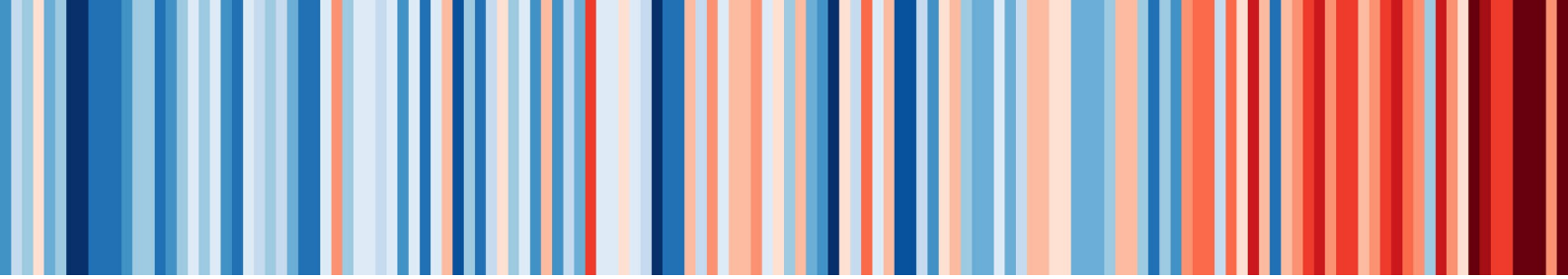


Stadtklimaanalyse Stadt Bensheim

Mai 2026



gefördert durch

HESSEN

Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat

Klimaplan Hessen WIR ZEIGT WIRKUNG!

Bearbeitung

Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI)
info@bpi-kassel.de | www.bpi-kassel.de

Dipl.-Biol. Nicole Burghardt, M.Sc. ULM	Joann Richtzenhain, M.Sc.
Dr.-Ing. René Burghardt	Alexander Burakow, M.Sc.
Frederik Hilden, M.Sc.	Kiara Thielemann

Insofern nicht anders angegeben, gilt für alle Abbildungen, Diagramme und Tabellen als Quelle: **Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI) 2026**

in Zusammenarbeit mit

dem Magistrat der Stadt Bensheim
Team Klimaschutz, Umwelt & Energie

Claudia Krämer

Auftraggeberin (AG)
Magistrat der Stadt Bensheim
Team Klimaschutz, Umwelt & Energie

Kontakt
Claudia Krämer
Claudia.Kraemer@bensheim.de

Auftragnehmer (AN)
Burghardt und Partner, Ingenieure
Am Sonnenhang 4
D – 34128 Kassel

Kontakt
Dr.-Ing. René Burghardt
info@bpi-kassel.de

Überlassungserklärung

Hiermit überträgt der AN der AG die Nutzungsrechte der vorliegenden Ausarbeitung inklusive aller Karten- und Planwerke sowie der erstellten und übermittelten Daten.

Inhaltliche Änderungen seitens der AG müssen als solche klar gekennzeichnet werden. Die Änderungen dürfen nicht zu Miss- oder Fehlinterpretationen der Ergebnisse und Aussagen der Stadtklimaanalyse führen.

Die Urhebernennung für das erbrachte Werk und / oder Teilen daraus ist obligatorisch und dessen Einhaltung obliegt der Verantwortung der AG.

gez. Dr.-Ing. R. Burghardt Kassel, im Mai 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

1.1 Auftragsgegenstand 4

1.2 Vorbemerkung zur Handhabung der Stadtklimaanalyse 4

2 Fachlicher Hintergrund 6

2.1 Stadtklima 6

2.2 Temperatur und städtische Wärmeinsel 8

2.3 Vegetation und städtisches Grün 10

2.4 Regionaler Wind und städtische Durchlüftung 11

2.4.1 Rauigkeit und Porosität 11

2.4.2 Luftleitbahnen und Strömungsregime 13

2.5 Flurwinde und Kaltluft 15

3 Methodisches Vorgehen und verwendete Software 18

3.1 Methodisches Vorgehen 18

3.1.1 Historische Klimadatenauswertung 20

3.1.2 Projizierte Klimadatenauswertung 22

3.1.3 Ableitung der Klimaanalysekarte 26

3.1.4 Ableitung der Planungshinweiskarte 27

3.2 Technische Umsetzung 28

3.3 Verwendete Software 30

3.3.1 Geoinformationssystem 30

3.3.2 Kaltluftsimulationen 30

3.3.3 Windfeldsimulationen 31

4 Charakterisierung des Untersuchungsraums 32

4.1 Charakterisierung der Stadt und Region 32

4.2 Naturräumliche Einordnung 33

5 Klimatisch-planerische Analysen 35

5.1 Klimatische Charakterisierung der Region 35

5.1.1 Temperatur und Niederschlag 36

5.1.2 Kenntage 44

5.1.3 Windverhältnisse 46

5.2 Bebauungsanalysen 52

5.2.1 Urbane Morphologie 52

5.2.2 Grundflächenzahl und Geschossflächenzahl 55

5.3 Vegetationsanalysen 59
5.4 Klimatische Analysen 63
5.4.1 Kaltluftentstehung und Kaltlufttransport 63
5.4.2 Bodennahe nächtliche Lufttemperatur 69
6 Klimatischer Bestand und Szenarien 72
6.1 Klimaanalysekarte 72
6.2 Klimaprojektionen für die Region Bensheim und Hessen 78
6.2.1 Lufttemperatur und Niederschlag 81
6.2.2 Klimatische Kenntage 84
6.2.3 Bewertung der potenziellen klimatischen Veränderungen in Bensheim 88
7 Analysen und Planungen 90
7.1 Vulnerabilitätsanalysen 90
7.2 Planungshinweiskarte und Maßnahmenempfehlungen 95
8 Zusammenfassung 102
9 Anhang 9-1
9.1 Glossar 9-1
9.2 Ergänzende Detailkarten zum Thema Kaltluft 9-5
9.3 Literaturverzeichnis 9-12
9.4 Verzeichnis der ergänzenden Literatur / Quellen 9-16
9.5 Abbildungsverzeichnis 9-17
9.6 Tabellenverzeichnis 9-22

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausführung
%	Prozent
&	und
<	kleiner
>	größer
≤	kleiner gleich
≥	größer gleich
°	Grad
°C	Grad Celsius
AG	Auftraggeber | Auftraggeberin
ALKIS	Amtlichen Liegenschaftskataster Informationssystem
AN	Auftragnehmer | Auftragnehmerin
B	Bundesstraße
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
bspw.	beispielsweise
ca	circa
Cl-Green	Green Chlorophyll Index
cm	Zentimeter
D	Deutschland
d.h.	das heißt
DJF	Dezember, Januar, Februar
DOP	digitaler Orthophotos
Dr.	Doktor | Doktorin
DWD	Deutscher Wetterdienst
etc.	et cetera
GCM	Global Climate Models
gez.	gezeichnet
GFZ	Geschossflächenzahl
GIS	Geoinformationssystem
GRZ	Grundflächenzahl
ha	Hektar
HBO	Hessischen Bauordnung
HLNUG	Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
i.d.R.	in der Regel
ID	Identifikation
Ing.	Ingenieur | Ingenieurin
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
IR	Infrarot
JJA	Juni, Juli, August
K	Kelvin
KAnG	Bundes-Klimaanpassungsgesetz
KFK	Klimafunktionskarte
km	Kilometer
l	Liter
LBO	Landesbauordnung
LT	Lufttemperatur
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
Max.	Maximum
Min.	Minimum
mind.	mindestens
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahinfrarotbereich
Nr.	Nummer
Phvar	städtische Porosität
ppm	parts per million
PrMAX	Niederschlagsmaximum (precipitation maximum)
PrMIN	Niederschlagsminimum (precipitation minimum)
RCM	Regional Climate Models
RCP	Representative Concentration Pathways
rd.	rund
RL	Richtlinie
s	Sekunde
sog.	sogenannten
u.a.	unter anderem
UC	urban canopy
UCL	urban canopy layer
UTC	Koordinierte Weltzeit (coordinated universal time)
v.a.	vor allem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
VWG	Verwaltungsgrenzen
W	Watt
z.B.	zum Beispiel
Z0	Rauigkeitslänge
Zd	Nullpunktverschiebung
zu	Windgeschwindigkeit

1 Einleitung

1.1 Auftragsgegenstand

Im Zuge des voranschreitenden Klimawandels ist es für Städte, Gemeinden und Kommunen von besonderer Bedeutung, die aktuelle klimatische Situation sowie die projizierten klimatische Veränderungen in ihrer strategischen Entwicklungsplanung zu berücksichtigen, um negative klimatische Einflüsse zu reduzieren und positive Effekte oder Synergien zu fördern.

Ein geeignetes Instrument hierfür ist die Stadtklimaanalyse. Die Stadtklimaanalyse ist eine hoch aufgelöste, evidenzbasierte und räumlich verortete Bestandsanalyse, die den Untersuchungsraum hinsichtlich unterschiedlicher klimatischer Aspekte beschreibt, analysiert und bewertet. Neben dem klimatischen Status quo wird auch die mögliche klimatische Entwicklung des Raums durch Klimaprojektionen betrachtet. Die hieraus resultierenden Handlungsempfehlungen dienen den Planungsbeauftragten später als Grundlage für eine zielgerichtete, realitätsnahe und individualisierte Klimaanpassung im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung.

Die Etablierung eines zielgerichteten, klimabewussten städtischen Leitbildes ist auch für die Stadt Bensheim von besonderem Interesse, da im Stadtgebiet ein dringender Handlungsbedarf im Bereich der Klimaanpassung identifiziert wurde. Ausgehend von den Ersteinschätzungen, die auf den kürzlich vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) veröffentlichten Hitzekarten basieren, wird Bensheim anhand der Landesoberflächentemperaturen als stark belastetes Gebiet eingestuft.

Für die Entwicklung einer qualifizierten Klimaanpassungsstrategie, zu der Kommunen auch durch das Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG) 2023 [1] verpflichtet wurden, ist die Stadt Bensheim zunächst auf die dezidierte Untersuchung der klimatischen Bestandssituation mit der Stadtklimaanalyse angewiesen.

Für die Erstellung der Stadtklimaanalyse wurde der Stadt daher vom Land Hessen im Rahmen der Richtlinie zur Förderung von kommunalen Klimaschutz- und Klimaanpassungsprojekten sowie von kommunalen Informationsinitiativen (Teil II Nr. 2 der Förderrichtlinie) eine Förderung bewilligt.

1.2 Vorbemerkung zur Handhabung der Stadtklimaanalyse

Der vorliegende Bericht zur Stadtklimaanalyse hat drei thematische Schwerpunkte.

Zunächst werden allgemeine fachliche Hintergründe und die angewandten Methodiken erläutert (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3). In den Kapiteln 4, 5 und 6.1 folgt die klimatische Bestandsanalyse, die aus der Auswertung verschiedener meteorologischer Messdaten und mehrerer Themenkarten besteht, welche schließlich in der Klimaanalysekarte zusammengeführt werden. Der finale Teil schließt den Bericht mit der Auswertung unterschiedlicher Klimaprojektionen und Szenarien (vgl. Kapitel 6.2), einer Vulnerabilitätsanalyse (vgl. Kapitel 7.1) und der Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 7.2) mit Handlungsempfehlungen für die Stadt Bensheim ab.

Damit die generierten Karten- und Planwerke auch abseits des Themas „Klima“ und „Klimaanpassung“ einen Mehrwert für die Kommune darstellen, werden sie außerdem als einzelne digitale Karten mit einer technischen Beschreibung bereitgestellt.

Alle Berechnungen und Analysen werden final der Stadt Bensheim als GIS- Daten zum Import in das kommunale GIS zur Verfügung gestellt.

2 Fachlicher Hintergrund

2.1 Stadtklima

Der städtische Siedlungsraum unterscheidet sich hinsichtlich seiner klimatischen Wirkungsweise deutlich von seinem unbebauten Umfeld (siehe Abbildung 1). In Städten und Ballungsräumen herrscht das sogenannte Stadtklima. Dieses ergibt sich aus der menschengemachten Modifikation des natürlichen Mesoklimas (Lokalklimas) und weiteren standortbedingten stadtklimatischen Veränderungen durch Bebauung, Abwärme, Luftbeimengungen etc. Das Mikroklima (Kleinklima) (vgl. Kapitel 3) wird dagegen mitunter standortbedingt von den stadtklimatischen Veränderungen der urbanen Bebauung, Abwärme, Luftbeimengungen u.a. beeinflusst [2].

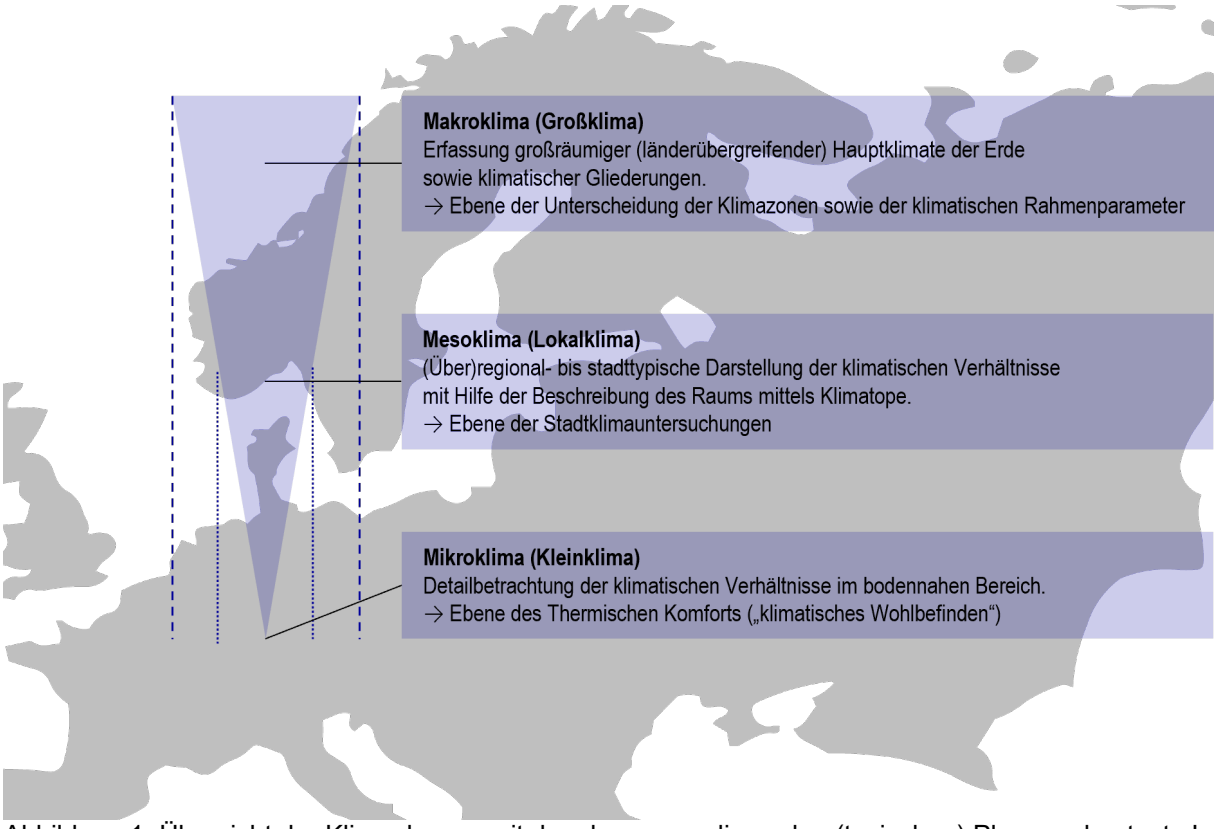


Abbildung 1: Übersicht der Klimaebenen mit dem korrespondierenden (typischen) Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten.

Das Stadtklima wirkt sich wiederum auf die meso- und mikroklimatische Ebene aus, wobei seine konkrete Ausprägung in Abhängigkeit von den vorhandenen Klimaeinflussfaktoren (z.B. Strahlungsintensität, Neigung der Erdachse) und der Stadtcharakteristik (Klimamodifikatoren, siehe Tabelle 1) variiert. Hiervon unterscheiden sich einige Parameter, z.B. in Bezug auf einzelne Stadtteile nur wenig (z.B. Sonneneinstrahlung, Niederschlag); andere wiederum, die direkt durch das Wärmespeichervermögen von Baustoffen, die Versiegelung des Bodens oder anthropogene Abwärme, etc. beeinflusst werden, können spürbar große Unterschiede aufweisen.

Tabelle 1: Beispiele für typische (anthropogene) Modifikationen / Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen / Risiken (rechte Spalte) im städtischen Raum.

Parameter | Ursache	Wirkung | Risiko
Beeinflussung durch Oberflächengeometrie, aerodynamische Rauigkeit, Wärmeinseleffekt	- Windfeldveränderungen - Turbulenzen - ..
Oberflächenversiegelung	- Reduzierte Retentionsfähigkeit (kumulativ) - Gefahr von Überschwemmungen - ..
Oberflächenversiegelung, geringer Grünflächenanteil	- Reduzierte Verdunstung - ..
Reduzierte Retentionsfähigkeit	- Gefahr von Überschwemmungen - ..
Reduzierte Verdunstung und erhöhte Wärmespeicherung durch Bebauung	- Temperaturerhöhung - ..
Temperaturerhöhung	- Vorhandensein wärmeliebendere Pflanzen (Zunahme Invasiver Arten) - Hitzestress, thermische Belastung - Anstieg der hitzebezogenen Vulnerabilität unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen (vgl. Kapitel 7.1) - ..

2.2 Temperatur und städtische Wärmeinsel

Ähnlich unterschiedlich wie die Ursachen sind auch die Auswirkungen des Stadtklimas auf Menschen, Tiere, Pflanzen und die unbelebte Natur (z.B. Gebäude). Hierbei muss beachtet werden, dass klimatische Faktoren wie bspw. die Lufttemperatur oder die Luftfeuchte zum einen vom Organismus physiologisch und zum anderen von jedem Menschen subjektiv wahrgenommen werden. Diese subjektive Wahrnehmung wird wiederum durch viele unterschiedliche Aspekte, wie bspw. das Geschlecht, das Alter oder das Gewicht, aber auch die Herkunft bzw. den Lebensraum oder Erkrankungen geprägt. Aus humanphysiologischer Sicht stellt eine Überhitzung des Körpers über 40 °C eine starke Belastung dar. Ab 42 °C ist sie lebensgefährlich.

Obwohl nicht alle Eigenschaften des Stadtklimas generell schädlich sind, werden viele der stadtklimatischen Wirkungskomplexe wegen ihrer Auswirkung auf die Gesundheit der Stadtbewohner, das Wohlbefinden oder die städtische Infrastruktur als negativ empfunden. Ein solcher Wirkungskomplex ist der städtische Wärmeinseleffekt, der aus der Wechselwirkung von verschiedenen Faktoren und Effekten im urbanen Kontext resultiert. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Städte tragen stets zur Erwärmung der Lufttemperatur bei; im Jahresmittel sind sie durchschnittlich um 1 bis 2 °C wärmer als die sie umgebende Landschaft [3] und [4]. Der Mittelwert der Lufttemperatur wird langfristig durch urbane Charakteristika, wie die Bebauung und die damit einhergehende Bodenversiegelung, beeinflusst (siehe Abbildung 2). Wird beispielsweise der Versiegelungsgrad innerhalb eines Quartiers um 10 % erhöht, steigt auch der Lufttemperaturmittelwert um ca. 0,2 °C gegenüber seiner unbebauten Umgebung an. Dieser Wert kann in Hinsicht auf einzelne Tageswerte (Temperaturminima und -maxima) bei Strahlungswetterlagen noch stärker überschritten werden [5]. Ergänzend zu der eigentlichen Bebauung spielen auch die Eigenschaften der eingesetzten Materialien (Absorptionsvermögen, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeemissionsvermögen und Verdunstungsfähigkeit) sowie die Kubaturen, die Baumassen und die Bebauungsmorphologie eine bedeutende Rolle für das Überwärmungsrisiko städtischer Räume.

Aus diesem Zusammenspiel urbaner Eigenschaften und klimatischer Effekte entsteht die ballungsraumtypische Wärmeinsel (siehe Abbildung 3). Sie ist durch eine starke Erwärmung und eine nur eingeschränkte Abkühlung während der Nacht geprägt. Dieser Effekt kann durch Extremwetter, wie länger anhaltende Hitzeperioden, zusätzlich verstärkt werden. Im Zuge des Klimawandels treten diese immer häufiger auf. In dieser Form stellt die städtische Wärmeinsel ein gesundheitliches Risiko für eine ebenfalls zunehmende Zahl an hitzevulnerablen Menschen, Tieren, Pflanzen und Infrastruktur dar und zählt somit zu den negativen Effekten des Stadtklimas.

Eine **Hitzewelle** ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Sie ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann. Neben der Lufttemperatur sind hierbei weitere Parameter, wie die Luftfeuchte, Strahlung und Wind von Bedeutung.

International existiert keine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle.

Definitionen basieren häufig auf einer Kombination von perzentilbasierten Schwellenwerten (z.B. 98. Perzentil der Tagesmaximalwerte und einer minimalen Dauer z.B. 3 Tage).

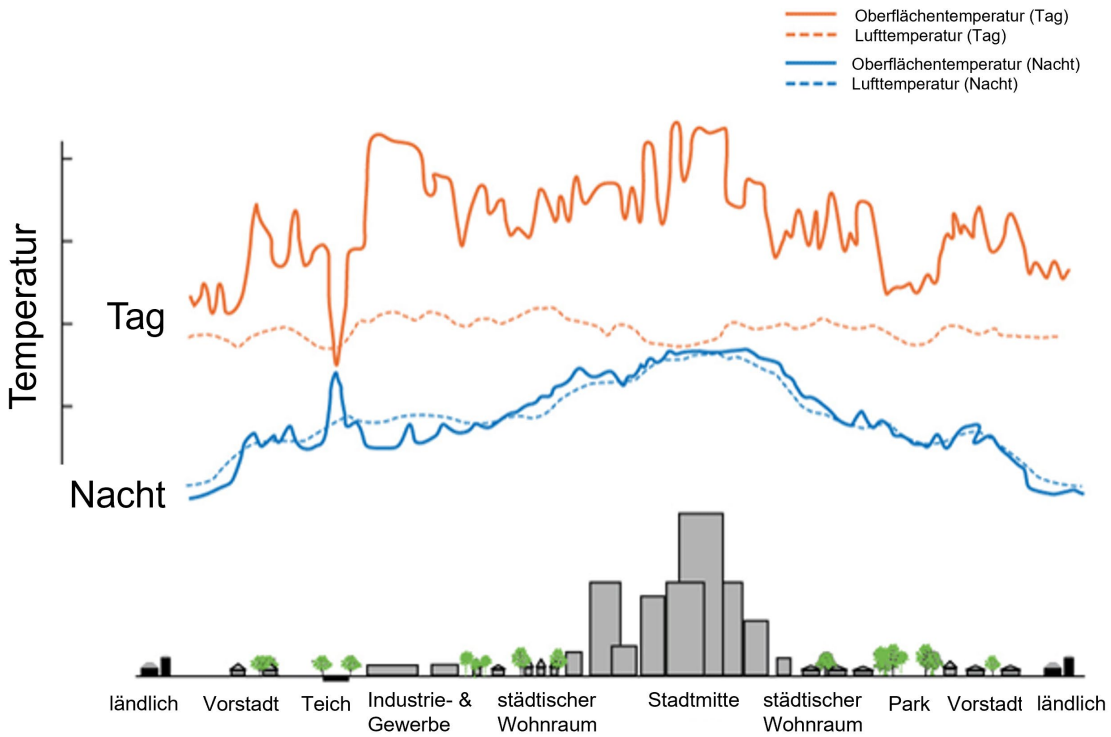


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der typischen Durchschnittstemperaturen (Sommer, aber nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Landnutzung (unterschiedliche Stadtcharakteristika). Die orangen Graphen stellen die durchschnittlichen Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen die durchschnittlichen Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Stadtstrukturen (Materialien, Objekte). Beispiel Stillgewässer: Die durchschnittliche Temperatur eines Wasserkörpers liegt am Tag unter der durchschnittlichen Lufttemperatur. Auf Grund der guten Wärmespeicherungskapazität des Wassers fällt sie nachts ohne Strahlungseintrag aber kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen dar. In der Regel bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen [6].

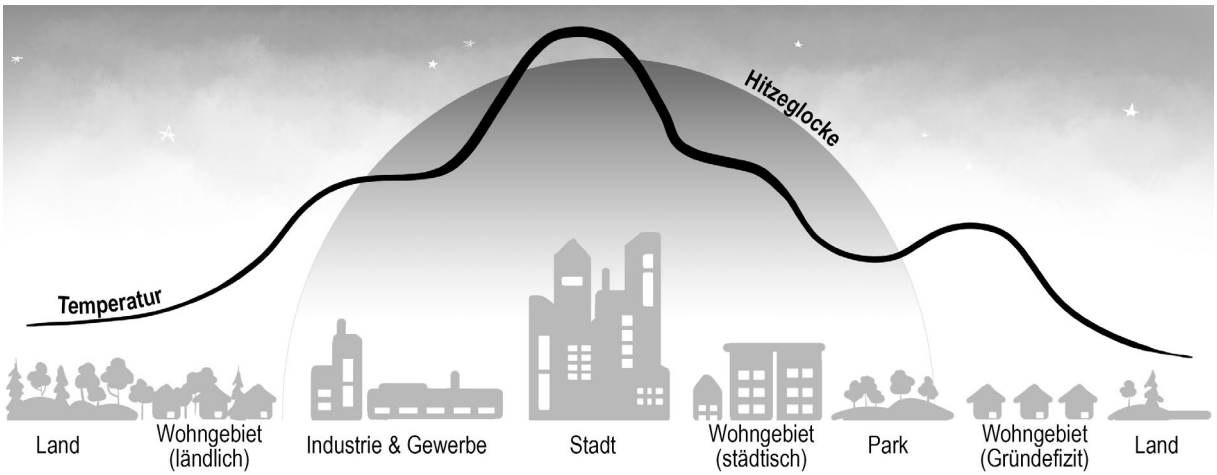


Abbildung 3: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel. Zwischen dem wärmeren Siedlungsraum der Stadt und dem kühleren Umland bildet sich, vorzugsweise bei wolkenfreien und windschwachen Wetterbedingungen während der Nacht, eine Lufttemperaturdifferenz aus. Je weniger „kühlende“ Faktoren (Vegetation, unversiegelte Flächen, Be- und Durchlüftungsachsen) und desto mehr Baumassen in ungünstiger Anordnung vorhanden sind, desto stärker ist i.d.R. der städtische Wärmeinseleffekt.

2.3 Vegetation und städtisches Grün

Urbanes Grün erfüllt eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen, die das städtische Klima und die Lufthygiene positiv beeinflussen. Auf das Stadtklima bezogen spielt es vor allem wegen seiner Retentionseigenschaften, die das Wasserspeicher und -abgabeverhalten der Pflanzen beschreiben (hierzu zählen Verdunstungsprozesse), und durch die reduzierte oder ausbleibende Bodenversiegelung eine wichtige Rolle. Städtische Vegetation bestimmt auch die urbane Struktur und hat zahlreiche weitere ökologische, ökonomische, strukturelle, soziale und ästhetische Funktionen, wodurch die Identität der Stadt geprägt und die Lebensqualität der Bewohnerinnen und Bewohner beeinflusst wird.

Beispielhaft für das öffentliche, städtische Grün sei auf die Rasenflächen hingewiesen: Bei guter Wasserversorgung weisen diese an Strahlungstagen im Vergleich zu angrenzenden versiegelten Flächen wesentlich niedrigere Oberflächentemperaturen und damit niedrigere Lufttemperaturen auf. Bei schlechter Wasserversorgung heizt sich auch der Boden und das Gras darüber auf, sodass von einer Kühlwirkung nicht mehr gesprochen werden kann. Wiesen, d.h. Vegetationsflächen mit größeren Wuchshöhen, können den Boden durch die Eigenverschattung der Gräser- und Kräuter vor einer zu starken Überhitzung schützen [7].

Ihre größte thermische Wirkung besitzen Rasenflächen abends und nachts, wenn, aufgrund der isolierenden Wirkung des Grasfilzes, der Bodenwärmestrom gering und die Ausstrahlung hoch ist. Diese Rasenareale kühlen dann sehr stark ab und heben sich als innerstädtische Kaltluftflächen (vgl. Kapitel 2.5) hervor. Baum- und Strauchbestandene innerstädtische Flächen können die genannten positiven klimatischen Effekte noch weiter verstärken, da sie neben ihrer Transpiration, die deutlich höher ausfällt als die von Wiesen, auch durch ihren Schattenwurf tagsüber für niedrigere Temperaturen sorgen. Nachts hingegen stellen sich dort höhere Temperaturen als auf einer Rasenfläche ein.

Die relative Luftfeuchte ist in einem Stadtwald höher als über einer urbanen Rasenfläche. Baumbestandene Flächen transpirieren im Vergleich zu Kurzgras rund 40 % - 70 % (je nach Baumart) mehr. Außerdem weisen sie nach Niederschlägen wegen ihres größeren Interzeptionsvolumens (Zurückhalten des Wassers auf der „Oberfläche“ der Vegetation) eine höhere Evaporationsrate (Verdunstungsrate) als Rasenflächen auf. Da der größte Teil der Globalstrahlung bereits vom Kronendach absorbiert wird, steht tagsüber weniger Energie für die Bodenerwärmung und Speicherung zur Verfügung als bei Rasenflächen, Wiesen oder gar unbeschatteten versiegelten Oberflächen. Ferner bewirken Baumbestände eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.4), wodurch Aerosole und Staub, aber auch Gase aus der vorbeiströmenden Luft gefiltert werden können [2]. Unter klimatischen Gesichtspunkten nehmen bereits kleinräumige Grünflächen Einfluss auf das Mikroklima. Ab welcher Größe jedoch ein deutlicher „Abstrahlungseffekt“ (bspw. hinsichtlich der Senkung der Lufttemperatur oder der Verbesserung der Luftqualität) entsteht, hängt von unterschiedlichen Faktoren (z.B. Dichte der umgebenden Bebauung, Grünvolumen, Barrierewirkungen etc.) ab. Dimoudi und Nikolopoulou (2003) [8] haben die Klimarelevanz für Vegetationsflächen von mind. 10 m x 10 m untersucht und nachgewiesen.

2.4 Regionaler Wind und städtische Durchlüftung

Die Unterscheidung zwischen ländlichem und städtischem Gebiet spielt bei dem Faktor Wind eine große Rolle, da die räumlich-strukturellen und thermischen Charakteristika des urbanen Raums (vgl. Abbildung 2) dort zu einer Veränderung der Windverhältnisse führen (Windgeschwindigkeit & Windrichtung, siehe Abbildung 4).

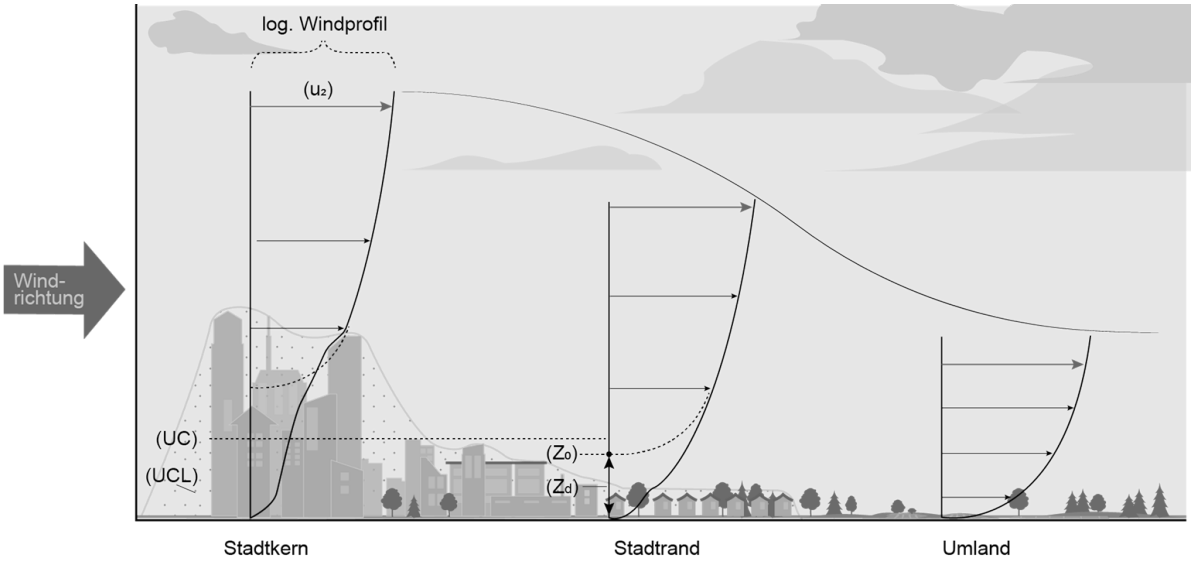


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand und dem freien Land (Umland). Das Windprofil wird im urbanen Bereich deutlich stärker beeinflusst bzw. verformt als im Umland. Z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, Z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (vertikale Streckung des Profils) und den Raum (UCL) unterhalb der mittleren Gebäudehöhe (UC). Die unterschiedenen Parameter werden im nachfolgenden Kapitel 2.4.1 genauer erläutert.

Die Luftbewegungen in der Stadt werden insbesondere durch lokale Windsysteme beeinflusst, die zum einen von den topographischen Gegebenheiten und zum anderen von der Art und Anordnung seiner Bebauung abhängig sind [9]. Diese Windsysteme bilden sich gerade dann heraus, wenn der überregionale Wind nur schwach ausgeprägt ist.

Stark durch das vorliegende Relief geprägte Windsysteme (topographisch) sind bspw. Hangwinde sowie Berg- und Talwinde. Vor allem bei Städten in Tal- und Kessellagen sind diese Zirkulationssysteme von Bedeutung, da sie die Frischluftzufuhr und den Abluftabtransport (z.B. hinsichtlich Schadstoffen) maßgeblich fördern.

2.4.1 Rauigkeit und Porosität

Wie bereits beschrieben verändert das urbane Profil die Windverhältnisse hinsichtlich der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung. Die größere Oberfläche und Rauigkeit (Oberflächen- oder Terrainstruktur) einer städtischen Bebauung bewirkt durch die erhöhte Reibung eine Verminderung der Windgeschwindigkeit (bis zu 30 % im Jahresmittel). Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20 % zu, was auch zu einer Verminderung des Luftaustausches führt und damit den Schadstofftransport behindert [9].

Hinsichtlich der Rauigkeit einer Oberfläche oder eines Terrains sind zwei Parameter von Relevanz. Zum einen die Rauigkeitslänge (Z_0) und zum anderen die Nullpunktverschiebung (Z_d).

Z_0 beschreibt den Einfluss eines Hindernisses auf die Windgeschwindigkeit, der abhängig von der Oberflächenrauigkeit des Hindernisses bis zu einer bestimmten Höhe variiert. Z_d beschreibt den vertikalen Versatz von Z_0 und somit die Höhe über dem Boden, ab der der Wind „richtig fließen“ kann; auch bezeichnet als „effektiver“ Boden (siehe Abbildung 4). Typische Werte beider Rauigkeitsparameter für unterschiedliche Oberflächen werden in Tabelle 2 wiedergegeben. Je höher die Werte von Z_0 und Z_d, desto stärker wird das Windprofil verformt, was u.a. eine Verminderung der Windgeschwindigkeit im Urban Canopy Layer (UCL) zur Folge hat. Die städtische Porosität ($Ph_{_var}$) beschreibt den Zustand des offenen 3-dimensionalen Raums im Verhältnis zum bebauten Volumen. $Ph_{_var}$ wird parallel zu den Rauigkeitslängen (Z_0) und der Nullpunktverschiebung (Z_d) berechnet und basiert auf dem Ansatz der „Frontal Area Analyse“ [10].

Für die Berechnung der Porosität ist die vorherrschende Windrichtung nicht von Relevanz, da hierbei der 3-dimensionale Raum und die in ihm enthaltenen Baumassen untersucht werden. Ergänzend zu den dynamischen Faktoren Z_0 und Z_d, die eine direkte Aussage über die Rauigkeit bzw. den Reibungseinfluss treffen, zeigt die urbane Porosität das Potential einer möglichen Durchlüftung an. Damit ist Ph_var alleinstehend von größerer planerischer Relevanz als die Rauigkeitslänge und die Nullpunktverschiebung. Die Einteilung der städtischen Porosität geschieht im Wertemaßstab von 0 bis 1, wobei 1 die höchste Porosität und 0 die niedrigste Porosität des 3-dimensionalen Raums darstellt. Das heißt, je höher der Wert, desto geringer ist der Windwiderstand des Bereichs.

Tabelle 2: Beispiele für Rauigkeitslängen und Nullpunktverschiebungen unterschiedlicher Oberflächen (nach Oke 2017 [11])

	Oberfläche | Terrain	Durchschnittliche Höhe [m]	Rauigkeitslänge (Z_0)	Nullpunktverschiebung (Z_d)
ländlich	Eis, geteerte Fahrbahn		0,001-0,01 mm	--
	Schnee, Wasser		0,1-1 mm	--
	Blanker Boden, geschnittenes Gras	0,02-0,05	0,01-0,02 m	--
	Gras, Stoppelfeld	0,2-0,5	0,03-0,06 m	0,1-0,3 m
	Ackerland, Pflanzenbestand	0,4-1	0,05-0,15 m	0,2-0,7 m
	Plantagen, Buschland	2-4	0,4-1 m	1,3-2,5 m
	Wald	12-30	0,8-2 m	9-24 m
urban	*niedrige Höhe und Dichte* Häuser, Gärten, Bäume, Warenhäuser	5-8	0,3-0,8 m	2-4 m
	mittlere Höhe und Dichte Reihenhäuser, Stadtzentren	7-14	0,7-1,5 m	3,5-8 m
	hohe Höhe und Dichte < 6 Stockwerke, Reihen- und Block-Gebäude	11-20	0,8-2 m	7-15 m
	Büro- und Wohnungsturmcluster	> 20	> 2 m	> 12 m

Mit Hilfe der berechneten städtischen Porosität können klare Planungshinweise abgeleitet werden. Durch die Erfassung der Bereiche mit einer hohen Porosität können Durchlüftungspotentiale definiert und in der Klimafunktionskarte dargestellt werden.

Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der Themenkarte (Kaltluft mit dem bodennahen Strömungsfeld) als Informationsbasis, um Potentiale und Möglichkeiten zur Schaffung einer besseren Durchlüftung in der Stadtentwicklung zu berücksichtigen.

Jedes Objekt besitzt eine gewisse Oberflächenrauigkeit. Bezogen auf die Be- und Durchlüftung kann diese spezifische Rauigkeit als Barrierewirkung interpretiert werden. Die Barrierewirkung wiederum äußert sich in einer erhöhten Reibung zwischen Luftstrom und Objekt. Je stärker die Reibung, desto mehr (Bewegungs-)Energie wird dem Luftstrom entzogen, wodurch die Be- bzw. Durchlüftung verringert werden kann.

2.4.2 Luftleitbahnen und Strömungsregime

Sowohl der horizontale als auch der vertikale Luftmassentransport regulieren die Belüftung des bodennahen Raums. Ganzjährig relevant für die Durchlüftung von städtischen Gebieten ist jedoch nur die horizontale Luftströmung. Von besonderer stadtklimatischer Relevanz sind diese Luftströmungen besonders in den Nacht- und Vormittagsstunden bei austauscharmen Hochdruckwetterlagen. Diese Wettersituationen verstärken die typischen Eigenschaften des Stadtklimas, wodurch die thermische und lufthygienische Belastung der Bevölkerung gesteigert wird.

Stadtklimarelevante Luftleitbahnen ermöglichen besonders bei austauscharmen Wetterlagen das Ein- und Durchdringen vorhandener schwacher Horizontalströmungen in den UCL [12]. Eine räumlich umfangreichere Möglichkeit zur Verminderung thermischer und lufthygienischer Belastungen innerhalb des Stadtraums liegt in der Freihaltung beziehungsweise Schaffung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (z.B. Ein- und Ausfallstraßen, Grünflächen, Gewässer, Gleisanlagen) im UCL.

Entsprechend ihrer thermischen und lufthygienischen Eigenschaften und Qualität der transportierten Luftmassen werden stadtklimarelevante Luftleitbahnen in

- Ventilationsbahnen,
- Frischluftbahnen und
- Kaltluftbahnen (nach VDI 2015 [13])

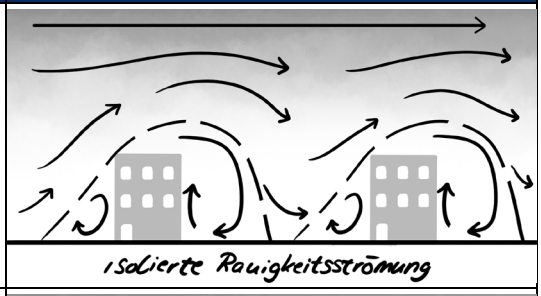
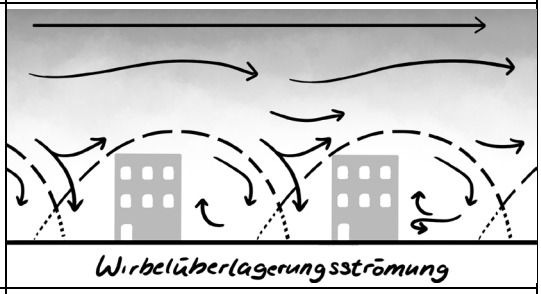
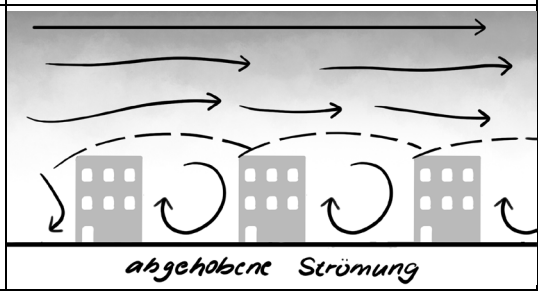
unterteilt.

Kaltluft beschreibt ausschließlich einen Temperaturzustand von Luftmassen, nimmt aber keinen Bezug auf lufthygienische Aspekte.
Bei Frischluft handelt es sich hingegen um unbelastete Luftmassen.

In Abhängigkeit von der Stadtmorphologie können sich unterschiedliche lokale Strömungsregime ausbilden [11]. Das hierbei relevante dimensionslose Höhen-Weiten-Verhältnis beschreibt den Raum zwischen zwei Objekten (z.B. Gebäuden) in Abhängigkeit einer angenommenen Windrichtung. Dabei definieren unterschiedliche Schwellenwerte des Höhen-Weiten-Verhältnisses die Zugehörigkeit zu einem Strömungsregime (siehe Tabelle 3).

Informationen zu bestehenden Strömungsregimen bzw. deren mögliche Veränderung (z.B. durch bauliche Nachverdichtung oder Abriss von Gebäuden) sind für die Stadtplanung und Stadtentwicklung von großem Interesse. So können konkrete Aussagen zu baulichen Vorgaben (keine Bebauung, definierte Bebauung etc.) z.B. im Bereich von bestehenden Luftleitbahnen getroffen werden, sodass deren Funktionalität weiterhin bestehen bleibt. Funktionierende Strömungssysteme können durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische und immissionsrelevante Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Tabelle 3: Strömungsregime mit zugehörigen Höhen-Weiten-Verhältnissen und grafischen Beispielen.

Regime	Höhen-Weiten-Verhältnis	Schema
Isolierte Rauigkeitsströmung	< 0,3 bis 0,5	
Wirbelüberlagerungsströmung	> 0,5 und < 0,65	
Abgehobene Strömung	> 0,65	

2.5 Flurwinde und Kaltluft

Neben den durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen sogenannte Flurwinde aus. Das Flurwindsystem beschreibt Druckausgleichströmungen zwischen verschiedenen Arealen (z.B. Stadt-Umland) und ist an ein flaches Relief oder an hindernisarme Freiflächen (Leitbahnen) gebunden. Der flache städtische Raum ist stark von seiner baulichen Gestaltung abhängig und fällt als ein durch Bebauung bedingtes Windsystem in diese Kategorie. Diese Windsysteme sind ein unterstützender Faktor bei der Kalt- und Frischluftzufuhr und dem Luftabtransport, wenngleich die Flurwinde in ihrer Intensität regulär recht schwach ausgeprägt sind, was sie im Gegensatz zu den topographischen Systemen sehr störanfällig macht (z.B. durch regionale Überströmung).

Flurwinde entstehen, wenn sich in Gebieten gegenüber ihrem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Dies wird insbesondere durch die Überwärmung bebauter oder versiegelter Gebiete und dem damit einhergehenden konvektiven Aufstieg von Luftmassen (siehe Abbildung 5) gefördert. Der entstehende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Druckausgleichsströmung).

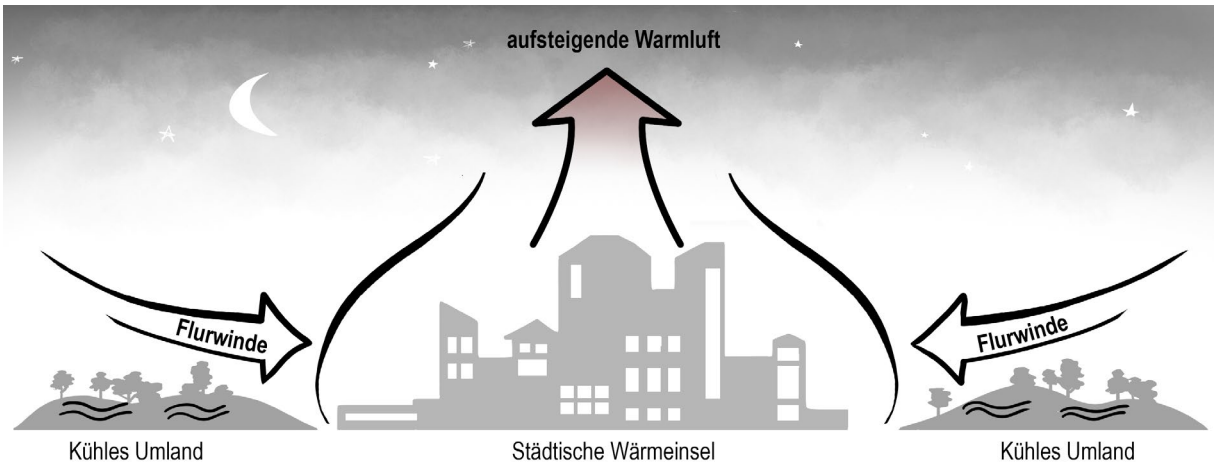


Abbildung 5: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruralen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz).

