen. Parkanlagen mit kühlen Bereichen bietet der Stadtbevölkerung eine Möglichkeit der Erholung an heißen Sommertagen, wenn keine ausreichenden privaten Grünflächen zur Verfügung stehen.
- M14. Die Erreichbarkeit von Ausgleichsräumen wie Parkanlagen kann die thermische Betroffenheit der Wohngebiete reduzieren. In stark hitzebelasteten Bereichen sollte daher die

Erreichbarkeit von bereits vorhandenen Ausgleichsräumen geprüft werden und gegebenenfalls zusätzliche Ausgleichsräume geschaffen werden.

- M15. Neben dem öffentlichen Raum bieten private Gebäude und Flächen große Potenziale. In Kooperation mit den privaten Grundstückseignern sollten grüne Gärten (statt Steingärten) angelegt werden. Die Potenziale der klimaangepassten Gestaltung von Gebäuden und Begrünung von Dächern und Fassaden sind groß und sollten auch im privaten und halböffentlichen Kontext genutzt werden.
- M16. Bereitstellung von Trinkwasserbrunnen. An heißen Tagen ist in stark frequentierten Fußgängerbereichen die Möglichkeit einer ausreichenden Flüssigkeitszufuhr sinnvoll.
- M17. Förderung der Biodiversität auf Verkehrsbegleit- oder Restflächen.
- M18. Fördern des Gärtnerns in verschiedenen Formen:
 - „Essbare Stadt“-Projekte (Pflanzung von Obst-/Nussbäumen im öffentlichen Raum oder Förderung von Gärtnern in Kindergärten oder an Schulen mit Hochbeeten, Beerensträuchern oder Obstbäumen),
 - Förderung von naturnahen Privatgärten und kommunalen Grünflächen (z.B. entlang von Straßen, Verkehrsinseln), da diese oftmals trocken- und hitzeresistenter sind und Nahrung für Insekten bieten.

9.4 Prinzip „Schwammstadt“

Die Berücksichtigung des Schwammstadt-Prinzips wird durch die immer häufiger auftretenden kurzzeitigen Starkniederschläge und langanhaltenden Trockenphasen immer wichtiger. Um die Funktionalität des städtischen Grüns zu sichern, ist die Speicherung von Niederschlagswasser zur Versorgung der Vegetation elementar. Folgende Maßnahmen fördern die Umsetzung dieses Prinzips „Schwammstadt“:

- M19. Steigerung der Retention: Rückhalt eines Großteils des Niederschlagswassers im Gebiet, damit dieses für die Bewässerung zur Verfügung steht. Nur ausreichend feuchte Grünflächen können auch in Trockenperioden ihre kühlende Funktion durch Verdunstung erfüllen.
- M20. Wasserdurchlässige Gestaltung von befestigten Flächen, z.B. mittels Schotterrasen, wassergebundener Decke, Rasenpflaster, versickerungsfähige Pflaster, sodass Regenwasser oberflächlich versickern kann.

Die Wirkung einer einzelnen Anpassungsmaßnahme führt primär lokal zu einer Verbesserung des Klimas. Erst das Zusammenwirken von mehreren Maßnahmen bewirkt einen Rückgang der städtischen Wärmeinsel. Besonders effizient sind Verschattungsmaßnahmen sowie unversiegelte Flächen, die eine Umsetzung der eingehenden Sonnenenergie in Verdunstungswärme (latenter Wärmefluss*) anstatt einer Erhöhung der Temperatur (fühlbarer Wärmefluss) bewirken.

Nicht zu unterschätzen sind die psychologischen Wirkungen innerstädtischer Grünbereiche, die evtl. lokalklimatisch kaum Bedeutung haben, aber die Aufenthaltsqualität positiv beeinflussen.

Klimaschutz- und Adaptationsmaßnahmen können einerseits konkurrieren (Solaranlage vs. Dachbegrünung) und sich andererseits auch ergänzen. In Tabelle 9-1 wird diese sich ergänzende Wirkung am Beispiel von städtischen Begrünungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 9-1: Wirkungskatalog von Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich des Klimaschutzes und der Klimaanpassung.