Die Kaltluftentstehung beschreibt auf mikro- und mesoskaliger Ebene den nächtlichen Abkühlungsprozess der bodennahen Luftschichten. Mit dem Sonnenuntergang beginnt auf ausreichend großen Grün- und Freiflächen die Kaltluftproduktion. Diese dauert bis in die frühen Morgenstunden an und wird sowohl durch die ausbleibende solare Einstrahlung als auch durch die thermische Ausstrahlung, Wärmeflüsse und Verdunstung der oberen Bodenschicht bedingt. Da sich die Luft mit dem Erkalten auch verdichtet, strömt sie anschließend flüssigkeitsähnlich der Reliefausprägung folgend in tiefere Regionen (siehe Abbildung 6). Eine signifikante Strömungsdynamik entwickelt sich hierbei ab ca. 1 - 2 ° Gefälle und wird stets von der Rauigkeit (vgl. Kapitel 2.4.1) der überströmten Bodenschichten (siehe Tabelle 2) beeinflusst.

Sowohl das Entstehungsgebiet als auch die Kaltluftproduktionsrate werden von dem vorhandenen Untergrund bestimmt. Hierbei fördern besonders unversiegelte Freiflächen (z.B. Wiesen, Brachen, Grünflächen etc.) mit einer niedrigen Vegetationshöhe die Kaltluftproduktion. Liegen diese Areale in einem reliefierten Gebiet (z.B. unbebaute Hänge), werden die Kaltluftmassen über die topographischen Windsysteme (Hang- und Bergwinde) abgeleitet. Allerdings

können Hindernisse, in Abhängigkeit ihrer Ausprägung (Länge, Höhe, Ausrichtung), den Kaltluftabfluss behindern oder auch komplett zum Erliegen bringen (siehe Abbildung 7).



Abbildung 6: Schematische Darstellung eines der Orographie folgenden Kaltluftabflusses. Ähnlich einer Flüssigkeit versucht die Kaltluft Hindernisse wie bspw. Gebäude zu umströmen.

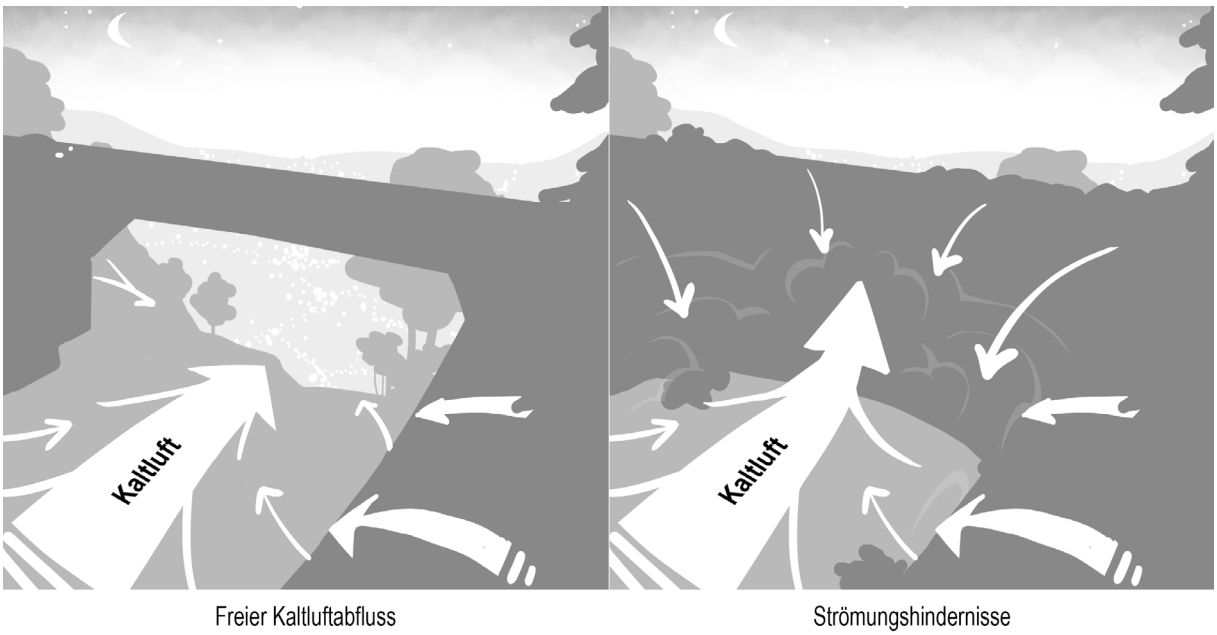


Abbildung 7: Orthogonal zum Kaltluftstrom ausgerichtete größere Hindernisse, wie bspw. Gebäuderiegel oder Straßendämme bremsen bzw. stauen die Kaltluft.

Ist bei den Kaltluftentstehungsflächen kein ausreichendes Gefälle vorhanden, reduziert das zwar nicht die Kaltluftproduktion, verringert jedoch den Wirkungsbereich, aufgrund des fehlenden Kaltluftabflusses. Unter Umständen können die Sogwirkungen vorhandener Flurwinde den Kaltlufttransport unterstützen.

Waldgebiete auf stark geneigten Flächen tragen ebenfalls zur Kaltluftproduktion bei [14]. Durch die Baumkronen wird das Aufheizen tagsüber verringert und die Neigung des Geländes unterstützt die Durchströmung des kühlen Stammraums. Dies ermöglicht den Kaltluftabfluss aus dem bodennahen Waldbereich. In Abhängigkeit von Gefälle, Dauer und Einzugsgebiet kann eine Kaltluftschicht bis zu einer Höhe von über mehreren Dekametern anwachsen.

Natürliche, unversiegelte Untergründe sind für die Kaltluftentstehung entscheidend. Zudem kann eine geringe Bodenrauigkeit (keine bodennahen Hindernisse wie Mauern, dichte Büsche

etc.) zu einem besseren Abflussverhalten an einem Hang führen und sich der Wirkungsraum somit vergrößern.

Im Durchschnitt wird den Acker- und Wiesenflächen das höchste Kaltluftentstehungspotential zugeordnet [15] und [16]. In der Regel handelt es sich bei diesen Luftmassen um weniger stark thermisch belastete Luft, weshalb sie auch im Zusammenhang mit dem städtischen Luftaustausch umgangssprachlich, als „Frischluft“ bezeichnet wird. Wissenschaftlich ist dies jedoch nicht korrekt, da Kaltluft nur einen Temperaturzustand von Luftmassen beschreibt und entsprechend auch aus lufthygienischer Sicht belastet sein kann. Liegt beispielsweise eine starke Emissionsquelle (lufthygienisch) im Abflussbereich eines Kaltluftentstehungsgebiets, so entsteht zwar weiterhin Kaltluft, diese kann aber nicht als unbelastete Luft bezeichnet werden. Entsprechend müssen die Umgebung oder mögliche lufthygienische Störfaktoren bei der Bewertung von potenziellen Frischluftzuflüssen miteinbezogen werden. Der Begriff der Frischluft beschreibt den am Tag durch Photosynthese neu gebildeten Sauerstoff (O_2) der Vegetation (vornehmlich in Waldgebieten).

Besonders für urbane Räume in Kessel- oder Hanglagen ist die Kaltluftentstehung und deren Transport für die thermische Regulierung des Stadtklimas und der Luftreinhaltung von großer Wichtigkeit. Die Richtlinie 3787 Blatt 5 des VDI [17] unterstreicht diese Bedeutung mit der Forderung, Kaltluftentstehung und Kaltluftabflüsse in der Stadt- und Regionalplanung zu berücksichtigen.

3 Methodisches Vorgehen und verwendete Software

3.1 Methodisches Vorgehen

Die zunehmende Temperaturverschiebung und insbesondere die Zunahme der sogenannten Ereignistage oder Kenntage, wie bspw. die Sommertage ($LT_{max} \geq 25°C$), die Heißen Tage ($LT_{max} \geq 30°C$) oder die Tropennächte ($LT_{min} \geq 20°C$), rücken immer stärker in den Fokus der Stadtplanung. Insbesondere durch die Akkumulation verschiedener Wärmequellen (natürlich und menschengemacht) innerhalb des urbanen Umfelds kann es bereits in mittelgroßen Städten zur Ausprägung von städtischen Wärmeinseln kommen. Diese verstärken wiederum den thermischen Einfluss von Baustrukturen (und Infrastruktur) sowie die bioklimatische Belastung für Menschen, Tiere und Pflanzen. In Anbetracht der weiter voranschreitenden Klimaveränderung ist es daher eine wichtige Aufgabe der Kommunen, klimatische Aspekte bei der Stadtentwicklung systematisch zu berücksichtigen. Belastungen müssen durch eine vorausschauende Stadtplanung und die Umsetzungen von individuellen Klimaanpassungsmaßnahmen gezielt abgebaut werden, während positive Effekte gefördert und erhalten werden müssen.

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden [18] und [19], die eine direkte Grundlage für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen bieten. Prinzipiell werden beim Stadtklima zwei Aspekte betrachtet: die thermischen und die dynamischen. Der Arbeitskreis der Umweltmeteorologen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (2018) [20] beschreibt das Stadtklima wie folgt:

„...ein ideales Stadtklima zeichnet sich durch eine möglichst große Inhomogenität mit einer charakteristischen Weglänge von 150 m und einem thermisch und lufthygienisch belastungsfreien Raum aus. Es soll die planerischen Absichten im Außenraum unterstützen...“

Demzufolge bietet ein heterogenes Mikroklima mehr Freiraum für die individuelle Anpassung von Menschen, Tieren und Pflanzen an ihre städtische Umwelt, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, stadtklimatische Belange mit planerischen Zielen in Einklang zu bringen.

Im stadtplanerischen Kontext wird zwischen mehreren Planungsebenen unterschieden. In Abhängigkeit der gewählten Planungsebene finden sich wiederum unterschiedliche klimatische Einordnungen (= klimatische Planungsebenen) (siehe Abbildung 8), die es zu beachten gilt. So bewegt sich ein Flächennutzungsplan im mesoklimatischen Bereich, wohingegen sich Einzelgebäude oder Gebäudegruppen auf der Ebene des Mikroklimas wiederfinden. Bebauungspläne liegen, je nach Flächenumgriff, zwischen diesen beiden Ebenen und werden dem Lokalklima zugeordnet.

Trotz der direkten und indirekten Wechselbeziehungen der einzelnen stadtklimatischen Ebenen muss dennoch eine strikte fachliche Trennung erfolgen. So kann z.B. eine gesamtstädtische mesoklimatische Analyse nicht 1:1 auf einen Objektplan übertragen und angewendet werden. Dies ergibt sich zum einen aus den unterschiedlichen Auflösungen (Rastergrößen) und zum anderen aus den unterschiedlichen klimatischen Fragestellungen, unter deren Aspekten die jeweiligen Klimaanalysen durchgeführt werden (siehe Abbildung 8). Ebenso kann die erforderliche Datenbasis in Abhängigkeit der klimatischen Planungsebene variieren.

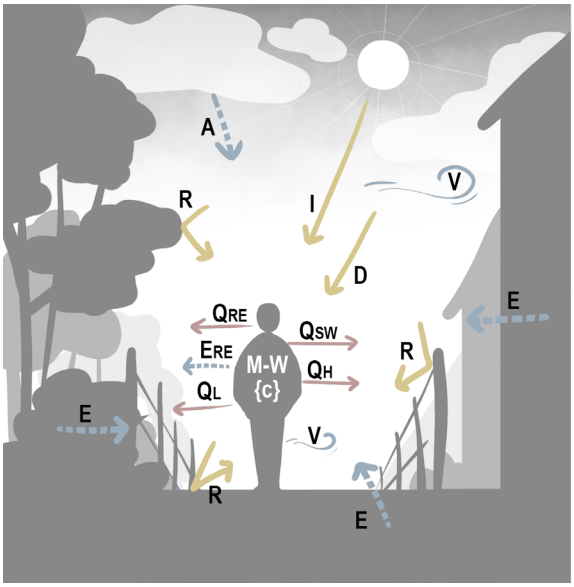
Um ein Gesamtbild einer stadtklimatischen Situation darstellen zu können, ist eine mesoskalige Analyse notwendig. Die Ergebnisse der Analyse werden als Klimafunktionskarte oder Klimaanalysekarte dargestellt und geben Aufschluss über die Verteilung verschiedener

Klimatope (Flächen, die sich durch bestimmte klimatische Eigenschaften charakterisieren lassen) sowie die regionale Belüftungssituation. Daraus können für die Stadtentwicklung wichtige Empfehlungen erarbeitet werden. Sollten sich hierbei bereits einzelne „Hotspots“ herauskristallisieren, so können diese nachfolgend, unter Zuhilfenahme mikroklimatischer, numerischer Simulationen, genauer untersucht werden, um detaillierte Maßnahmen zu erarbeiten.

Klimatische Einordnung	Administrativer Bezug		Planungsebene	klimatische Fragestellung	Auflösung (Rastergröße)	Einordnung SKA
Mesoklima	Region		Regionalplan > M 1:100.000	Regionale Luftaustauschprozesse und Klimafunktionen	100 m	Bezugsebene SKA
	Stadt		Flächennutzungsplan > 1:10.000	Wärmeinseleffekt, Belüftungsstrukturen (Rauigkeiten)	25 m - 50 m	
	Ortsteil		Bebauungsplan M 1:5.000	Übergang von Klimatopanalyse zu Mikroklimaanalyse	10 m	(Planungs-) Aussagen
	Block		Bebauungsplan M 1:1.000	Mikroklimatische Untersuchungen, thermischer Komfort	2 m - 5 m	Auflösung einzelner Themenkarten
Mikroklima	Gebäude		Bauplan / Objekt M 1:200	Strahlungs- und Gebäudeströmungen	> 0 m - 2 m	

Abbildung 8: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen.

Stadtklimatische Bewertungen, die den Außenraum und somit den direkten Lebens- und Aufenthaltsraum der Menschen betreffen, finden im Maßstab der Mikroklimate (< 1:1000) statt.



M	metabolische Rate (Energieumsatz)
M-W	Wärmeproduktion durch Energiestoffwechsel
{c}	Wärmeisolation der Bekleidung
Q_{RE}	Wärmefluss durch Atmung (fühlbar & latent)
Q_L	Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion
Q_{SW}	turbulenter Fluss von latenter Wärme
Q_H	turbulenter Fluss von fühlbarer Wärme
V	Windgeschwindigkeit
I	direkte Sonneneinstrahlung
D	diffuse Sonneneinstrahlung
R	reflektierte Sonneneinstrahlung
A	atmosphärische Gegeneinstrahlung
E	langwellige Emission der Umgebungsoberfläche
E_{RE}	Infrarotstrahlung von der Oberfläche des Menschen

Abbildung 9: Der thermische Wirkungskomplex nach der VDI-RL 3787 Blatt 2 [21]. Schematische Darstellung der unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken, wie bspw. direkte Sonneneinstrahlung oder Windgeschwindigkeit, aber auch Wärmeabstrahlungen von Umgebungsoberflächen.

Die Gestaltung der Umwelt hat direkten Einfluss auf die thermische Situation in diesem Bereich und beeinflusst dadurch auch das Wohlbefinden der Bewohnerinnen und Bewohner. In

diesem Maßstab, in dem kleinräumige nachbarschaftliche Einflüsse eine größere Rolle spielen, zeigt sich, ob ein schattenspendender Baum am richtigen Ort gepflanzt wurde oder ob er durch die Baumkrone möglicherweise ein Belüftungshindernis darstellt.

3.1.1 Historische Klimadatenauswertung

In der Umweltmeteorologie hilft die historische Betrachtung klimatischer Parameter bei dem Aufzeigen von klimatischen Veränderungen und der klimatischen, regionaltypischen Bewertung. Außerdem bilden sie die Grundlage für weitergehende klimatische Analysen, wie bspw. der Simulation der bodennahen Lufttemperatur und damit der Ableitung des städtischen Wärmeinseleffekts. Mittels der klimatischen Charakterisierung der Region werden übergeordnete Dynamiken der vergangenen Jahre sichtbar. Die klimatischen Analysen befinden sich auf der Ebene des Mesoklimas (vgl. Abbildung 1) und sind der Ausgangspunkt für detailliertere Untersuchungen des Stadtklimas.

In der Beschreibung historischer und projizierter klimatischer Dynamiken werden verschiedene Eingangsdaten von unterschiedlichen Akteuren ausgewertet und miteinander verglichen. Dabei ist die räumliche Auflösung, bspw. der Raster, aber auch die räumliche Verschneidung und Interpretation abhängig von den Eingangsdaten. Um einen Überblick zu den, in diesem Bericht verwendeten, Eingangsdaten zu erhalten, wird dies unter diesem Abschnitt näher erläutert.

Die Erfassung der historischen Daten und deren Aufbereitung ist in Deutschland die Kernaufgabe der Bundesoberbehörde des Deutschen Wetterdienst (DWD), welcher dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) unterstellt ist. Klimatische Messreihen und weiterführende Daten stellt der DWD auf seiner Internetseite frei zur Verfügung [22].

Als die wichtigsten Indikatoren in der klimatischen Betrachtung geografischer Räume gelten die (bodennahe) Lufttemperatur und der Niederschlag. Für die umfassende historische und gegenwärtige Analyse des Klimas werden die Parameter weltweit unter genau festgelegten Bedingungen gemessen. Dafür werden bspw. strahlengeschützte Messfühler genutzt. Die Geräte des DWD messen die Lufttemperatur in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche. Ebenfalls existiert ein standardisiertes Verfahren zur Messung von Niederschlägen. Die Messstationen sind in Deutschland auf 507 (Lufttemperatur) und 1925 (Niederschlag) Standorte verteilt. Die zeitliche Auflösung variiert dabei zwischen minütlich bis stündlich. Da das Stationsnetz stetig erweitert wird, sind die realgemessenen Zeiträume stationsabhängig, umfassen jedoch häufig eine Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten. Die Zuverlässigkeit der Messungen wird vom DWD in mehreren Schritten automatisiert und manuell überprüft und kann daher als hoch eingeschätzt werden. Dennoch spricht der DWD selbst von einer Fehlerquote von 0,1 %-1 %, insbesondere bei Werten aus dem Zeitraum von 1979 [22].

Ferner verfügt der DWD mit einem 1 km x 1 km Raster innerhalb Deutschlands über die Möglichkeit, die gemessenen Temperaturdaten in einer flächendeckenden Darstellung auflösen zu lassen. Die Informationen basieren auf den real gemessenen Werten der DWD-Messstationen, die mittels eines eigenen Interpolationsverfahrens auf ganz Deutschland projiziert werden können. Berücksichtigt werden etwa Landnutzungsinformationen. Hierdurch ist man in der Lage die klimatischen Dynamiken seit 130 Jahren zu beschreiben. Anthropogene Einflüsse,

wie Siedlungsgebiete, werden vergröbert mitberücksichtigt. Mikroklimatische Effekte sind nicht sichtbar [22].

Für den klimatischen Parameter der Windverhältnisse liegen bundesweit 218 DWD-Messstationen vor, die seit variierenden Zeitpunkten die langjährigen Windstärken und -richtungen verzeichnen. Wie schon bei den vorher genannten Klimaparametern sind die Windstärken auch in einem flächendeckenden Raster berechnet worden. Die Werte berücksichtigen verschiedene Einflussfaktoren, wie z.B. die Höhe über dem Meeresspiegel, die geographische Lage, die Geländeform und die Landnutzung, mittels eines statistischen Verfahrens. Lokale Hindernisse, die die Stationsmesswerte verfälschen könnten, wurden ebenfalls herausgerechnet. Die Abweichungen liegen somit im Bereich von ± 0,15 m/s

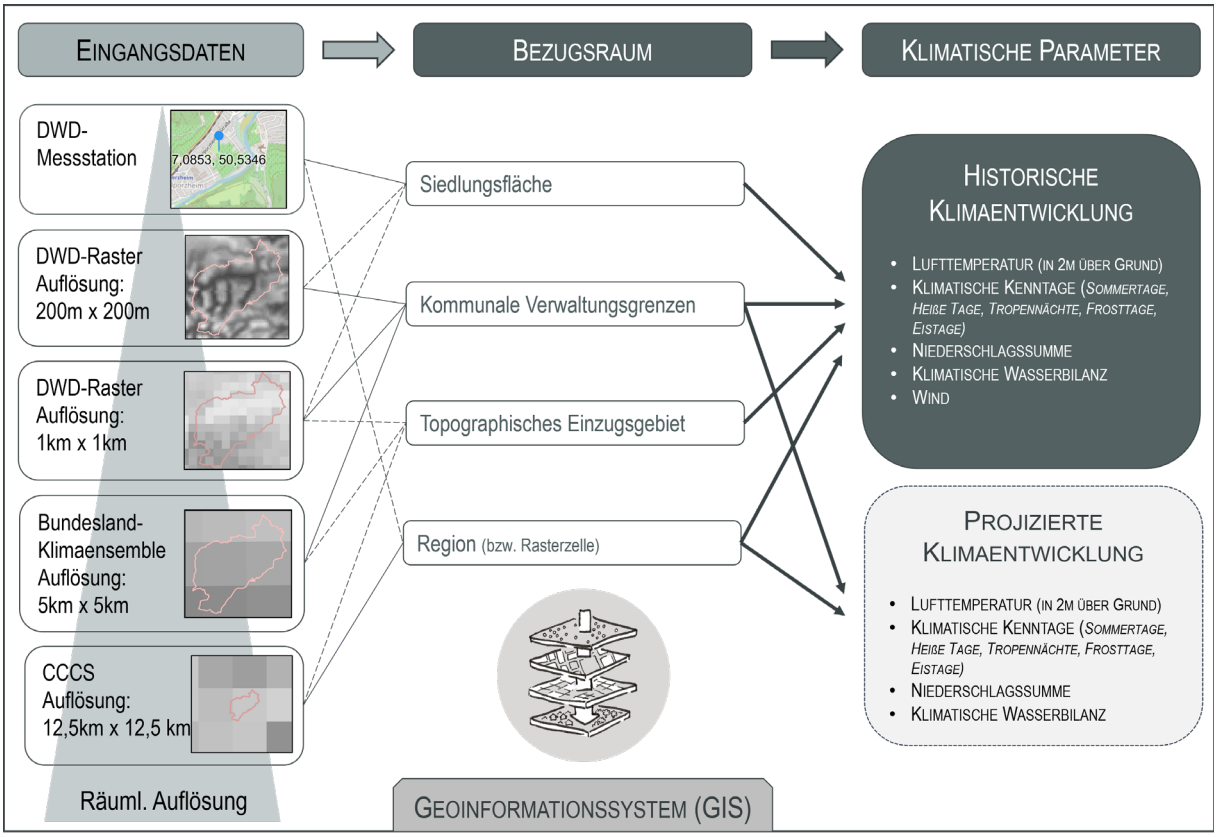


Abbildung 10: Darstellung der verschiedenen Eingangsdaten in Kombination mit den Bezugsräumen und den ausgewerteten klimatischen Parametern.

Wie in Abbildung 10 nachvollzogen werden kann, variiert der Bezugsraum, für den insbesondere die Rasterdaten zugeschnitten werden. Die DWD-Messstationen decken mit ihrem Stationsnetz eine Vielzahl von Orten ab, jedoch sind gerade ländliche Regionen in einer geringeren Dichte erschlossen. Zudem befinden sich die Standorte teilweise innerhalb bebauter Umgebungen, teilweise aber auch bspw. auf vegetationsbestimmten Freiflächen. Hier ist das Augenmerk auf die lokalen Bedingungen zu richten und dies mit in die Interpretation der Messdaten zu berücksichtigen. Die Daten können sowohl einen Bezug auf die klimatischen Bedingungen innerhalb des Siedlungsraums als auch auf die allgemeinen regionalen Verhältnisse bieten. Gerade bei kleinräumigen klimatischen Prozessen, wie dem bodennahen Windfeld oder städtischen Wärmeinseleffekten, sind die Daten dahingehend zu bewerten. Des Weiteren kann es Sinn ergeben, den Siedlungsraum gesondert von der kommunalen Verwaltungsgrenzen zu betrachten, wenn sich bspw. infolge von topographischen Besonderheiten signifikante lokale Unterschiede herausbilden.

Ausgewertete historische Daten für das Untersuchungsgebiet Bensheim

Der Auswertung der klimatischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag mit den jeweiligen Teilaspekten, z.B. der klimatischen Kenntage, liegen zwei Datenquellen des DWD zu Grunde. In stündlicher Auflösung gibt die DWD-Messstation (ID 5906) in Mannheim Aufschluss über die regionaltypischen Temperaturverläufe während der Sommermonate. Die Raster des DWD erfassen flächendeckende langjährige Klimaparameter monatsgenau in einer räumlichen Auflösung von 1km x 1km. Mesoklimatische Unterschiede können für das Untersuchungsgebiet und Umgebung dargestellt werden.

3.1.2 Projizierte Klimadatenauswertung

Um eine allumfängliche Beschreibung der klimatischen Situation im Untersuchungsraum zu gewährleisten, ist es notwendig neben dem historisch klimatischen Status Quo auch die erwartbare zukünftige Entwicklung des Klimas zu betrachten.

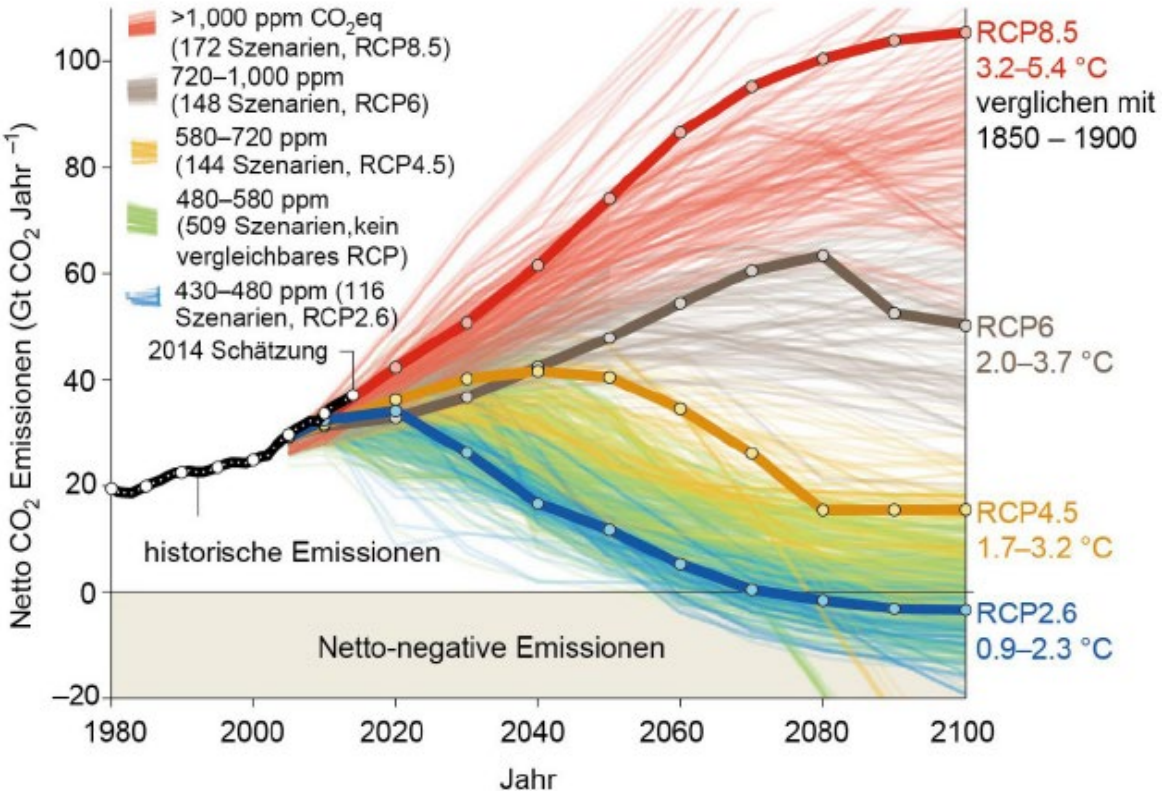


Abbildung 11: Abbildung der Temperaturveränderungen seit dem Jahr 1850 und Darstellung des projizierten Verlaufs unterschiedlicher Klimaszenarien [23]. Die ausgewerteten RCPs 2.6 und 8.5 sind blau bzw. rot dargestellt.

Die Berechnung klimatischer Projektionen stellt einen Bereich der Klimawissenschaften dar, der im Zuge des voranschreitenden Klimawandels an Aufmerksamkeit seitens der Fachgemeinschaft und der Öffentlichkeit gewinnt. Gleichzeitig erfordern die Berechnung und virtuelle Modellierung von klimatischen Dynamiken ein sehr hohes Maß an technischem und

theoretischem Wissen, welches kontinuierlich weiterentwickelt wird. Entsprechend werden international etablierte Methodiken bei der Ermittlung der Klimaprojektionen regelmäßig überarbeitet.

Die Definierung der grundlegenden Annahmen der Szenarien wird von der internationalen Gemeinschaft übernommen in Gestalt des Internationalen Rates für den Klimawandel (IPCC).

Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC wurden Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre definiert (siehe Abbildung 11), die sogenannten RCP (Repräsentative Konzentrationspfade - Representative Concentration Pathways) [24].

Nach Moss et al. (2010) [25] beziehen sich die RCPs (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) auf spezifische Konzentrationspfade (siehe Tabelle 4), die sich bis ins Jahr 2100 erstrecken. Sie sind mit integrierten Bewertungsmodellen verknüpft, welche das Klimasystem, die Wirtschaft und die Landnutzung modellieren. Insbesondere für die Öffentlichkeitsarbeit ist hierbei zu beachten, dass Klimamodelle keine Klima-Prognosen liefern, sondern lediglich Klima-Projektionen. Das heißt, sie liefern Aussagen darüber, wie sich das Klima unter den im Modell enthaltenen Voraussetzungen verändert, bspw. was passiert, wenn sich die Menschheit weiterhin so verhält wie bisher.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Charakteristiken der unterschiedlichen RCPs. Hinsichtlich der Temperaturveränderungen ist anzumerken, dass diese nicht homogen, sondern heterogen verteilt sind. De facto bedeutet dies, dass manche Gebiete und Regionen stärkere Temperaturanstiege erfahren als andere. Das RCP 2.6 würde unterhalb des politisch definierten 2 °C-Ziels verlaufen.

RCP	absolute Treibhausgaskonzentrationen (ppm = parts per million) bis 2100	Strahlungsantrieb bis 2100 (gegenüber 1850)	durchschnittliche globale Temperaturänderung bis 2100 (gegenüber 1850)
2.6	400 ppm	2,6 W/m²	unter +2 °C
4.5	650 ppm	4,5 W/m²	+2 bis +3 °C
6.0	850 ppm	6 W/m²	+3 bis +4 °C
8.5	1370 ppm	8.5 W/m²	über +4°C

Die technische Umsetzung von Annahmen hin zu konkreten Werten liegt bei transnationalen und nationalen Programmen, welche Rechenmodelle entwickeln und die Rechenkapazität bereitstellen. Die Modelle entstehen in einer zweistufigen Kaskade. Globale Klimamodelle (GCM) beziehen sich auf die klimatischen Dynamiken weltweit. Regionale Klimamodelle (RCM) basieren auf einem dieser globalen Modelle und wenden angepasste Methoden für einen bestimmten Bereich (z.B. Kontinent Europa) an.

Die Komplexität der Klimamodelle bedingt eine vergleichsweise niedrige Auflösung mit 0,22° x 0,22° bei den GCM und 0,11° x 0,11° bei den RCM. Raumbezogene Aussagen für Regionen, die kleiner als eine Rasterzelle sind, sind somit nicht möglich.

Es gibt eine Vielzahl an regionalen Klimamodellen (RCMs), die auf Basis der RCP-Klimaszenarien entwickelt wurden, insbesondere für den europäischen Kontinent. Diese Modelle sind in der Regel Teil größerer Klimasimulationsprojekte und internationaler Modellierungsinitiativen. Für die spezifischen Szenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) existieren diese Modelle in unterschiedlichen Varianten. Insgesamt kann von mehr als 30 verschiedenen RCMs

ausgegangen werden, die in verschiedenen internationalen Projekten und Datenbanken zur Verfügung stehen.

Auswertung und Berechnung der Klimaszenarien

Die fortlaufende Veröffentlichung neuer Modellierungsergebnisse betrifft auch die Verfügbarkeit von Daten in den deutschen Bundesländern. In Deutschland wurde im Forschungsprojekt „REKLIES-DE“ eine Systematik entwickelt, mit der für die Bundesländer ein festgelegtes Ensemble der RCMs in einer Auflösung von 5 km x 5 km ermöglicht wird. Das Klimaprojektionsensemble von Hessen wurde in einem weiteren Schritt mit den Naturräumen interpoliert, wodurch zellbedingte Abweichungen der Daten mitigiert wurden [26]. Die Auswertung einzelner Zellen bzw. in Räumen von ca. 5 km x 5 km wird somit ermöglicht. Herrschen in einem Untersuchungsraum jedoch kleinräumigere Klimata vor, etwa infolge aus einer ausgeprägten Oberflächenrauigkeit, können die zellgemittelten Projektionen nicht uneingeschränkt angewandt werden. Für kleinräumige Aussagen (bspw. für Tallagen) sind die projizierten Daten mit den historischen Messungen zu vergleichen.

Da es sich bei Klimaprojektionen um annahme- und evidenzbasierte Berechnungen auf Grundlage historischer Beobachtungen handelt, existiert immer eine Referenzperiode, die historische klimatische Verhältnisse als Ausgangspunkt betrachtet, auf den die Szenarien-Annahmen projiziert werden. Für die RCP-Szenarien wird i.d.R. das 30-jährige Mittel 1971-2000 als Ausgangspunkt genommen, um die Veränderungen klimatischer Parameter auszudrücken. Die Werte werden entsprechend auch als Änderungssignale (Deltasignale) berechnet, welche die relative Dynamik der klimatischen Parameter darstellen. Liegen punktuelle historische Messreihen vor, bspw. in Form einer DWD-Messstation, können alternativ die Änderungssignale mit den realgemessenen Werten verrechnet werden, wodurch man stationsgenaue Projektionen erhält.

Der Datenverfügbarkeit entsprechend wurden in der vorliegenden Stadtklimaanalyse die Veränderungen bestimmter klimatischer Parameter für die RCP 2.6 (*Transformation zur Klimaneutralität und Einhaltung des 2 °C-Ziel*) und RCP 8.5 (*rasantes fossiles Wirtschafts-wachstum – aktuell anzunehmen*) für die langjährigen Mittel 2031 - 2060 und 2071-2100 aus den Klimaensembledaten des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) berechnet [26]. Hieraus lassen sich der monatlich gemittelte Lufttemperaturverlauf im Jahresgang und die klimatischen Kenntage Sommertage ($LT_{max} \geq 25°C$), Heißen Tage ($LT_{max} \geq 30°C$), Tropennächte ($LT_{min} \geq 20°C$), Frosttage ($LT_{min} < 0°C$) und Eistage ($LT_{max} < 0°C$) identifizieren und mit aktuellen Werten vergleichen.

Für die Interpretation der Daten und Werte ist wichtig zu beachten, dass die Projektionen auf Annahmen basieren, die bereits 2012/2013 entwickelt wurden. Die getroffenen Annahmen stammen aus dem 5. IPCC-Bericht und nehmen etwa im RCP2.6-Szenario ein sofortiges Handeln ab diesem Jahr an [25]. Die reale Entwicklung in den vergangenen 10 Jahren weisen jedoch zunehmend auf eine Überschreitung des angenommenen Treibhausgaskontingents für das 2 °C-Ziel hin, welches das RCP 2.6 Szenario repräsentiert (siehe Abbildung 11). Im aktuellen Bericht des Weltklimarates wird das Niveau einer globalen Erwärmung von 1,5 °C bereits 2030-2035 erwartet, wenn bis dahin nicht der Ausstoß von CO_2 um 65 % gegenüber dem Jahr 2019 reduziert wird [24].

Die klimatische Wasserbilanz in der projizierten Dynamik basiert auf Berechnungen nach dem Verfahren nach Thornthwaite (1984) [27], welche die Lufttemperaturen sowie die Sonneneinstrahlung mitberücksichtigt [28]. Da die Methodik bei den Berechnungen des DWD unterschiedlich zum Thornthwaite-Verfahren ist, sind die Änderungssignale lediglich als tendenzielle Orientierungshilfe zu betrachten.

3.1.3 Ableitung der Klimaanalysekarte

Ziel einer Klimaanalysekarte (früher Klimafunktionskarte (KFK)) ist es, Flächen und deren Verbindungen miteinander hinsichtlich ihrer Klimafunktionen zu bewerten und daraus planungsrelevante Empfehlungen für die Stadt- und Landschaftsplanung abzuleiten. Hierfür werden grundlegende klimatische Aspekte (siehe Tabelle 5) unter Einbeziehung ihres Ursprungs und ihrer Abhängigkeiten zugrunde gelegt.

Tabelle 5: Grundlegende klimatische Aspekte und deren Ursprung bzw. ihre Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klimafunktionen herangezogen werden.

Klimatischer Aspekt	Ursprung und Abhängigkeit
Wärmebelastung	- solare Einstrahlung - umgebendes Gebäudevolumen und dessen Materialität - vorhandene Vegetation
Übergeordnetes Strömungsfeld (Luftleitbahnen)	Für die Durchlüftung der Stadt sorgen häufig großräumige (synoptische) Winde. Die Winde in der Stadt hängen dabei von - der Anströmungsrichtung, - der baulichen und - der topographischen Struktur der Stadt ab. Für die Durchlüftung der Stadt sind daher Luftleitbahnen (zusammenhängende, windoffene Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit) von entscheidender Bedeutung.
Autochthones Windfeld (Flurwind)	Als Ergänzung zu den großräumigen Winden bilden sich, vornehmlich während austauscharmer Wetterlagen, auch lokale (autochthone, also eigenbürtige) Strömungen aus. Häufig werden diese durch lokale Temperaturdifferenzen angetrieben. Ihnen kommt in der stadt-klimatischen Bewertung eine besondere Bedeutung zu, da sie an (windstillen) Hitzetagen / Tropennächten die einzigen, vornehmlich kühlenden Windströmungen darstellen.
Nächtliche Kaltluftproduktion	Beim Ausbleiben des externen Strahlungsantriebes der Sonne (nach Sonnenuntergang) findet die Aus- bzw. Abkühlung aller Flächen und Objekte auf der Erdoberfläche statt. Dabei kühlen insbesondere Acker- und Wiesenflächen besonders schnell und stark ab, wodurch die Temperatur der bodennahen Luftschichten sinkt, und so Kaltluft entsteht.

3.1.4 Ableitung der Planungshinweiskarte

Die Planhinweiskarte (PHK) transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte (bzw. KFK) sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung. Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken können so synergetische, aber auch konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Maßnahmenempfehlungen - in Bezug auf die kommunale Planung herausgearbeitet werden.

Über die Analyse der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (einzelne Themenkarten) lassen sich Stadtteilcharakteristika ablesen. Diese können für eine individuelle klimatische Beschreibung der einzelnen Stadtteile sowie der gesamten Stadt und für zukünftige Planungsentscheidungen, z.B. in Hinblick auf eine optimierte städtische Belüftung oder den Abbau von Wärmeinseln, herangezogen werden. Die Planungshinweiskarte in Kombination mit den im Erläuterungsbericht genannten konkreten Handlungsempfehlungen dient zukünftig als Instrument um die Schutz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Stadträumen in Bezug auf ihre Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Veränderungen hinsichtlich der klimatischen Wirkgrößen frühzeitig abzuleiten. Die Funktionsräume sind betreffend ihrer Planungsrelevanz im städtebaulichen Kontext geschärft und werden dabei konkret beschrieben sowie in mehreren planerischen Bewertungsstufen, in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 [29], dargestellt.

Für die Stadt Bensheim wurden in der Planungshinweiskarte raumbezogenen Planungshinweisen (unterschiedliche Ausgleichsräume und bebaute Räume) definiert.

3.2 Technische Umsetzung

Die Technik zur Erstellung einer Klimaanalysekarte (früher Klimafunktionskarte) hat sich seit Anfang der 1970er dahingehend verändert, dass durch den Einsatz moderner Geoinformationssysteme (GIS) wesentliche Verbesserungen in der Erfassung der klimatischen Wechselbeziehungen möglich wurden. Obwohl national wie auch international keine einheitlichen Standards zur Herleitung einer Klimaanalysekarte existieren, ist die Verschneidung zuvor erfasster stadtklimatischer Einflussgrößen mit dem Ziel der Klimatopausweisung und -evaluierung anerkannte wissenschaftliche Praxis [30,31,18,32–34]. Insbesondere haben Ng & Ren 2015 [35] mit ihrem umfassenden Werk „The Urban Climatic Map“ die internationale und nationale Verbreitung und Erstellung moderner Klimafunktionskarten thematisiert.

In diesem Bericht erfolgt die Analyse einzelner klimatisch relevanter Größen (einzelne Themenkarten), die Berechnung der Klimaanalysekarte sowie die Entwicklung der Planungshinweiskarte mit dem Geoinformationssystem ArcGISPro der Firma Esri.

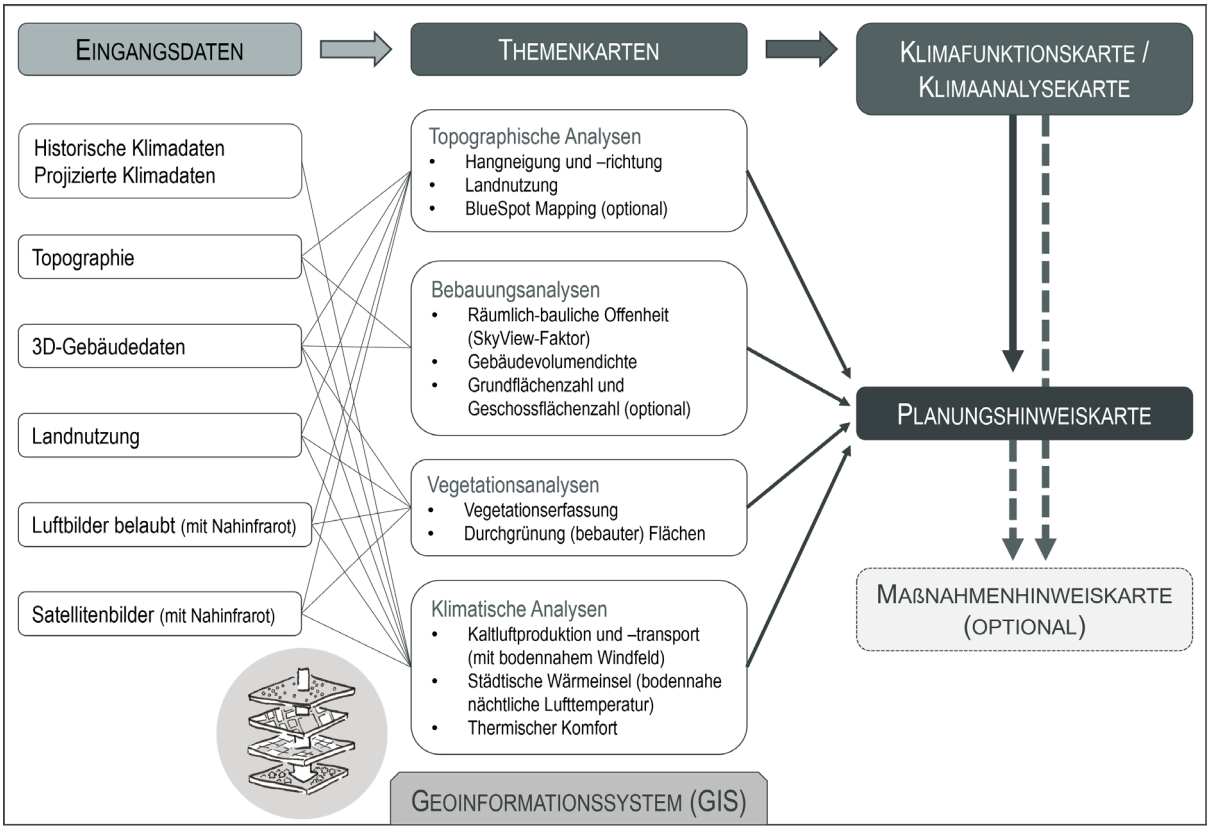


Abbildung 12: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung der Klimaanalysekarte und der Planungshinweiskarte. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, werden die einzelnen Themenkarten mit Hilfe mehrerer und unterschiedlicher Eingangsdatensätzen erstellt. Entgegen den Eingangsdaten, welche diskrete (klar abgegrenzte Daten) stadt- und landschaftsplanerische Informationen abbilden, repräsentieren die Themenkarten klimarelevante räumliche Ableitungen. Die Entwicklung der Themenkarten basiert auf physikalisch basierten Berechnungen innerhalb des GIS oder lizensierten numerischen Simulationsprogrammen, wie bspw. KLAM_21 des DWD (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Methodik zur Herleitung wurde unter anderem im Rahmen unterschiedlicher Arbeiten entwickelt und geprüft [18]. Dabei werden die Ergebnisse der Themenkarten immer auch

in den planerischen Kontext (siehe Abbildung 13) gesetzt, sodass die Verwendbarkeit im Planungsalltag gewährleistet wird.

Auf Basis der Themenkarten wird in der Folge die Klimaanalysekarte abgeleitet. Dies geschieht unter Zuhilfenahme einer linearen Wertungsmatrix, welche auf den geolokalen Besonderheiten der Stadt sowie der wissenschaftlichen klimatischen Expertise beruht.

Gleichzeitig fließen auch numerische Simulationen (bspw. zur Kaltluftentstehung und -transport) in den Entstehungsprozess ein.

Mit Hilfe der Planungshinweiskarte werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Themenkarten, der Klimaanalysekarte und – sofern vorhanden – weiterer stadtklimatische Analysen und Untersuchungen in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer zukunftsorientierten (klimaangepassten) Entwicklung des Untersuchungsraums übertragen.

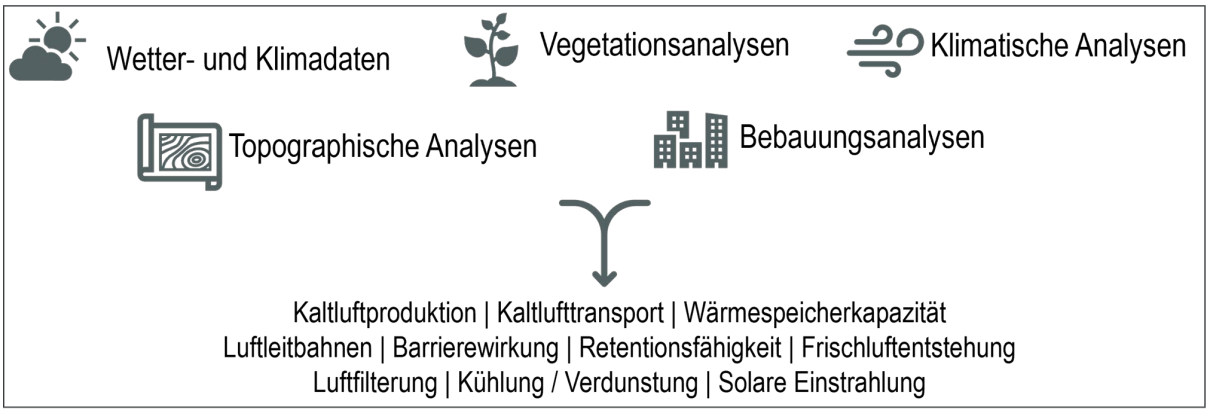


Abbildung 13: Die unterschiedlichen Daten und Analysen der Stadtklimaanalyse ermöglichen konkrete Aussagen zu unterschiedlichsten Fragestellungen und klimatischen Aspekten im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung.

3.3 Verwendete Software

3.3.1 Geoinformationssystem

Geoinformationssysteme (GIS) stellen eine Schnittstellentechnologie zwischen räumlichen und technischen Sachdaten dar. Einzig über das GIS ist es möglich, Daten im Raum zu verorten und gleichzeitig räumlich und zeitlich zu analysieren (siehe Abbildung 14). Unter der Berücksichtigung bzw. der Erfassung räumlicher sowie zeitlicher Korrelationen, können analytische, planerische und konzeptionelle Mehrwerte generiert werden. Gleichzeitig organisieren Geoinformationssysteme Geodatenbestände und ermöglichen so die Verwaltung von räumlichen, zeitlichen und technischen Daten auf Datenbankebene.

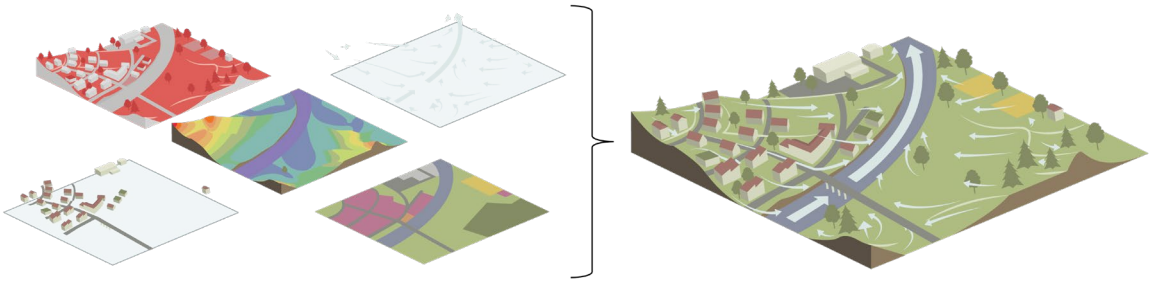


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (links) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität (rechts) zu schaffen.

3.3.2 Kaltluftsimulationen

„KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. (…) Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet. Über diese Fläche wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Gitterpunktabstände sind dabei 20 bis 50 m. Die Modellgebietsgröße wird in der Regel so gewählt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst sind. Bei 50 m Gitterabstand beträgt z.B. die maximale Größe 22.500 km². Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung (schematisiert in 9 Nutzungsklassen, Sondernutzungen können bei Bedarf ergänzt werden) sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsklasse 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. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z.B. Einzelgebäude, Dämme, Schallschutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende Höhe erreicht hat. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft. Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Zu diesem Zeitpunkt wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Lufttemperatur und der Luftdichte vorhanden sind. Es werden während der gesamten Nacht gleichbleibend gute Ausstrahlungsbedingungen, das heißt eine geringe Bewölkung, angenommen. Möglich ist die Vorgabe einer schwachen, durch

regionale Luftdruckunterschiede hervorgerufenen Grundströmung des Windes. Der Simulationszeitraum von 8 Stunden entspricht der mittleren Andauer einer Sommernacht. Im Gegensatz zu stark vereinfachenden Modellen, die auf einer „statischen" Analyse des Reliefs und der Landnutzung beruhen, können mit KLAM_21 Kaltluftbewegungen in ihrer Dynamik und zeitlichen Entwicklung flächendeckend wiedergegeben werden. Die physikalische Basis des Modells bilden eine vereinfachte Bewegungsgleichung und eine Energiebilanzgleichung, mit der der Energieverlust und damit der „Kälteinhalt" der Kaltluft-schicht bestimmt wird. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltlufthöhe errechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten." [36]

3.3.3 Windfeldsimulationen

Um die Interaktionen der vielen unterschiedlichen Faktoren realitätsnah zu simulieren, werden Windfeldsimulationen primär mit numerischen Strömungsmechanik-Modellen (CFD Computer Fluid Dynamics) durchgeführt.

Durch die Verwendung der international evaluierten Softwareerweiterung „Airflow Analyst" ist es möglich, das Windfeld direkt innerhalb des Geoinformationssystems zu berechnen. Bei der Berechnung des Windfeldes wird eine räumliche Auflösung von 0,5 bis 1 m zugrunde gelegt. Da das berechnete Windfeld den 3-dimensionalen Raum abdeckt, können unterschiedlichste Informationen zum Windfeld für jede beliebige Höhe abgefragt werden. Dies ist insbesondere dann von großem Interesse, wenn zu überprüfen ist, inwieweit vertikale und horizontale Veränderungen (z.B. durch neue Gebäudestrukturen, Vegetation o.ä.) das Windfeld beeinflussen.

Innerhalb des Geoinformationssystems kann die Simulationssoftware numerische Analysen turbulenter Strömungen über komplexer Topografie im urbanen und ruralen Raum durchführen. Als Eingangsparameter wird eine gitterartige Beschreibung der Geländehöhe, Rauigkeit sowie Windbeobachtungsdaten oder ein alternatives Grenzschichtprofil verwendet. Das Windfeld wird in einem 3D-Raster berechnet und ermöglicht die Nachbearbeitung der Ergebnisse sowie den Export von Daten in ein GIS-konformes Austauschformat.

4 Charakterisierung des Untersuchungsraums

4.1 Charakterisierung der Stadt und Region

Die zwischen FRANKFURT und HEIDELBERG gelegene Stadt Bensheim zählt mit ihren neun Stadtteilen mehr als 40.000 Einwohner. Das Stadtgebiet erstreckt sich über 57.83 km². Als größte Stadt des Kreises BERGSTRAßE gilt sie als dessen wirtschaftlicher und kultureller Mittelpunkt (L .1). Ihre zentrale Lage im Kreis BERGSTRAßE und in den Metropolregionen FRANKFURTRHEINMAIN und RHEIN-NECKAR wirkt sich positiv auf Bensheims Status als Wirtschaftsstandort aus. Die Stadt wirbt in diesem Kontext mit einer guten ICE- und Flughafenanbindung, einem ausgewogenen Branchenmix und ihren diversen Freizeit- und Erholungsangeboten, die sie als Wirtschaftsstandort attraktiveren (L .1.2). Die Branchenschwerpunkte liegen in Bensheim in der IT/Elektronik, Automobilbranche und Pharma/Medizintechnik.

Hinsichtlich ihrer demographischen Entwicklung ist das Durchschnittsalter der Bewohner in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen, und liegt Stand 2019 bei etwas über 45 Jahren (L. 1.3). Auch die Stadt Bensheim ist vom demographischen Wandel betroffen; dieser macht sich in einem stetigen Anstieg der Altersklassen 60 + und einer gleichzeitig sinkenden Anzahl an Neugeborenen bemerkbar. Der Bensheimer Demographiebericht aus dem Jahr 2019 prognostiziert diesbezüglich bis 2050 keine Trendwende (L. 1.4: 13, 14). Die Entwicklung in Bensheim stimmt somit weithin mit der des Bundeslandes Hessen überein (ebd.: 20).

Nr.	Gemarkung	Nr.	Gemarkung	Nr.	Gemarkung	Nr.	Gemarkung
01	Auerbach	04	Gronau	07	Schwanheim	10	Zell
02	Bensheim	05	Hochstädten	08	Schönberg		
03	Fehlheim	06	Langwaden	09	Wilmshausen		

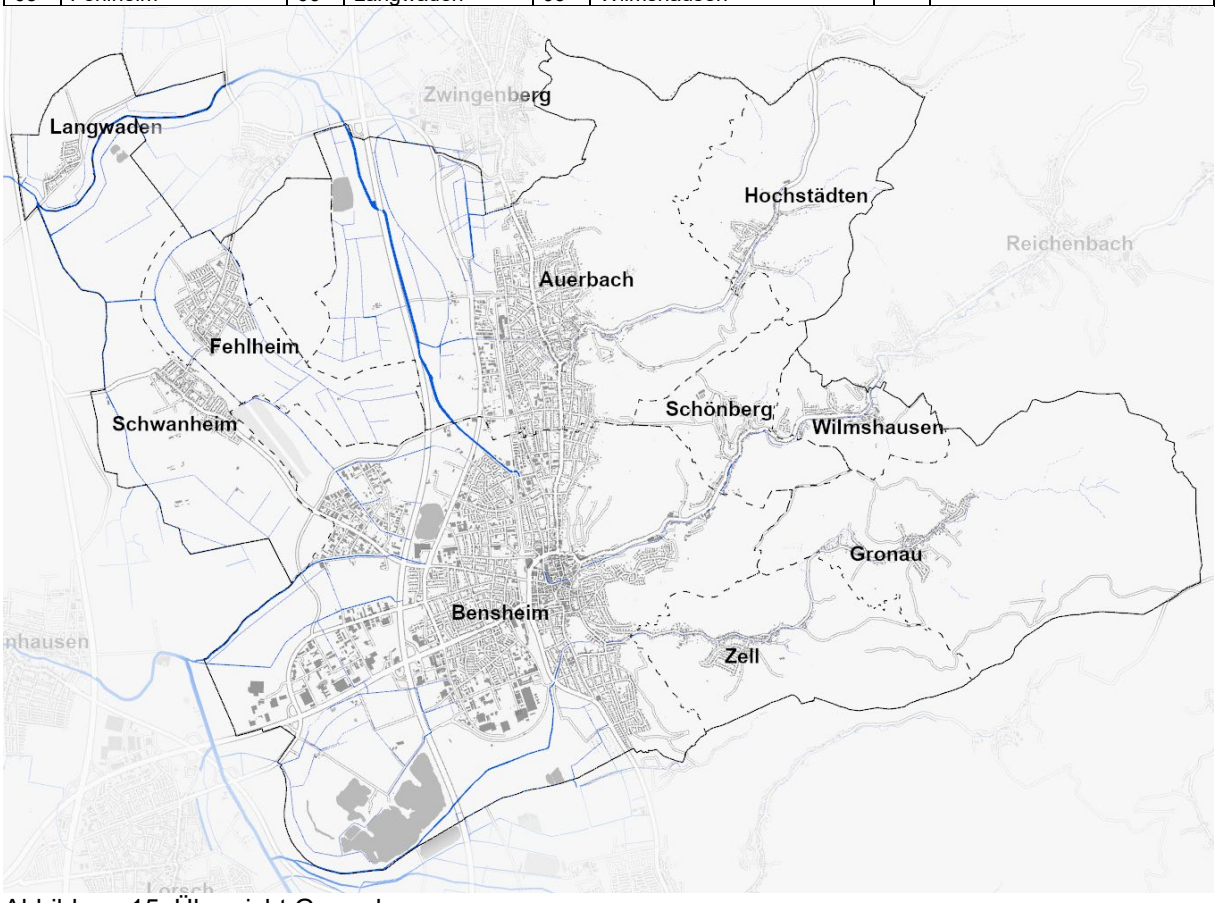


Abbildung 15: Übersicht Gemarkung

4.2 Naturräumliche Einordnung

In Deutschland gibt es drei biogeographische Regionen: ATLANTISCH, KONTINENTAL und ALPIN. Die Stadt Bensheim und der Kreis BERGSTRAßE sind in der zentralen biogeographischen Region KONTINENTAL gelegen.

Gemäß der naturräumlichen Gliederung Deutschlands durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) werden unsere heimischen Landschaften systematisch in sieben Großlandschaften, 68 Naturräume und zahlreiche naturräumliche Haupteinheiten eingeteilt. Dabei beruft sich das BfN auf die Wissenschaftler Meynen & Schmithüsen et al. (1953 – 1962) und Syssmank (1994), die das System der naturräumlichen Gliederung entworfen bzw. verfeinert haben.

Der naturräumlichen Gliederung entsprechend liegt das Gebiet der Stadt Bensheim in der Großlandschaft SÜDWESTDEUTSCHES MITTELGEBIRGE / STUFENLAND (L .2). Diese teilt sich nahe des Bensheimer Gemeindegebiets in die Naturräume OBERRHEINISCHES TIEFLAND UND RHEIN-MAIN-TIEFLAND (Westen) und ODENWALD, SPESSART UND SÜDRHÖN (Osten). Die Naturräume gliedern sich wiederum in kleinere Haupteinheiten. Bensheim liegt an der Schnittstelle dreier solcher Haupteinheiten. Der Westen des Gemeindegebiets ist der Haupteinheit HESSISCHE RHEINEBENE zugehörig, die Mitte der BERGSTRAßE und der Osten dem VORDERE[N] ODENWALD (L .2).

Einige Flächen innerhalb des Gemeindegebietes haben einen Schutzstatus inne. Hierzu zählen Landschaftsschutzgebiete, Natura2000-Gebiete, Naturschutzgebiete und einzelne Naturdenkmäler.

Teilbereiche des nordwestlichen Gemeindegebietes Bensheims sind als Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen. Sie gehören zum Landschaftsschutzgebiet FOREHAHI, das sich westlich von Bensheim auf über 9.500 ha erstreckt. Auch Naturschutzgebiete (NSG) sind in Bensheim vertreten: Hierzu zählen das NSG HEMSBERG VON BENSHEIM-ZELL (14,56 ha), ERLACHE BEI BENSHEIM (48,75 ha) und das TONGRUBENGELÄNDE VON BENSHEIM UND HEPPENHEIM (91,81 ha), das zumindest zu Teilen an der Südgrenze Bensheims liegt (L .3). Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) zählt auch das an der nördlichen Gemeindegebietsgrenze gelegene NSG ORBISHÖHE VON AUERBACH UND ZWINGENBERG (6,8 ha) zu Bensheim hinzu (L .4). Neben den Landschafts- und Naturschutzgebieten sind die Natura2000-Gebiete schützenswert. Diese setzen sich in Bensheim aus fünf Flora-Fauna-Habitaten (FFH) und zwei Vogelschutzgebieten (VSG) zusammen. Die FFH-Gebiete befinden sich vorrangig in der östlichen Hälfte des Gemeindegebiets. Hierzu zählen die FFH-Gebiete:

1. GRONAUER BACH MIT HUMMELSCHEID UND SCHANNENBACHER MOOR,
2. TONGRUBENGELÄNDE VON BENSHEIM UND HEPPENHEIM,
3. BUCHENWÄLDER DES VORDEREN ODENWALDES,
4. MAGERRASEN VON GRONAU U. ANGRENZENDE FLÄCHEN,
5. KNIEBRECHT, MELIBOKUS UND ORBISHÖHE BEI SEEHEIM-JUGENHEIM, ALSBACH UND ZWINGENBERG.

Die VSG liegen im westlichen Teil des Gemeindegebiets. Hierzu zählen das VSG JÄGERSBURGER/GERNSHEIMER WALD und HESSISCHE ALTNECKARSCHLINGEN.

In BENSHEIM gibt es weiterhin drei Naturschutzgebiete:

1. HEMSBERG VON BENSHEIM-ZELL,
2. TONGRUBENGELÄNDE VON BENSHEIM UND HEPPENHEIM,

3. ERLACHE BEI BENSHEIM.

Im Gemeindegebiet sind zudem 24 Naturschutzdenkmäler verteilt, die aus 23 besonderen Bäumen und einem kleinen Felsenmeer bestehen (L. 3).

5 Klimatisch-planerische Analysen

5.1 Klimatische Charakterisierung der Region

In der klimatischen Charakterisierung gilt es zunächst, das großräumigere Mesoklima (vgl. Abbildung 1) zu betrachten. Unterschiede zu anderen Regionen in Deutschland werden hierdurch hervorgehoben, was anhand der nachfolgenden Abbildungen nachvollzogen werden kann.

Die regionale, klimatische Gliederung von Bensheim im langjährigen Mittel (1991-2020) charakterisiert sich nach Daten des DWD durch eine Übergangslage zwischen submaritimem und subkontinentalem Klima (siehe Abbildung 16). Die Einteilung der verschiedenen Klimata bezieht sich auf die thermoklimatischen Schwankungen, d.h. die Differenz zwischen dem monatsgemittelten Temperaturminimum im Winter und dem Temperaturmaximum im Sommer. Diese liegen im Bereich der Gemarkung Bensheim bei 17,9 K zwischen dem kühlsten Monat Januar und dem wärmsten Monat Juli (siehe Kapitel 5.1.1).

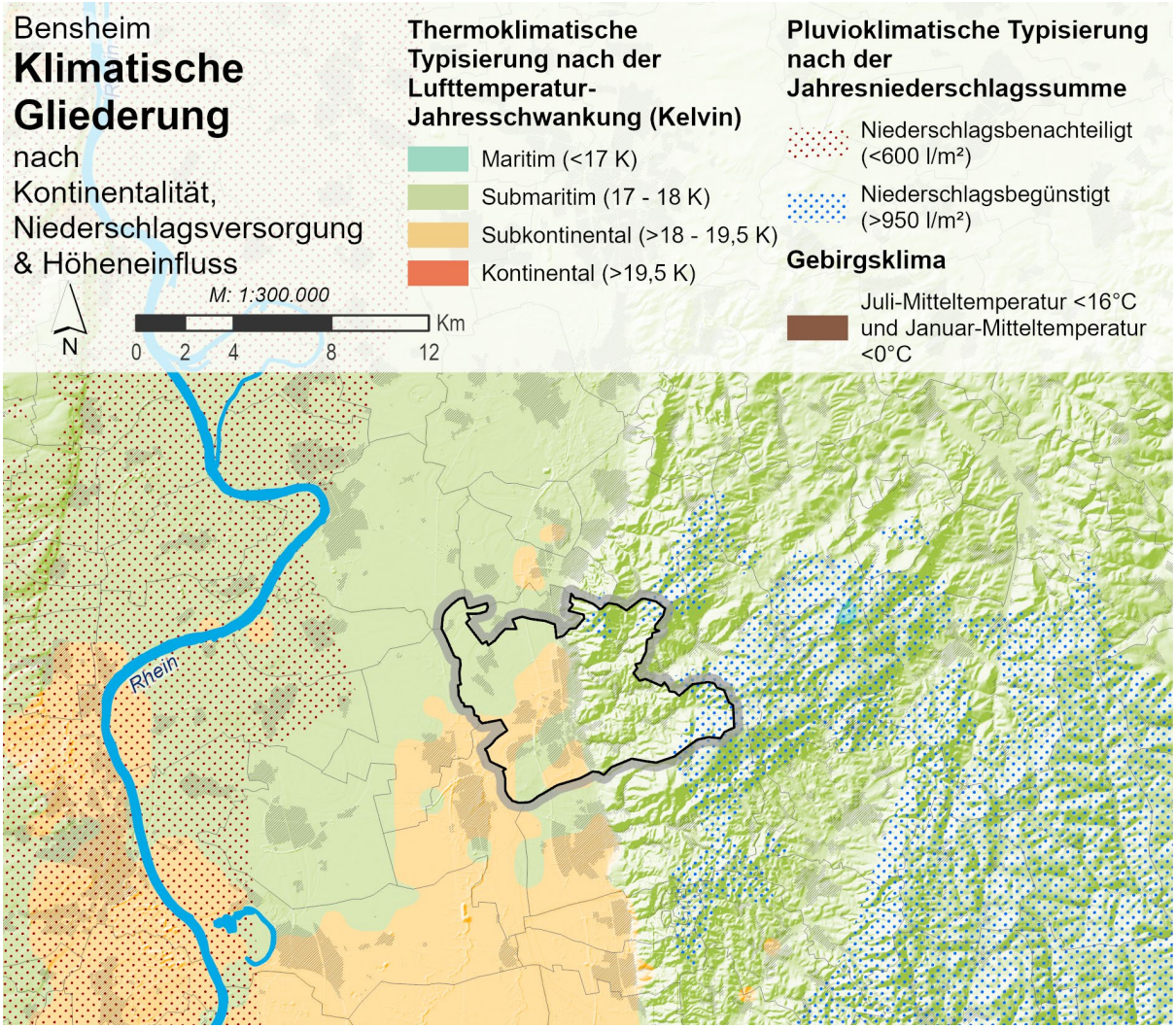


Abbildung 16: Klimatische Gliederung der Gemarkung Bensheim und der Region (nach Endlicher und Hendl 2003 [37]) nach thermoklimatischer Typisierung (jahreszeitliche Temperaturschwankungen) und pluvioklimatischer Typisierung (Jahresniederschlagssumme). Eigene Darstellung mit Daten des DWD.

Im Süden grenzt Bensheim an subkontinentale Klimata, die sich entlang der niederen Lagen des Rheintals erstrecken.

Der Unterschied zwischen kontinentalen und maritimen Klimata ist, dass sich kontinental geprägte Regionen durch eine klimatisch wechselhaftere und heterogene Gesamtsituation auszeichnen als maritim geprägte. Für die jeweiligen Untertypen gelten diese Charakteristika in abgeschwächter Form.

Neben der thermoklimatischen Typisierung ist die niederschlagsbezogene pluvioklimatische Typisierung in der Kartendarstellung ebenfalls berücksichtigt. Bensheim wird mit einer durchschnittlichen Jahressumme von 799 l/m² (1991-2020) (siehe Kapitel 5.1.1) als „niederschlagsnormal“ typisiert. Die Verortung niederschlagsbegünstigter Gebiete zeigt, dass die östlichen Bereiche innerhalb der Verwaltungsgrenzen von Bensheim bereits entsprechende Niederschlagssummen über 950 l/m² verzeichnen. Ähnlich, wie bei dem Übergangscharakter der thermoklimatischen Typisierung, liegt Bensheim auch beim Niederschlag in einer Zwischenlage von niederschlagsbegünstigten und niederschlagsbenachteiligten Bereichen, die sich östlich bzw. westlich der Gemarkung befinden (siehe Abbildung 16).

5.1.1 Temperatur und Niederschlag

Die Lufttemperatur und der Niederschlag gelten als die wichtigsten Indikatoren in der klimatischen Betrachtung geografischer Räume.

Für diese beiden Parameter wurde die gemittelte Lufttemperatur in Relation mit der Niederschlagssumme gesetzt. Bei den Karten handelt es sich um eine Bivariate-Darstellungsform bei denen zwei Eingabedatensätze in einer Farbskala vereint werden (siehe Abbildung 17). Zur Unterstützung beim Lesen der Karte wurden die Temperaturen mit einer Skala von 1 bis 4 codiert und die Niederschlagssummen mit „a“ bis „d“. Somit ist es möglich, Regionen in vier Bereiche zu kategorisieren:

- kalt-trocken (weiß = 1a) bis warm-trocken (pink = 4a) und
- kalt-feucht (hellblau = 1d) bis warm-feucht (blauviolett = 4d).

Des Weiteren entstehen Übergangsbereiche. Insgesamt werden 16 Abstufungen dargestellt. Die Werteskala ist derweil nicht gleichmäßig, sondern bildet Quartile (4 Klassen à 25 %), die die Einteilung aufgrund der numerischen Häufigkeit bildet. Dementsprechend entsteht eine gleichmäßige farbliche Darstellung, was der Lesbarkeit zuträglich ist, jedoch verschieden große absolute Wertebereiche umfasst (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Wertebereiche der verschiedenen Code-Kombinationen (1 bis 4 und a bis d) der Temperatur- und Niederschlagsdarstellungen. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Wertebereiche bei der Jahres- und der Sommer-Darstellung unterscheiden.

Jahr				
Temperaturen	(a) 2,9-8,8 °C	(b) < 9,3 °C	(c) < 9,8 °C	(d) < 11,5 °C
Niederschlagssummen	(1) 487-689 l/m²	(2) < 782 l/m²	(3) < 892 l/m²	(4) < 2477 l/m²
Sommer				
Temperaturen	(a) 3,6-17 °C	(b) < 17,6 °C	(c) < 18,1 °C	(d) < 20 °C
Niederschlagssummen	(1) 154-206 l/m²	(2) < 230 l/m²	(3) < 267 l/m²	(4) < 845 l/m²

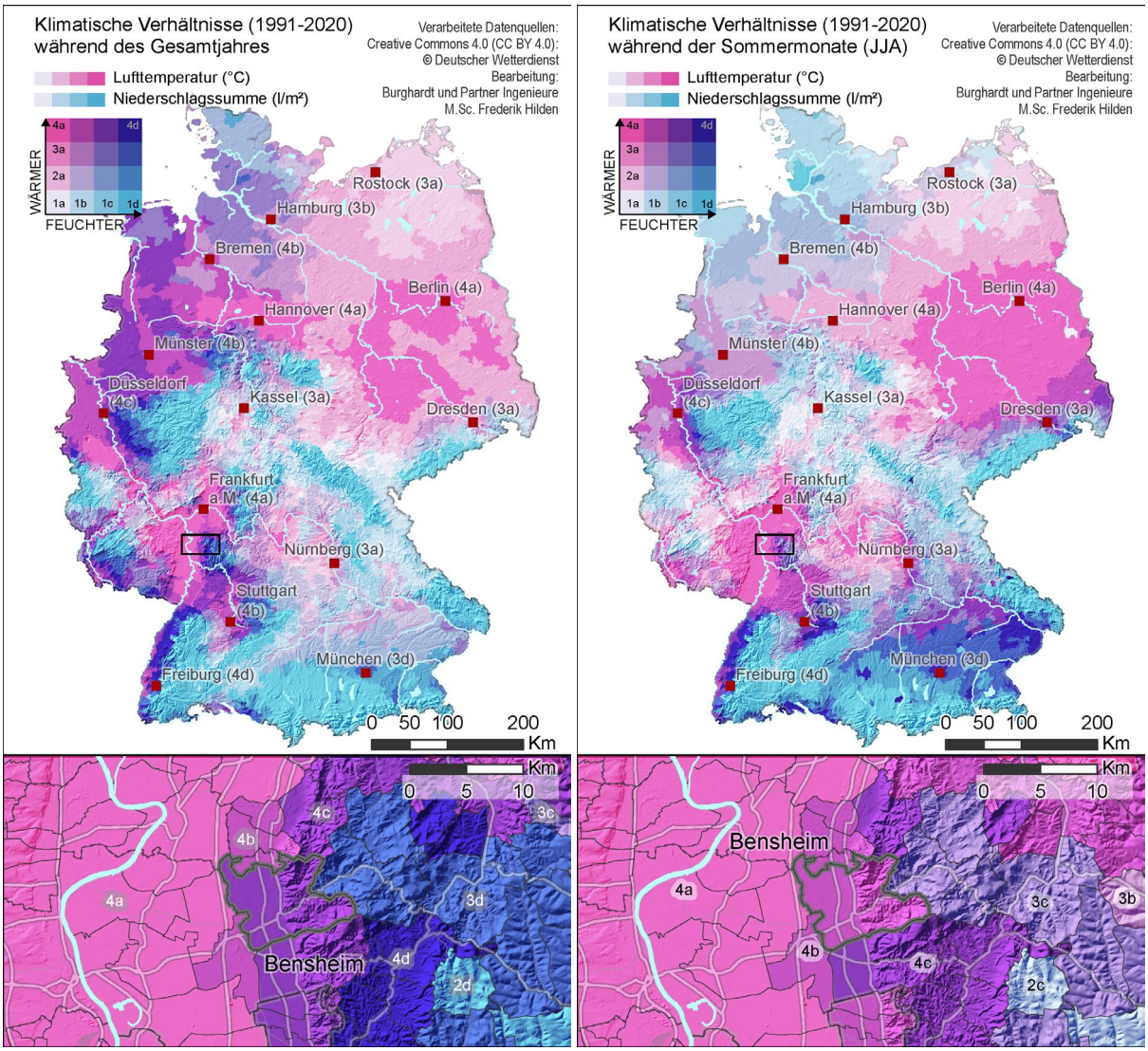


Abbildung 17: Bivariate Darstellungsform der klimatischen Verhältnisse während des Gesamtjahres (links) und während des Sommers (Juni, Juli, August – rechts). Die genauen Wertebereiche der unterschiedlichen Klassen für Temperatur (a bis d) und Niederschlagssummen (1 bis 4) sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Die beiden Abbildungen unterscheiden sich in den betrachteten Zeiträumen. Links ist die Einteilung entsprechend der durchschnittlichen Lufttemperatur und der Niederschlagssumme im Gesamtjahr. Rechts wird der Sommer gesondert betrachtet, um die klimatischen Verhältnisse während der Jahreszeit mit dem höchsten thermischen Stress abzubilden. Allgemein ist erkennbar, dass die nordwestlichen Regionen auf das Gesamtjahr betrachtet vergleichsweise mild und feucht sind, was die maritimen Auswirkungen auf das Klima verdeutlicht. Im Sommer sind es hingegen v.a. die südwestlichen Regionen Deutschlands, die hohe Lufttemperaturen und hohe Niederschläge verzeichnen. Des Weiteren ist der Süden Deutschlands generell sehr feucht, während der Nordosten besonders trocken ist.

Die Region des oberrheinischen Tieflandes, an dessen Rand sich Bensheim befindet, charakterisiert sich sowohl im Gesamtjahr als auch in den Sommermonaten als warm-trocken. Bensheim wird im Gesamtjahr mit 4c typisiert und im Sommer mit 4b. Auch hier wird die Übergangslage zwischen warm-trocken (4a) und kühl-feucht (2c) sichtbar.

Historische Klimaveränderungen

Anhand der Daten der DWD-Messstationen können die historischen Dynamiken seit dem Zeitalter der Industrialisierung nachvollzogen werden. Die jährlich gemittelten Lufttemperaturen in 2 m über Grund seit dem Jahr 1880 weisen auf eine einsetzende Erwärmung der bodennahen Luftschicht ab den 1990er Jahren hin. Abbildung 18 gibt für Hessen Aufschluss über die relativen Veränderungen der Lufttemperaturen im Jahresmittel mit dem langjährigen Mittel des 20. Jahrhunderts von 1901-2000 als Basistemperatur.

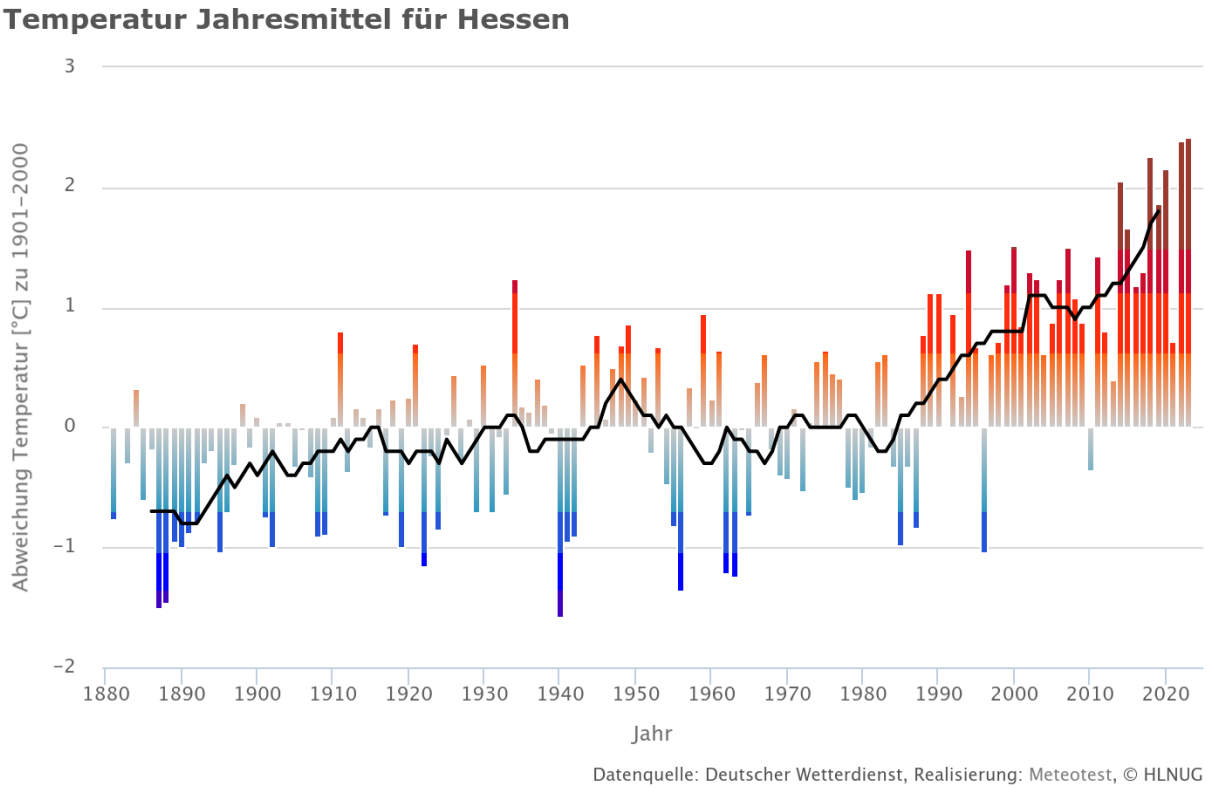


Abbildung 18: Historische Dynamik der Lufttemperatur in 2 m über Grund im Jahresmittel (Säulen) und im 5-jährige Mittel (Graph) von 1880 bis 2023 in Hessen.

Die blauen bzw. roten Säulen signalisieren, ob das jeweilige Jahr mit seiner gemittelten Lufttemperatur über oder unter dem Referenzzeitraum von 1901-2000 verortet wird. Der schwarze Graph fasst die langjährigen Dynamiken im 5-jährigen Mittel zusammen. Die Erwärmung in Hessen gegenüber dem Referenzzeitraum ist also bereits bei 1,8 °C angelangt. Wie überaus deutlich zu erkennen, stellt der Klimawandel kein theoretisches Konstrukt mehr dar, sondern ist anhand unverfälschter Messdaten belegbar und längst auch vor Ort im Alltag Realität. Wie sich dies auf die Region Bensheim auswirkt, wird im Folgenden näher erläutert.

Klimatische Charakterisierung des Untersuchungsraums

Die klimatische Charakteristik eines Untersuchungsgebietes wird durch die Dynamik der klimatischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlagssumme und klimatische Wasserbilanz beschrieben. Nachfolgend wird der Jahresverlauf dieser klimatischen Parameter innerhalb der Verwaltungsgrenzen von Bensheim mit dem historischen Verlauf von 1881-1910, 1971-2000 und 1991-2020 abgebildet (siehe Diagramm 1 und Tabelle 7). Die klimatischen Veränderungen seit dem industriellen Zeitalter zu heute werden hierdurch wieder deutlich.

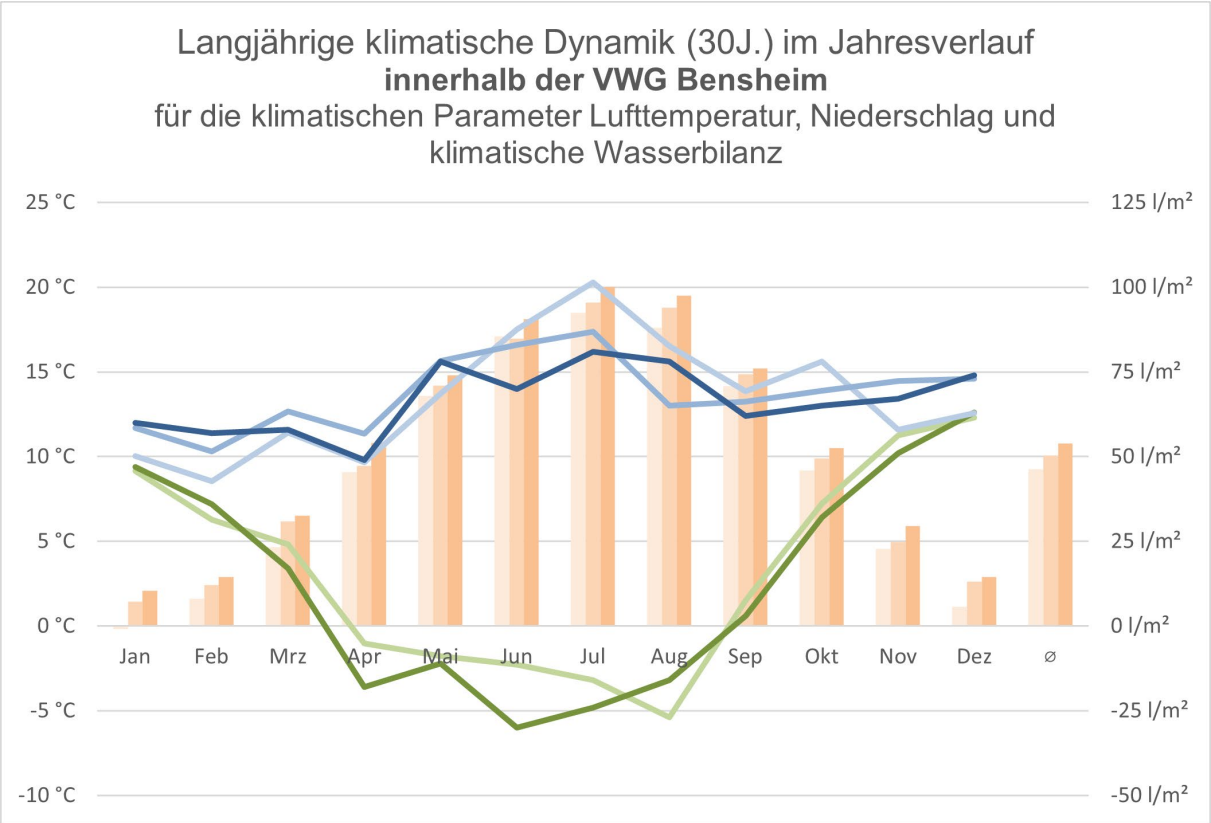


Diagramm 1: Darstellung der langjährigen klimatischen Dynamiken für die Parameter Lufttemperatur (orange Säulen), Niederschlagssummen (blaue Linien) und die klimatische Wasserbilanz (grüne Linien). Die zugehörigen Werte der 30jährigen Mittel sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 7: Zu Diagramm 1 korrespondierende Wertetabelle der Änderungssignalen der drei klimatischen Parameter zum Referenzzeitraum. Bei der Lufttemperatur werden verhältnismäßig starke Anstiege im Jahresgang rot hervorgehoben. Bei den wasserbezogenen Werten werden Anstiege grün und Verluste rot hinterlegt.

		30J.	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	⌀
°C	**Lufttemperatur**	**1881-1910**	**-0,2**	**1,6**	**4,6**	**9,1**	**13,6**	**17,1**	**18,5**	**17,6**	**14,2**	**9,2**	**4,6**	**1,2**	**9,3**
°C	*Änderungssignal*	1971-2000	*+1,6*	*+0,8*	*+1,5*	*+0,4*	*+0,6*	*-0,1*	*+0,6*	*+1,2*	*+0,7*	*+0,7*	*+0,4*	*+1,5*	*0,6*
°C	*Änderungssignal*	1991-2020	*+2,3*	*+1,3*	*+1,9*	*+1,7*	*+1,2*	*+1,0*	*+1,5*	*+1,9*	*+1,0*	*+1,3*	*+1,3*	*+1,7*	*1,2*
l/m²	**Niederschlags-summe**	**1881-1910**	**50**	**43**	**57**	**48**	**69**	**88**	**101**	**83**	**69**	**78**	**58**	**63**	**807**
l/m²	*Änderungssignal*	1971-2000	+8	+9	+6	+9	+10	-5	-15	-18	-3	-9	+14	+10	+52
l/m²	*Änderungssignal*	1991-2020	+10	+14	+1	+1	+9	-18	-20	-5	-7	-13	+9	+11	+28
l/m²	**Klimatische Wasserbilanz**	**1971-2000**	**46**	**31**	**24**	**-5**	**-9**	**-11**	**-16**	**-27**	**8**	**36**	**56**	**62**	**195**
l/m²	*Änderungssignal*	1991-2020	*+1*	*+5*	*-7*	*-13*	*-2*	*-19*	*-8*	*+11*	*-5*	*-4*	*-5*	*+2*	*-45*

Anhand der monatlich gemittelten Lufttemperatur sind klare jahreszeitliche Schwankungen zu erkennen. Die Temperaturen sind in den vergangenen 110 Jahren bereits um +1,2 °C angestiegen, mit monatlichen Unterschieden. Die Wintermonate sind mit bis zu +2,3 °C signifikant milder geworden, wobei allein die vergangenen 20 Jahre seit 2000 einen Temperaturanstieg von +0,7 °C verzeichnen, was wiederum die beschleunigte Erwärmung verdeutlicht. Die Sommermonate Juli und August erwärmen sich ebenfalls überdurchschnittlich, was besonders die bioklimatische Belastung für Menschen und Natur infolge von heißeren Sommern verstärkt.

Bezüglich der monatlichen Niederschlagssummen hat sich die grundsätzliche Verteilung der Niederschläge nicht wesentlich verändert. Die Kurve wird jedoch sichtbar flacher, die monatlichen Unterschiede werden geringer. Die ersten vier Monate verzeichnen die geringsten Niederschläge (PrMIN = April 49 l/m²), die Sommermonate die höchsten (PrMAX = Juli 81 l/m²).

Die klimatische Wasserbilanz fasst die thermischen und niederschlagsbezogenen Einflüsse zusammen und veranschaulicht, was nach Verdunstung langfristig für Natur und Mensch erhalten bleibt. Sowohl für die Landwirtschaft, aber auch für die städtische Vegetation und Grünstrukturen ist dieser Parameter daher relevant. Sichtbar wird die entgegengesetzte Kurve zu den anderen zwei Parametern. Zwar regnet es im Sommer mehr, aber durch die höheren Temperaturen bleibt weniger vom Niederschlag übrig.

Die klimatische Wasserbilanz in Bensheim ergibt sich aus den Daten des DWD mit einem eigenen Berechnungsverfahren (vgl. Kapitel 3.1.1). Die Dynamik zeigt, dass die höheren Lufttemperaturen auch mit einer höheren Verdunstung und somit mit einem umfassenderen Wasserverlust führt. Die bereits genannten Monate mit den höchsten Lufttemperaturen sind daher auch bei der klimatischen Wasserbilanz mit -70 l/m² von den größten Wasserverlusten betroffen. Im Jahr beträgt die Bilanz im langjährigen Mittel 1991-2020 161 l/m².

Die **Klimatische Wasserbilanz** veranschaulicht, welchen Einfluss die Temperaturdynamik auf die Nettoverfügbarkeit der Niederschlagssummen hat, indem die Verdunstungsrate (potentielle Evapotranspiration) von Landflächen mit bilanziert wird. Prinzipiell ist die Verdunstung von Landflächen aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche sowie unterschiedlicher Temperaturen und Bodenwassergehalte kompliziert. Aus diesem Grund existieren verschiedene Verfahren zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz. Die meisten Berechnungen stellen Näherungswerte für die maximale Verdunstung bewachsener Landflächen dar.

Die Beschaffenheit des Geländes und der Landnutzung in einer Region beeinflussen die Dynamik des Mesoklimas grundlegend. Anthropogene Veränderungen der Landnutzung und der Oberflächenrauigkeit, wie im Kontext von großen Siedlungsgebieten, führen zu einer Veränderung der bodennahen Lufttemperatur und zu einer Ausbremsung der bodennahen Anströmung.

Die langjährige Lufttemperatur der bodennahen Luftschichten in 2 m über Grund wird nachfolgend dargestellt (siehe Abbildung 19). Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der Sommermonate Juni, Juli und August für die Region von Bensheim.

Eine Darstellung im größeren Maßstab ist aufgrund der Auflösung von 1 km x 1 km nicht sinnvoll.