Wirkungen bezüglich Klimaschutz	Wirkungen bezüglich Klimaanpassung	Sonstige Wirkungen
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sauerstoffproduktion 2. Kohlenstoffspeicherung 3. Verbesserung der CO₂-Bilanz <ul style="list-style-type: none"> - durch Photosynthese - durch Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs - durch Lebensdauererlängerung von Materialien durch Abschattung materialschädigender UV-Strahlung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stadtbegrünung 2. Grünflächen mit geringer Rauigkeit dienen als Luftleitbahnen und tragen zur besseren Durchlüftung bei 3. Reduktion des Energiebedarfs (Klimaanlage und Heizbedarf) 4. Erhöhte Verdunstung = verringerte Aufheizung der künstlichen Materialien sowie geringer Anstieg der Lufttemperatur 5. Kühlung durch Verschattung 6. Verringerung der urbanen Wärmeinsel 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verringerte Schallreflexion 2. Attraktiverer Lebensraum 3. Verringerung der Luftbelastung durch verbesserte Durchlüftung und Reduktion des Energiebedarfs

9.5 Klimaanpassungsmaßnahmen für Industrie- und Gewerbegebiete

- M21. Dachbegrünung mit ausreichend Substratdicke in Kombination mit PV-Anlagen. Steigerung der Retention.
- M22. Aufgeständerte, bodengebundene Fassadenbegrünung vor Süd- bis Südwest-ausgerichteten Fassaden. Bewässerung durch (gespeichertes) Regenwasser.
- M23. Abschattung der Fenster vor Süd- bis Südwest-ausgerichteten Fassaden. Künstlich oder durch Baumpflanzungen mit ausreichend großen Baumscheiben.
- M24. Verringerung des Versiegelungsgrads z.B. durch Entsiegelung von Stellplätzen oder Bau von Parkhäusern. Verbesserung des ÖPNVs und Radwege zur Verringerung des Stellplatzbedarfs. Abschattung von Stellplätzen durch Bäume mit ausreichend großen Baumscheiben.
- M25. Wasserdurchlässige Gestaltung von befestigten Flächen, z.B. mittels Schotterrasen, wassergebundener Decke, Rasenpflaster, versickerungsfähige Pflaster, sodass Regenwasser oberflächlich versickern kann.
- M26. Installation von Pocket-Parks zur Steigerung der Aufenthaltsqualität. Schaffung von Pausen-Plätzen.

- M27. Helle Oberflächen, Verwendung von Materialien mit geringer Wärme-Speicherkapazität.
- M28. Nachverdichtung von bestehenden Gewerbegebieten durch Aufstockung/Bebauung von Parkplätzen oder Konversion vor Bebauung von Freiflächen im Außenbereich.

Der Maßnahmenkatalog stellt überwiegend grundsätzlich mögliche Maßnahmen zusammen, um das lokale Stadtklima zu schützen und zu verbessern. Die Konkretisierung der Maßnahmen kann beispielsweise in einer Klimaanpassungsstrategie erarbeitet werden. Dies erfordert jedoch die Zusammenarbeit verschiedener Akteure, insbesondere aus dem Bereich der Grün- und Stadtplanung. Nicht zuletzt ist es wichtig die Bürgerschaft bei den anstehenden Anpassungsstrategien mitzunehmen.

In dem integrierten Klimaanpassungskonzept (kurz: KAnK ZW) wurden partizipativ weitere Handlungsstrategien und Maßnahmen mit und für die Stadt Zweibrücken erarbeitet. Das Klimaanpassungskonzept ist ein Baustein, wie mit den Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler Ebene umgegangen werden soll.

Freiburg, den 10.09.2025



Dr. Christine Ketterer
Fachlich Verantwortliche Klima
M.Sc. in Climate Sciences



Dr. Marcel Gangwisch
Sachverständiger
M.Sc. in Umweltwissenschaften



Dr. Markus Hasel
Stellv. fachlich Verantwortlicher Klima
Diplom-Meteorologe



Tobias Gronemeier
Modellentwickler Palm, Sachverständiger
M. Sc. Meteorologie



Dr. Rainer Röckle
Geschäftsleitung
Diplom-Meteorologe

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt. Der Bericht oder Teile daraus dürfen nur für das vorliegende Projekt vervielfältigt oder weitergegeben werden.

10 Literatur

- Basu, R.** (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health* (8)1: 40.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)** (2023): Grundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung schaffen. Methoden und Werkzeuge der Klimaanalyse im besiedelten Raum.
- Christen, A.** (2019): Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler, and A. Matzarakis (Eds), *Warnsignal Klima: Die Städte.*, S. 36–42.
- Christidis, N., G.S. Jones & P.A. Stott** (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change* (5)1: 46–50.
- Dettmar, J., N. Pfoser & S. Sieber** (2016): Gutachten Fassadenbegrünung. TU Darmstadt, 100S.
- Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft e. V., Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, & klimafakten.de eds.** (2023): Was wir heute übers Klima wissen: Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind.
- DIN 18916:2016-06** (2016): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten.
- Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG)** (2024): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse.
- Fuss, S., J.G. Canadell, G.P. Peters, M. Tavoni, R.M. Andrew, P. Ciais, R.B. Jackson, C.D. Jones, F. Kraxner, N. Nakicenovic, C. Le Quéré, M.R. Raupach, A. Sharifi, P. Smith & Y. Yamagata** (2014): Betting on negative emissions. *Nature Climate Change* (4)10: 850–853.
- GEG** (2023): Gesetz zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor vom 20. Juli 2022. *Bundgesetzblatt Jahrgang 2022 Teil I Nr. 28*, ausgegeben am 28. Juli 2022.
- Gerhards, I., S. Philippi, N. Scheck, S. Singer-Posern & M. Voll** (2013): Modellgestützte Klimanalysen und –bewertungen für die Regionalplanung. Modellvorhaben der Raumordnung „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ (klamis).
- Grize, L., A. Huss, O. Thommen, C. Schindler & C. Braun-Fahrländer** (2005): Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly* (135): 200–205.
- an der Heiden, M., S. Muthers, H. Niemann, U. Buchholz, L. Grabenhenrich & A. Matzarakis** (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* (62)5: 571–579.
- Hewitt, C.D.** (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Transactions American Geophysical Union* (85)52: 566.
- IPCC ed.** (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC ed.** (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Köppen, W.** (1936): Das geographische System der Klimate. In: W. Köppen and R. Geiger (Eds), *Handbuch der Klimatologie*. Gebrüder Bornstraeger, Berlin, S. C1–C44.
- Matzarakis, A. & H. Mayer** (1997): Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology* (41)1: 34–39.
- Mayer, H. & P.R. Höppe** (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* (38)1: 43–49.
- Mayer, H. & A. Matzarakis** (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet: (Forschungsvorhaben STADTLUFT) Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München (Ed).
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg** (2023): Anforderungen für die Erstellung von kommunalen Klimaanalysen im Fördermodul B von KLIMOPASS.
- Moss, R.H., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J.A. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, E. Lin, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J.F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P.J. Runci, R. Stouffer, D. VanVuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J.P. van Ypersele & M. Zurek** (2008): *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins & D.A. Stainforth** (2004): Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* (430)7001: 768–772.
- Parlow, E., D. Scherer & U. Fehrenbach** (2006): Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (REKLISO): Wissenschaftlicher Abschlussbericht.
- Revi, A., D.E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R.B.R. Kiunsi, M. Pelling, D.C. Roberts & W. Solecki** (2014): Urban areas. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (Eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 535–612.
- Robine, J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel & F.R. Herrmann** (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* (331)2: 171–178.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger & C. Appenzeller** (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* (427)6972: 332–336.
- Schwab, A. & D. Zachenbacher** (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO): Wissenschaftlicher Abschlussbericht.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1** (2015): *Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1:2015-09.

- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2** (2022): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2:2022-06.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5** (2003): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5:2003-12.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10** (2010): Umweltmeteorologie - Human- biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10:2010-03.
- van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith & S.K. Rose** (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* (109)1: 5.
- Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGREGOR, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding & F. Kimura** (2004): Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* (82)6: 1599–1628.
- Weischet, W. & W. Endlicher** (2018): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin Stuttgart.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart** (2012): Städt- bauliche Klimafibel. URL: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>.
- Zander, K.K., W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellström & S.T. Garnett** (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change* (5)7: 647–651.

Glossar

Fachbegriffe, die im Glossar genauer erläutert werden, sind bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit einem „*“ gekennzeichnet.