Im Untersuchungsraum Bensheim wird die wesentliche Rolle der Topografie sichtbar. Der Abfall des Geländes in westlicher Richtung geht einher mit ansteigenden Lufttemperaturen. Entsprechend lässt sich Bensheim in zwei Bereiche einteilen. Die westlichen Bereiche, die sich bereits im Rheintal befinden, sind signifikant wärmer als die höheren östlichen Lagen.

Innerhalb der Verwaltungsgrenzen divergiert die langjährige Lufttemperatur daher um bis zu 2,4 °C zwischen 17,3 °C und 19,7 °C (siehe Tabelle 8).

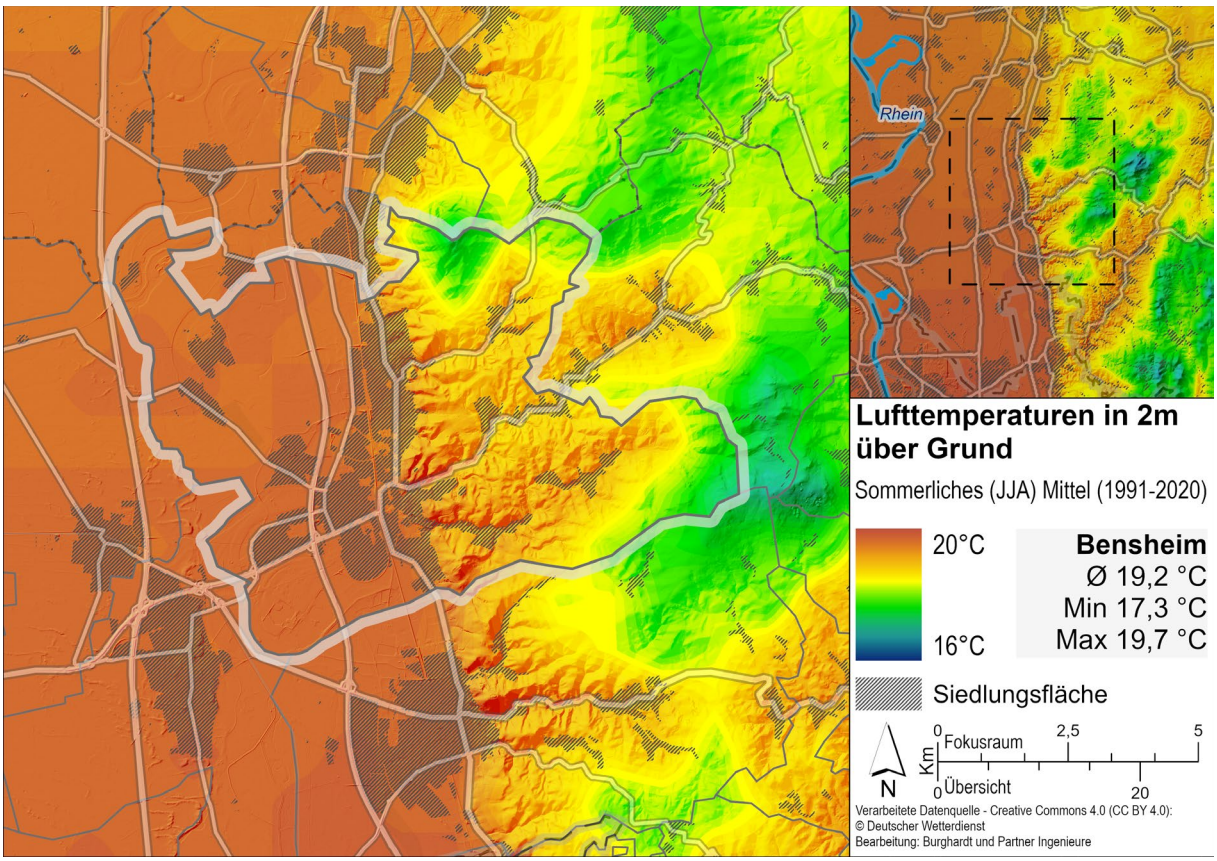


Abbildung 19: Die Lufttemperatur (2 m über Grund) in einer Auflösung von 1 km x 1 km. Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der Sommermonate Juni, Juli und August.

Regionaltypische Lufttemperatur im Tagesverlauf

Diagramm 2 gibt den gemittelten Tagestemperaturverlauf für den wärmsten Sommermonat Juli und für die historischen langjährigen Mittel 1951-1980, 1971-2000 und 1991-2020 wieder. Die Werte wurden an der DWD-Station 5906 in Mannheim gemessen und bieten eine Datengrundlage, die aufgrund der räumlichen Nähe zu Bensheim auch für das Untersuchungsgebiet wertvolle Erkenntnisse liefert. Die Temperaturkurve der bodennahen Luftschicht auf 2 m über Grund zeigt, dass die maximale Abkühlung (vgl. Kapitel 5.4.2) im Sommer gegen 4 Uhr nachts erreicht ist. Mit dem Sonnenaufgang setzt die Erwärmung ein, welche ihr maximales Potenzial gegen 14 Uhr erreicht.

Der Tagesverlauf lässt sich in 4 Phasen einteilen. Die Erwärmungsphase findet im Zeitraum von 6 bis 10 Uhr statt. Die Kurve vollzieht hier einen steilen Anstieg mit bis zu 2 °C pro Stunde. Die Zeit zwischen 11 und 17 Uhr kann als Temperaturplateau bezeichnet werden. Die Temperatur stagniert innerhalb des Wertebereichs von 2 °C auf hohem Niveau. Die 3. Phase beschreibt die Abkühlung zwischen 18 und 22 Uhr. Nachdem die direkte solare Einstrahlung nach Sonnenuntergang ausbleibt, kühlen sich sowohl die Oberflächen als auch die darüberliegenden Luftschichten ab. Die Phase der nächtlichen Kühle kann zwischen 0 und 4 Uhr verortet werden. Thermisch unbelastete Landflächen, v.a. Naturräume, sind in dieser Phase nahezu ausgekühlt.

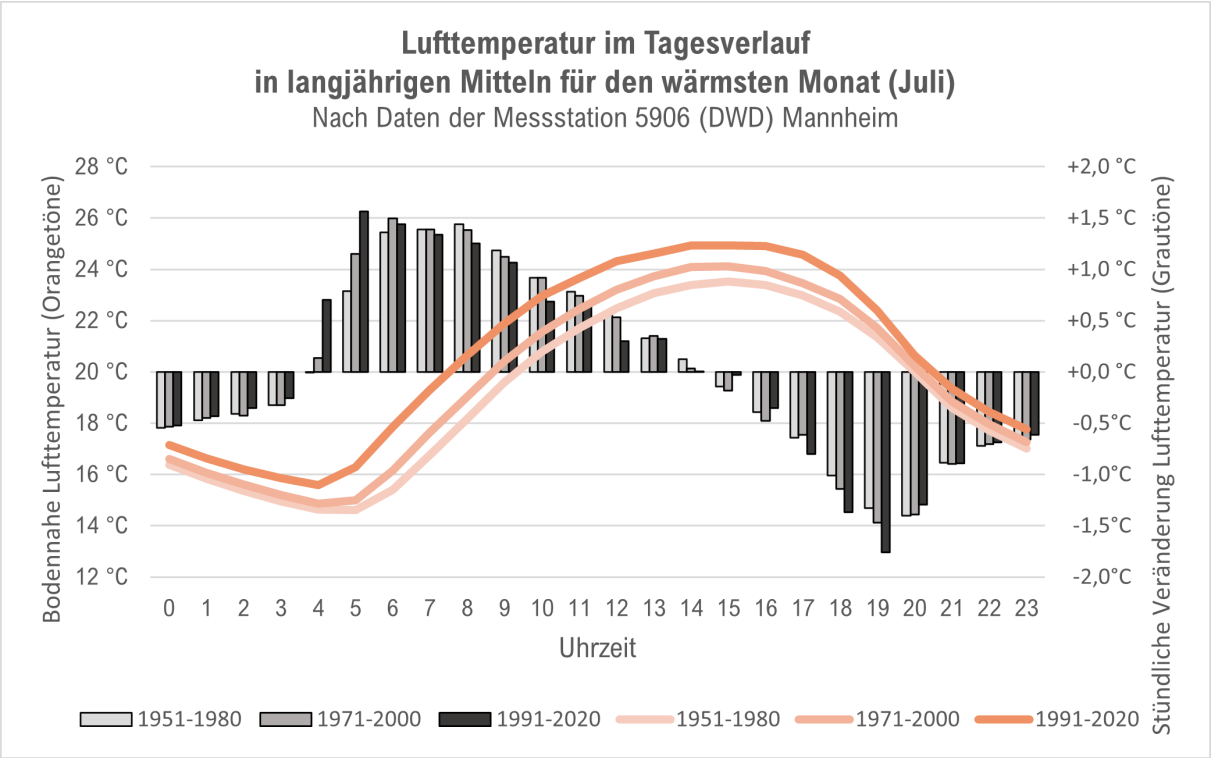


Diagramm 2: Darstellung des gemittelten Tagesverlaufs während des wärmsten Monats Juli für die langjährigen Mittel 1951-1980, 1971-2000, 1991-2020 nach den Messdaten der DWD Station (ID 5906). Die orangenen Graphen zeigen die absoluten Lufttemperaturen in 2 m über Grund, die Säulen zeigen die Veränderung gegenüber der vorangegangenen Stunde.

Allgemein spiegelt sich auch bei der tageszeitabhängigen Betrachtung der allgemeine Trend der Erwärmung wider, wodurch sich die Kurve der Lufttemperaturen im Juli durchschnittlich um +1,4 °C gegenüber 1980 nach oben verschoben hat. Ähnlich der unterschiedlichen Erwärmungsdynamik der einzelnen Monate (siehe Diagramm 1) hebt sich das Temperaturniveau auch bei den Tageszeiten nicht gleichmäßig. Die Temperaturveränderung des langjährigen Mittels 1991-2020 zeigt, wie die Erwärmungsphase bereits deutlich früher und intensiver beginnt. Um 5-6 Uhr ist die Erwärmung am umfassendsten mit +1,6 °C, während das maximale Potenzial bis 1980 erst um 8-9 Uhr erreicht wurde. Das Temperaturmaximum wird weiterhin um 14 Uhr erreicht. Interessanterweise zeigt sich ebenfalls in der Abkühlungsphase, dass der Temperaturabfall der aktuellen Kurve steiler geworden ist. Die Werte sinken hier zwischen 17 und 19 Uhr um bis zu -1,8 °C pro Stunde. Ab 20 Uhr kehrt sich dieser Trend jedoch wieder um, wodurch der Temperaturrückgang mittlerweile geringer ausfällt und im Juli nur noch im Schnitt auf 15,6 °C sinkt. Die kühlen Nachtstunden werden in Konsequenz kürzer, was im Umkehrschluss wieder mehr thermische Belastung bedeutet.

Vor stadtklimatischen Gesichtspunkten besitzt v.a. die Abkühlungsphase Planungsrelevanz. Je heißer ein Tag ist, desto stärker vollzieht sich die Geschwindigkeit der Abkühlung nach Sonnenuntergang. Die gemessenen Werte in Diagramm 2 spiegeln die Bedingungen eines thermisch unbeeinflussten Außenbereichs wider. Das bedeutet, dass die Umgebung möglichst frei von anthropogenen Einflüssen ist und die Ergebnisse regionaltypisch ausgewertet werden können. Städtische und versiegelte Räume weichen von dieser regionaltypischen Temperaturkurve ab. Infolge von Versiegelung und erhöhter Oberflächenrauigkeit durch Bebauungsstrukturen verändert sich auch die Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Durch die Versiegelung steigt die Wärmekapazität der Oberfläche. Die solare Wärmeenergie wird stärker absorbiert und gespeichert. Nach Sonnenuntergang kommt es durch die sog. thermische Latenz zu

einer verlangsamten Abgabe der tagsüber gespeicherten Wärmeenergie an die bodennahen Luftschichten. Ferner verursacht die erhöhte Oberflächenrauigkeit eine Einschränkung der Verbreitung kälterer Luftschichten aus dem unbelasteten Umland. Thermisch belastete städtische Räume bilden daher Wärmeinseln (vgl. Kapitel 2.2) aus, die nur geringfügig auskühlen.

Die Planung ist angesichts der steigenden allgemeinen Lufttemperatur gefordert, den Transport kälterer Luftschichten in die Stadt zu ermöglichen. Wie anhand der Kurve zu erkennen, reguliert sich der Wärmehaushalt auch bei thermisch hohen Belastungen. Die Kurven nähern sich im Laufe der Nacht aneinander an. Diese Auskühlung ist in belasteten städtischen Räumen eingeschränkt, weshalb der Transport der Kaltluft aus dem Umland zu erhalten ist.

Tabelle 8: Übersicht zu den ausgewerteten historischen Klimadaten für das Verwaltungsgebiet von Bensheim der letzten zwei 30-jährigen Mittel sowie zu den deutschlandweiten Werten. Die klimatischen Kenntage werden im nächsten Kapitel näher beschrieben.

Bensheim	Historischer Zeitraum			Deutschland
Zeitraum	1971 bis 2000	1991 bis 2020	Vergleich (Δ) der 30-jährigen Mittel	1991 bis 2020
Lufttemperatur 2 m ü.G. (in °C)				
Gesamtjahr	10,1	10,8	+ 0,7 °C	9,2
Sommermonate (JJA)	18,3	19,2	+ 0,9 °C	17,6
Wintermonate (DJF)	2,2	2,6	+ 0,5 °C	1,2
Klimatische Kenntage (Jahr)				
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)	47	57	+ 10	41
Heiße Tage (LTmax ≥ 30 °C)	10	15	+ 4	9
Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)	0,8	1,5	+ 1	-
Frosttage (LTmin < 0 °C)	63	64	+ 1	84
Eistage (LTmax < 0 °C)	13	11	- 2	20
Niederschlagssumme (in l/m²)				
Gesamtjahr	824	799	+ 3 %	791
Sommermonate (JJA)	235	229	+ 3 %	241
Wintermonate (DJF)	218	221	- 1 %	191
Kl. Wasserbilanz (in l/m²)				
Gesamtjahr	194	148	+ 31 %	304
Sommermonate (JJA)	-54	-70	- 22 %	-30
Wintermonate (DJF)	139	145	- 4 %	185

Anmerkung: Zur besseren Verständlichkeit werden die Werte gerundet dargestellt, wodurch es mitunter zu Ungenauigkeiten bei den Änderungssignalen (Δ) kommt. Zudem werden die Änderungssignale bei Lufttemperaturen mit °C angegeben, und nicht der gemäß der wissenschaftlichen Praxis in Kelvin.

5.1.2 Kenntage

Da die Betrachtung der durchschnittlichen Monatstemperaturen nur wenig Aussagekraft zu den täglichen Spitzenbelastungen besitzt, werden mit den klimatischen Kenntagen zusätzliche Aussagen zu lokaltypischen Klimacharakteristika getroffen. Mit sog. Ereignistagen oder Kenntagen (siehe Tabelle 9) lassen sich sowohl Klimaklassifikationen zuordnen als auch Trends von klimatischen Veränderungen identifizieren und die damit einhergehende thermische Belastung veranschaulichen. Die Erhebung orientiert sich an definierten Schwellenwerten, die bei Erreichen bzw. Überschreitung pro Tag erhoben werden [38].

Tabelle 9: Typische temperaturbezogene Kenntage mit ihren zugehörigen Definitionen, die im Rahmen der Stadtklimaanalyse ausgewertet wurden.

Kenntag	Definition	Kenntag	Defintion
Sommertag	$LT_{MAX} \geq 25$ °C	Frosttag	$LT_{MIN} < 0$ °C
Heißer Tag	$LT_{MAX} \geq 30$ °C	Eistag	$LT_{MAX} < 0$ °C
Tropennacht	$LT_{MIN} \geq 20$ °C		

Die Entwicklung in Deutschland zeigt, dass sich die Temperaturmaxima bereits in Richtung extremer werdenden thermischen Belastungen verschiebt, während die Temperaturminima einen Trend zu milderen Belastungen aufweisen [39]. Die systematische Erhebung der klimatischen Kenntage gewinnt aus diesem Grund an Bedeutung.

Hohe Temperaturen, wie in den Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten dargestellt, haben zur Folge, dass sich das allgemeine Stresslevel für Menschen, Tiere und Pflanzen auf lange Sicht erhöht [40–42]. Bei vulnerablen Bevölkerungsgruppen (wie z.B. älteren Menschen, Kindern, Wohnungslosen, draußen Arbeitenden, Personen mit Herzkreislauferkrankungen etc.) kann dies zu schweren gesundheitlichen Konsequenzen führen. Fällt die Temperatur nachts nicht unter 20 °C, ist der menschliche Körper nur noch bedingt in der Lage, sich von täglichen Belastungen zu regenerieren [42,43]. Treten die Ereignistage im Kontext mit sog. austauscharmen Wetterlagen auf, verstärkt sich die Belastung insbesondere in städtischen Gebieten weiter. Aufgrund der Wärmespeicherung versiegelter Flächen reduziert sich die Temperatur in den strahlungsfreien Stunden während der Nacht nur gering. Außerdem wird die Luftzirkulation aufgrund von Gebäuden und Infrastrukturen eingeschränkt. In Verbindung mit austauscharmen Wettersituationen, bei denen die Luftmassen nur begrenzt zirkulieren, können städtische Wärmeinseln verstärkt werden. Dies führt zu höheren Temperaturen in den Städten und verschärft die Auswirkungen von Hitzewellen und Luftqualitätsproblemen [44]. Es ist davon auszugehen, dass austauscharme Wetterlagen zunehmen werden und im Zuge des Klimawandels länger anhalten [45]. Welche gesundheitlichen Konsequenzen hohe thermische Belastungen auf die Bevölkerung haben, zeigt sich bereits in den Großstädten: In Berlin etwa konnten bereits von 2001-2010 bis zu 5 % aller Todesfälle mit Hitzeereignissen in Verbindung gebracht werden [46]. In den vergangenen 20 Jahren ist die Zahl der hitzebedingten Todesfälle in Europa um 30 % gestiegen; bis zu 72.000 sind allein auf die Hitzewelle 2022 zurückzuführen [47].

Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte treten v.a. in den Monaten Juni, Juli und August auf und geben besonders hohe thermische Belastungen an. Ein Tag wird gewertet, sobald die maximale Lufttemperatur in 2 m über Grund im Tagesverlauf die Marke von 25 °C bzw. 30 °C erreicht oder überschreitet oder die Temperatur in den nächtlichen Stunden mit geringem bis keinem solaren Strahlungsantrieb zwischen 18 und 6 Uhr nicht unter 20 °C fällt [48].

Die Anzahl dieser klimatischen Kenntage hat sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich erhöht (siehe Diagramm 3 und Tabelle 8). Seit dem 30-jährigen Mittel 1971-2000 sind die Sommertage von 47 Tagen im Jahr auf 57 Tage im Jahr angestiegen. Die Anzahl der Heiße Tage hat um 5 Tage zugenommen.

Als ein Ergebnis der Auswertung bestätigt sich durch die steigende Anzahl an klimatischen Kenntagen in Bensheim die grundsätzliche Beobachtung, dass die Sommer tendenziell mit extremer werdenden Belastungen einhergehen [39].

Um auch die klimatische Dynamik der Wintermonate sichtbar zu machen, werden für diese Jahreszeit ebenfalls die zwei Kenntage Frosttage und Eistage [49,50] definiert. Während die hitzebezogenen Ereignistage i.d.R. einen direkten Effekt auf die Bevölkerung haben, ist das Ausbleiben von kältebezogenen Ereignistagen für die Bevölkerung eher indirekt spürbar (Vegetationszyklen, Schädlingswellen etc.).

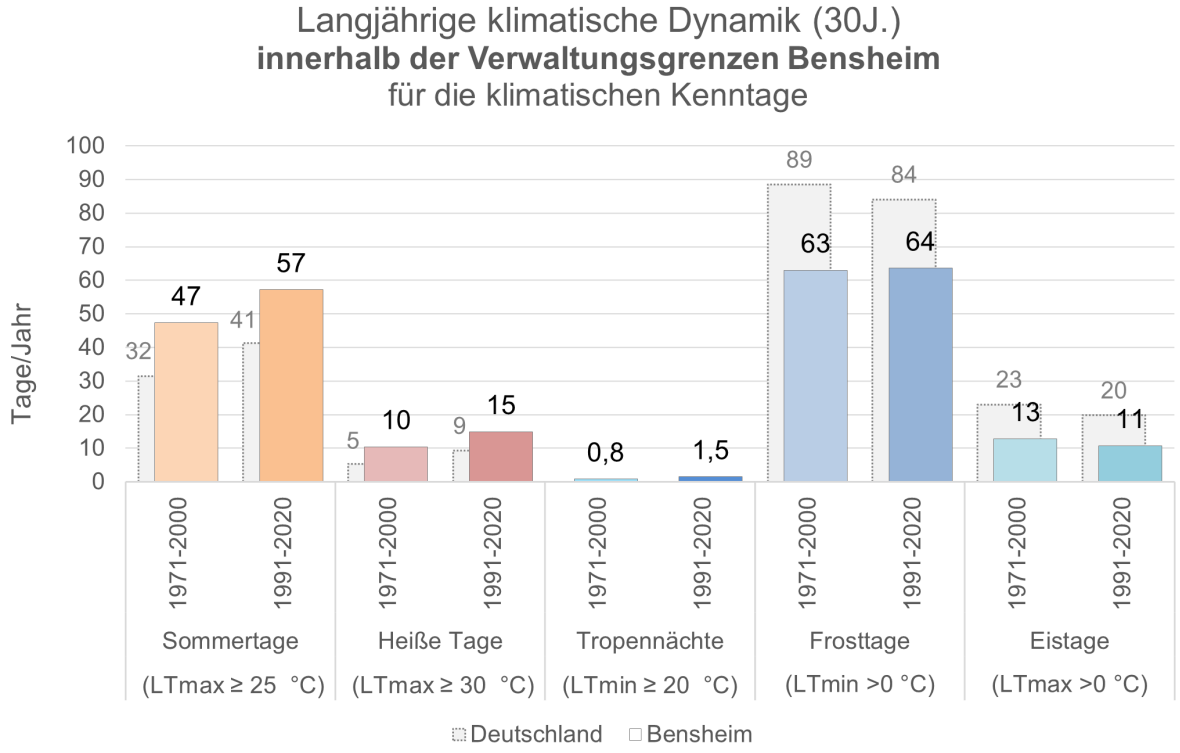


Diagramm 3: Darstellung der temperaturbezogenen Kenntage für die jüngsten historischen Mittel für die Verwaltungsgrenzen von Bensheim. Die Anzahl der Sommertage und Heiße Tage geht erwartungsgemäß nach oben, während die Zahlen zu den kältebezogenen Kenntagen rückläufig sind. Die grauen Säulen repräsentieren den jeweiligen Wert für Gesamtdeutschland.

5.1.3 Windverhältnisse

Als Wind wird Luft bezeichnet, welche durch Luftdruckunterschiede in Bewegung gesetzt wird. Die Anströmungsrichtung bzw. Windrichtung benennt die Himmelsrichtung, aus der der Wind weht. In der Stadtplanung können sich positive Effekte ergeben, wenn die Einflüsse der regionaltypischen Windrichtung mitgedacht werden. Eine gute Belüftung besiedelter Räume kann Luftverschmutzungen und Wärmebelastungen entgegenwirken. Dabei ist die thermische Belastung neben der Rauigkeit auch direkt abhängig von der gegebenen Windgeschwindigkeit. Ferner beeinflussen Windgeschwindigkeiten auch menschliche Aktivitäten. Die Bedeutung städtischer Durchlüftung, Kühlung und Temperierung dient der weiteren Planung städtischer Räume und Entwicklungen [51–53].

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit den Windverhältnissen und insbesondere den Windrichtungen und -geschwindigkeiten in Bensheim und der Region sowie ihren Implikationen für die Stadt- und Regionalplanung. Dazu wird zunächst eine allgemeine Übersicht über die Windverhältnisse und anschließend ein detaillierterer Überblick über lokale Besonderheiten gegeben.

In Windrosen werden Windstärke und -richtung oft auf Grundlage einer kreisförmigen 360-Grad-Skala grafisch dargestellt. Dabei orientiert sich die Skala am geographischen Norden, welcher sich bei 0° befindet. Osten ist bei 90°, Süden bei 180° und Westen bei 270°. Während die Ausrichtung der Fläche Auskunft über die relative Verteilung der Anströmungsrichtungen gibt, zeigt die Farbgebung die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten an.

Die regionaltypischen Windverhältnisse umfassen die langjährig gemittelten Bedingungen der Anströmungen durch bodennahe Luftschichten in 10 m über dem Grund. Dargestellt werden diese mittels einer flächigen und zeitlichen Auflösung von Raster- und Messdaten. Die Präsentation der Messdaten in Form einer sog. Windrose ermöglicht die kombinierte Betrachtung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, angelehnt an die Form eines Kompasses.

Abbildung 20 stellt die lokalen Windverhältnisse im durchschnittlichen Jahresmittel für den Zeitraum 1980 bis 2000 dar mit Fokus auf die Gemarkung von Bensheim sowie einer größeren Übersicht der Windgeschwindigkeiten in der Region. Insbesondere die erhöhte Oberflächenrauigkeit beeinflusst die Windgeschwindigkeiten nachhaltig bis in Höhen von bis zu 500 m [54]. In Konsequenz sind die regionalen Einflüsse auch in Abbildung 20 sichtbar. In Bensheim herrschen durchschnittlich Windgeschwindigkeiten von 3,5 m/s, wobei das Minimum bei 2,1 m/s und das Maximum bei 4,3 m/s liegt. Die angrenzenden höheren Lagen verzeichnen vergleichsweise hohe Windgeschwindigkeiten.

Eine weitere Ausdifferenzierung der lokalen Windverhältnisse in Bensheim bieten die Daten der DWD-Station (ID 5906), welche in stündlicher Auflösung die Windstärke und die Windgeschwindigkeit misst. Die DWD-Wetterstation befindet sich im Offenland in unmittelbarer Nähe des Siedlungsgebietes Mannheim.

Wie über Diagramm 4 verdeutlicht, werden die Windgeschwindigkeiten u.a. maßgeblich von thermischen Einflüssen gesteuert. Aus diesem Grund variieren Windgeschwindigkeiten zwischen der Tagessituation mit einem thermischen Strahlungsantrieb und die Nachtsituation ohne solaren Input. In den Nachtstunden zwischen 22-4 Uhr dominieren Schwachwindsituationen von 0-2 m/s und ermöglichen bspw. den Abfluss von Kaltluft. Ferner führen die

allgemeinen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen dazu, dass im Winter und Frühling die Windstärken höher liegen als im Sommer und Herbst.

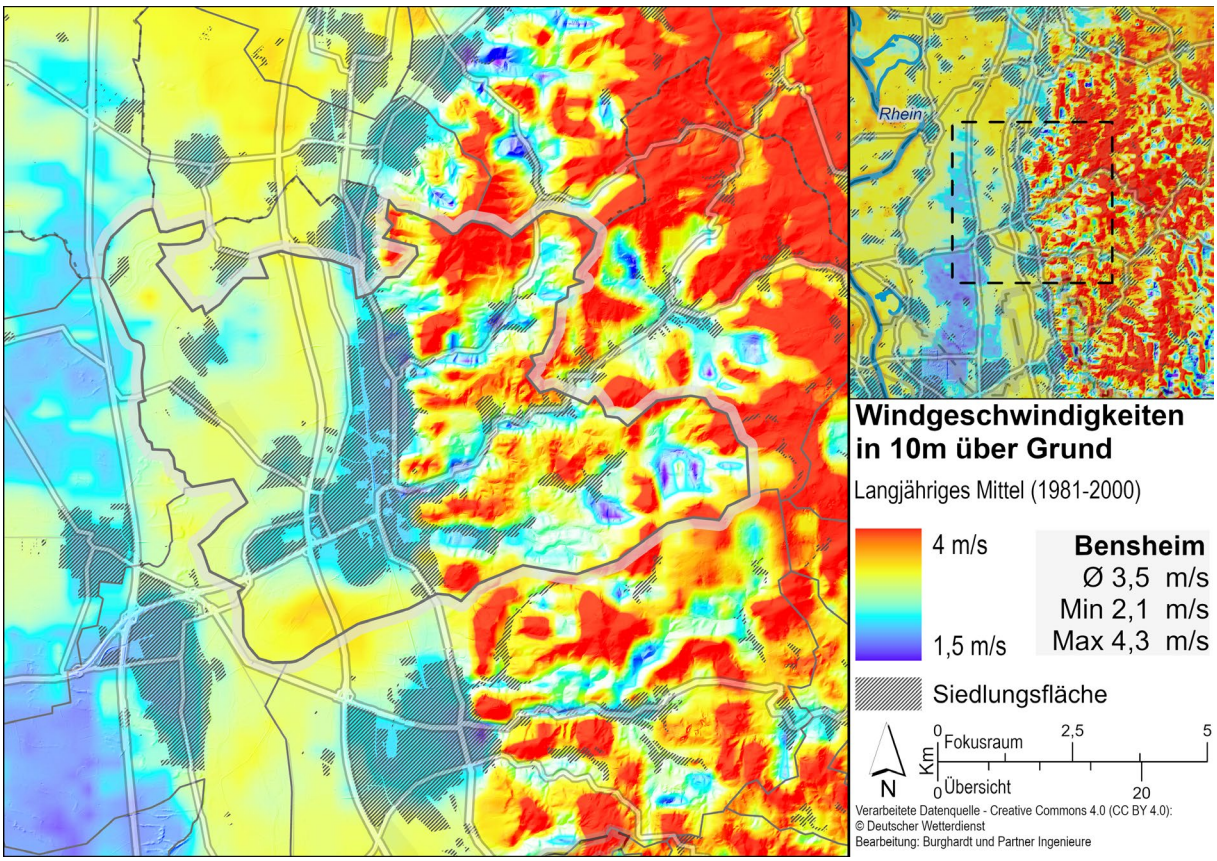


Abbildung 20: Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund für das langjährige Mittel 1981-2000 mit Fokus auf die Gemarkung Bensheim und der regionalen Übersicht. Blautöne geben geringe Windgeschwindigkeiten an, Rottöne symbolisieren Windgeschwindigkeiten von 4 m/s und darüber.

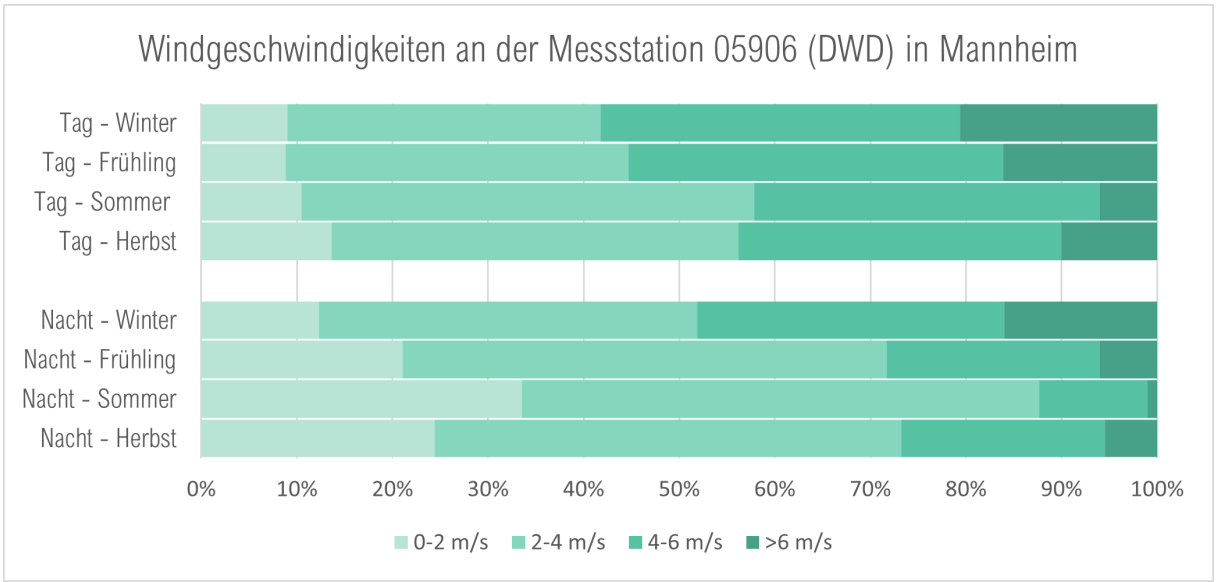


Diagramm 4: Darstellung der Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit zu den Jahreszeiten und Tages- und Nachtzeiten an der DWD-Station (ID 5906) in Mannheim.

Von Planungsrelevanz sind insbesondere die Sommermonate. Das Abkühlungspotenzial wirkt in Form von zwei Phänomenen. Zunächst bewirkt die Anströmung kälterer Luftmassen, dass wärmere Regionen ventiliert werden. Außerdem hilft Wind dem menschlichen Körper unmittelbar bei der Kühlung zu unterstützen, indem er Wärme abträgt [55]. Das thermische Empfinden wird durch die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) berechnet und dargestellt [56]. Bereits die Zunahme der Windgeschwindigkeit um 0,5 m/s kann die gefühlte Temperatur deutlich gesenkt werden [55].

In einer bebauten Umwelt, wie Städten, treten allgemein geringere Windgeschwindigkeiten auf als im Umland [55]. Gleichzeitig sind im Sommer die windschwachen Situationen häufiger als in den übrigen Jahreszeiten, wie auch die Windgeschwindigkeiten an der Messstation zeigt. Gepaart mit den höheren Lufttemperaturen und direkter solarer Strahlung führen geringe Windgeschwindigkeiten zu einer gefühlten Temperatur über der realgemessenen Lufttemperatur in °C. Dies bewirkt schlussendlich eine stärkere physiologische Belastung auf den Körper, welche bei vulnerablen Bevölkerungsgruppen schwerwiegende gesundheitliche Konsequenzen mit sich bringt.

Auch die Windrichtung spielt bei der Ventilierung der städtischen Siedlungsgebiete von Bensheim eine wesentliche Rolle. Eine standortgenaue Auswertung der Windrichtungen kann aufgrund der fehelenden Datenerhebung für Bensheim nicht erbracht werden. Daher werden auch hier die regionaltypischen Windverhältnisse der DWD-Station 5906 herangezogen. Die Ergebnisse sind detailliert in den nachfolgenden Abbildungen in Form der Windrosen dargestellt. Die Windrosen geben neben den Anströmungsrichtungen Aufschluss über die relative Ausprägung von Windgeschwindigkeiten (in %) in Bezug zur Windrichtung. Der geringen Ausprägung bzw. Häufigkeit des Auftretens von Windgeschwindigkeit über 6 m/s entsprechend, wurden diese zur Gruppe „> 6 m/s“ zusammengefasst. Die tabellarische Reduktion in Haupt- und Nebenkomponenten fasst die Ergebnisse auf einen Blick zusammen (siehe Tabelle 10).

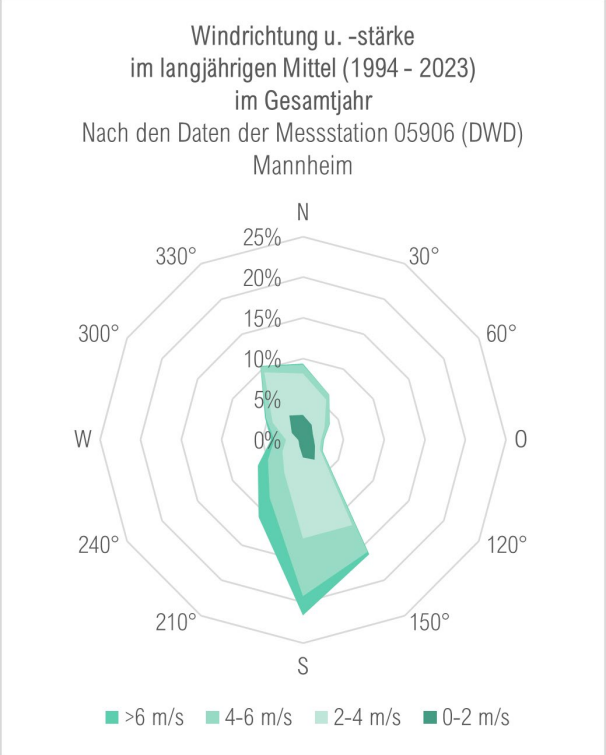


Diagramm 5: Windstärke und -richtung im langjährigen Mittel (1994-2023) für das Gesamtjahr.

Durch die vorhandene Datenlage konnten die Windstärke und Windrichtung für das langjährige Mittel der Jahre 1994 bis 2023 ausgewertet werden. Die Schwankungen in den Lufttemperaturen (Einfluss auf den Wind), im Laufe der Jahreszeiten erfordern die differenzierte Betrachtung gemäß der saisonalen Zeiten Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) und Herbst (September, Oktober, November) sowie eine tageszeitliche Differenzierung zwischen den Kernzeiten 08-18 Uhr und 22-04 Uhr.

Tabelle 10: Haupt- und Nebenkomponenten der regionaltypischen Anströmung während der Tagesstunden (08-18 Uhr) und der Nachtstunden (22-04 Uhr) an der DWD-Station 5906).

Tagesbetrachtung	Hauptkomponente	Nebenkomponente
Frühling (MAM)	Südsüdwest (180° / 210°)	Nordnordost (15°)
Sommer (JJA)	Südsüdwest (210°)	Nordnordwest (350°)
Herbst (SON)	Süd (180°)	Nord (0°)
Winter (DJF)	Süd (180°)	Nord (0°)
Nachtbetrachtung	**Hauptkomponente**	**Nebenkomponente**
Frühling (MAM)	Süd- Südsüdost (180° / 160°)	Nord- Nordnordwest (0° / 350°)
Sommer (JJA)	Süd-Südsüdost (180° / 160°)	Nordnordwest (330°)
Herbst (SON)	Süd-Südsüdost (180° / 160°)	Nordnordwest (330°)
Winter (DJF)	Süd (180°)	Nord (0°)

Die Hauptanströmungsrichtungen im Frühling (März, April und Mai, siehe Diagramm 6) sind tagsüber Süd bis Südsüdwest mit rund 30 %. Ergänzend kommt die Komponente Nordnordost hinzu. Während der Nachtstunden wechseln die Verhältnisse hinsichtlich einer dominanteren Süd-Südsüdost-Komponente und einer Nebenkomponente aus Nord-Nordnordwest.

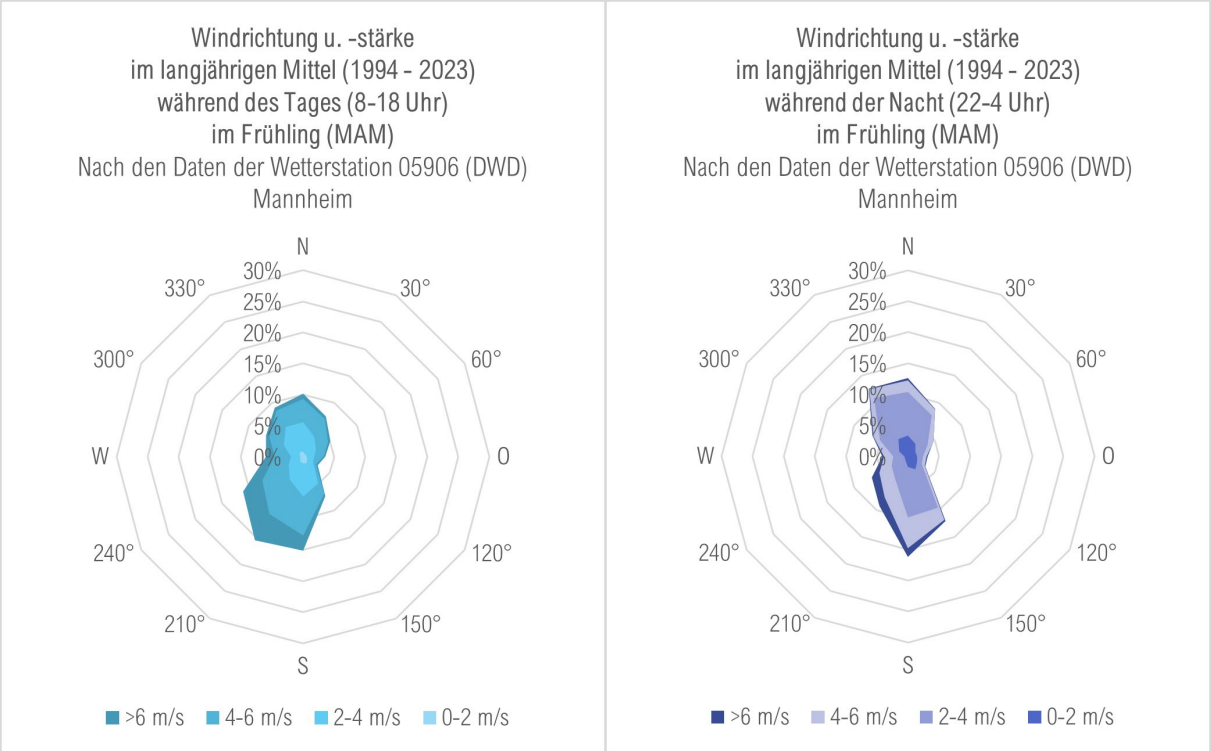


Diagramm 6: Windstärke und -richtung im langjährigen Mittel (1994-2023) für den Frühling während der Tagessituation (8-18 Uhr) und während der Nachtsituation (22-4 Uhr)

Die Tages-Hauptanströmungsrichtungen für die Sommermonate (Juni, Juli und August, siehe Diagramm 7) sind im Bereich Süd-Südwest mit rund 40 %. In selteneren Fällen ist die Anströmungsrichtung Nordnordwest. Windgeschwindigkeiten über 6 m/s sind vergleichsweise gering und treten lediglich bei einer Anströmung aus Südsüdwest auf. In der Nacht sind die Verhältnisse vergleichbar mit der Situation während der Frühlingsmonate. Der entscheidende Unterschied ist in der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit zu finden, welche für den Tag, aber insbesondere für die Nacht erkennbar niedriger liegt.

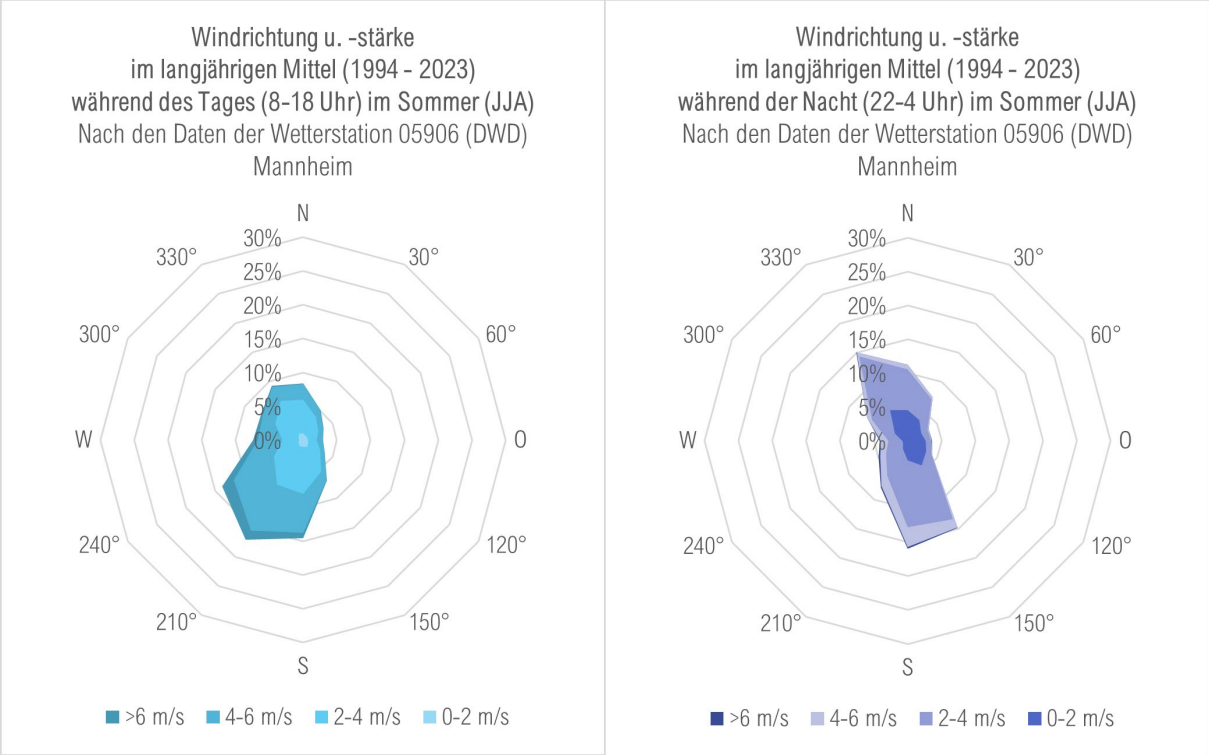


Diagramm 7: Windstärke und -richtung im langjährigen Mittel (1994-2023) für den Sommer während der Tagessituation (8-18 Uhr) und während der Nachtsituation (22-4 Uhr)

Die einzige Hauptanströmungsrichtung für den Herbst (September, Oktober und November, siehe Diagramm 8) kommt aus Süd (180°) mit Flanken aus Südsüdwest bis Südsüdost. Die Nebenkomponente ist schwach vertreten aus Norden. In der Nacht setzt sich ebenfalls die Anströmung aus Süd mit einem zusätzlichen Süd-südost-Anteil durch. Die Nebenkomponente ist etwas stärker aus Nord-Nordwest vertreten.

Die Veränderungen zum Winter (Dezember, Januar und Februar, siehe Diagramm 9) liegen erneut vor allem in der Windgeschwindigkeit. Die Hauptkomponenten sind für den Tag und die Nacht primär die Südanströmungen mit schwachen Nebenkomponenten aus Norden.