Anthropogen	Durch den Menschen verursachte Einflüsse.														
Atmosphärische Gegenstrahlung	Der Anteil der langwelligen Strahlung, der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde gerichtet ist.														
Atmosphärische Grenzschicht	Als atmosphärische Grenzschicht (auch planetare Grenzschicht) wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 500 m – 2000 m der Atmosphäre reicht, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Der Mittelwert der Höhe beträgt ca. 1000 m. In der atmosphärischen Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.														
Ausbreitungsklasse	Die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier charakterisiert die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre. Die thermische Schichtung bestimmt neben der Bodenrauigkeit die atmosphärische Turbulenz, die ein Maß für das "Verdünnungsvermögen" der Atmosphäre ist.														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Klasse</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>III₁</td> <td>stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter</td> </tr> <tr> <td>III₂</td> <td>leicht labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>mäßig labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre</td> </tr> </tbody> </table>	Klasse	Beschreibung	I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	III ₁	stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter	III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung	IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung	V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre
Klasse	Beschreibung														
I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
III ₁	stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter														
III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung														
IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung														
V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre														
Autochthone Wetterlagen	Windschwache, wolkenlose Strahlungswetterlagen (Hochdruckgebiet), bei denen sich lokalklimatische Besonderheiten im Mikro- und →Mesoklima ausprägen.														
Belastungsraum	→ Wirkungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet ist														
Bergwind	Talabwind: Nachts kühlt sich die Luft in Tälern stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt zunächst die Hänge hinunter (Hangabwind), sammelt sich in den Geländeeinschnitten und Tälern und fließt schließlich als Bergwind talabwärts. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und hält bis kurz nach Sonnenaufgang an.														
Eistage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur unter 0 °C liegt, d.h. es herrscht durchgehend Frost.														
Frischluff	Herantransportierte Luft, die geringer durch Luftschadstoffe belastet ist als die vorhandene Luft.														
Frosttage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Minimum der Lufttemperatur < 0 °C beträgt.														
Geostrophischer Wind	Wind, der außerhalb der Reibung der Erdoberfläche weht und sich mit dem Luftdruckgradient und der Coriolis-Kraft (eine Scheinkraft hervorgerufen durch die Erdrotation) im Gleichgewicht befindet.														

Grün-blaue Infrastruktur	Grüne Infrastruktur umfasst Elemente wie Parks, Bäume, private Gärten, Fassaden- und Dachbegrünung und Wälder. Zur blauen Infrastruktur gehören Fließ- und Stehgewässer, aber auch Wassermanagementsysteme zur Regenwasserrückhaltung (Mulden, Regenrückhaltebecken, ungebundene Schotterdecken) oder Überflutungsflächen.
Hangwind	Hangabwind/Hangaufwind sind Teil der Berg-/Talwindzirkulation. Sie setzen schon kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten Ausgleichsströmung zwischen Tal und Vorland als → Bergwind (nachts) bzw. → Talwind (tags) ein.
Heiße Tage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt.
Human-Biometeorologie	Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation transportiert. → Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab.
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter → Kaltluft. Dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen → Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (→ Wirkungsraum) von Bedeutung sind (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)).
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei autochthonen Wetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftproduktionsrate	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur → Kaltluftbildung. Die Stärke der Kaltluftbildung kann über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche erfolgen.
Klimavielfalt	Fußläufige Erreichbarkeit von öffentlich zugänglichen Grün- und Freiflächen mit Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen für die Stadtbewohner.
Klimatop	Fläche mit einer einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaft werden in der Landschaftsökologie sowie in der Stadtklimatologie als Klimatop bezeichnet (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)).
Konvektion	Vertikaler Luftaustausch; Aufsteigen erwärmter Luftmassen bei gleichzeitigem Absinken kälterer Luft in der Umgebung.
Latenter Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in die Verdunstung von Wasser, ohne eine Änderung der Lufttemperatur zu bewirken.
(Luft-) Leitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer → Rauigkeit, d.h. frei von flächiger Bebauung und hoher, dichter Vegetation (z.B. Wälder).