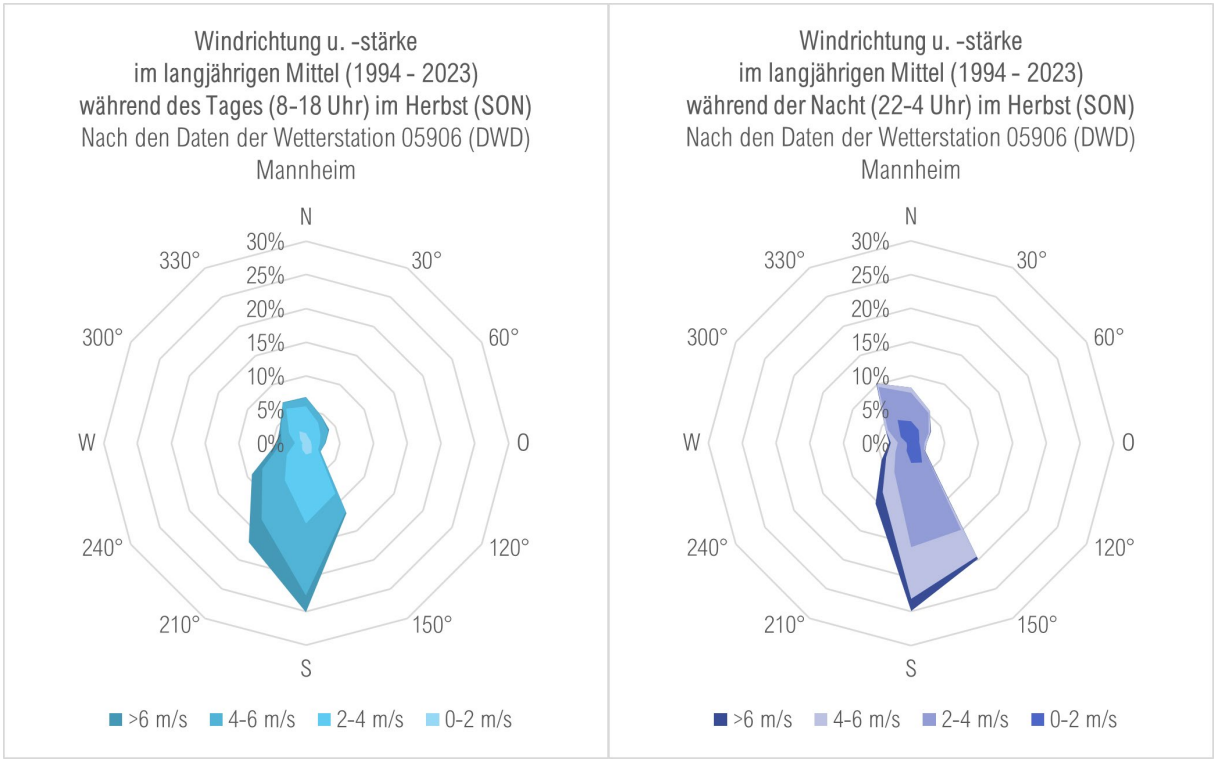


Diagramm 8: Windstärke und -richtung im langjährigen Mittel (1994-2023) für den Herbst während der Tagessituation (8-18 Uhr) und während der Nachtsituation (22-4 Uhr)

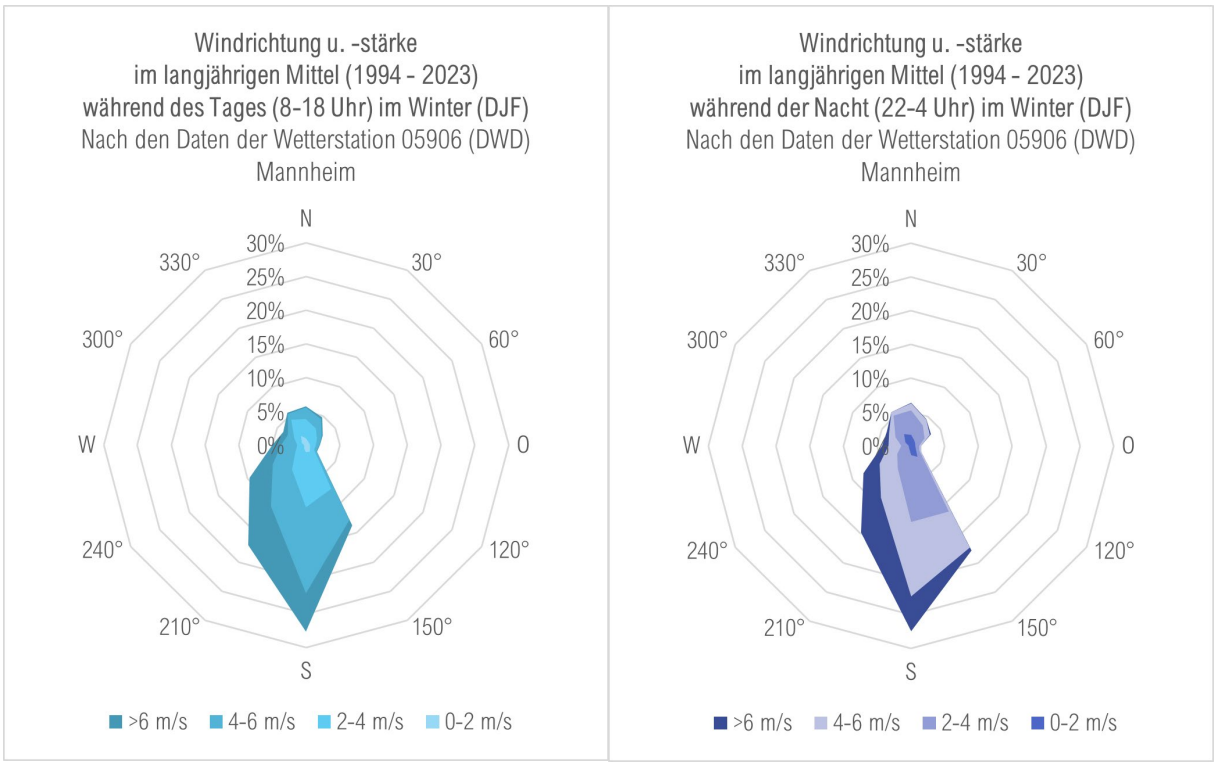


Diagramm 9: Windstärke und -richtung im langjährigen Mittel (1994-2023) für den Dezember während der Tagessituation (8-18 Uhr) und während der Nachtsituation (22-4 Uhr)

5.2 Bebauungsanalysen

5.2.1 Urbane Morphologie

Die Betrachtung der **mittleren Höhe der urbanen Morphologie** (pro Hektar) kann einen unterstützenden Beitrag zum Verständnis der städtebaulichen Strukturen leisten. Entgegen der Themenkarte zur Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ) (vgl. Kapitel 5.2.2) ist die Analyse zur mittleren Höhe der urbanen Morphologie nicht auf die administrative Einheit des Flurstücks bezogen. Die Analyse bezieht sich auf die räumliche Ausdehnung von 1 ha. Entsprechend werden im Rahmen der Analyse die Gebäudestrukturen in einen Rasterdatensatz mit der räumlichen Auflösung von 1 m x 1 m umgewandelt. Dabei erhält jede Rasterzelle den Höhenwert des zugrundeliegenden Gebäudes. Freiräume, die nicht durch Gebäude bestanden sind, erhalten einen Höhenwert von 0. Damit wird ein hochaufgelöstes Rasterabbild der vorhandenen Bebauungsstruktur geschaffen, welches für die Mittelwertberechnung genutzt werden kann. Die explizite Berücksichtigung von Freiräumen (Höhenwert = 0) ist ein relevanter methodischer Schritt. Obwohl die Gebäudehöhe der primäre untersuchte Parameter ist, misst die Analyse nicht die "mittlere Höhe der Gebäude", sondern die "mittlere Höhe der urbanen Morphologie" bzw. die volumetrische Dichte in Metern bezogen auf 1 ha.

Als räumliche Bezugsgröße wird 1 ha genutzt. Das bedeutet, das im Rahmen der Berechnung der mittleren Höhe der urbanen Morphologie, für jede Zelle der Mittelwert aus allen Rasterzellen innerhalb einer (radial berechneten) Fläche von 1 ha ermittelt wird.

Durch die Verwendung dieser Ermittlungsmethode wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Stadtstrukturen nicht ausschließlich durch die Baukörper, sondern auch durch die dazwischenliegenden Freiräume bestimmt werden. Entsprechend lässt sich diese Analyse eine flächenlosgelöste Betrachtung der städtebaulichen Dichte zu. Die Visualisierung mit Hilfe von Werteklassen erleichtert die visuelle Erfassung von Räumen mit unterschiedlichen mittleren Gebäudehöhen.

Die Analyse macht die mittlere Höhe der urbanen Morphologie zu einem direkten, inversen Indikator für zwei stadtklimatisch und perzeptiv entscheidende Größen. Zum einen die **morphologische Porosität** die den Anteil an Freiraum und zum anderen den **Sky View Factor (SVF)** der den Anteil des sichtbaren Himmels von einer jeden Rasterzelle aus beschreibt.

Ein hoher Wert der mittleren Höhe der urbanen Morphologie impliziert eine dichte, hohe Verbauung mit wenig Freiraum, was zu einem niedrigen SVF und (generell) zu einer hohen Wärmeabsorption führt. Eine niedrige mittlere Höhe der urbanen Morphologie (nahe 0) indiziert hingegen explizit Flächen mit sehr geringer Bebauung, was mit einem hohen SVF und einem entsprechend hohen nächtlichen Abkühlungspotential korreliert.

Für die Strategie der "Innenentwicklung vor Außenentwicklung" ist die Identifizierung von (klimaverträglichen) Nachverdichtungspotenzialen für eine zukunftsgerechte Stadtgestaltung bedeutsam. Die Analyse der mittleren Höhe der urbanen Morphologie kann hierfür ein anwendungsorientiertes Werkzeug darstellen. Durch den Vergleich einer IST-Analyse (basierend auf dem realen Bestand) mit einer Soll-Analyse (basierend auf den maximal zulässigen Höhen oder der GFZ des Bebauungsplans) können Diskrepanzen sichtbar gemacht werden.

Die Analyse ermöglicht eine empirische und objektive Abgrenzung von Quartierstypen, die weit über eine simple Nutzungskartierung hinausgeht. Unterschiedliche städtebauliche Charakteristika können sich direkt in der „Signatur“ der mittleren Höhe der urbanen Morphologie

abbilden. Bspw. deuten hohe und homogene Werte, auf die geschlossene Bauweise und das geringe Maß an Freiflächen (niedrige Porosität) hin, die typisch für die gründerzeitliche Blockrandbebauung sind. Zeilenbausiedlungen (z.B. aus der Nachkriegszeit) erzeugen ein klares Muster aus Bändern mit mittleren Werten (die Gebäuderiegel) und Bändern mit sehr niedrigen Werten (den meist großzügigen Freiräume dazwischen). Einfamilienhausgebiete weisen durchgehend niedrige Werte auf, die die im Verhältnis geringe Gebäudehöhe und die hohen Freiflächenanteile (Gärten) abbilden.

Planerisch können diese Informationen als Grundlage für gestalterische Satzungen oder für die Anpassung von Bebauungsplänen genutzt werden, um den spezifischen Charakter eines Quartiers datenbasiert zu erhalten oder gezielt weiterzuentwickeln.

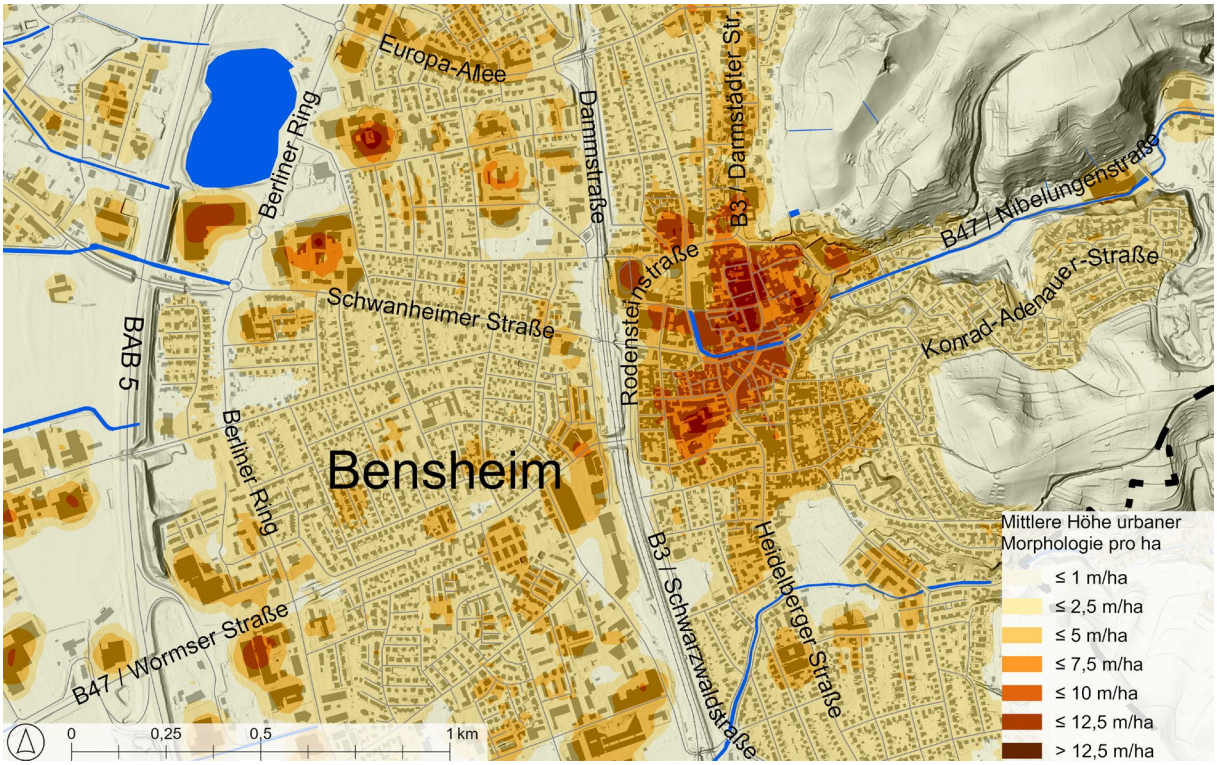


Abbildung 21: Kartenauszug der Analysekarte Mittlere Höhe der urbanen Morphologie für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkle Rottöne zeigen eine größere Mittlere Höhe in der urbanen Morphologie an, als bspw. blassgelbe Einfärbungen. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Am deutlichsten tritt die urbane Verdichtung im historischen Zentrum BENSHEIMS hervor (siehe Abbildung 22). Der Bereich zwischen der RODENSTEINSTRAßE, der HEIDELBERGER STRAßE im Süden und der B47 / NIBELUNGENSTRAßE weist großflächig hohe bis sehr hohe Werte der mittleren Höhe auf (≥ 7,5 m/ha bzw. ≥ 10 m/ha, vereinzelt ≥ 12 m/ha). Diese Werte spiegeln die engen Blockstrukturen, die geschlossene Bauweise sowie die nur punktuell vorhandenen Freiräume wider. Stadtklimatisch geht diese Konstellation mit einer geringen morphologischen Porosität, einem entsprechend niedrigen Sky View Factor (SVF) und einer erhöhten Wärmeabsorption einher. Der Bereich ist der am stärksten verdichtete Siedlungsraum BENSHEIMS und bildet die typischen Merkmale eines innerstädtischen, baulich gefassten Altstadtquartiers ab.

Im Umfeld der innerstädtischen Bebauung, insbesondere nördlich der Kernstadt, entlang der B3 / Darmstädter Straße und in Richtung der Wohnquartiere an der Europa-Allee, nimmt die mittlere Höhe der urbanen Morphologie moderat ab. Diese Räume zeigen eine durchmischte Bebauungsstruktur, die aus kleineren Mehrfamilienhäusern und freistehenden Gebäuden besteht. Die Werte bewegen sich überwiegend im Bereich von 2,5 m/ha bis 7,5 m/ha, was auf eine geringere Gebäudehöhe und zugleich höhere Freiflächenanteile hinweist. Die Porosität steigt, der SVF nimmt zu. Ein Hinweis auf tendenziell bessere nächtliche Abkühlungsbedingungen im Vergleich zur kompakten Innenstadt.

Die großflächigen Einfamilienhausgebiete, die sich im Westen entlang der Schwanheimer Straße, nach Süden und im Nordwesten bis zum Berliner Ring erstrecken, weisen erwartungsgemäß sehr niedrige Werte der mittleren Höhe (< 2,5 m/ha, vereinzelt < 1 m/ha) auf. Diese Siedlungstypen sind durch geringe Gebäudehöhen, großzügige Gärten und eine aufgelockerte Struktur mit hohen Freiraumanteilen geprägt. Hier überwiegt eine hohe morphologische Porosität und ein hoher SVF, womit diese Quartiere stadtklimatisch günstigere Voraussetzungen für Durchlüftung und nächtliche Abkühlung bieten.

Besonders markant treten die linearen Muster der Zeilen- und Nachkriegsbausiedlungen hervor, z.B. im Umfeld der Kreuzung Berliner Ring / Wormser Straße, der Kreuzung Berliner Ring / Schwanheimer Straße oder westlich der Joseph-Heckler-Schule. Hier wechseln sich Bereiche mittlerer Werte (Gebäuderiegel) oder Wohnhochhäuser mit Bereichen sehr geringer Werte (Freiflächen, Grünzüge, Zwischenräume) ab. Diese charakteristischen Merkmale entsprechen den typischen Strukturen der Nachkriegsmoderne und verdeutlichen die städtebauliche Offenheit dieses Quartierstypus.

Die gewerblich geprägten Bereiche, z.B. entlang des Berliner Rings, weisen ebenfalls überwiegend niedrige bis moderate Werte auf. Zwar sind einzelne Produktions- und Lagerhallen vergleichsweise hoch, ihre große Parzellentiefe und die ausgedehnten Abstands- und Verkehrsflächen führen jedoch zu einer insgesamt niedrigen volumetrischen Dichte. Stadtklimatisch bedeutet dies eine erhöhte Porosität, aber zugleich, aufgrund großflächiger Versiegelung, ein gleichzeitig erhöhtes Wärmeangebot, das unabhängig von der geringen mittleren Höhe tagsüber bioklimatische Belastungen verstärken kann. Aufgrund des großen Oberflächen-Volumen Verhältnisses kühlen die Gewerbehallen in der Nacht aber sehr schnell aus, im Gegensatz zur kompakten und dichten Altstadtstruktur.

Topographisch bedingt zeigen die östlichen Hanglagen, insbesondere in Richtung Auerbach und Schönberg, überwiegend geringe Werte. Die Bebauungsstruktur ist kleinteilig und folgt dem Terrain, eine geschlossene, hochverdichtete Morphologie tritt hier kaum in Erscheinung. Die Kombination aus Hangneigung, geringen Gebäudehöhen und ausgeprägten Gartenanteilen begünstigt die nächtliche Kaltluftentstehung und -abfuhr und wirkt klimatisch entlastend.

Die räumlichen Muster verdeutlichen insgesamt das starke Gefälle zwischen der hochverdichteten Altstadt und den offenen, freiraumreichen Siedlungsstrukturen der übrigen Siedlungsstrukturen. Für die Stadt- und Klimastrategie Bensheims ergeben sich hieraus wichtige Hinweise: Bereiche mit sehr hoher mittlerer Höhe verfügen nur über geringe klimatische Puffer, während Niedrigwerte in den Randquartieren potenzielle Räume für eine angemessene, klimaverträgliche Innenentwicklung darstellen. Die Analyse bildet somit eine datengestützte Grundlage, um Nachverdichtungspotenziale, Quartierscharaktere und klimatische Wirkungsketten im Kontext der kommunalen Entwicklungsplanung präzise zu bewerten.

5.2.2 Grundflächenzahl und Geschossflächenzahl

Die **Grundflächenzahl (GRZ)** und die **Geschossflächenzahl (GFZ)** stellen im Kontext der Baunutzungsverordnung (BauNVO) zentrale Kenngrößen zur verbindlichen Festsetzung des Maßes der baulichen Nutzung dar. Generell beziehen sich GRZ und GFZ auf die Fläche des entsprechenden Baugrundstücks. In der Regel liegen jedoch nur, auf Grundlage des Amtlichen Liegenschaftskataster Informationssystem (ALKIS), die Informationen der Flurstücksgrenzen vor. Da ein Baugrundstück prinzipiell auch aus mehr als einem Flurstück bestehen kann, besitzt die Analyse eine gewisse Unschärfe. Sie stellt jedoch auf dieser Maßstabsebene die einzige Möglichkeit einer flächendeckenden Betrachtung der horizontalen wie vertikalen Charakteristik auf Gebäudeebene dar, wodurch planerisch die städtebauliche Morphologie (Dichte & Struktur) aussagekräftig beschrieben werden kann.

Die **Grundflächenzahl (GRZ)** wird entsprechend § 19 BauNVO als Maß definiert, welches die zulässige Überbauung einer Baugrundstücksfläche regelt. Dabei wird die Grundfläche der (zukünftigen) Bebauung ins Verhältnis zur Grundfläche des Baugrundstücks gesetzt. Eine GRZ von 0,4 bedeutet beispielsweise, dass 40 Prozent der Baugrundstücksfläche überbaut (durch bauliche Maßnahmen bebaut) werden dürfen. Dabei umfasst die GRZ die Berücksichtigung aller baulichen Anlagen, und ist nicht auf ein einzelnes Gebäude (z.B. ausschließlich das Wohngebäude) beschränkt. Als planerisches Instrument kann sie zur Steuerung der horizontalen Ausdehnung der Bebauung verwendet werden. Im Rahmen der Analyse bleibt zu beachten, dass die GRZ nur die Gebäude berücksichtigt, da sie als Geodaten zur Verfügung stehen. Planungsinformationen über bspw. versiegelte Auffahrten oder Stellflächen liegen in der Regel nicht vor, und werden dementsprechend nicht berücksichtigt. Indirekt findet sich der Versiegelungsgrad in der thematischen Analyse der Vegetation wieder, da hier der Vegetationsanteil auf Flurstücksebene berechnet wird.

Während die GRZ die horizontale bauliche Ausdehnung begrenzt, definiert die **Geschossflächenzahl (GFZ)**, entsprechend § 20 BauNVO die Intensität der baulichen Nutzung. Dabei wird die bauliche Gesamtfläche, welche die Summe der Geschossflächen (aller Gebäude auf dem Baugrundstück), im Verhältnis zur Flächengröße des Baugrundstücks betrachtet. Eine GFZ von 1,2 auf einem 1.000 m² großen Baugrundstück erlaubt somit bauliche Umsetzung zur Schaffung von 1.200 m² Geschossfläche. Die Ermittlung der GFZ ist jedoch komplexer als die der GRZ, da sie sich auf die Summe der Geschossflächen aller Vollgeschosse bezieht. Die Definition dessen, was ein Vollgeschoss ausmacht – insbesondere im Hinblick auf Dach- oder Kellergeschosse – ist nicht bundeseinheitlich in der BauNVO, sondern in der jeweiligen Landesbauordnung (LBO) des Bundeslandes geregelt. In Hessen geschieht die Begriffsdefinition in § 2 der Hessischen Bauordnung (HBO). Sie setzt im Grundsatz die Mindesthöhe für ein Vollgeschoss auf 2,30 m fest. Erfahrungsgemäß kann im Bundeskontext ein durchschnittliches Geschoss (inklusive Boden und Decke) mit einer Höhe von 3,0 m angenommen werden. Im Rahmen der Ermittlung Anzahl der Geschosse und dementsprechend auch der Ermittlung der Geschossflächenzahl wird die Gebäudehöhe durch 3,0 m dividiert. Diese „Vereinfachung“ der Ableitung der Geschossanzahl kann eine Unschärfe gegenüber der realen Anzahl der Geschosse verursachen. Alleinstehend kann die GFZ nur bedingt die baulich-vertikale Dichte auf Baugrundstücken und im weiten Sinn auch für Quartiere / Neubaugebiete steuern. Mit Hilfe der GFZ kann jedoch eine generelle Abschätzung zum Nutzflächenpotential erfolgen, da der Wert der GFZ fest mit der Grundfläche des Baugrundstücks verbunden ist und dementsprechend nicht dimensionslos, sondern einen diskreten Wert beschreibt.

Ein besonderer planerischer Mehrwert entsteht durch die kombinierte Betrachtung der Parameter GRZ und GFZ. Durch den Wegfall Isolation, und der entsprechenden Kombination der Werte kann eine gesamtflächige Beschreibung des baulichen IST-Zustandes auf Flurstücksebene erreicht werden. Dabei wird die städtebauliche Struktur nun in der horizontalen wie auch vertikalen Betrachtungsebene gemeinsam beschrieben. Obwohl pauschalisierte und generalisierte Aussagen planerisch und individuell stets zu prüfen sind, lassen sich „typische“ Kombinationen aus GRZ und GFZ wie folgt ableiten.

Klassische, suburban geprägte Einfamilienhausstrukturen mit hohem Grünanteil lassen sich durch eine **niedrige GRZ und zugleich niedrige GFZ** beschreiben.

Eine **hohe GRZ in Kombination mit einer niedrigen GFZ** beschreiben ein städtebauliches Muster welches sich typischerweise bei eingeschossigen Gewerbebauten, Supermärkten (mit Großparkplätzen) oder Lagerhallen etc. wiederfindet. Dabei beschreibt diese Kombination einen hohen Versiegelungsgrad des Bodens bei gleichzeitiger geringer baulicher Dichte, wodurch Flächen mit dieser Kombination oft ökonomisch wie auch ökologisch als ineffizient beschrieben werden. Jedoch wird die klimatische Wertigkeit dieser Flächen, bspw. im Kontext des Kaltlufttransportes in der Nacht oder des Durchlüftungspotentials am Tag bei dieser Bewertung oft außen vorgelassen.

Der vorangegangen Kombination gegenüber steht eine **niedrige GRZ bei gleichzeitiger hoher GFZ**. Hierbei werden Räume typischerweise mit hoher Punktbebauung (Hochhäuser) und erhöhtem (meist öffentlich zugänglichen) Freiraumanteil identifiziert.

Die Maximalkombination aus **hoher GRZ und hoher GFZ** beschreibt Räume sehr hoher 3-dimensionaler Dichte, wie sie bspw. für Innenstadtkernen oder geschlossenen gründerzeitlichen Blockrandbebauungen typisch ist.

Die thematische Analyse der Grundflächenzahl gemeinsam mit der Geschossflächenzahl verdeutlicht die real existierende Stadtstruktur. Dabei geht die Aussagekraft über die einer einfachen Dichtemessung hinaus, indem mit Ihrer Hilfe flächendeckend Bautypologien abgeleitet werden können. Darauf aufbauend kann die Analyse, in Kombinationen mit anderen Themenkarten, als Werkzeug der Potentialerfassung oder des Monitorings für die Bauentwicklung genutzt werden.

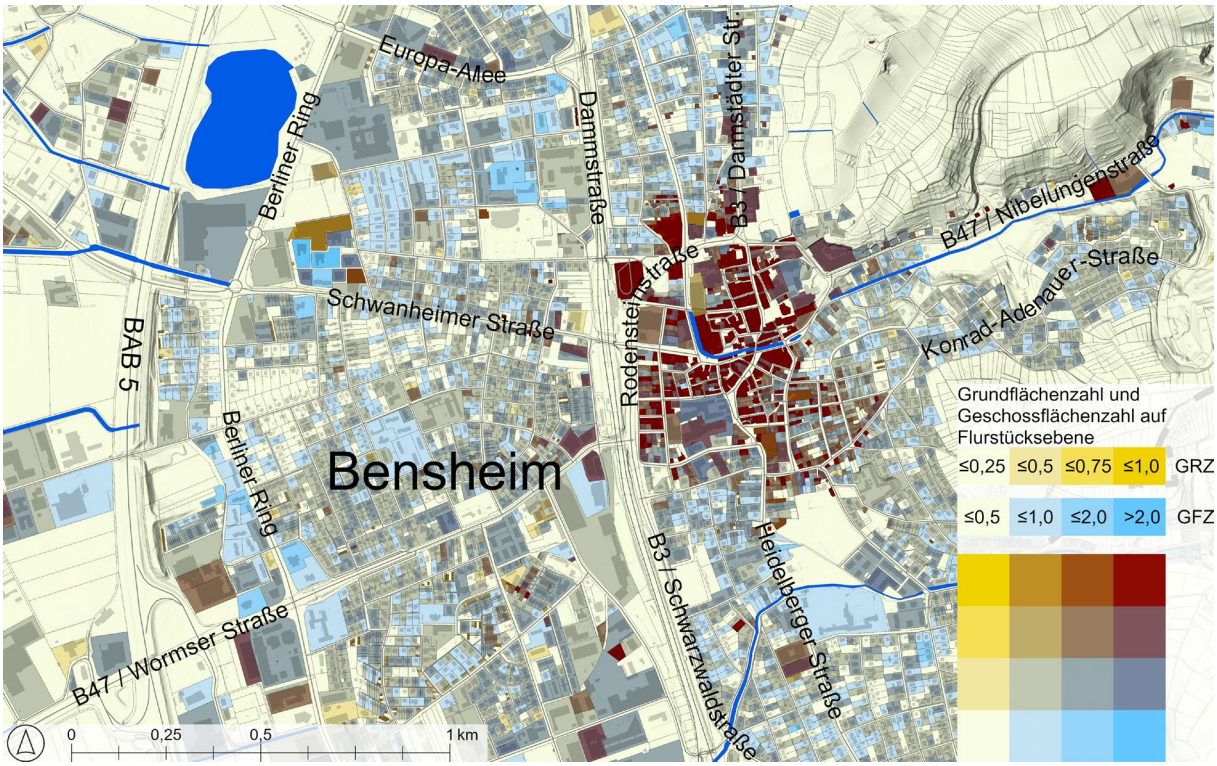


Abbildung 22: Kartenauszug der Analysekarte Grundflächenzahl und Geschossflächenzahl für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelgelbe Bereiche stellen eine hohe GRZ mit niedriger GFZ und hellblaue Bereiche eine hohe GFZ mit niedriger GRZ dar. Braunrote Bereiche kennzeichnen Areale wo sowohl die GRZ, wie auch die GFZ hoch ist. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Analog Abbildung 22 zur ubranen Morphologie zeigt die Analysekarte in Abbildung 23 das Verhältnis von Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ) und stellt eine flächendeckende Bestandsaufnahme der baulichen Dichte und städtebaulichen Struktur im Untersuchungsraum Bensheim bereit. Die Auswertung erfolgt auf Ebene der Flurstücke und basiert auf den ALKIS-Gebäudedaten, wodurch die horizontale und vertikale Ausprägung der Bebauung systematisch abgebildet wird. Trotz der bekannten Einschränkungen hinsichtlich der Abgrenzung tatsächlicher Baugrundstücke zeigt die Karte ein realitätsnahes und in der Maßstabsebene belastbares Bild der bestehenden Siedlungsstruktur.

Die farbliche Darstellung der GRZ verdeutlicht unterschiedliche Intensitäten der Flächenversiegelung und Flächeninanspruchnahme. Helle bis dunkle Gelbtöne markieren hierbei Bereiche mit erhöhter baulicher Bodenversiegelung; diese finden sich besonders in gewerblichen Lagen, entlang großer Verkehrsinfrastrukturen sowie auf Flächen mit eingeschossigen, flächenausgedehnten Nutzungen. Demgegenüber lassen niedrige (hellgelbe) GRZ-Werte in Wohnquartieren mit Einfamilien-, Reihenhausstrukturen oder Nachkriegssiedlungen auf einen höheren Grün- und Freiraumanteil schließen.

Die in der Analyse hervorgehobenen blauen Bereiche verdeutlichen Zonen mit hoher Geschossflächenkonzentration, wie sie insbesondere im innerstädtischen Kerngebiet sowie vereinzelt in Teilen der verdichteten Wohnbebauung auftreten. Diese Bereiche sind geprägt durch mehrgeschossige Gebäude, geschlossene Blockstrukturen oder städtebaulich kompakte Quartiere. Eine geringe GFZ zeigt dagegen niedriggeschossige Bebauung, wie sie für aufgelockerte Wohnlagen typisch ist.

Von besonderer planerischer Relevanz ist die kombinierte Betrachtung beider Parameter, denn erst die Überlagerung von GRZ und GFZ ermöglicht Rückschlüsse auf städtebauliche Typologien und Nutzungsintensitäten. In der Karte werden diese Muster räumlich eindeutig sichtbar:

– **Hohe GRZ bei gleichzeitig niedriger GFZ:**
nur vereinzelt im Stadtgebiet für einzelne Gewerbestandorte, besonders auffällig sind hier Garagenhöfe

– **Niedrige GRZ bei hoher GFZ**:
bei einigen Gewerbestandorten, überwiegend Wohngebäude (insbesondere Reihenhäuser und MFH, sowie Gebäude der Nachkriegsmoderne: z.B. Zeilen und Wohnhochhäuser)

– **Hohe GRZ und hohe GFZ:**
erwartungsgemäß im historischen Kern Bensheims

– **Niedrige Kombinationen beider Parameter:**
lockere Wohnstrukturen mit hohem Vegetations- und Freiflächenanteil (z.B. EFH zwischen Schwanheimer Straße und Berliner Ring)

Die Kartendarstellung macht damit deutlich, wie heterogen die bauliche Struktur Bensheims ausgeprägt ist und welche Differenzierungen sich hinsichtlich Versiegelungsgrad, Nutzungsintensität und baulicher Dichte ergeben. Durch die räumlich hochaufgelöste Betrachtung bietet die Karte eine wertvolle Grundlage für stadtklimatische Bewertungen, insbesondere im Kontext der klimatischen Belastung, der Durchlüftung, der Kaltluftleitbahnen sowie der Identifikation von Entwicklungspotentialen. Sie eignet sich darüber hinaus als Instrument zur Ableitung von Bautypologien und zur planerischen Bewertung zukünftiger baulicher Verdichtung oder Transformation im Stadtgebiet.

5.3 Vegetationsanalysen

Die Vegetationsstrukturen werden auf Grundlage digitaler Orthophotos (DOP) mit integrierten Nahinfrarotkanal bei einer räumlichen Auflösung von 20 cm erstellt. Dabei reflektiert der hohe Chlorophyllanteil vitale Grünstrukturen den Nahinfrarotbereich (NIR) ungefähr sechsmal besser als die Wellenlängen, speziell die Grünen, des sichtbaren Spektrums. Über die Auswertung des IR-Bandes von Luftbildern in Vollbelaubung kann so eine dezidierte Erfassung der Vegetationsstrukturen im öffentlichen wie auch privaten Raum erfolgen, wodurch das gesamtstädtische Grün erfasst wird.

Zur Identifikation aller vitalen Vegetationsstrukturen wird der NDVI („Normalized Difference Vegetation Index“) sowie der CI-Green („Green Chlorophyll Index“) genutzt (siehe Abbildung 23). Dabei können potentiell verfälschende Einflüsse durch Schattenwürfe von Gebäuden, durch Topographie oder auch von Bäumen reduziert werden.

Ergänzende Flächennutzungen (außerhalb des Siedlungsraums), die nativ vegetationsdominiert sind (z.B. Wälder, Offenland etc.) werden mit Hilfe von zusätzlichen Schraffuren hervorgehoben.

Die für Bensheim verwendeten Luftbilder stammen aus dem Jahr 2024.

Die Analyse "in Vollbelaubung" ist bedingt durch die zur Verfügung gestellten DOPs. Zugleich unterstützt dies das Ziel, die maximale photosynthetische Aktivität und das maximale Grünvolumen zu erfassen. Dadurch ist es möglich eine Bestandsaufnahme der städtischen Grünstrukturen durchzuführen Die Reduzierung von Störeinflüssen durch Schatteneffekten, die insbesondere durch Gebäudestrukturen in urbanen Räumen vermehrt auftreten, wird durch die kombinierte Verwendung von NDVI und CL-Green als Ratio-Indizes (Verhältnisrechnungen) methodisch unterstützt. Die Nutzung eines einzigen zeitlichen Schnitts stellt eine "Peak-Performance"-Momentaufnahme dar, was jedoch auch bedeutet, dass es sich um einen statischen Datensatz handelt. Die Analyse kann keine Aussagen über die phänologische Dynamik der Vegetation treffen. Ebenso zeigt sie nicht, wann eine Pflanze grünt, wie lange sie ihr Laub behält oder wie resilient sie gegenüber Einflüssen wie Früh- oder Spätfrost oder Trockenheit ist.



Abbildung 23: Schematische Darstellung zur Erfassungsmethodik von Vegetation. Auf Grund eines höheren Chlorophyllanteils (Blattgrün) reflektieren vitale Grünstrukturen stärker im Nahinfrarotbereich als geschädigte, während gleichzeitig der Rotbereich des sichtbaren Lichts weniger stark reflektiert wird.

In der klimatisch-funktionalen Betrachtung gilt: Grünfläche ist nicht gleich Grünfläche. Die wichtigste Ökosystemleistung von urbanem Grün zur Minderung von Hitzebelastungen am Tag sind die Beschattung sowie die Evapotranspiration (Verdunstungskühlung). In der Nacht ist der Grad der Auskühlung der bodennahen Luftschichten (vgl. Kapitel 5.4.1) der planungsrelevante Faktor. Hier zeigt sich, das offenland- und parkartiggeprägte Flächen über die größten Abkühlungspotentiale verfügen.

Der Schwellenwert der Vegetationshöhe von 2,5 m wurde gesetzt um Flächen mit unterschiedlichen (klimatischen) Funktionen zu trennen. Er trennt die bodennahe Vegetation (Rasen, Stauden, Kleinsträucher) von den raumprägenden Baumkronen und Großsträuchern. Vegetation über dieser Höhe ist für die Stadtplanung aus drei Gründen von besonderer Relevanz:

a) **Beschattung:** Nur Vegetation dieser Höhe ist in der Lage, versiegelte Flächen wie Straßen, Plätze und Gehwege sowie Gebäudefassaden effektiv zu beschatten und die Aufheizung dieser Oberflächen zu reduzieren.[7]

b) **Luftzirkulation:** Baumkronen in dieser Höhe interagieren direkt mit der städtischen Luftzirkulation. Sie können (positiv) als Filter und Turbulenzelemente wirken oder (negativ) bodennahe Frischluftschneisen blockieren. Ihre Erfassung ist daher für mikroklimatische Strömungsmodelle unerlässlich.

c) **Aufenthaltsqualität:** Die dreidimensionale Struktur von Bäumen definiert den menschlichen Maßstab und die "Wahrnehmung" von Grün, die für die Erholungsfunktion und die psychische Gesundheit von großer Bedeutung ist (vgl. Green View Index).

Gleichzeitig können Vegetationsräume mit geringem Aufwuchs für die nächtliche Abkühlung an Relevanz gewinnen, insbesondere dann, wenn es sich bzw. um Flächen mit heimischen Wildpflanzen handelt die, durch ihre Wuchshöhe den Boden besser vor Austrocknung schützen können, als ein kurzgemähter Rasen und gleichzeitig sind viele die heimischen Wildpflanzen trockenheitsresistent, wodurch auch während längeren Trocken- und Hitzephasen im Sommer die Gefahr des Vegetationsausfalls reduziert wird.

Vegetationsdominierte Flächen außerhalb des bebauten Raums von Bensheim lassen sich in Wald- und Offenlandflächen unterscheiden. Die für diese charakteristischen Vegetationsstrukturen heben sich visuell durch ihre farbig skalierten Höhenunterschiede voneinander ab. Das Offenland wird durch weitflächig niedrige Vegetationsbestände (blassgelb), Wälder dagegen durch hohe Vegetationsbestände (grün) geprägt. Bewirtschaftete Ackerflächen besitzen mitunter keine nennenswerte Vegetation, werden aber über die Flächennutzung als Offenlandflächen erkannt und als solche aufgeführt. So unterscheiden sie sich von den versiegelten Flächen, die insbesondere für die Siedlungen raumprägend sind.

Wird der administrative Raum BENSHEIMS entlang der Gemarkungen BENSHEIM und AUERBACH in einen östlichen und westlichen Teil geteilt, so wird der Westen BENSHEIMS primär von Offenland und der Osten von Waldbeständen geprägt. Die östlichen Waldbestände, deren Vegetation zu der höchsten des gesamten Untersuchungsraums zählt (BANNWALD, ODENWALD), werden von den Siedlungen HOCHSTÄDTEN, SCHÖNBERG, WILMSHAUSEN, GRONAU und ZELL sowie dem räumlich stark mit diesen verflochtenen Offenland durchzogen. Im westlichen Teil Bensheims grenzt der JÄGERSBURGER WALD an die Gemeindegrenze an und reicht teilweise in die Gemarkungen SCHWANHEIM und LANGWADEN hinein. Der großflächigste Waldbestand im westlichen Teil Bensheims ist der NIEDERWALD, der an AUERBACH, FEHLHEIM und das nördlich des Stadtgebietes gelegene RODAU angrenzt.

Bezogen auf die Gesamtfläche aller Gemarkungen besitzt die Gemarkung GRONAU den höchsten Vegetationsanteil (97 %). Darauf folgt mit knapp 96 % die Gemarkung HOCHSTÄDTEN. Mit Ausnahme BENSHEIMS bewegt sich der Vegetationsanteil aller weiteren Gemarkungen zwischen 85 % (FEHLHEIM, AUERBACH) und 93 % (LANGWADEN, ZELL). Bensheim bildet mit einem Vegetationsbestand von rund 69 % das Schlusslicht.

Innerhalb des bebauten Raums nehmen der Vegetationsanteil und die Vegetationshöhen gegenüber dem Außenraum stark ab. Gemessen an der innerörtlichen Vegetation, d.h. dem an der tatsächlichen Siedlungsfläche gemessenen Vegetationsanteil, liegt BENSHEIM im Vergleich aller Gemarkungen mit rund 22 % an vorderster Stelle (siehe Diagramm 10). Mit einigem Abstand folgt die Gemarkung AUERBACH (15 %). In FEHLHEIM, SCHÖNBERG und AUERBACH beträgt der innerörtliche Vegetationsanteil zwischen 13 % und 14 %. Langwaden erreicht in dieser Wertung einen knapp 12 %-igen Vegetationsanteil; SCHWANHEIM, ZELL und HOCHSTÄDTEN bewegen sich zwischen 9 % und 6 %. Den geringsten an der Siedlungsfläche gemessenen Vegetationsanteil besitzt die Gemarkung GRONAU (4 %).

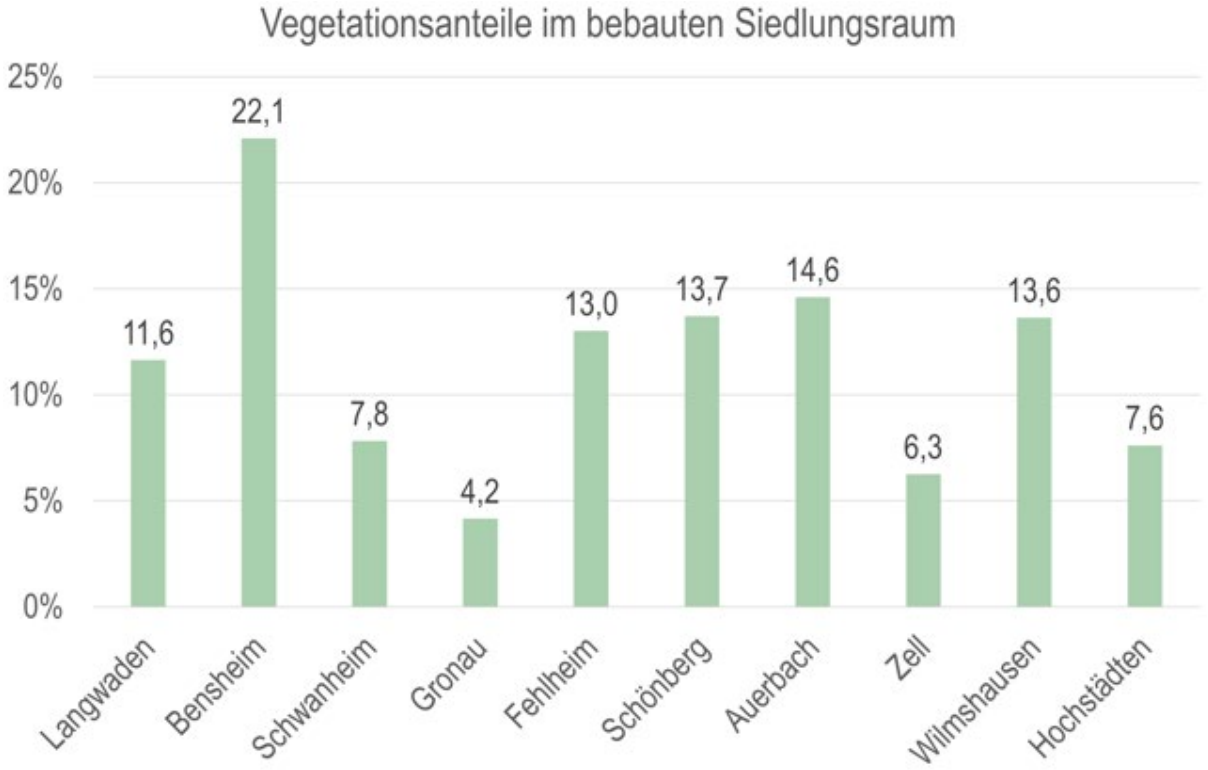


Diagramm 10: Statistische Auswertung des Vegetationsanteils im bebauten Siedlungsraum innerhalb der unterschiedlichen Gemarkungen von Bensheim.

Im Siedlungskontext (siehe Abbildung 24) dominiert generell die niedriggewachsene Vegetation (Gräser, Sträucher). Baumstrukturen sind im gesamten Siedlungsraum verteilt und mit meist 3 m bis 6 m oft weniger hochgewachsen als in den Wäldern. Abseits der vegetationsbestandenen Grün- und Freiflächen charakterisieren sich besonders die örtlichen Gewerbe- und Industriegebiete durch große, versiegelte Flächen für Verkehr und Logistik. Auch der altstädtische Bereich in BENSHEIM ist aufgrund seiner hohen Bebauungsdichte stark versiegelt, wird jedoch gleichfalls von kleinteiligen Grünstrukturen durchzogen. Gleiches gilt für die Ortskerne der umliegenden Gemarkungen, die dort an den örtlichen Hauptstraßen gelegen sind und aufgrund ihres erhöhten Versiegelungsanteils i.d.R. mit einem niedrigen Vegetationsanteil einhergehen.

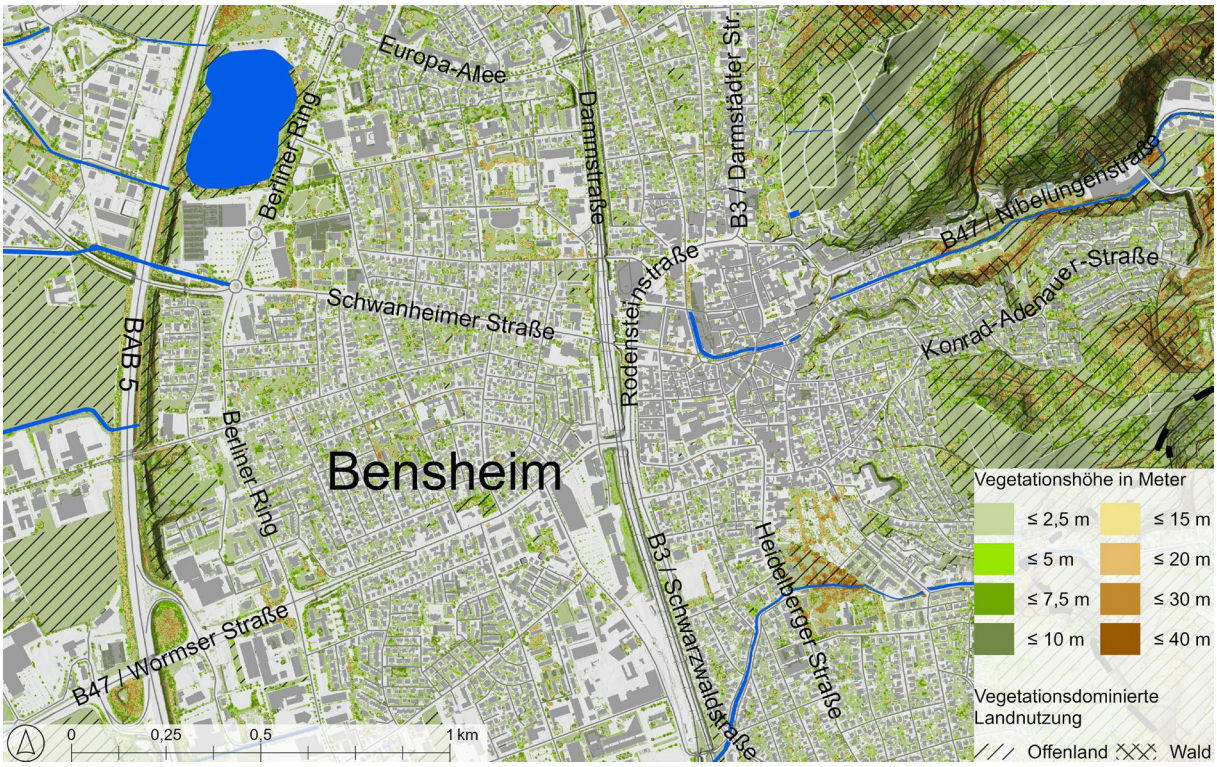


Abbildung 24: Kartenauszug der Themenkarte Vegetationsflächen und Vegetationshöhen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Gelbtöne zeigen einen relativ niedrigen Vegetationsanteil auf Flurstücksebene an, während Grün & Blautöne im Verhältnis einen hohen Vegetationsanteil markieren. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

5.4 Klimatische Analysen

5.4.1 Kaltluftentstehung und Kaltlufttransport

Die Simulation der **nächtlichen Kaltluftentstehung** und des **Kaltlufttransportes** (bodennahes nächtliches Windfeld) geschieht mit Hilfe des numerischen Kaltluftsimulationsprogramms „Klam_21“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in der Version 2.012 (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Berechnung basiert auf den Informationen der Landnutzung, der Bebauungsstruktur sowie der Topographie. Ausgegangen wird von einer austauscharmen sommerlichen Strahlungsnacht (ohne regionale Anströmung). Der Sonnenuntergang, und damit das Ausbleiben eines externen Strahlungseintrag (Sonne) bestimmt den Simulationsbeginn. Die Simulationsdauer beträgt acht Stunden. Insgesamt werden 10 Zeitschnitte angefertigt um die voranschreitende Dynamik der Kaltluftentstehung und des -transports abzubilden. Die Zeitschnitte werden in einem Intervall von jeweils 1 Stunde erstellt. Ergänzend werden, zur Verdeutlichung der Dynamik während der frühen Kaltluftbildungsphase, zwei zusätzliche Zeitschnitte nach 15 Minuten und nach 30 Minuten ermittelt.

Kaltluft muss planerisch wie auch physikalisch von Frischluft unterschieden werden. Frischluft beschreibt einen lufthygienisch unbelasteten Zustand der Luft. Dabei ist die Bildung von Frischluft typischerweise an die Produktion von Sauerstoff gekoppelt, welche nur am Tag, primär auf Flächen mit hohem Vegetationsvolumen (Wälder, Baumgruppen oder auch Einzelbäumen) und sekundär auch auf Vegetationsflächen mit niedrigem Vegetationsvolumen (Wiesen, Weiden etc.) geschieht (vgl. Kapitel 2.5).

Kaltluft hingegen bildet sich ausschließlich in den Nachtstunden, vorzugsweise während Strahlungsnächten (wolkenlos), über unversiegelten Offenlandflächen (i.d.R. im Außenbereich) mit niedriger Vegetation. Damit zählt das Offenland als primärer Kaltluftentstehungsraum. Wälder werden in der Regel eher zu den Räumen der sekundären Kaltluftentstehung gezählt. Der Wald stellt einen 3-dimensionalen Raum mit unterschiedlichen Strukturen dar. Dabei zeigt sich bei Wäldern, die topographisch eher flach geprägt sind, eine andere Kaltluftdynamik als bei Wäldern in Hanglage. Grundsätzlich gilt erst einmal, das am Tag der Kronenraum den Stammraum von der eintreffenden solaren Einstrahlung der Sonne abschirmt, wodurch die Temperaturen im Wald an einem Sommertag in der Regel niedriger sind als auf dem Offenland. In der Nacht zeigt sich bei topographisch flach ausgeprägten Wäldern, dass das geschlossene Kronendach die effektive Auskühlung des bodennahen Stammraums reduziert, wodurch die bodennahe Lufttemperatur im Wald in der Nacht in der Regel höher ist als auf dem Offenland. Aufgrund der höheren Dichte (und damit auch dem höheren Gewicht) von kühleren Luftmassen gegenüber wärmeren, leichteren Luftmassen, besteht bei Wäldern in Hanglage jedoch die Möglichkeit, dass der Stammraum besser von kühleren Luftmassen aus der Umgebung durchströmt wird, und die Luftmassen, dem Gefälle folgend, abfließen können, wodurch das Abkühlungspotential dieser Wälder steigt. Neben der aufgezeigten Bewegung von kühleren Luftmassen entsprechend der vorliegenden topographischen Gegebenheiten, abfließend wie Wasser, das einen Hang hinunterfließt, kann sich Kaltluft zusätzlich aufgrund des Druckgefälles zwischen Räumen mit unterschiedlichen Lufttemperaturen bewegen. Dieses druckinduzierte Flurwindsystem kann besonders intensiv in Gebieten auftreten in denen stark überwärmte Siedlungsräume und kühlere Umgebungen in Wechselwirkung treten. Durch die Überwärmung des Siedlungsraum in Folge der erhöhten Wärmespeicherung am Tag, steigt die warme Luft in der Nacht auf, wodurch im Siedlungsraum bzw. über dem Siedlungsraum ein Unterdruck entsteht,

Dieser Unterdruckt kann wiederum dazu führen, dass kühlere Luft aus dem Umland in den Siedlungsraum gezogen wird. Dabei können insbesondere lineare Strukturen, mit geringer baulicher Dichte, einen positiven leitenden Effekt auf das Transportgeschehen der Kaltluft in den Siedlungsraum besitzen. Auch nicht lineare innerstädtische Frei- und Grünflächen fördern die lokale Kaltluftproduktion und können, je nach Lage und Ausrichtung, das Eindringen des Kaltluftabflusses in den Siedlungsraum unterstützen.

Kaltluftvolumenstrom

Die Analyse des Kaltluftvolumenstroms kann primär dazu genutzt werden um die Abgrenzung und Priorisierung von Räumen mit Potentialen als Luftleitbahnen und Kaltlufteinwirkbereichen zu unterstützen. Bereiche mit hohen Volumenstromwerten deuten auf strategisch bedeutsame Korridore hin, die für die nächtliche Abkühlung und Belüftung der thermisch belasteten Siedlungsbereiche (Wirkgebiete) von besonderer Bedeutung sein können. Dabei bleibt jedoch die Notwendigkeit der Abschätzung der planerischen Bedeutsamkeit dieser Flächen im städtebaulichen Kontext bestehen. Die zusätzliche Stärke in der Verwendung des Kaltluftvolumenstroms im planerischen Kontext liegt darin, dass ergänzend zu der rein qualitativen Aussage ("hier verläuft ein Kaltluftkorridor") die quantitative, ingenieurtechnische Bewertung ("dieser Korridor liefert „X“ Kubikmeter Kaltluft pro Sekunde") hinzukommt. Die Betrachtung des Kaltluftvolumenstrom stellt somit eine Synthese aus den Parametern Masse und Bewegung dar. Er misst die tatsächlich transportierte Kühlenergie und ist somit ein belastbarer Parameter, um die klimatische Wirksamkeit und die Versorgungsfunktion eines Kaltluftentstehungsgebiets oder eines Kaltluftabflusskorridors objektiv bewerten und vergleichen zu können (z.B. nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 „Lokale Kaltluft“).

Kaltluftschichtdicke und bodennahes Strömungsfeld

Die Betrachtung der Kaltluftschichtdicke ist primär als Visualisierungswerkzeug im Kontext der Kaltluftanalyse zu verstehen. Sie verdeutlicht vereinfacht, wo und wie stark sich Kaltluft ansammelt. Damit werden auch lokale Kaltluftentstehungsgebiete innerhalb des Siedlungsraums erkennbar, da sie sich schneller, als die überwärmte Umgebung abkühlen und eine entsprechende Kaltluftentstehung auf der Fläche stattfindet. Gleichzeitig kann eine Betrachtung der Kaltluftschichtdicke in Kombination mit dem dargestellten bodennahen Strömungsfeld erfolgen, so kann visuell verdeutlicht werden, ob bspw. von einer Konnektivität zwischen einzelnen im Stadtgebiet verteilt liegenden kleineren Kaltluftentstehungsflächen auszugehen ist.

Im Zuge der Kaltluftsimulation für die Stadt BENSHEIM wurden insgesamt 10 Zeitschnitte (15 min., 30 min., 1 Std. und weitere Stundenschnitte) für die Darstellung des Kaltluftvolumenstroms sowie für die Darstellung der Kaltluftschichtdicke und dem bodennahen Strömungsfeld visualisiert. Nachfolgend werden die Darstellungen nach 30 min, 2 Std. und 4 Std. nach Sonnenuntergang näher beschrieben, da in diesen frühen Stunden ein enger Bezug zur Planungsrelevanz gegeben ist. Zusätzlich werden die übrigen Kartenausschnitte im Anhang (vgl. Kapitel 9.2) dargestellt.

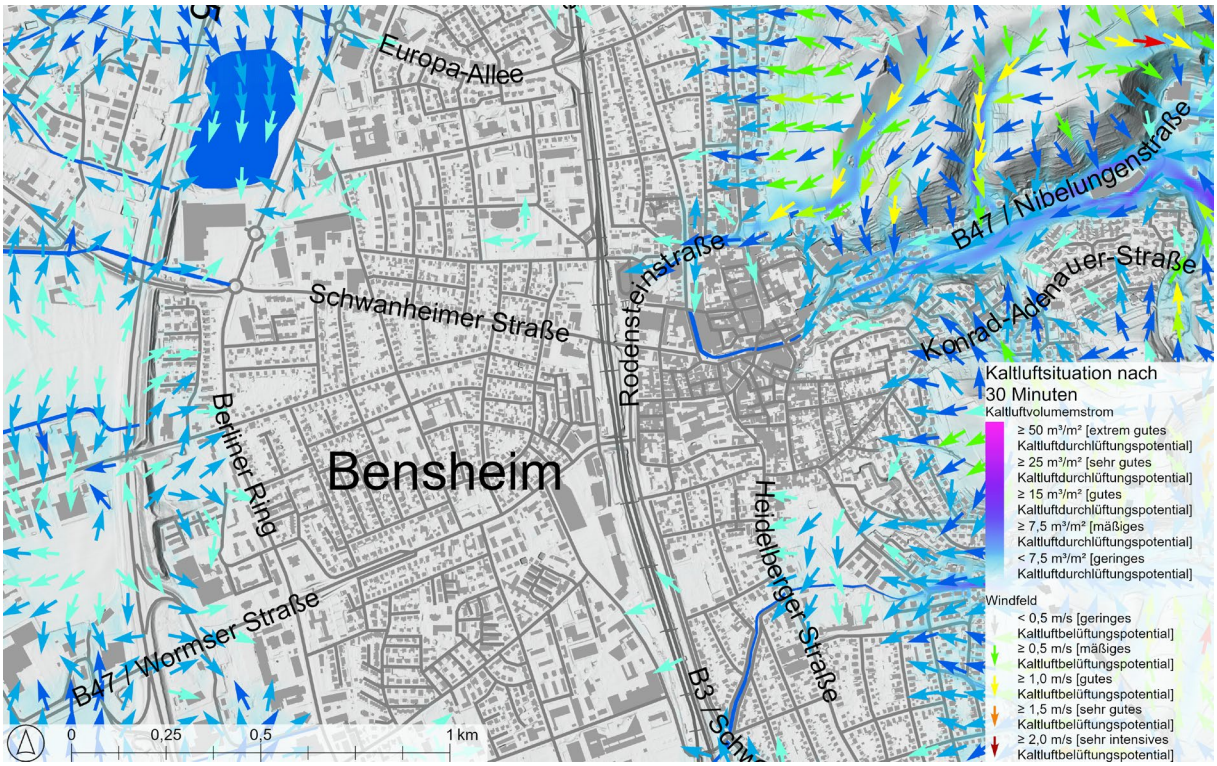


Abbildung 25: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 30min. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

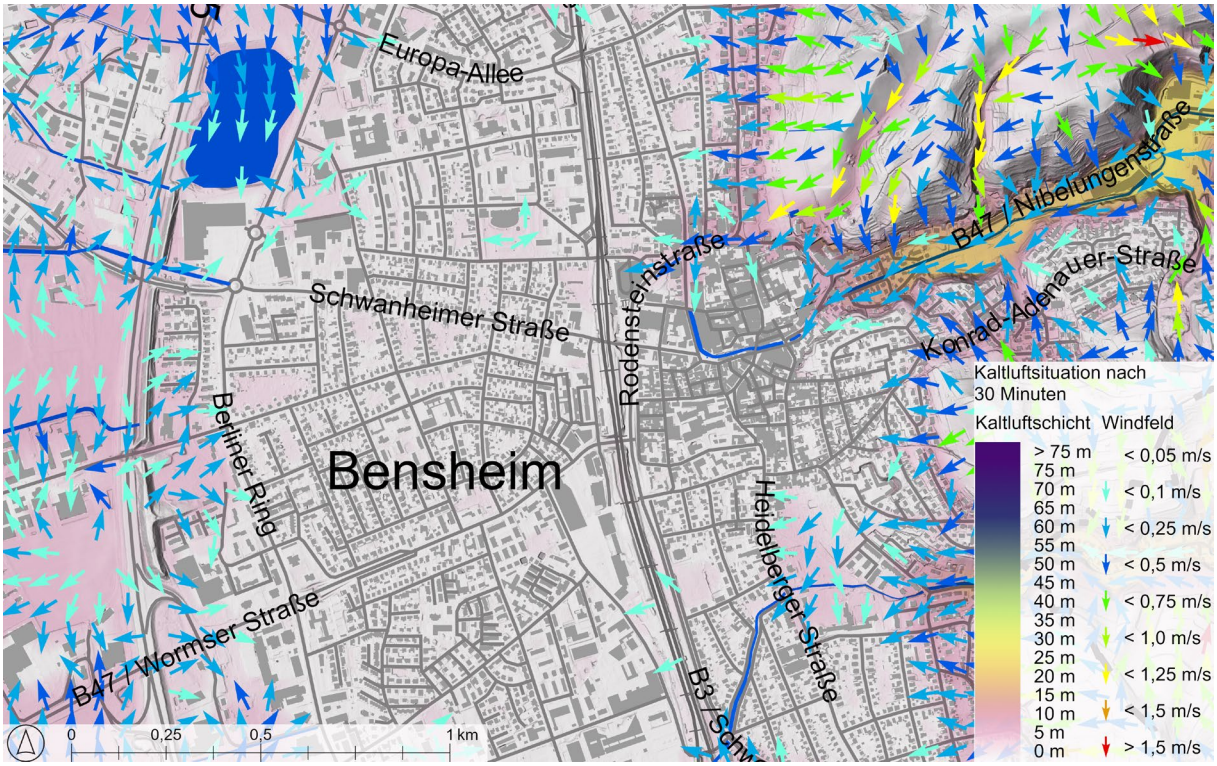


Abbildung 26: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 30min. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet.

Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Kaltluftbildungsphase (30 Minuten nach Sonnenuntergang, Abbildung 26 u. 27)

Bereits in der frühen Phase nach Sonnenuntergang bildet sich ein deutliches Kaltluftmuster über den unversiegelten Offenlandflächen östlich des Stadtgebiets aus. Die dort vorherrschenden großflächigen Landwirtschaftsflächen (Weinberge) fungieren entsprechend ihrer physiologischen Eigenschaften als primäre Kaltluftentstehungsräume. Die Karten zeigen hier bereits frühe, flächenhafte Abkühlungseffekte sowie beginnende, topographiegeleitete Abflussprozesse entlang der lokalen Geländeneigungen in Richtung des bebauten Siedlungsraums.

Die Waldflächen im östlichen Hügelland weisen, trotz ihrer geringeren relativen Abkühlungsrate, ein erstes erkennbares Abflussverhalten entlang der Hanglagen auf. Dabei wird insbesondere der potenzielle Einfluss druckinduzierter Flurwindsysteme sichtbar, die durch den erwärmten Siedlungskörper BENSHEIMS in der Anfangsphase als schwach ausgeprägte Zugwirkung in Erscheinung treten.

Trotz der erst kurzen Auskühlungsdauer lässt sich bereits eine erste Leitwirkung linienhafter Strukturen wie Täler, Straßenachsen oder wenig bebaute Korridore erkennen.

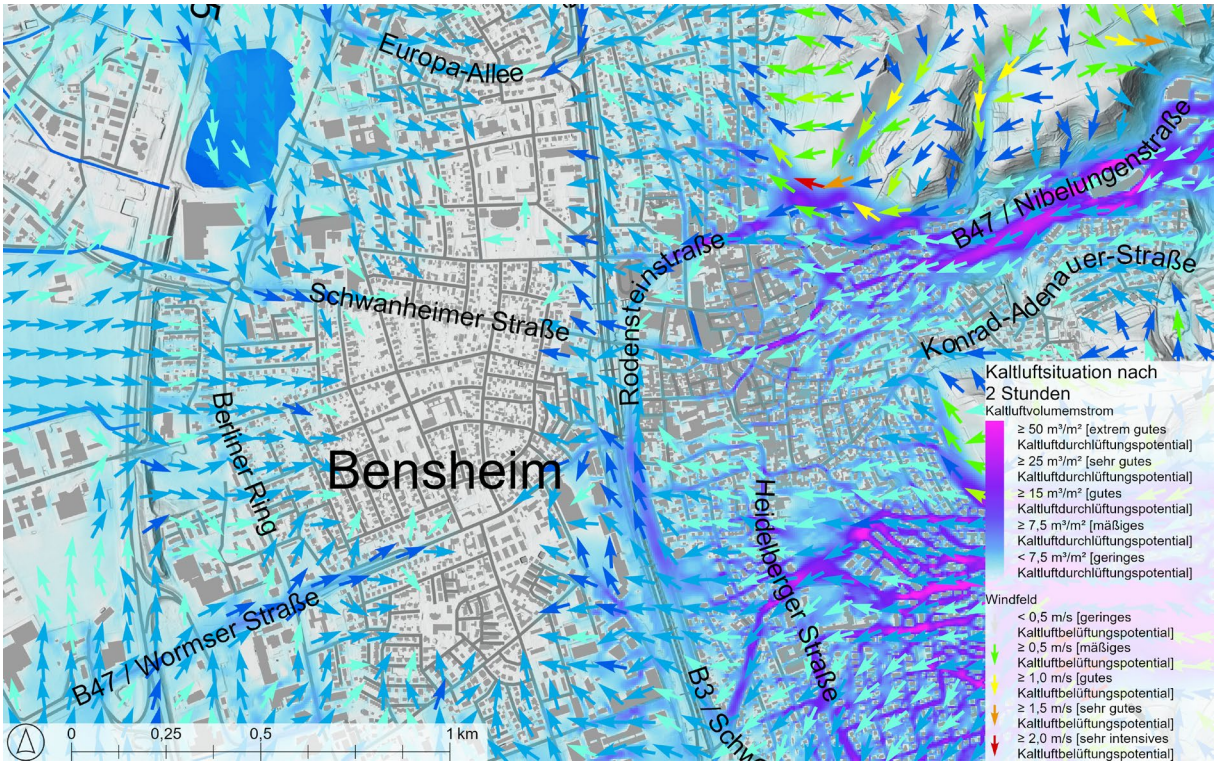


Abbildung 27: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 2Std. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

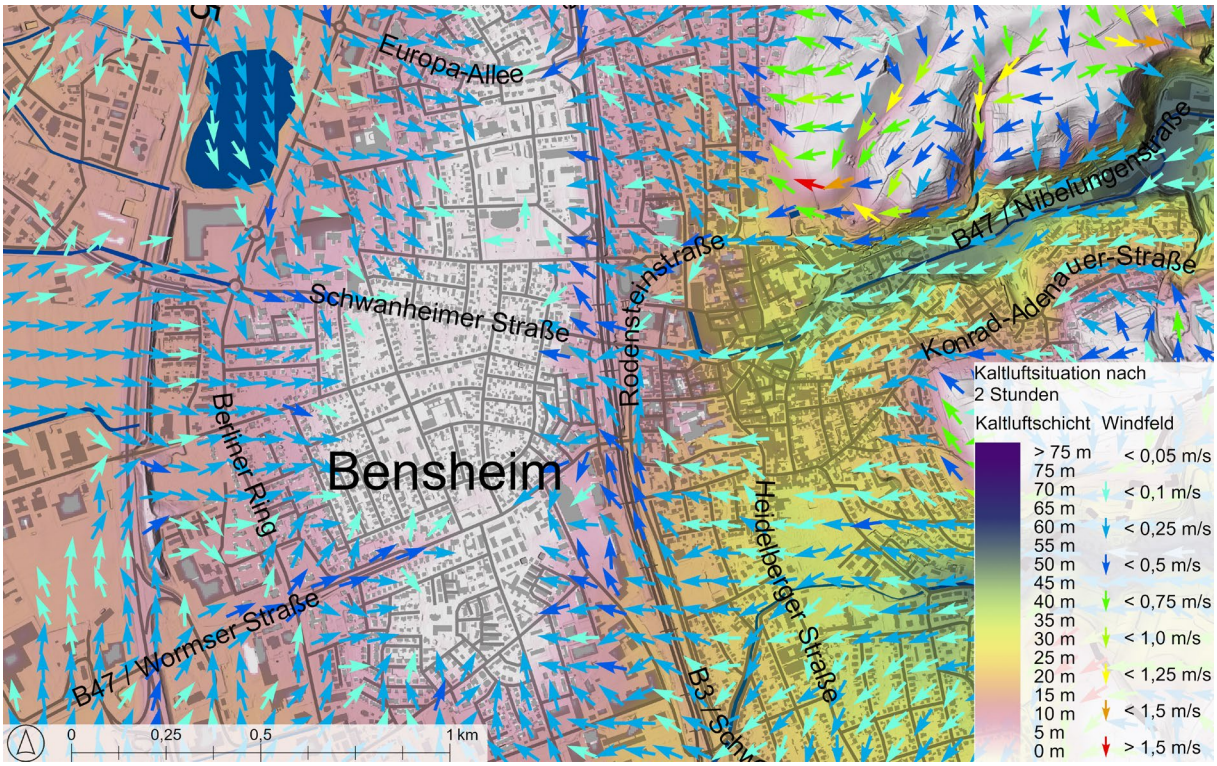


Abbildung 28: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 2Std. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Ausgeprägte Kaltluftproduktion und beginnender Abfluss

(2 Stunden nach Sonnenuntergang, Abbildungen 28 u. 29)

Nach etwa zwei Stunden verfestigt sich die räumliche Verteilung der Kaltluftentstehung deutlich. Die Offenlandflächen im Osten wirken nun als dominante Abflussquellen und speisen einen zunehmend dynamischen Kaltluftstrom, der entlang der Topographie in Richtung BENSHEIM geführt wird.

In dieser Phase wird die Funktion der Täler und linienhafter Offenlandstrukturen besonders klar. Sie fungieren als gesamtstädtisch bedeutsame Luftleitbahnen. Die Simulation verdeutlicht, dass insbesondere der Korridor entlang der NIBELUNGENSTRAßE / B47, sowie die umgebenden Hanglagen eine überdurchschnittliche Transportfunktion für das Stadtgebiet östlich der Bahntrasse besitzen. Diese Räume bilden zentrale Versorgungskorridore für den thermisch belasteten innerstädtischen Siedlungsraum.

Die Kaltluftschichtdicke zeigt eine zunehmende Ausprägung insbesondere in den Siedlungsbereichen mit geringer Dichte.

Das bodennahe Windfeld verdeutlichen einen Übergang von lokal begrenzten Bewegungen hin zu konstanten Strömungen, die zunehmend auf die bislang unbeeinflussten Siedlungsbereiche einwirken.

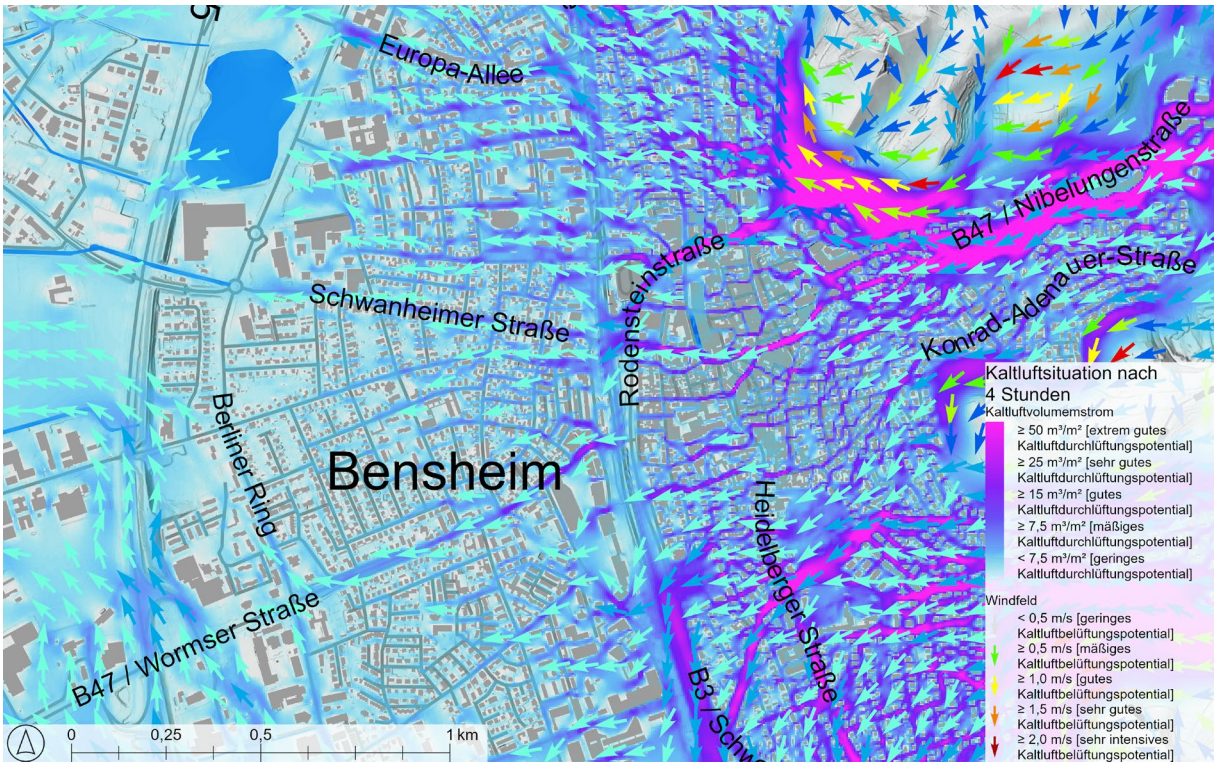


Abbildung 29: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 4Std. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

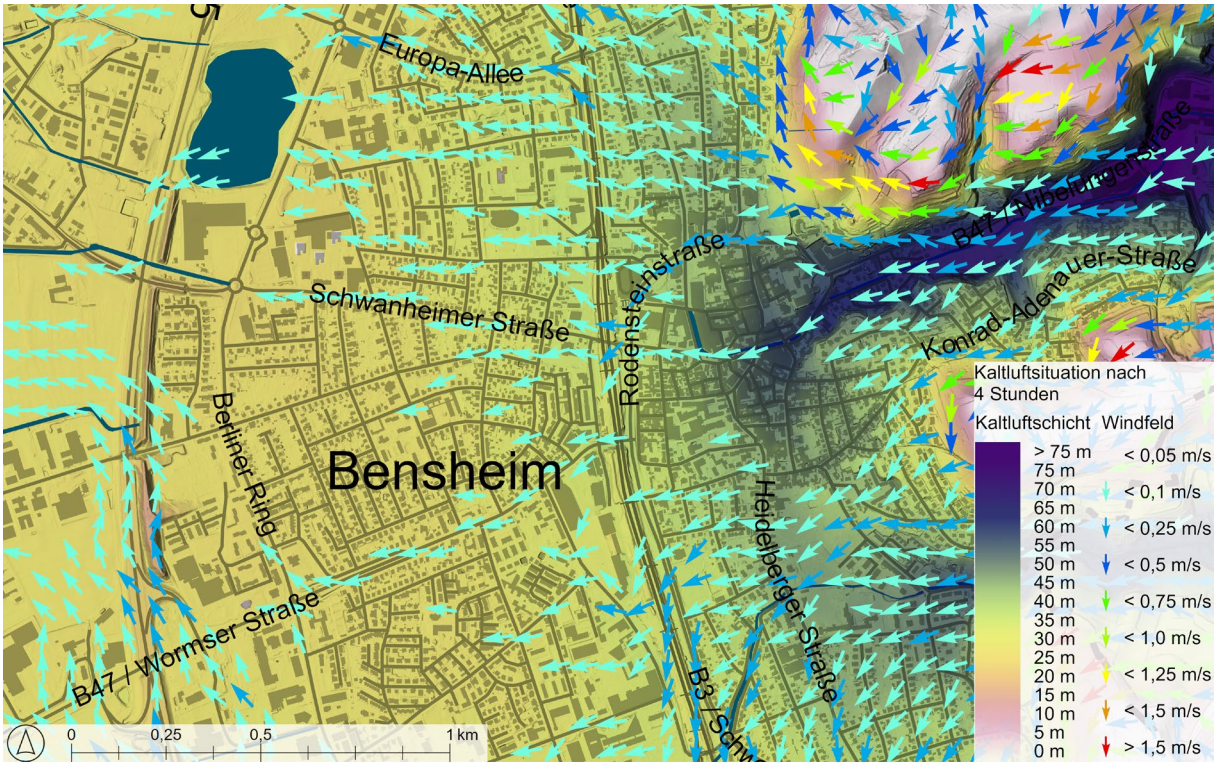


Abbildung 30: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 4Std. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet.

Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Stabile Abflussphase und Einwirkung in den Siedlungsraum

(4 Stunden nach Sonnenuntergang, Abbildungen 30 u. 31)

Vier Stunden nach Sonnenuntergang zeigt sich ein vollständig etabliertes, großräumiges Kaltluftabflussfeld. Die großräumige Auskühlung der östlichen Hang- und Offenlandbereiche führt zu einem kontinuierlichen und volumetrisch bedeutsamen Kaltluftstrom in Richtung der übrigen BENSHEIMER Siedlungsflächen. Die Karten zeigen die höchste Kaltluftschichtdicke entlang der NIBELUNGENSTRAßE im LAUTERTAL, während gleichzeitig die stärksten Volumenstromwerte entlang der Hauptabflusskorridore auftreten.

Die Funktionsweise der Kaltluftleitbahnen tritt nun sehr klar hervor:

- Ost-West gerichtete Abflüsse dominieren vollständig die Kaltluftsituation.
- Talräume, Straßenräume und lineare Vegetations- und Landwirtschaftsstrukturen entfalten ihre volle Leitwirkung.
- Bereiche mit niedriger baulicher Dichte, wie das Gewerbegebiet im Süden oder einzelne Wohnquartiere mit aufgelockerter Bebauung, lassen teilweise ein Eindringen der Kaltluftströme hinter der Bahntrasse in den Siedlungsraum zu.

Die innere Stadtstruktur zeigt einen differenzierten Einfluss:

- Verdichtete Zonen, insbesondere der Altstadtkern, wirken strömungshemmend und reduzieren die Eindringtiefe des Kaltluftstroms. Erkennbar durch Richtungsänderungen und geringe Windgeschwindigkeiten.
- Aufgelockerte innerstädtische Grün- und Freiflächen fungieren, abhängig von ihrer Lage, als sekundäre Einwirkbereiche, die die Versorgung einzelner Quartiere begünstigen können (z.B. alter Sportplatz im Meerbachquartier).

Die Karten (in Abbildungen 26-31) zeigen zudem deutlich, dass die thermische Zugwirkung des aufgeheizten Siedlungsraums einen verstärkenden Effekt besitzt: Durch den nächtlichen Unterdruck der Stadt wird der westliche Zufluss der Kaltluftströme nach anfänglicher Sättigung durch die großen Kaltluftmassen aus dem Osten abgelöst, was zu einer wechselnden Belüftungsrichtung führt.

5.4.2 Bodennahe nächtliche Lufttemperatur

Die bodennahe nächtliche Lufttemperatur wird rechnerisch für 04:00 Uhr nachts (UTC), während eines „Heißen Tages“ (LTmax ≥ 30 °C) berechnet. Prinzipiell ist eine Simulation für jede beliebige Uhrzeit möglich. I.d.R. stellt sich um 04:00 Uhr nachts (UTC) allerdings die stärkste Abkühlung im Offenland ein (vgl. Kapitel 2.2), wodurch der städtische Wärmeinseleffekt in Bereichen des überwärmten Siedlungsraums zu diesem Zeitpunkt am deutlichsten hervortritt.

Als Eingangsparameter für die anzunehmende Lufttemperatur im Außenbereich wird das Mittel der Tagesmaxima sowie der korrespondierenden Mittel des Nachtminima für einen regionaltypischen „Heißen Tage“ des letzten 30 Jahre ermittelt (vgl. Kapitel 5.1.2).

Als Referenz dient hierfür der historische Datenbestand des DWDs. Entsprechend lässt sich ein typischer „Heißer Tag“ in der Region, während dem letzten 30-jährigen Mittel, mit einem Maximum von 31,6 °C und einem Minimum der Lufttemperatur in der Nacht von 16,9 °C im Außenbereich charakterisieren.

Für die lokaltypische Durchlüftung wird eine austauscharme Wetterlage ohne regionale Überströmung angenommen, in der eine Schwachwindsituation in Form des bodennahen Flurwindes dominierend ist. Entsprechend wird als Eingangsparameter für das bodennahe nächtliche Windfeld auf die, in den Kaltluftsimulationen (vgl. Kapitel 5.4.1), berechneten Windgeschwindigkeiten zurückgegriffen.

Die Berechnung basiert auf dem Ansatz von Koopmanns et al. aus dem Jahr 2020 und nutzt für die Berechnung der bodennahen Lufttemperatur die Informationen zur Bebauung, der Vegetationsausstattung sowie der entsprechenden nächtlichen Durchlüftung. Durch die Berücksichtigung des regionaltypischen „Heißen Tages“ findet eine individuelle Betrachtung des Untersuchungsraums statt, welche nicht ausschließlich die Morphologie des städtischen und des ländlichen Raums nutzt, sondern auch die klimatische Charakteristik der Region berücksichtigt. Insbesondere die Information, wie das Verhältnis zwischen dem täglichen Maximum und dem nächtlichen Minimum an einen „Heißen Tag“ ausgeprägt ist, liefert wichtige Informationen zur generellen regionalklimatischen Dynamik und deren damit verbundenen Potentialen oder Defiziten.

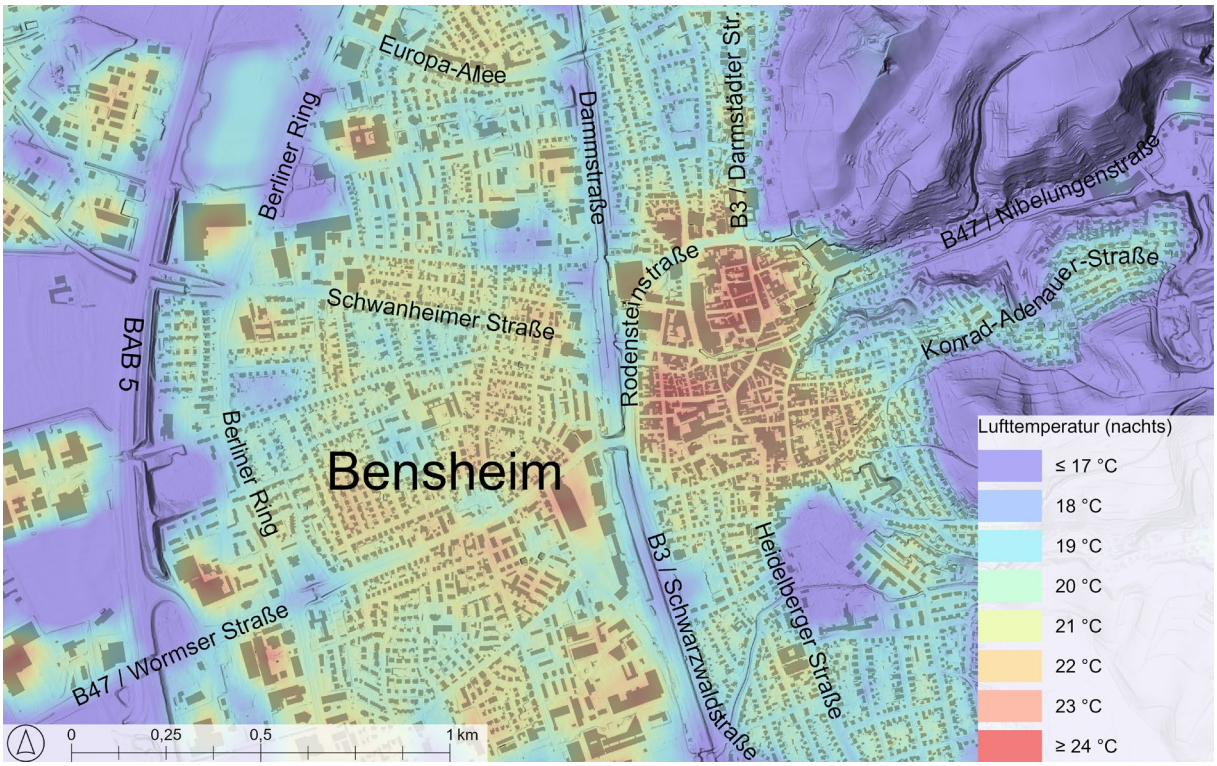


Abbildung 31: Kartenauszug der Analysekarte bodennahe nächtliche Lufttemperatur. Dargestellt wird die simulierte bodennahe nächtliche (04:00Uhr) Lufttemperatur (2m ü.G.) während eines für die Region typischen Heißen Tages (LTmax: 31,6°C, LTmin: 16,9°C) für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Rötliche Farbfüllungen geben höhere Temperaturen (°C) wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Die Karte in Abbildung 32 zeigt die simulierte bodennahe nächtliche Lufttemperatur um 04:00 Uhr während eines regionaltypischen „heißen Tages“ und bildet damit den Zeitraum der maximalen nächtlichen Abkühlung im Offenland ab. Die Darstellung verdeutlicht eindrücklich die

Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffekts innerhalb des BENSHEIMER Siedlungsraums. Während die umgebenden Offenlandflächen, insbesondere in topographisch begünstigten Lagen, deutliche nächtliche Temperaturabsenkungen erreichen, verbleiben dichter bebaute Gebiete sowie stark versiegelte Strukturen auf einem insgesamt höheren Temperaturniveau.

Rötliche Farbwerte markieren dabei jene Bereiche, in denen die nächtliche Abkühlung signifikant reduziert ist und sich thermische Belastungen entsprechend verstärkt ausprägen. Diese Zonen korrelieren überwiegend mit dichten, mehrgeschossigen Baustrukturen sowie mit großflächigen Wärmeinseln in den innerstädtischen Kernbereichen. Demgegenüber weisen blauviolette Farbtöne kühlere Bereiche auf, die bevorzugt entlang der Offenlandräume, innerstädtischer Vegetationsstrukturen oder in Kaltluftleitbahnen auftreten. Die dargestellte Temperaturverteilung spiegelt dabei sowohl die lokale Bebauungs- und Vegetationsstruktur als auch die nächtlichen Strömungsbedingungen wider, welche aus den Kaltluftsimulationen übernommen wurden.

Die Karte ermöglicht eine differenzierte Einschätzung der nächtlichen thermischen Belastungssituation und zeigt jene Räume auf, in denen planerische Maßnahmen zur Reduzierung des Wärmeinseleffekts prioritär anzusetzen sind. Insbesondere die Identifikation lokaler Wärmeinseln, deren räumliche Ausdehnung sowie die Einbindung vorhandener Kaltluftentstehungs- und Kaltlufttransportprozesse liefern eine wesentliche Grundlage für stadtklimatisch sensible Entscheidungen im weiteren Planungsprozess.

6 Klimatischer Bestand und Szenarien

6.1 Klimaanalysekarte

Klimaanalysekarten werden laut VDI-Richtlinien als thematische Fachkarten definiert, die sich grundsätzlich von amtlichen Festlegungskarten unterscheiden. Als thematische Fachkarten (oder auch „Planungsgrundlagenkarten“) geben sie durch die flächenbezogene Visualisierung von Klimaeigenschaften und -phänomenen Aufschluss über alle klimatisch relevanten Belange eines Stadtgebietes. Mit den anhand dieser Informationsgrundlage abgeleiteten Planungs- und Handlungsempfehlungen nimmt die Klimaanalysekarte für Städte und Regionen eine zentrale Funktion für die praktische Raumanalyse und sachgerechte Durchführung von Planungsprozessen ein.

Die Darstellung und Berechnung der Klimaanalysekarten unterliegt aufgrund der Individualität der Untersuchungsräume keinem explizit durch den VDI festgelegtem Maßstab. Trotz einer grundsätzlich flexibleren Handhabung bei Inhalt, Kartengrafik und Kartenmaßstab, die aus dem vermehrten Einsatz von kartengestützten Planungsinformationssystemen (Geoinformationssystemen) resultiert, ist bei der Erstellung von Klimaanalysekarten jedoch grundsätzlich *„[…] die Arbeit mit vergleichsweise großmaßstäbigen Darstellungen erforderlich“* [13]. In der Übersicht des VDI zu den „Steuerungsinstrumente[n] für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende[n] Fachbeiträge[n]“ sind die Darstellung thermischer Belastungsräume (Überwärmungsräume) und der Luftleitbahnen sowie der Kaltluftentstehungsflächen dem Mesoklima und somit der Ebene der Regionalplanung (Raumordnungsplanung im Maßstab 1 : 50.000 – 1 : 100.000), Flächennutzungsplanung und der vorbereitenden Bauleitplanung (Bauleitplanung im Maßstab 1 : 5000 – 1 : 25.000) zugeordnet [13]. Über detaillierte, kleinräumige mikroklimatische Verhältnisse (≤ 1 : 1000) können in Klimaanalysekarten, deren Funktion in der Visualisierung thermischer Belastungsräume, Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsflächen liegt, demnach nur bedingt Aussagen getroffen werden.

In diesem Sinne werden in Klimaanalysekarten klimatische Verhältnisse wie die Temperaturverteilung in Kombination mit bewertenden Sachverhalten wie z.B. Frischluftschneisen dargestellt, um einen Gesamtüberblick über alle relevanten Klimaelemente eines Stadtgebietes zu erhalten [13]. Hierfür werden in den Untersuchungsräumen sogenannte Klimatope ausgewiesen. Diese beschreiben *„[…] räumliche Bereiche mit vergleichbaren, einheitlichen, kleinräumigen, bodennahen lokalklimatischen Verhältnissen und definieren sich hauptsächlich über die jeweilige Nutzungsform (Siedlung, Freiraum, Wasser)“* [13]. Bei den für die Zuweisung der Klimatope relevanten Aspekten handelt es sich in erster Linie um:

a) Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad,
b) Oberflächenstruktur, Rauigkeit,
c) Relief,
d) Vegetationsart/-struktur,
e) Lage im Stadtgebiet [13].