Lufttemperatur	Physikalisch betrachtet ist die Lufttemperatur ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens. Dieser wird bestimmt durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Molekularbewegung in der Luft. Je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, umso höher ist auch seine Lufttemperatur.
Median	Der Median oder Zentralwert bezeichnet einen Mittelwert. Der Median ist der mittlere Wert aus einer Liste an Werten, wenn diese der Größe nach sortiert werden. Der Median teilt demnach die Liste von Werten genau in der Mitte.
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich sub-regional bis lokal innerhalb der atmosphärischen →Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischet & Endlicher (2018)).
Mikroklima	Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das Großklima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei → autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.
Morbidität	Häufigkeit der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung.
Mortalität	Sterblichkeit, Sterberate der Bevölkerung.
Neutrale (Indifferente) Schichtung	Eine neutrale oder indifferente Schichtung liegt vor, wenn ein Luftpaket bei Vertikalbewegungen stets die gleiche Temperatur wie die Umgebungsluft aufweist.
Phänologische Phase	Die Phänologie befasst sich mit den Entwicklungserscheinungen der Natur, die aufgrund der Jahreszeitenwechsel auftreten. Die Phänologischen Phasen bezeichnen dabei die verschiedenen Phasen innerhalb eines Jahres, z.B. die Frühlingsphase, welche mit dem Austrieb der Pflanzen gekennzeichnet ist.
Perzentil	Ein Perzentil ist ein Wert auf einer Skala von Null bis Hundert, der den Prozentsatz an Datensatzwerten angibt, der gleich oder niedriger als er selbst ist. Das Perzentil wird oft genutzt, um die Extremwerte einer Verteilung abzuschätzen. So kann z.B. das 90. (10.) Perzentil verwendet werden, um die Schwelle für die oberen (unteren) Extremwerte zu bezeichnen
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur. Ein Index zur Beschreibung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz.
Rauigkeit	Ein Maß für die Rauigkeit ist der z_0 -Wert, der in Meter angegeben wird. Er beschreibt die Wirkung von Vegetation und Bebauung auf die bodennahe Strömungsreduktion.
KAnK ZW	Integriertes Klimaanpassungskonzept in Zweibrücken. Die Stadtklimaanalyse ist ein wesentlicher Grundstein für das IKAK. Dieses betrachtet die wichtigsten Änderungen im Zuge des Klimawandels und erarbeitet ein Handlungskonzept für die zukünftige städtebauliche Planung, um die Stadt Zweibrücken resilient für die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu gestalten. Die Hauptaspekte sind dabei Anpassungen an vermehrte Starkregenereignisse und Hitzeperioden.
Sommertag	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt.

Strahlungsantrieb	Netto-Strahlungsflussdichte an der Tropopause, welche z.B. durch die veränderte Konzentration von Treibhausgasen zustande kommt.
Strahlungsbilanz	Die Strahlungsbilanz ist die Differenz aus der Einstrahlung und Ausstrahlung auf eine Oberfläche. Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche wird dabei hauptsächlich von der solaren, kurzwelligen Einstrahlung und der terrestrischen, langwelligen Ausstrahlung bestimmt.
Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde in der zweiten Nachthälfte.
Urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während → autochthonen Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte ist ein Maß für die Menge der abfließenden → Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit.
Vulnerabilität	Die Vulnerabilität bezeichnet die Verwundbarkeit oder Verletzbarkeit der Bevölkerung aufgrund von klimatischen Extremereignissen wie beispielsweise Hitzeperioden.
Wahre Ortszeit	Die auf den Sonnenstand bezogene Zeit. Die Sonne steht um 12:00 Uhr wahrer Ortszeit im Zenit.
Wärmebelastung	Wärmebelastung liegt vor, wenn der menschliche Organismus Probleme bekommt, die Kerntemperatur von 37 °C zu halten. Die Wärmebelastung wird anhand von Wärmehaushaltsmodellen des Menschen ermittelt. Dabei gehen neben physiologischen Größen die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Strahlungsströme und die Windgeschwindigkeit ein. Besondere Belastungssituationen ergeben sich insbesondere bei einer längeren Dauer der Wärmebelastung, z.B. in Hitzeperioden.
Wirkungsraum	Raum, in den die → Kaltluft oder → Frischluft eindringt. Ist der Wirkungsraum bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet wird er auch als → Belastungsraum oder belasteter Wirkungsraum bezeichnet.