Sofern das Relief nicht stark variiere, sei bei ähnlichen oder gleichen Flächennutzungsstrukturen in der Regel auch von vergleichbaren mikroklimatischen Bedingungen auszugehen, so der VDI. In Bezug auf die Klimatopabgrenzung wird zusätzlich darauf hingewiesen *„[…] dass sich klimatische Prozesse nicht linienscharf an Bebauungs- und Nutzungsgrenzen anpassen, sondern fließende Übergänge zu benachbarten Flächen vorliegen.“* [13].

Je nach den lokalen Bedingungen werden verschiedene Klima- bzw. Klimatoptypen (Freiland- , Wald-, Misch- und Übergangs-, Vorstadt-, Stadt-, Innenstadtklima) nach ihren prägenden Charakteristiken voneinander abgegrenzt. Zu jedem dieser Klimatope werden vom VDI zudem eigene planungsrelevante Hinweise vorgegeben [13].

Freilandklima (Kaltluftentstehungsgebiete)

Freilandklimatope stellen sich überwiegend über unbewaldeten, vegetationsbestandenen / niedrig bewachsenen Außenbereichen ein. Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus und wirken als Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten (lufthygienisch relevante) Emittenten vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, können diese Bereiche eine hohe Ausgleichsfunktion für die human-biometeorologisch und lufthygienisch belasteten bebauten Bereiche besitzen.

Hinweise für die Planung

- Aufforstungs- und Siedlungsmöglichkeiten entsprechend den lokalklimatischen Verhältnissen, jedoch zudem Bedeutung der Flächen (hierzu dient die Planungshinweiskarte, sie klassifiziert die Ausgleichsräume und definiert potenziell notwendige klimatische Entwicklungsgutachten) für den großräumigen Luftaustausch beachten (z.B. in Stadtrandlage)
- Erhaltung des Kaltluftentstehungspotenzials.

Waldklima (Frischluftentstehungsgebiete)

Das Klima im Stammraum eines Walds wird durch verminderte Ein- und Ausstrahlung bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich oberhalb des Kronenraums, wo eine ungehinderte Wärmeausstrahlung stattfinden kann. Deshalb sind Waldgebiete auf geneigten Flächen hoch relevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischluft und deren Dynamik. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und human-biometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluft- und Reinluftgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit keine Luftleitfunktionen übernehmen.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und ausbauen, soweit lokalklimatisch verträglich
- Funktion bei benachbarten Gebieten mit höher belasteter Luft: Immissionsschutzwald (Luftgeneration)

Misch- und Übergangsklimate

Das Misch- und Übergangsklima beschreibt vegetationsgeprägte Gebiete von ausreichender Größe (ab 1 ha), um ein lokales klimatisches Ausgleichspotential zu generieren.

Diese Flächen besitzen eine hohe klimaökologische Wertigkeit als Puffer- und Ausgleichsflächen in Nachbarschaft zu klimatisch belasteten Gebieten. Auf diesen Flächen findet eine ausreichende lokale Belüftung und Evapotranspiration statt, wodurch sie insbesondere in den Sommermonaten eine wichtige klimatisch regulierende Funktion übernehmen.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und weitere Versiegelung vermeiden

Vorstadtklima

Das Vorstadtklima entsteht in verdichteten Gebieten mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen und moderatem nächtlichen Abkühlungspotential. Die Belüftung kann durch die Bebauung eingeschränkt sein.

Hinweise für die Planung

- weitere Versiegelung vermeiden
- Arrondierung (Einbezug angrenzender Flächen) möglich

Stadtklima

Charakteristisch für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit überwiegend hohen Baukörpern und Straßenschluchten. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und den geringen Grünflächenanteil ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte deutlich überwärmt. Tagsüber treten hohe strahlungsbeeinflusste Lufttemperaturen auf, die zu Hitzestress führen. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen human-biometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen.

Hinweise für die Planung

- Entsiegelung und anschließend geeignete Begrünung, Wasserflächen etc.
- Blockentkernung und -begrünung
- Fassaden- und Dachbegrünungen anstreben
- hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden
- verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden
- emissionsarme Energieversorgung anstreben

Innenstadtklima

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün charakterisiert ist. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen und die starken Windfeldveränderungen, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Das Innenstadtklima ist human-biometeorologisch sehr ungünstig.

Hinweise für die Planung

- Entsiegelung
- Blockentkernung und -begrünung
- Fassaden- und Dachbegrünungen anstreben
- hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden
- verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden
- Verkehrsberuhigung und emissionsarme Energieversorgung anstreben

Da die reine Klimatopausweisung für die Berücksichtigung aller lokaler Besonderheiten urbaner Untersuchungsräume unzureichend ist, wird die Klimaanalysekarte zusätzlich durch Informationen und Darstellungen zu weiteren klimatischen Grundparametern wie z.B. dem bodennahen nächtlichen Windfeld und der Intensität des Kaltluftvolumenstroms ergänzt.

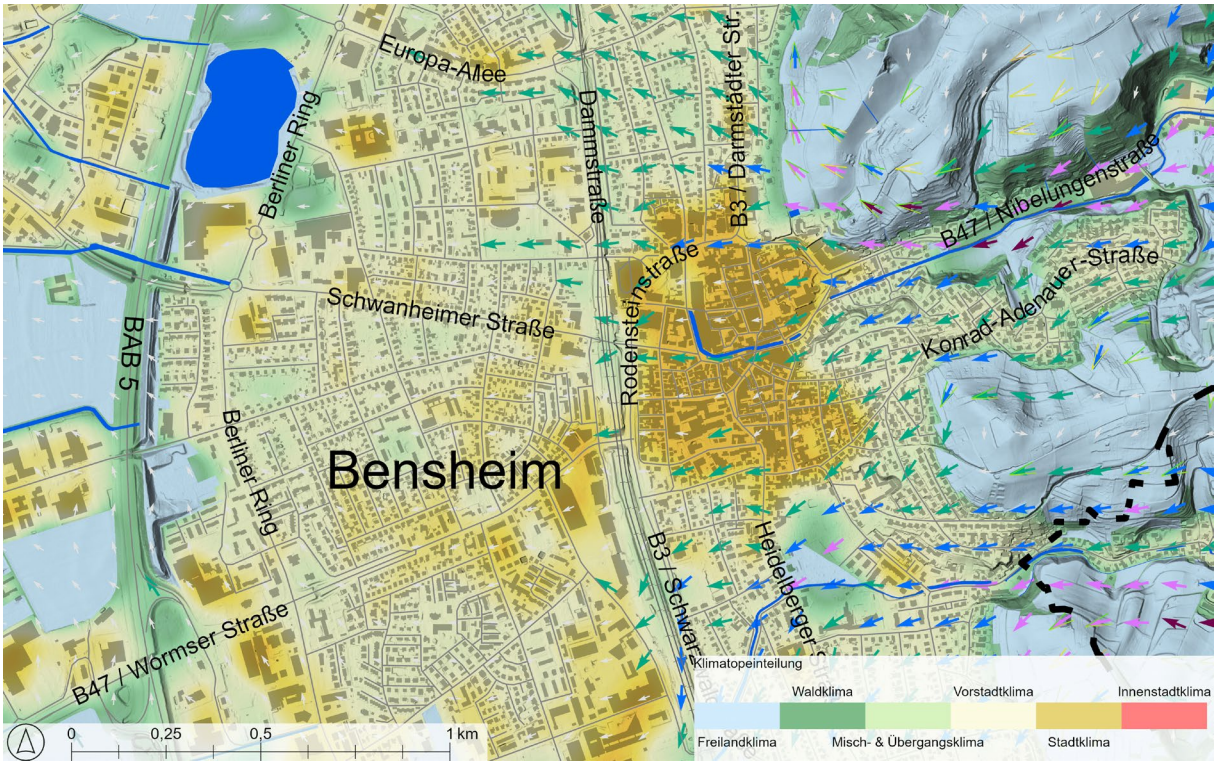


Abbildung 32: Kartenauszug zur **Klimaanalysekarte** für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Die unterschiedlichen Klimatope werden fließend dargestellt, der Kaltluftvolumenstrom in den zugehörigen Vektorpfeilen. Für den gesamten administrativen Raum liegt eine separate Karte als hochaufgelöstes PDF vor.

Der Siedlungsaußenraum in BENSHEIM setzt sich aus FREILAND- und WALDKLIMATOPEN zusammen (siehe Abbildung 32 und Einzelkarte „Klimaanalysekarte Bensheim 2025“). Der Flächennutzung entsprechend ist der BENSHEIMER Westen stark vom FREILANDKLIMA geprägt, während sich der Osten des Stadtgebiets wegen der dortigen Waldbestände heterogener gestaltet. Das WALDKLIMA ist generell abseits der dortigen Siedlungsbestände raumprägend, während sich im direkten Umfeld der bebauten Siedlungsflächen aufgrund seiner primär landwirtschaftlichen Nutzung weitläufig das FREILANDKLIMA herausbildet.

Die regionaltypische nächtliche Kaltluftbewegung trägt die Kaltluft von Osten nach Westen. Die Kaltluft strömt häufig mit (stark) erhöhten Windgeschwindigkeiten von den Bergen und Hängen ab, die den BENSHEIMER Osten maßgeblich prägen, und wird von dort aus über das

topographisch abschüssige Freiland in Richtung Westen und in Richtung der Stadt BENSHEIM geleitet. Im Nordosten BENSHEIMS hat die MÜHLTALSTRAßE, die HOCHSTÄDTEN und AUERBACH verbindet, ein enormes Kaltluftdurchlüftungspotential. Gleiches gilt für die B47 / NIBELUNGENSTRAßE und deren näheres Umfeld. Von REICHENBACH aus strömt im nächtlichen Verlauf ≥ 25 m³/m² Kaltluft in die Gemarkungen WILMSHAUSEN und SCHÖNBERG ein und wird weiter in Richtung der BENSHEIMER Altstadt getragen. Die Kaltluft umströmt dort den KIRCHBERG (≥ 50 m³/m² bei teils ≥ 1 m/s) und tritt in den Siedlungsraum nördlich der Altstadt ein. Ein weiterer bedeutender Kaltluftvolumenstrom bildet sich im Osten bzw. Südosten des BENSHEIMER Gemeindegebietes heraus. Dem MEERBACH und der MÄRKERWALDSTRAßE / GRONAUER STRAßE folgend besitzt der nahegelegene Raum ein sehr gutes bis extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential (≥ 25 m³/m² bis ≥ 50 m³/m²). Die Kaltluft umströmt und strömt durch den bebauten Raum östlich der Stadt BENSHEIM, trifft auf den östlichen Rand des Stadtgebietes auf und fließt durch dieses hindurch. In den Gemarkungen AUERBACH und BENSHEIM haben die östlichen Siedlungsflächen daher weitläufig mindestens ein mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential (≥ 7,5 m³/m²). In BENSHEIM steigt das Kaltluftdurchlüftungspotential insbesondere in den südöstlichen Wohnquartieren auf ≥ 7,5 m³/m² („gut“) an.

Auch südlich des GEWERBEGEBIETS SÜD in der Gemarkung BENSHEIM hat der Raum ein sehr gutes bis extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential. Der Kaltluftvolumenstrom speist sich u.a. aus der von Osten anströmenden Kaltluft. Die Kaltluftmassen umströmen das Freiland zwischen den Städten BENSHEIM und HEPPENHEIM und führen weiter bis nach LORSCH. Der Westen BENSHEIMS besitzt kein nennenswertes Kaltluftdurchlüftungspotential (< 7,5 m³/m²) und besitzt aufgrund seines einheitlich flachen Geländes ein ebenfalls nur geringes Kaltluftbelüftungspotential (< 0,5 m/s).

Der Übergang vom Freiraum zum urbanen Raum wird als MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMA bezeichnet. Dieses prägt insbesondere die urbanen Randbereiche, die an die FREILAND- und WALDKLIMATOPE angrenzen, bildet sich jedoch auch im Siedlungskontext durch Parks oder kleine, gut vernetzte Grünflächen heraus. Wie dies bei allen Klimatopen der Fall ist, sind die Übergänge MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMAS hin zu den Freiraumklimatopen und den urbanen Klimatopen (VORSTADTKLIMA, STADTKLIMA, INNENSTADTKLIMA) fließend. Oftmals zeigen sich so im bebauten Raum klimatische Tendenzen, ohne dass ein Raum eindeutig einem einzelnen Klimatop zugeordnet werden kann. Im Falle des MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMAS ist dieses im Verbund mit dem VORSTADTKLIMA für den Großteil aller BENSHEIMER Siedlungsflächen raumprägend. Eine tendenziöse Einordnung des Siedlungsraums in das MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMA umfasst neben den Siedlungsrandbereichen z.B. den Nordosten der Gemarkungen AUERBACH und BENSHEIM sowie die Gemarkungen SCHÖNBERG und ZELL. Abseits dieser Bereiche sind es kleinere vegetationsdominierte Flächenkonstellationen wie Gärten, Hinterhöfe oder Parks, die das VORSTADTKLIMA punktuell auflockern. In den örtlichen Gewerbegebieten haben insbesondere die großen Frei- und Abstandsflächen zwischen den versiegelten Gewerbeflächen diese Funktion inne und sind so dem MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMA oder dem FREILANDKLIMA zuzuschreiben.

Die versiegelten Flächen der Gewerbegebiete sind in Kombination mit den für diesen Gebietstypus prägenden großen Baumassen für die tendenzielle Überwärmung dieser Räume verantwortlich. In den Gewerbegebieten herrscht oftmals flächenübergreifend das STADTKLIMA. Größere Gebäudekomplexe und verdichtete Gebäudekonstellationen (bspw. GEWERBEGEBIET SÜD) sind mitunter einer stärkeren bioklimatischen Belastung ausgesetzt. Das STADTKLIMA erhält so mancherorts INNENSTADTKLIMATISCHE Tendenzen. Punktuell höhere Belastungen sind

insbesondere im Fall des STADTKLIMAS auch im restlichen Siedlungsraum nicht unüblich. Oftmals sind sie an einzelne Gebäudegruppen wie Bildungseinrichtungen gebunden. Baulich verdichtete Räume, zu denen i.d.R. die Ortszentren der einzelnen Gemarkungen zählen, sind meist mindestens dem STADTKLIMA zuzuordnen (GRONAU, SCHWANHEIM, FEHLHEIM, AUERBACH, BENSHEIM). Im Falle FEHLHEIMS weist zudem das nordwestliche Neubauquartier Überwärmungstendenzen auf. In BENSHEIM ist zusätzlich der Raum zwischen dem GEWERBEGEBIET SÜD und der SCHWANHEIMER STRAßE flächenübergreifend dem STADTKLIMA zuzurechnen.

Die höchste bioklimatische und hygienische Belastung geht vom INNENSTADTKLIMA aus. Regulär ist dies im BENSHEIMER Gemeindegebiet nicht maximal intensiv, aber deutlich erkennbar ausgeprägt. Klare Belastungstendenzen sind insbesondere dem BENSHEIMER Altstadtbereich zuzuschreiben. Hiervon ist der Raum zwischen der TAUBERTSGASSE im Norden, der HÜGELSTRASSE im Osten, den Grundstücken entlang der FRIEDHOFSTRAßE und HERMANNSTRAßE im Süden und der Bahntrasse im Westen betroffen. Auch das Ortszentrum in AUERBACH, einschließlich der Grundstücke an und nördlich der Kreuzung der DARMSTÄDTER STRAßE und BACHGASSE, weist entsprechende Überwärmungstendenzen (INNENSTADTKLIMA) auf. Gleiches gilt für die Ortszentren in SCHWANHEIM und FEHLHEIM und einzelne Bildungseinrichtungen innerhalb des BENSHEIMER Stadtgebiets.

6.2 Klimaprojektionen für die Region Bensheim und Hessen

Anhand der historischen Betrachtung der regionalen klimatischen Verhältnisse in Bensheim und der entsprechenden Region konnten die bereits stattgefundenen klimatischen Veränderungen dargestellt werden (vgl. Kapitel 3.1.1). Welche Auswirkungen der Klimawandel in Zukunft auf die Region haben wird, ist Gegenstand dieses Kapitels.

Im Allgemeinen beschreibt der Begriff „Klimawandel“ die langfristige Veränderung klimatischer Bedingungen, die infolge zunehmender Emissionen von Treibhausgasen in die Atmosphäre verursacht werden. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 33 die Veränderung der Lufttemperaturen als schematische Kurve dargestellt. Je höher und zentraler die Kurve, desto häufiger tritt die durchschnittliche Lufttemperatur in der Ausgangssituation auf. In Deutschland lag die mittlere Jahrestemperatur im Referenzzeitraum 1971-2000 bei 8,6 °C. Infolge des Klimawandels vollzieht sich allerding bereits heute eine Verschiebung dieser Normalverteilung von Temperaturen in einen höheren Wertebereich. Bezogen auf Deutschland hat sich die Kurve von 2000 bis 2020 im Mittel um +0,8 °C auf 9,4 °C verschoben. Gleichzeitig verändert sich die Normalverteilung der Lufttemperaturen. Das bedeutet, dass das Klima grundsätzlich an Konstanz verliert und Abweichungen der Lufttemperaturen in niedrigere und hohe Wertebereiche häufiger auftreten. In Kombination mit der Verschiebung der Kurve zu wärmeren Temperaturen werden insbesondere Hitzeereignisse wahrscheinlicher. So ist in Deutschland die Anzahl der Heißen Tage mit einer Maximaltemperatur von ≤ 30 °C in den Jahren 2000 bis 2020 von 5 Tagen/Jahr auf 9 Tage/Jahr angestiegen.

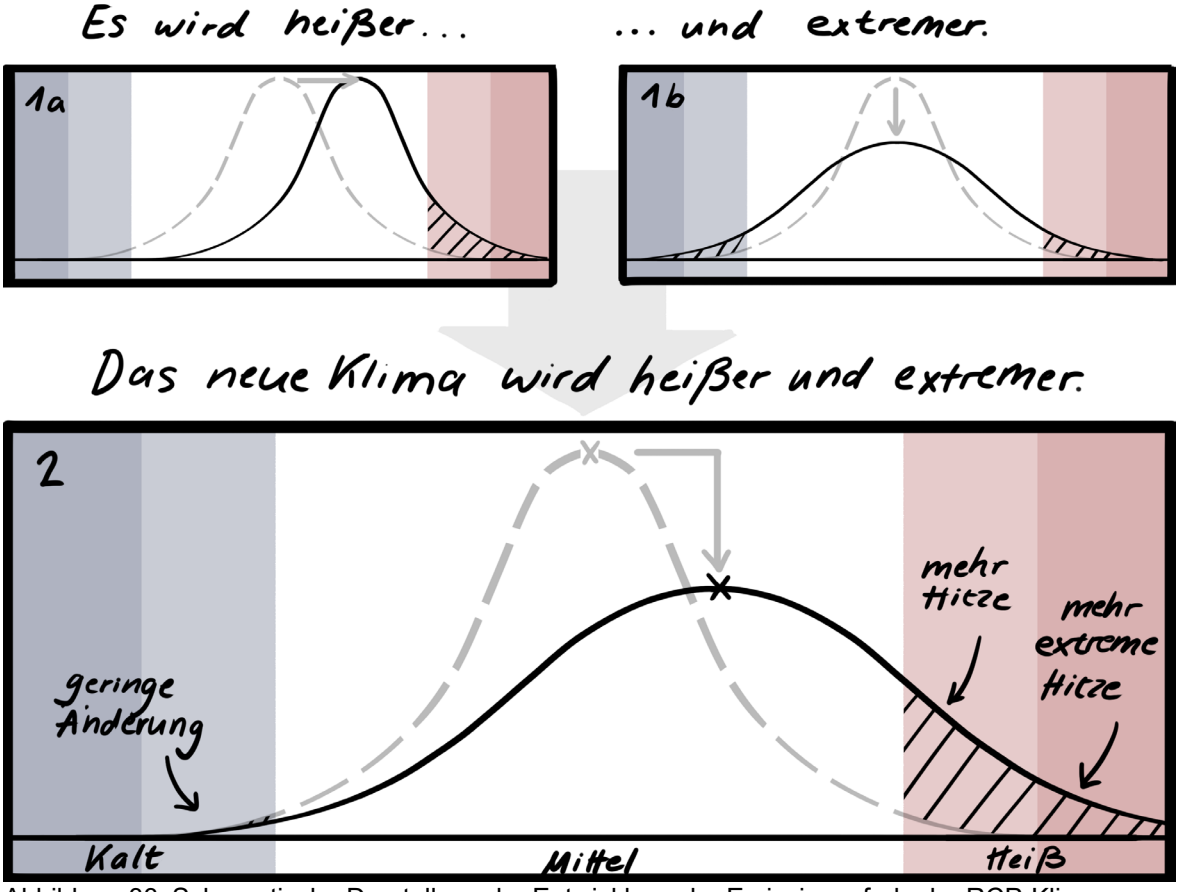


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Entwicklung der Emissionspfade der RCP-Klimaszenarien

Wie bereits im Kapitel 3.1.2 erläutert, ist an dieser Stelle erneut auf die inhärente Herausforderung zu verweisen, dass annahmebasierte Projektionen immer nur vom Status Quo

ausgehend in die Zukunft schauen können. So sind die Annahmen des Klimaprojektionsszenario RCP 2.6 (Begrenzung auf 1,5 °C globale Erwärmung gegenüber 1850-1900) aufgrund der realen Entwicklung seit 2013 (Veröffentlichungsdatum der Szenarien) selbst mit „optimistischen Maßnahmen“ nicht mehr realistisch [57].

Während in Europa bereits Regionen eine langjährige Erwärmung von über 2 °C verzeichnen, wird in Deutschland davon ausgegangen, dass die Erwärmung flächendeckend 2030 überschritten sein wird [24]. Geht man von der vollständigen Umsetzung der aktuell politisch formulierten Maßnahmen aus, wird die Erwärmung auf bis zu 2,9 °C begrenzt [57]. Das RCP 8.5-Szenario geht von einer maximalen Erwärmung von 3,1 °C aus und kann somit als *realistisch* gewertet werden.

Tabelle 11: Übersicht zu den ausgewerteten projizierten Klimadaten des RCP 2.6 für die Region Bensheim für zwei 30-jährige Mittel sowie zu den hessischen Werten.

Bensheim	**Klimaprojektion RCP 2.6**				**Hessen**	
Zeitraum	2031 bis 2060	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000
Lufttemperatur 2m ü.G. (in °C)						
Gesamtjahr	11,2	+ 1,1 °C	11,2	+ 1,1 °C	9,5	+ 1,1 °C
Sommermonate (JJA)	19,4	+ 1,1 °C	19,5	+ 1,3 °C	17,5	+ 1,2 °C
Wintermonate (DJF)	3,5	+ 1,3 °C	3,5	+ 1,3 °C	2,1	+ 1,3 °C
Klimatische Kenntage (Jahr)						
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)	58	+ 11	59	+ 12	41	+ 10
Heiße Tage (LTmax ≥ 30 °C)	16	+ 6	17	+ 7	10	+ 5
Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)	2,3	+ 1,5	3,8	+ 3,0	-	+ 0,7
Frosttage (LTmin < 0 °C)	46	- 18	48	- 16	68	- 18
Eistage (LTmax < 0 °C)	6	- 7	5	- 8	13	- 9
Niederschlagssumme (in l/m²)						
Gesamtjahr	862	+ 5 %	855	+ 4 %	805	+ 4 %
Sommermonate (JJA)	233	- 1 %	235	+ 0 %	249	+ 0 %
Wintermonate (DJF)	199	+ 8 %	193	+ 6 %	226	+ 6 %
Klimatische Wasserbilanz (in l/m²)						
Gesamtjahr	162	-	153	-	301	-
Sommermonate (JJA)	-124	-	-138	-	-100	-
Wintermonate (DJF)	173	-	168	-	214	-

Tabelle 12: Übersicht zu den ausgewerteten projizierten Klimadaten des RCP 8.5 für die Region Bensheim für zwei 30-jährigen Mittel sowie zu den hessischen Werten.

Bensheim	**Klimaprojektion RCP 8.5**				**Hessen**	
Zeitraum	2031 bis 2060	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000
Lufttemperatur 2m ü.G. (in °C)						
Gesamtjahr	12,1	+2,1 °C	13,9	+3,9 °C	12,2	+3,8 °C
Sommermonate (JJA)	19,3	+1,8 °C	21,4	+3,9 °C	20,6	+4,2 °C
Wintermonate (DJF)	4,8	+1,8 °C	6,5	+3,5 °C	4,7	+3,9 °C
Klimatische Kenntage (Jahr)						
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)	71	+ 24	98	+ 51	78	+46
Heiße Tage (LTmax ≥ 30 °C)	22	+ 12	42	+ 32	30	+24
Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)	5,3	+ 4,5	20,3	+ 19,5	-	+11
Frosttage (LTmin < 0 °C)	38	- 26	19	- 45	36	-49
Eistage (LTmax < 0 °C)	4	- 9	0	- 14	6	-16
Niederschlagssumme (in l/m²)						
Gesamtjahr	862	+ 4 %	855	+ 4 %	813	+ 5 %
Sommermonate (JJA)	233	- 5 %	235	- 15 %	219	- 12 %
Wintermonate (DJF)	199	+ 8 %	193	+ 17 %	256	+ 20 %
Klimatische Wasserbilanz (in l/m²)						
Gesamtjahr	121	-	47	-	135	-
Sommermonate (JJA)	-163	-	-230	-	-200	-
Wintermonate (DJF)	170	-	181	-	226	-

Anmerkung: Zur besseren Verständlichkeit werden die Werte gerundet dargestellt, wodurch es mitunter zu Ungenauigkeiten bei den Änderungssignalen (Δ) kommt. Zudem werden die Änderungssignale bei Lufttemperaturen mit °C angegeben, und nicht der gemäß der wissenschaftlichen Praxis in Kelvin.

Die nachfolgenden Darstellungen orientieren sich an den Empfehlungen von Kreienkamp [58], die klimatischen Veränderungen anhand einer vereinheitlichten Farbskala wiedergegeben werden können. Die nachfolgenden Karten beziehen sich im Folgenden lediglich auf das Szenario RCP 8.5. Die beiden Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 ermöglichen den Blick auf die mittel- und langfristige Dynamik. Im Anhang des Berichtes sind jedoch auch die Karten für das Szenario RCP 2.6 in größerer Darstellung zu finden.

6.2.1 Lufttemperatur und Niederschlag

Klimatische Veränderungen in Form von Temperaturanstiegen bilden die Grundlage für zahlreiche klimatische Phänomene und Änderungsdynamiken. Auch in der Öffentlichkeit wird der Klimawandel in erster Linie mit der globalen Erwärmung der Atmosphäre in Verbindung gebracht.

Das Klimaszenario RCP 2.6 weist in Richtung eines geringen bzw. stagnierenden Anstiegs der jahresgemittelten Lufttemperatur in 2 m über Grund mit 11,2 °C (+1,1 °C[1]) bis 2060 und 11,2 °C (+1,1 °C[1]) bis 2100. Folgt man der Klimaprojektion RCP 8.5 sind in Bensheim Temperaturanstiege bis auf durchschnittlich 12,1 °C (+2,1 °C[1]) bis 2060 und langfristig 13,9 °C bis 2100 erwartbar, was einer deutlicheren Steigerung um +3,9 °C[1] entspricht.

Vergleicht man die einzelnen Monate (siehe Diagramm 11) ist ein Erwärmungsschwerpunkt im Sommer bis Frühherbst zu erkennen in den Monaten von Juli bis Oktober. Das Frühjahr hingegen zwischen Februar und Mai erwärmt sich langsamer. Die Veränderungen sind in beiden Szenarien vergleichbar, allerdings sind sie im RCP 8.5 intensiver (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13).

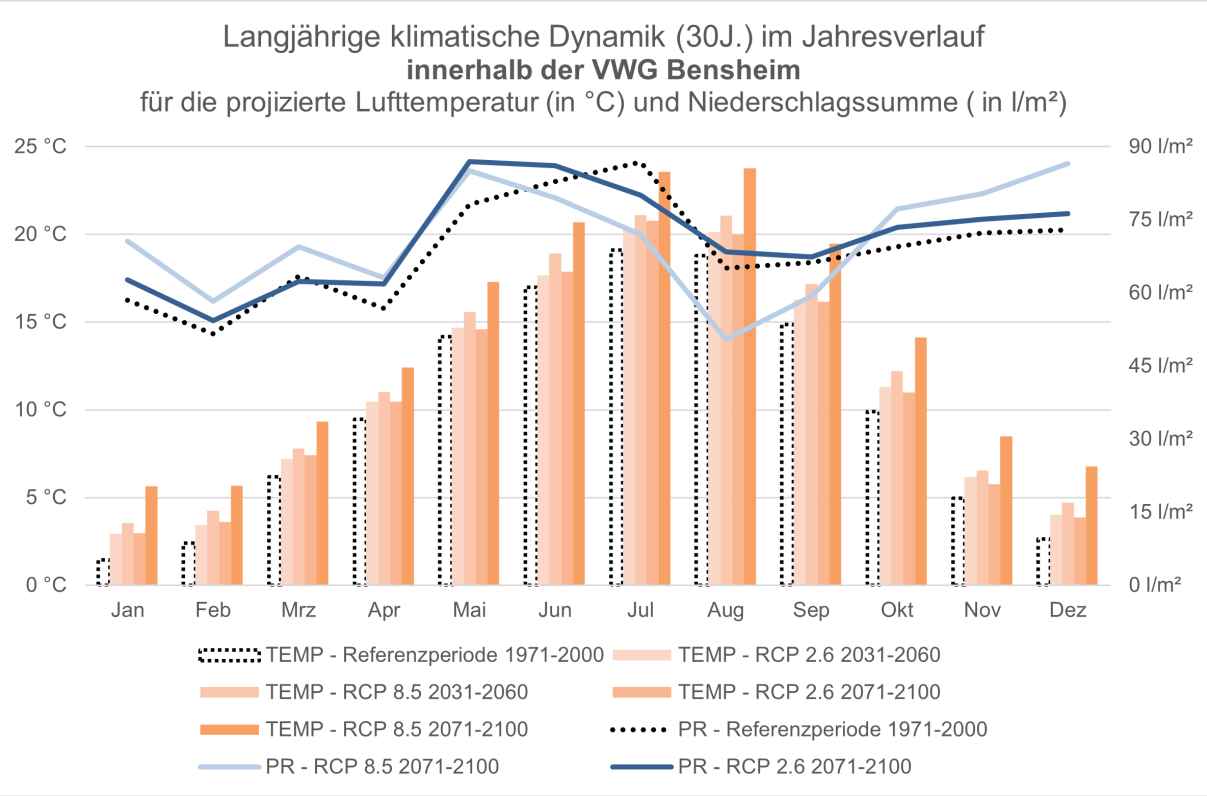


Diagramm 11: Langjährige klimatische Dynamik der bodennahen Lufttemperatur und der Niederschlagssumme innerhalb der VWG Bensheim während der einzelnen Monate für die betrachteten Mittel 1971-2000, 2031-2060, 2071-2100 und entsprechend der ausgewerteten Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5.

Die Niederschläge sind ebenfalls veränderter Dynamiken unterworfen. Während die Jahre im Gesamtjahr und insbesondere im Winterhalbjahr feuchter werden, gehen die sommerlichen projizierten Niederschlagssummen im RCP 8.5 bis 2100 um -15 %[1] zurück (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13). Welchen signifikanten Einfluss die steigenden Lufttemperaturen auf die Verfügbarkeit von Wasser im Naturhaushalt hat, zeigt die Entwicklung der klimatischen

[1]gegenüber der Referenzperiode 1971-2000

Wasserbilanz. Hier vertieft sich der Wasserverlust während der Sommermonate deutlich zum Ende des Jahrhunderts. Gleichzeitig bleibt die gesamtjährliche Bilanz im positiven Bereich (siehe Tabelle 12). Die Umverteilung der Niederschläge und der Verfügbarkeit von Wasser wird absehbar mit tiefgreifenden Konsequenzen für das lokale Ökosystem einhergehen.

Tabelle 13: Übersicht zu den Änderungssignalen der projizierten bodennahen Lufttemperatur und der Niederschlagssumme im Jahresverlauf für die VWG Bensheim

			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Lufttemperatur	Referenz	1971-2000	1,6	2,5	6,3	9,6	14,4	17,2	19,5	19,0	14,9	9,9	5,1	2,8
	RCP 2.6	**2031-2060**	*+1,5*	*+1,0*	*+1,0*	*+1,0*	*+0,5*	*+0,7*	*+1,2*	*+1,4*	*+1,4*	*+1,4*	*+1,2*	*+1,4*
	RCP 2.6	**2071-2100**	*+1,5*	*+1,2*	*+1,2*	*+1,0*	*+0,4*	*+0,9*	*+1,7*	*+1,2*	*+1,3*	*+1,1*	*+0,8*	*+1,3*
	RCP 8.5	**2031-2060**	*+2,1*	*+1,8*	*+1,6*	*+1,6*	*+1,4*	*+1,9*	*+2,0*	*+2,3*	*+2,3*	*+2,3*	*+1,6*	*+2,1*
	RCP 8.5	**2071-2100**	*+4,2*	*+3,3*	*+3,2*	*+2,9*	*+3,1*	*+3,7*	*+4,5*	*+5,0*	*+4,6*	*+4,2*	*+3,5*	*+4,1*
Niederschlag	Referenz	1971-2000	+59	+52	+63	+57	+78	+83	+87	+65	+66	+70	+72	+73
	RCP 2.6	**2031-2060**	+6	+2	- 0	+8	+11	+6	- 4	- 4	- 3	+4	+5	+8
	RCP 2.6	**2071-2100**	+4	+3	- 1	+5	+9	+3	- 7	+3	+1	+4	+3	+3
	RCP 8.5	**2031-2060**	+5	+3	+3	+5	+6	- 0	- 5	- 6	- 1	+3	+7	+7
	RCP 8.5	**2071-2100**	+12	+7	+6	+6	+7	- 3	- 15	- 15	- 7	+8	+8	+14

Die bestehenden regionalen Unterschiede der allgemeinen Lufttemperatur werden auch in Zukunft für wärmere Regionen Hessens eine deutliche Mehrbelastung bedeuten. Das Rhein-Main-Tal sticht in der Betrachtung des RCP 8.5 der Lufttemperatur im Gesamtjahr mit Werten über 12 °C im langjährigen Mittel 2031-2060 heraus. Bis 2100 liegt die durchschnittliche Lufttemperatur hier großflächig über 14 °C. Im Vergleich dazu herrschen in weiten Bereichen Mittel- und Nordhessens zum Ende des Jahrhunderts bei 11 °C bis 12 °C.

Auch in Bensheim sind die kleinräumigen Unterschiede in der Topografie ursächlich für eine heterogene Entwicklung der thermischen Verhältnisse. Die Siedlungsfläche befindet sich allerdings überwiegend in der belasteten Lage des Rheintals mit über 14 °C im Gesamtjahr.

Die Sommermonate (Juni, Juli, August) werden in der Auswertung gesondert betrachtet. Zum einen sind die Temperaturanstiege teilweise noch gravierender als im Gesamtjahresdurchschnitt und zum anderen sind die thermischen Belastungssituationen während der Sommermonate am höchsten. Die Teilbetrachtung der bodennahen Lufttemperatur während der Sommermonate ergibt, dass die Region von Bensheim bis 2100 mit über 23 °C (RCP 8.5) in besonderer Weise von thermischen Belastungssituationen betroffen sein wird. Mittelfristig sind Anstiege der sommerlichen Lufttemperatur +1,8 °C im Vergleich zu 1971-2000 auf 19,3 °C (*und im Siedlungsgebiet über 20 °C)* zu erwarten (siehe Abbildung 34).

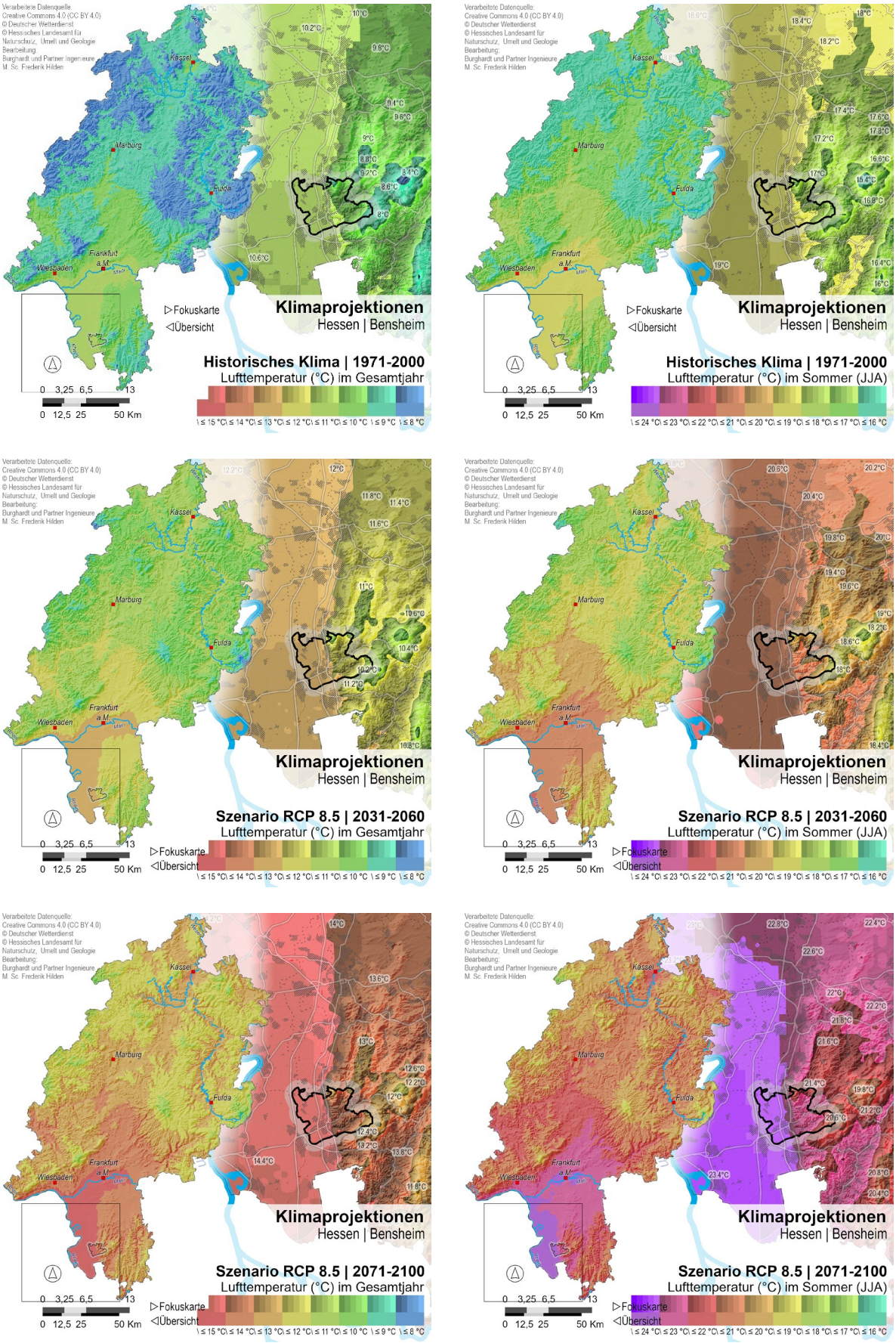


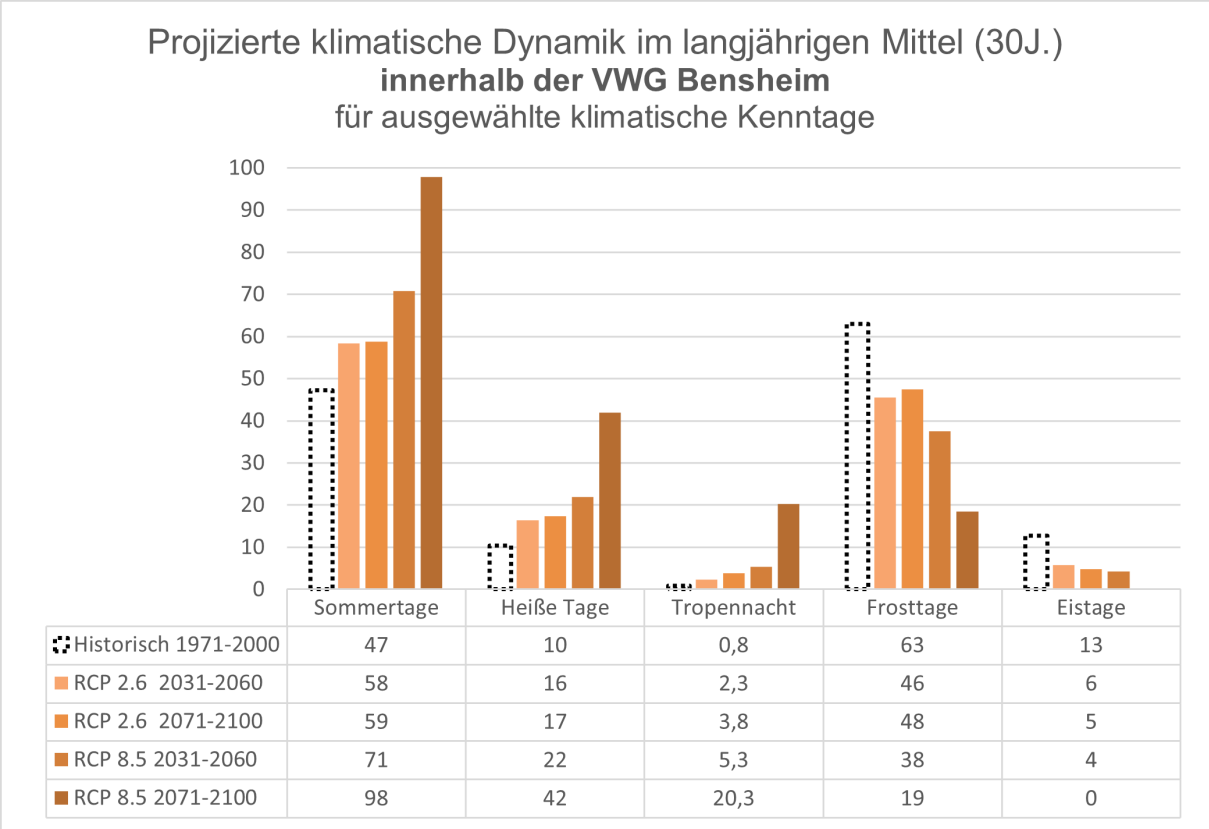
Abbildung 34: Projizierte bodennahe Lufttemperatur während des Gesamtjahres (links) und die Sommermonate (rechts) für die langjährigen Mittel 2031-2060 und 2071-2100 des RCPs 8.5

Angesichts der starken potenziellen Erwärmung während der Sommermonate ist eine Häufung der thermischen Gefährdungssituationen für den menschlichen Körper in dieser Zeit erwartbar. Vulnerable Bevölkerungsgruppen, wie Kleinkinder, ältere Menschen oder gesundheitlich vorbelastete Personen betrifft dies im besonderen Maße [54].

Die Wintermonate wurden ebenfalls für Bensheim ausgewertet und beschreiben den bereits beobachtbaren Prozess milder werdender Wintermonate (Dezember, Januar und Februar) (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12).

6.2.2 Klimatische Kenntage

Ebenso wie für die Historie können für die unterschiedlichen Projektionen Kenntage berechnet und analysiert werden (siehe Diagramm 12).



	Sommertage	Heiße Tage	Tropennacht	Frosttage	Eistage
Historisch 1971-2000	47	10	0,8	63	13
RCP 2.6 2031-2060	58	16	2,3	46	6
RCP 2.6 2071-2100	59	17	3,8	48	5
RCP 8.5 2031-2060	71	22	5,3	38	4
RCP 8.5 2071-2100	98	42	20,3	19	0

Diagramm 12: Projizierte Dynamik der klimatischen Kenntage in den langjährigen Mitteln 1971-2000, 2031-2060, 2071-2100 und entsprechend der ausgewerteten Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5.

Bereits bei der Betrachtung der projizierten Dynamik der Tage mit einer Maximaltemperatur von 25 °C und darüber ergibt sich die Region Bensheim als besonders betroffen. Die grafische Darstellung (siehe Abbildung 35) fasst die Jahressummen der **Sommertage** in jeweils 5 Tage/Farbe zu insgesamt 10 Abstufungen zusammen. Die Skala reicht von < 30 Tagen/Jahr bis 110 Tagen/Jahr. Für den Verwaltungsbereich von Bensheim ergeben sich im RCP 8.5 mittelfristig 71 statistische Sommertage pro Jahr. Bis zum Ende des Jahrhunderts steigt die Anzahl auf 98 Sommertage, was dem Äquivalent von drei Monaten im Jahr entspricht bzw. einer Verdopplung zur Referenzperiode 1971-2000. Die violette Einfärbung verweist indes im Bereich der niederen Lagen des Rheintals auf projizierte 104 Sommertage (siehe Tabelle 12).

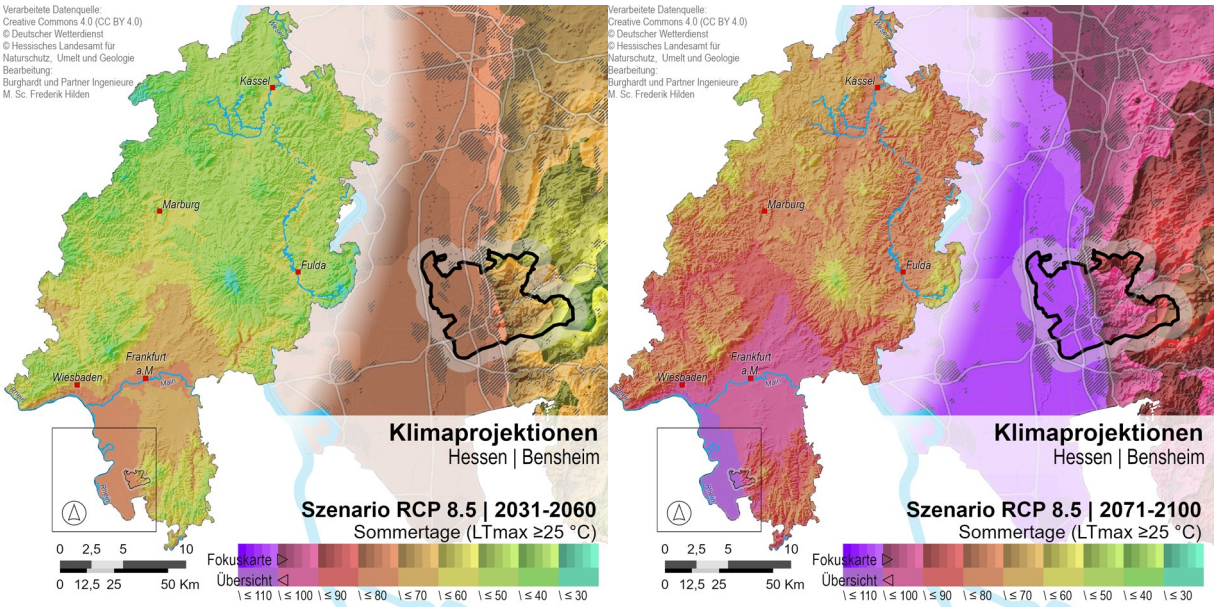


Abbildung 35: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Sommertage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).

Die Anzahl der **Heißen Tage** (siehe Abbildung 36) hat sich bereits in den vergangenen 20 Jahren um vier Tage erhöht. Im optimistischen Klimaszenario (RCP 2.6) verbleibt die Anzahl der Heißen Tage auf diesem Niveau. Gemäß der Klimaprojektion RCP 8.5 intensiviert sich der Anstieg in den kommenden Jahren weiter. Bis zum Jahr 2100 sind in Bensheim 42 Heiße Tage pro Jahr (+32 Tage zur Referenzperiode) projiziert. Unter Annahme der jährlichen Schwankungen sind tägliche Maximaltemperaturen über 30 °C in den bodennahen Luftschichten im zeitlichen Umfang von mehr als einen gesamten Monat realistisch. Im Bereich der Siedlungsflächen liegt der Wert bei etwa 47 Heißen Tagen (siehe Tabelle 12).

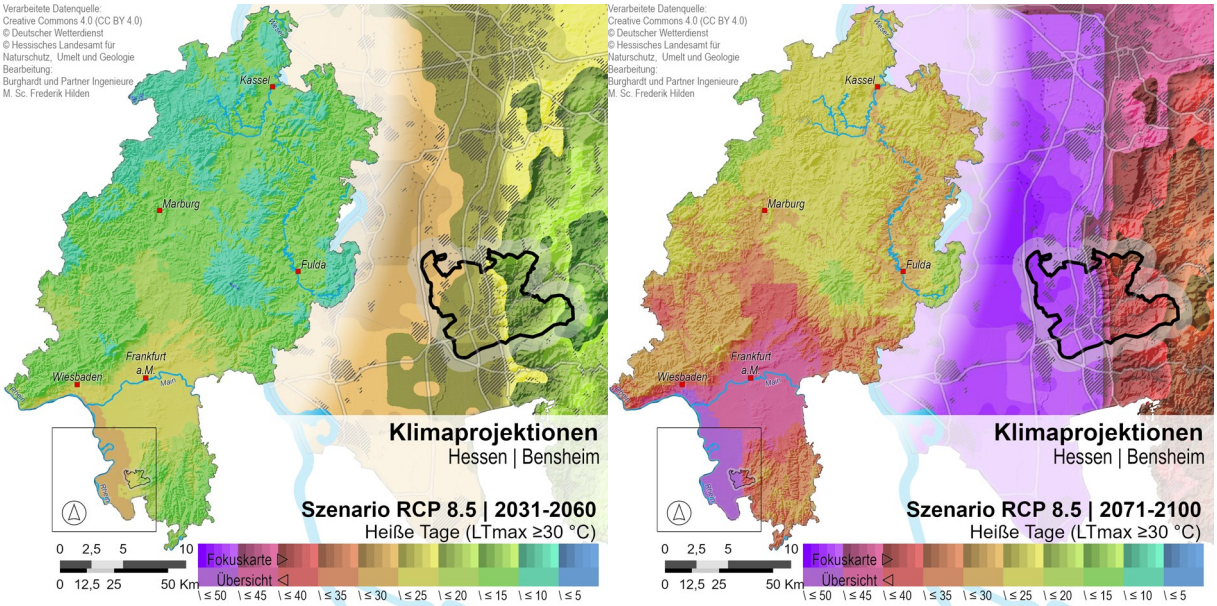


Abbildung 36: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Heiße Tage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).

Die **Tropennächte** (siehe Abbildung 37) stellen bei der Auswertung und Analyse einen Sonderfall dar, da sie im historischen klimatischen Kontext nahezu nicht innerhalb Hessens aufgetreten sind. Für Bensheim liegen 0,8 Tropennächte im Referenzzeitraum vor. Nichtsdestotrotz wird der relative Anstieg dargestellt und keine absoluten Werte.

Bis zum Jahr 2060 werden in Bensheim durchschnittlich 5,3 Tropennächte projiziert. Der anhaltende Anstieg der Lufttemperaturen würde bis in Jahr 2100 20,3 Tropennächte (RCP 8.5) betragen (siehe Tabelle 12).

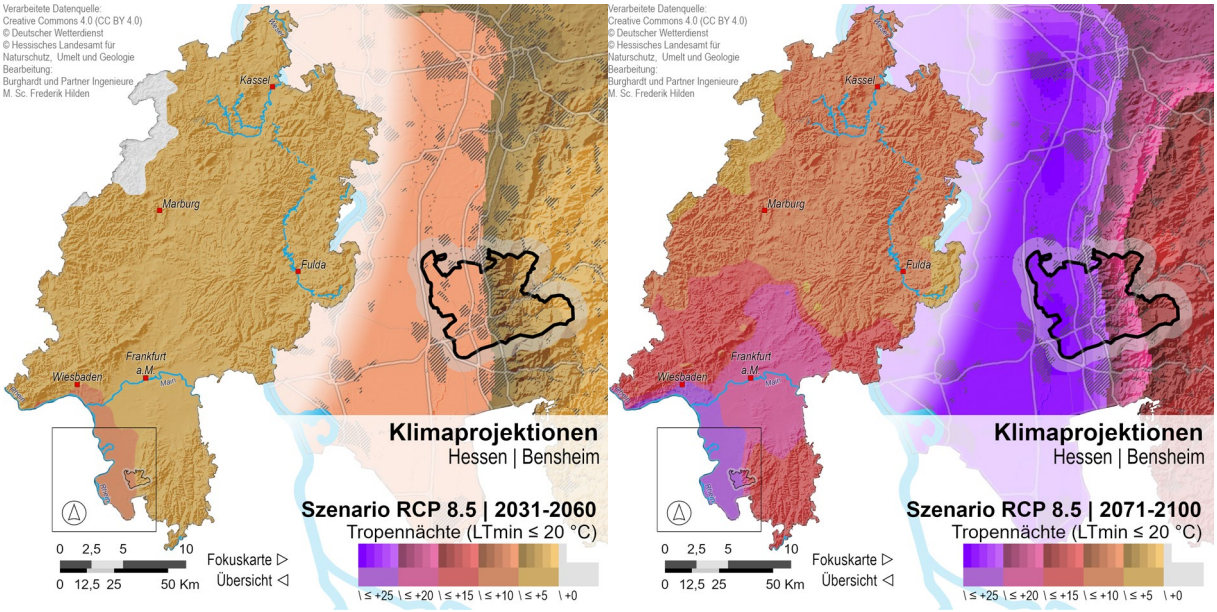


Abbildung 37: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Tropennächte“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).

Während es bei den hitzebezogenen Kenntagen zu bisweilen deutlichen Anstiegen kommen wird, sinkt die projizierte Anzahl der kältebezogenen klimatischen Kenntage.

Mittelfristig bis 2060 wird die Anzahl der **Frosttage** (siehe Abbildung 38) um -26 Tage auf 38 Tage pro Jahr zurückgehen, langfristig bis 2100 sogar um -42 Tage auf projizierte 19 Tage pro Jahr abfallen (siehe Tabelle 12).

Die **Eistage** (siehe Abbildung 39) bilden eine Teilmenge der Frosttage, an denen die Tagesmaximaltemperatur nicht über den Gefrierpunkt (0 °C) ansteigt.

Die Rückgänge sind bezeichnend für die zukünftig milder werdenden Wintermonate. In Bensheim geht die Jahressumme der Eistage abhängig vom Klimaszenario zwischen -9 (RCP 2.6) und -14 (RCP 8.5) zurück. Bensheim als auch zahlreiche Regionen Hessens werden somit ein absolutes Ausbleiben an Eistagen erleben (siehe Tabelle 12).

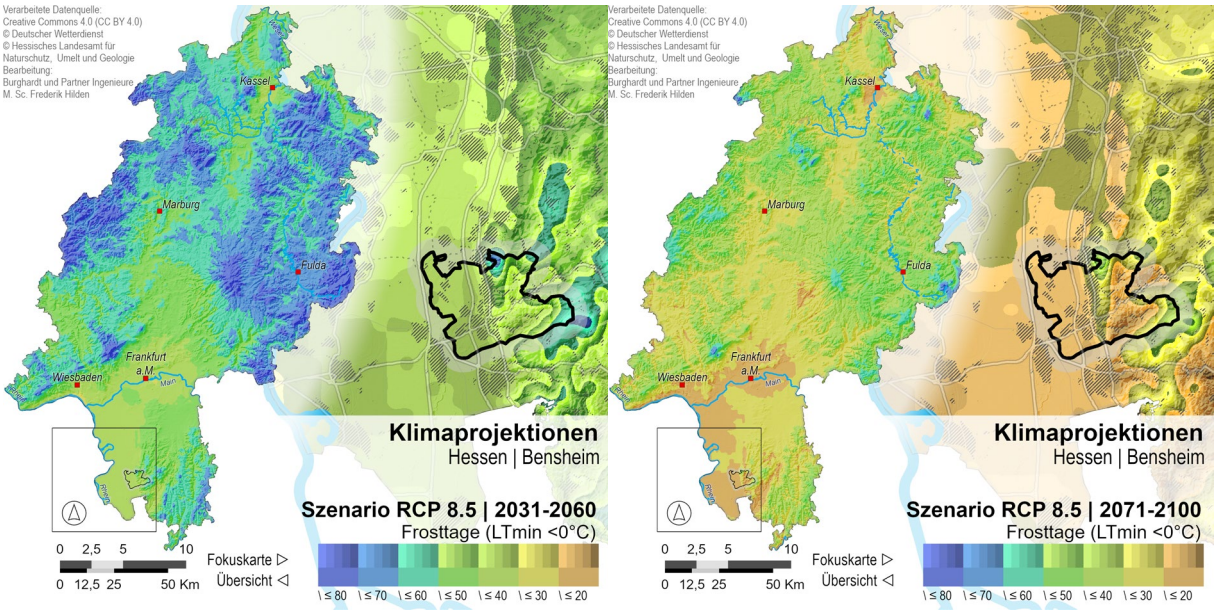


Abbildung 38: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Frosttage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).

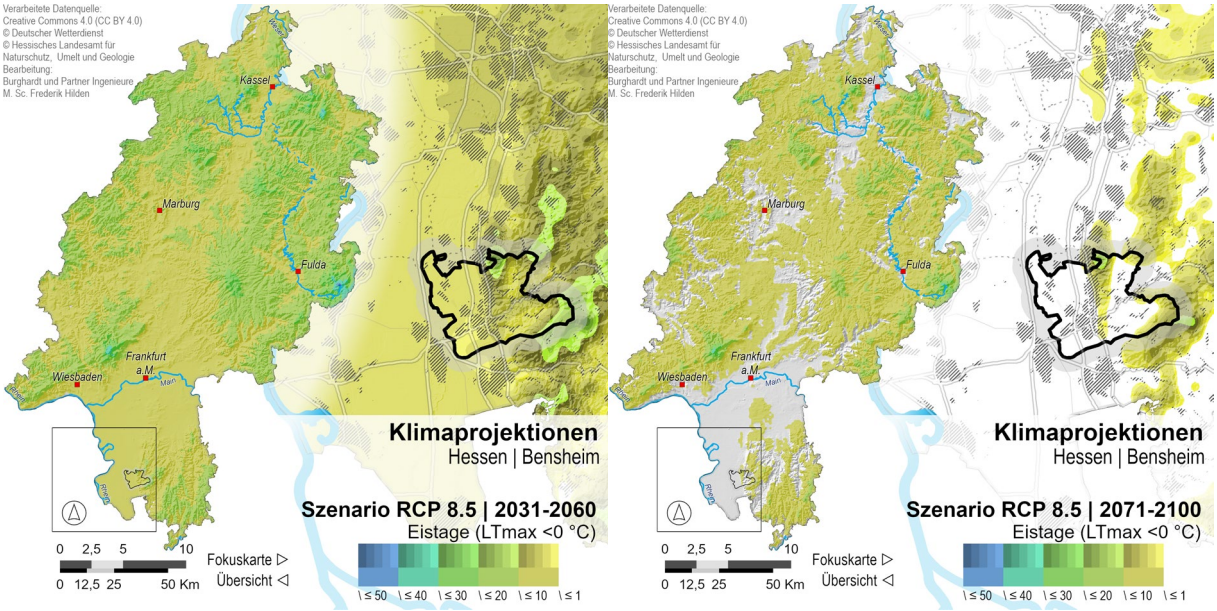


Abbildung 39: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Eistage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).

6.2.3 Bewertung der potenziellen klimatischen Veränderungen in Bensheim

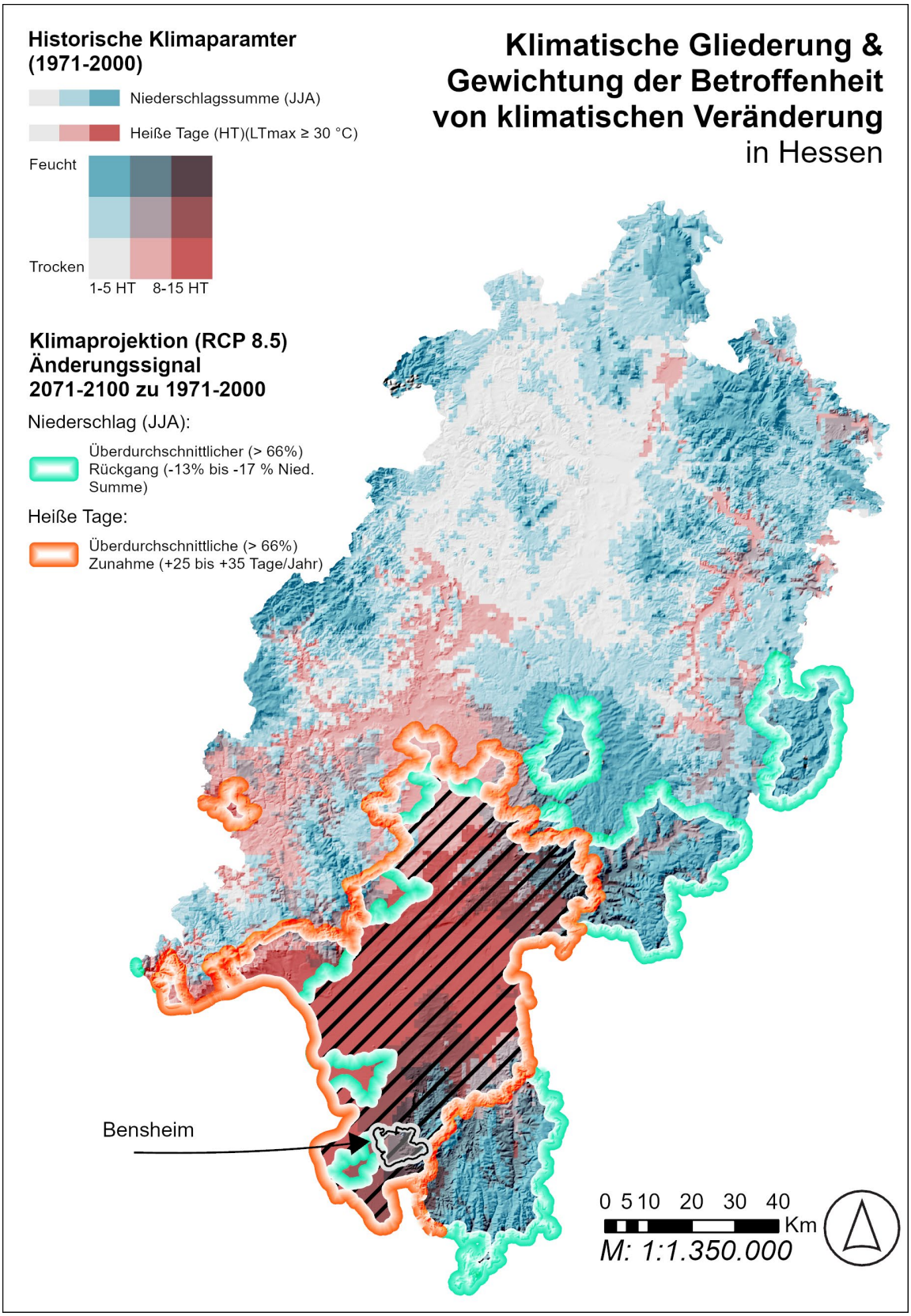


Abbildung 40: Kombinierte Darstellung der klimatischen Kategorisierung auf Basis kommunaler Verwaltungsgrenzen für die Klimaparameter Niederschlag und Lufttemperatur (über die Darstellung der Heißen Tage). Die historischen Daten (1971-2000) werden flächig über ein bivariates Schema, die projizierten relativen Veränderungen (RCP 8.5 2071-2100) über Konturen dargestellt (nach Daten des DWD und HLNUG).

Vor dem Hintergrund der erläuterten Individualbetrachtungen der klimatischen Veränderungen im Bereich der Lufttemperaturen und des Niederschlags erfolgte zusätzlich eine Bewertung in Bezug auf die kombinierten Herausforderungen der Klimaveränderungen (siehe Abbildung 40). Grundlegend wird angenommen, dass durch den Klimawandel gerade die Sommermonate zu zunehmenden Belastungssituationen innerhalb der Städte führen. In Kombination werden deshalb die historischen Werte der Niederschlagssumme und die Anzahl der Heißen Tage mit den jeweiligen projizierten Änderungssignalen gemäß dem Klimaszenario RCP 8.5 für das langjährige Mittel 2071-2100 gesetzt. Auf diese Weise wird dargestellt, welche Regionen bereits heute vergleichsweise belastet sind und welche Regionen von besonders hohen klimatischen Veränderungen betroffen sein werden.

Die flächenhafte farbliche Darstellung steht für den historischen Zustand während dem langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971 bis 2000. Je intensiver der Blauton, desto feuchter fallen die Sommermonate (Juni, Juli, August) aus. Je intensiver der Rotton, desto höher ist die Anzahl der Heißen Tage in den Sommermonaten.

Die Konturen beziehen sich auf die projizierten Veränderungen in den unterschiedlichen Verwaltungsgebieten in Hessen, ebenfalls während der Sommermonate.

Die Darstellung fokussiert jene Gebiete, die überdurchschnittlich (66-100 %) trockener werden mit mehr als -13 % Rückgang der sommerlichen Niederschlagssumme sowie gleichzeitig einen überdurchschnittlichen Anstieg von Heißen Tagen (>+25 Tage pro Jahr) verzeichnen. Regionen, die von starken Veränderungen der beiden klimatischen Parametern betroffen sind, werden in einer schraffierten Fläche visualisiert.

Bezogen auf Bensheim und das Rhein-Main-Gebiet wird deutlich, dass es in den Sommermonaten bereits heute wärmer ist als der Großteil der Regionen in Hessen. Die Projektion RCP 8.5 ergibt derweil ein Szenario, in dem übermäßige Rückgänge der Niederschläge und heißere Sommermonate in Bensheim erwartbar sind. Die schraffierten Flächen in den niederen Lagen Südhessens überlagern überwiegend Regionen, die schon heute trockene und heiße Sommer erleben.

7 Analysen und Planungen

7.1 Vulnerabilitätsanalysen

Kleinkinder gehören neben **Seniorinnen und Senioren** zu den Altersgruppen, die besonders hitzesensible reagieren. Der Grund hierfür ist nicht auf einen einzelnen Faktor oder Parameter zu reduzieren. Vielmehr ist es eine Kombination aus physischen und gesellschaftstypischen Aspekten, die zusammengefasst eine erhöhte Hitzevulnerabilität bedingen.

Zu den **hitzevulnerablen Bevölkerungsgruppen** zählen insbesondere Kleinkinder 4 ≤ Jahre sowie Senioren ≥ 60 Jahre. Diese Altersgruppen sind einem erhöhten Risiko der Dehydration ausgesetzt, da sie meist durch eine verminderte Flüssigkeitsaufnahme beeinflusst werden.

Säuglinge als die jüngsten Betroffenen besitzen eine hohe Stoffwechselwärmeproduktion sowie ein großes ungleiches Verhältnis von Körperoberfläche zu ihrem Körpergewicht. Das führt bei moderater Hitze zu einer effizienten Wärmeabgabe. Bei steigender Hitze kommt es jedoch zu einer Umkehr und in der Folge zu einer schnelleren Wärmeaufnahme, gleichzeitig ist die Schweißproduktion gegenüber der von älteren Kindern geringer, was den natürlichen Abkühlungsprozess des Körpers weiter reduziert. Diese physiologische Immaturität (körperliche Unreife) wird zudem durch die absolute Abhängigkeit von einer Betreuungsperson ergänzt, was einen weiteren Risikofaktor darstellt.

Bei Seniorinnen und Senioren wird die Hitzevulnerabilität durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren bestimmt, die kaskadierend (aufeinanderfolgen) aber auch in gegenseitiger Interdependenz auftreten können. Im Kern steht die physiologische Degeneration. Ein reduziertes Durstgefühl kombiniert mit geringeren köpereigenen Wasserreserven und einer ineffizienten / reduzierten kardiovaskulärer Anpassungskapazität treten u.a. in Interaktion mit chronischen Vorerkrankungen. Zudem wird das Risiko der körperlichen Überhitzung durch die für die im Alter oft vorkommende Polypharmazie (dauerhafte Einnahme von mindestens 5 verschiedenen Arzneimitteln) massiv erhöht.

Entsprechend bedürfen Kleinkinder sowie Seniorinnen und Senioren im Sinne des Bevölkerungsschutz eine besondere Aufmerksamkeit, die auch im Kontext der klimaangepassten Stadtplanung und Stadtentwicklung Berücksichtigung finden sollte.

Unter Berücksichtigung, dass die räumliche Verteilung der hitzevulnerablen Altersgruppen eine Momentaufnahme der demographischen Situation darstellt, bedeutet dies, dass die Nutzung der Daten für eine Trendabschätzung, bspw. um Aussagen zur demographischen Entwicklung einzelner Stadtteile zu treffen, nicht genutzt werden können. In diesem Fall bedarf es einer komplexeren Betrachtung, die unter anderem die demographische Verteilung sowie die städtebauliche Infrastruktur zu unterschiedlichen zeitlichen Schnitten berücksichtigt. Dennoch ist die Momentaufnahme zur räumlichen Verteilung der hitzevulnerablen Altersklassen im Kontext der Prävention von besonderer Planungsrelevanz. So können im Rahmen der Klimaanpassung bspw. Hitzepräventionsmaßnahmen (z.B. aktive und räumlich differenzierte Ansprache von Bürgerinnen und Bürgern bei bevorstehenden Hitzewellen) entwickelt werden.

Die Analyse basiert auf dem Datensatz (bestehend aus Adresse und Geburtsjahrgang) der gemeldeten Einwohnerinnen und Einwohner der Stadt, die entsprechend datenschutzkonform verarbeitet wurden. Nach der Identifizierung der entsprechenden Altersklassen auf Grundlage der Geburtsjahrgänge werden die hitzevulnerablen Altersklassen in ihrer räumlichen

Ausprägung / Verteilung identifiziert und als geglättetes Mittel der Anzahl Personen pro Hektar visualisiert. Entsprechend findet ein zweistufiger Prozess statt. Im ersten Schritt wird für jede Zelle eines Rasters (mit der Auflösung von 1 m x 1 m) die Summe aller ausgewählten Personen für eine Kreisfläche von 1 ha berechnet. Im zweiten Schritt findet die Glättung statt, indem für jede Zelle des Rasters der Mittelwert aus der Summe jeder Zelle für die Kreisfläche von 1 ha berechnet wird. Damit wird ein Höchstmaß an Datenschutz bei gleichzeitigem Erhalt der planerischen Aussagekraft erhalten.

Neben den hitzevulnerablen Personengruppen gibt es noch **hitzesensible Einrichtungen** die zugleich auch als **Hilfs- und Unterstützungseinrichtung** Bedeutung finden können, da sie über individuelle Anpassungs- / Unterstützungskapazitäten verfügen und gleichzeitig auch einer erhöhten thermischen Belastung ausgesetzt sein können.

Aus der Verteilung der unter 4-Jährigen (siehe Abbildung 41) und über 60-Jährigen (siehe Abbildung 42) im Stadtgebiet ergibt sich eine deutliche Konzentration dieser Altersgruppen auf die örtlichen Wohn- und Mischgebiete. Nur wenige Mitglieder der hitzevulnerablen Altersklassen sind in den stark gewerblichen und industriell geprägten Gebieten ansässig (Gewerbegebiete WEST, SÜD-WEST, SÜD und AUERBACH NORD).

Einen näheren Einblick in die numerische Verteilung der vulnerablen Altersklassen gewährt die statistische Auswertung der Bensheimer Bevölkerung (siehe Diagramm 13). Diese veranschaulicht die demographische Zusammensetzung der BENSHEIMER Gemarkungen.



Abbildung 41: Kartenauszug der Analysekarte Vulnerabilität Grundlagen – (hitze)vulnerable Altersklassen (Kleinkinder ≤ 4 Jahre) und sensible Einrichtungen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Grüntöne zeigen eine niedrige Dichte, Blau- und Violetttöne eine höhere Dichte der vulnerablen Gruppe an. Sensible Einrichtungen werden über Piktogramme dargestellt. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.



Abbildung 42: Kartenauszug der Analysekarte Vulnerabilität Grundlagen – (hitze)vulnerable Altersklassen (Senioren ≥ 60 Jahre) und sensible Einrichtungen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Gelbtöne zeigen eine niedrige Dichte, Magenta- und Violetttöne eine höhere Dichte der vulnerablen Gruppe an. Sensible Einrichtungen werden über Piktogramme dargestellt. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor.

Im Vergleich aller Gemarkungen zeigt die prozentuale Verteilung der Altersklassen ein ähnliches Bild: Mehr als die Hälfte der Einwohner jeder Gemarkung ist den Altersklassen 40 Jahre bis 59 Jahre und ≥ 60 Jahre zugehörig. Die Altersklasse ≥ 60 Jahre trägt daran in fast allen Gemarkungen den größeren Anteil. Ähnliches gilt für die Altersklassen 5 Jahre bis 19 Jahre und 20 Jahre bis 30 Jahre, die zwischen 30 % und 45 % der Einwohner jeder Gemarkung ausmachen, wobei die 20- bis 30-Jährigen i.d.R. zahlenmäßig überwiegen. Die wenigsten Mitglieder zählt die Altersklasse ≤ 4 Jahre. Ihr Anteil beträgt in allen Gemarkungen weniger als 10 %.

Die Kernstadt (BENSHEIM) und AUERBACH sind die einwohnerstärksten Stadtteile der Kommune. Die Anzahl der Bewohner AUERBACHS beläuft sich auf ca. 9.500, darunter ca. 380 Kleinkinder und ca. 2.880 Senioren. Die Kernstadt BENSHEIM zählt neben den meisten Bewohnern des Stadtgebietes auch die meisten Mitglieder der vulnerablen Altersklassen. Auf rund 24.800 Einwohner kommen 1.140 Kleinkinder und knapp 7.930 Senioren. Die weiteren acht Gemarkungen BENSHEIMS setzen sich aus je weniger als 2.000 Einwohnern zusammen. In diesem Vergleich sind in FEHLHEIM mit etwas weniger als 1.800 Einwohnern die meisten Kleinkinder (ca. 120) und die meisten Senioren (600) ansässig. An zweiter Stelle steht diesbezüglich SCHWANHEIM (ca. 40 Kleinkinder und 390 Senioren), an dritter Stelle GRONAU (ca. 35 Kleinkinder und ca. 420 Senioren) und an vierter Stelle ZELL (ca. 40 Kleinkinder und ca. 330 Senioren). In HOCHSTÄDTEN, SCHÖNBERG und WILMSHAUSEN liegt die Personenanzahl der Altersklasse ≤ 4 Jahre zwischen 20 und 30, während die Anzahl der Senioren diese auch hier deutlich übersteigt (210 bis 230). LANGWADEN zählt die wenigsten Bewohner (rund 330). Auf insgesamt 10 Kleinkinder kommen in dieser Gemarkung ca. 120 Senioren.

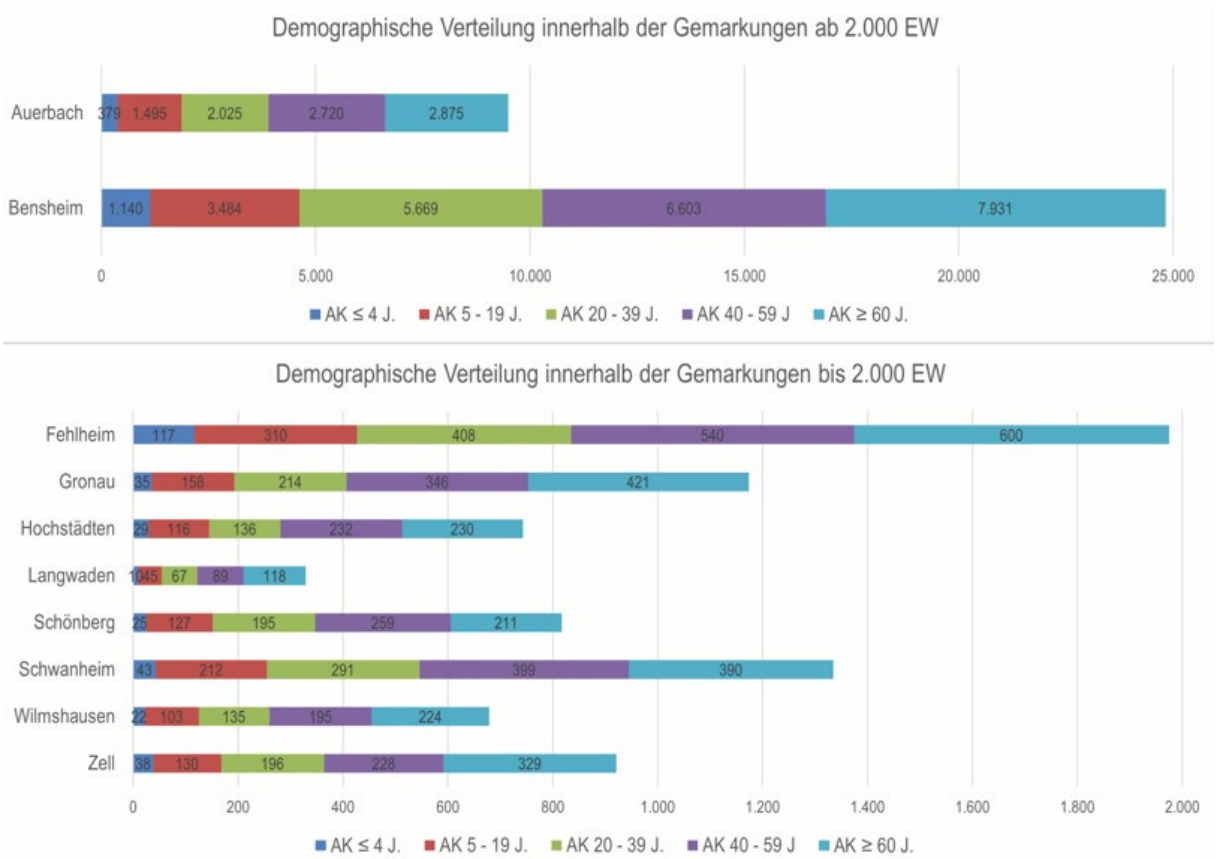


Diagramm 13: Statistische Auswertung der Altersverteilungen innerhalb der unterschiedlichen Gemarkungen von Bensheim.

Die kartografischen Darstellungen spiegeln diese Sachverhalte wider. Die Altersklasse ≤ 4 Jahre ist räumlich am stärksten in den zentral im Gemeindegebiet gelegenen Gemarkungen BENSHEIM und AUERBACH vertreten. Ausgenommen der Gewerbegebiete sind die betreffenden Haushalte in der gesamtstädtischen Perspektive gleichmäßig im Siedlungsraum verteilt. Die nähere Ansicht der einzelnen Gemarkungen zeigt ein differenzierteres Bild, demnach sich mehrere Ballungszentren (≥ 10 Kleinkinder / ha) punktuell im Raum herausbilden. Viele dieser Ballungsräume liegen im direkten oder näheren Umfeld von Kindertagesstätten. In AUERBACH konzentrieren sich die Haushalte mit Kleinkindern insbesondere im Kreuzungsbereich DARMSTÄDTER STRAßE / OTTO-BECK-STRAßE / KARLSBADER STRAßE bis zur PHILIPPSHÖHE, im Bereich der Straße IM LERCHENGRUND sowie an der südlichen Gemarkungsgrenze zu BENSHEIM, im Bereich SAARSTRAßE / WILHELMSTRAßE.

In BENSHEIM befinden sich die meisten Ballungsräume der Haushalte mit Kleinkindern. Über 10 Kleinkinder / ha leben z.B. in den Wohnquartieren östlich der Taunusanlage, nahe der MOSELSTRAßE und RUWERSTRAßE im südlichen Teil BENSHEIMS sowie an der HOSPITALSTRAßE östlich der Bahntrasse. Zwischen 10 und 17 Kleinkinder / ha leben im Bereich AM ZIEGELFALLTOR, nahe der TAUNUSSTRAßE und in der Kernstadt am RITTERPLATZ.

Weniger stark, aber grundsätzlich homogen, treten die Kleinkinderhaushalte in den umliegenden Gemarkungen auf (ca. 0 bis 2 Kinder / ha). FEHLHEIM sticht in diesem Kontext deutlich durch das Neubaugebiet nordöstlich der RODAUER STRAßE hervor, in dem die gemittelte Anzahl der Mitglieder der Altersgruppe ≤ 4 Jahre zwischen 7 und 17 beträgt.

Der hohe prozentuale Anteil der Altersgruppe ≥ 60 Jahre an der Gesamtbevölkerung BENSHEIMS spiegelt sich in der Skala der gemittelten Anzahl der betroffenen Personen pro Hektar

wider, die sich gegensätzlich zur Skala der Kleinkinder (0 bis 17 Personen / ha) in der Spanne von 0 bis 148 Personen / ha bewegt. Auch diese Altersgruppe ist im gesamtstädtischen Kontext homogen im Stadtgebiet verteilt. Ähnlich den Kleinkindern ist der Großteil der Altersklasse ≥ 60 Jahre in den Gemarkungen BENSHEIM und AUERBACH ansässig. Starke punktuelle Agglomerationen der entsprechenden Haushalte sind seltener, als es bei den Kleinkindern der Fall ist, dafür aber häufiger an soziale Einrichtungen wie Pflegeheime gebunden. Die Pflegeeinrichtungen an der EIFELSTRAßE und der HEIDELBERGER STRAßE in BENSHEIM können hier exemplarisch mit ca. 100 Personen / ha herangezogen werden. Repräsentative Personenzahlen für die örtlichen Pflegeeinrichtungen, die zusätzlich Betreuungsangebote für Senioren umfassen, sind regulär aber deutlich niedriger anzusetzen (≤ max. ca. 40 Personen / ha).

Vielerorts leben ≤ 10 bis 20 Senioren auf einem Hektar. Im Falle AUERBACHS zeigt sich ein leicht erhöhter Personenanteil von ca. 40 Personen / ha z.B. im Nordwesten (Umfeld IM LERCHENGRUND). In BENSHEIM zählt neben den genannten Pflegeeinrichtungen das Wohngebiet südlich der TAUNUSANLAGE zu den größten Agglomerationsräumen der Altersgruppe ≥ 60 Jahre (rd. 140 Personen). Im restlichen Gebiet der Gemarkung BENSHEIM, so z.B. auch im innerstädtischen Bereich, steigt diese Zahl ortsvariabel wie in AUERBACH auf ca. 40 Personen an.

Bezüglich der örtlichen Hilfs- und Gesundheitseinrichtungen sind neben Alten- und Pflegeeinrichtungen / Seniorenbetreuungsangeboten und Kirchen vorrangig diverse soziale Einrichtungen sowie das einzige örtliche Krankenhaus (HEILIG GEIST HOSPITAL) im innerstädtischen und innenstadtnahen Raum vertreten. Weitere Einrichtungen sind im restlichen Raum verstreut und mitunter nur teilweise in den übrigen Gemarkungen vorhanden, jedoch nur im Falle der Alten- und Pflegeeinrichtungen und Kinderbetreuungsangebote auch räumlich mit der Personenanzahl der hitzevulnerablen Altersklassen vernetzt.

7.2 Planungshinweiskarte und Maßnahmenempfehlungen

Die Planungshinweiskarte baut inhaltlich auf der Klimaanalyse auf. Sie ist ein bedeutendes Bindeglied zwischen dem fachlichen Beitrag der Klimaanalyse und praxisorientierten Planungsprozessen, da sie die Ergebnisse der Klimaanalyse bewertet und in eine für die Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplanung verständliche Sprache übersetzt.

Die Genauigkeit der Planungsaussagen hat sich stets an den Maßstab der Klimaanalyse zu richten [13]. Angestrebt wird durch die Planungshinweiskarte die Betrachtung ortsspezifischer Verhältnisse im Untersuchungsraum sowie deren subsequente Hervorhebung und Beurteilung im gesamtstädtischen Kontext. Somit dient sie dem *„[…] Schutz und der Vorsorge zum Erhalt gesunder Lebens- und Arbeitsverhältnisse für die ansässige Bevölkerung. Das schließt die Sicherung bestehender günstiger lokalklimatischer und lufthygienischer Verhältnisse ebenso ein wie im Bedarfsfall die Verbesserung etwaiger Belastungssituationen.“* [13]. Hierbei ist zu beachten, dass die Ausweisungen nicht zwingend an die genauen Abgrenzungen der Klimatope gebunden sein müssen, sondern von diesen abweichen können.

Die Planungshinweiskarte transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 6.1) sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen, umweltplanungsrelevanten und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung. Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken (z.B. Hitze, Vegetationsabdeckung, Kaltluftentstehung und -transport) können synergetische, aber auch konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Handlungsempfehlungen - in Bezug auf das Thema Klima in der kommunalen Planung herausgearbeitet werden. Neben den in der Stadtklimaanalyse erarbeiteten Ergebnissen, finden auch weitere, sofern vorhanden, Analysen und Planungen Eingang in die Entwicklung der Planungshinweiskarte.

Über die statistische Verteilung der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (Themenkarten) lassen sich lokale Charakteristika ablesen und darstellen. So kann dann z.B. im Hinblick auf eine optimierte städtische Belüftung (Durchlüftungsachsen) oder den Abbau von Wärmeinseln eingegangen und entsprechende Handlungsempfehlungen beschrieben werden.

Die abgeleitete Planungshinweiskarte orientiert sich in der Erstellung (Methodik) an der VDI-RL (3787 Blatt 1) [29]. Die Darstellung der Planungshinweise und Handlungsempfehlungen erfolgt, speziell für den bebauten Raum, stärker planungsorientiert (vgl. technische Beschreibung der Planungshinweiskarte).

Dargestellt werden drei Kategorien innerhalb der Grün- und Freiflächen sowie drei Kategorien innerhalb der Siedlungsflächen. Lokale Planungshinweise (z.B. Durchlüftungsachsen) werden verortet und stadtklimatische Besonderheiten / Schlüsselrollen lokaler Gegebenheiten werden gesondert überarbeitet.

Die Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 6.1) und die Planungshinweiskarte definieren den klimatischen IST-Zustand bzw. das vorhandene Wirkgefüge. Die unterschiedlichen Themenkarten dienen als Werkzeuge um die Informationen und Aussagen dieser Hauptkarten rekursiv nachzuverfolgen. In Kombination mit dem Erläuterungsbericht dienen die Plan- und Kartenwerke zukünftig als Instrumente um die Schutz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Stadträumen in Bezug auf ihre Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Veränderungen (bspw. Flächen- und Nutzungsänderungen) hinsichtlich der klimatischen Wirkgrößen abzuleiten.

Hierbei ist anzumerken, dass die Planungshinweiskarte kein pauschales „Verhinderungsinstrument“ darstellt, sondern unterschiedlich hohe Ansprüche an eine klimaangepasste Entwicklungsplanung stellt.

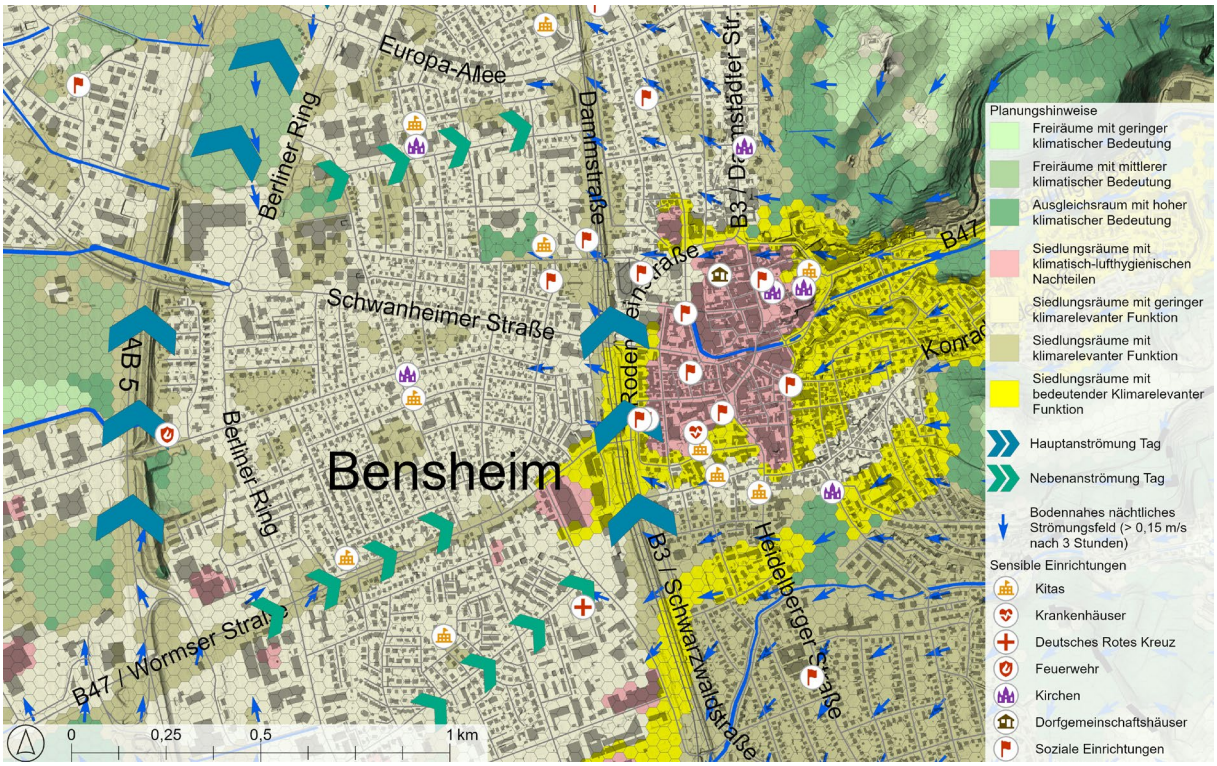


Abbildung 43 Kartenauszug der Planungshinweiskarte für Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Flächenhaft gliedert die Planungshinweiskarte den Untersuchungsraum in Freiräume und Siedlungsräume mit jeweils unterschiedlicher klimatischer Planungsrelevanz. Dabei zeigen grüne Flächen Ausgleichräume mit geringer, mittlerer und hoher klimatischer Bedeutung. Der Siedlungsraum wird in drei Gelbtöne sowie einen rötlichen Ton aufgegliedert. Ferner werden die Durchlüftungsachsen für den Tag (auf Grundlage der Haupt- und Nebenanströmung), sowie der Nacht, in Form des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes nach 3 Stunden visualisiert. Informatorisch ergänzend werden klimasensible Einrichtung verortet.

Die dargestellten hexagonalen Bewertungseinheiten fassen die einzelnen Klimatope in funktional-planerisch sinnvollen Einheiten zusammen. Die Planungshinweiskarte stellt somit eine bewertende Zusammenfassung der Klimaanalyse dar und dient als fachlich fundierte Grundlage für Abwägungsprozesse in der Stadtentwicklung.

Systematik der Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte gliedert den Stadtraum von BENSHEIM in zwei übergeordnete Kategorien:

- Freiräume / klimatische Ausgleichsräume
- Siedlungsräume

Die Freiräume werden in drei Stufen (hohe, mittlere und geringe klimatische Bedeutung), die Siedlungsräume in vier Stufen (von geringer klimarelevanter Funktion bis hin zu klimatisch-lufthygienisch belasteten Bereichen) klassifiziert. Maßgeblich für die Zuordnung sind unter

anderem die Kalt- und Frischluftproduktion, die Funktion als Kaltluftleit- oder Transitraum, die thermische Belastung sowie die stadtmorphologische Ausprägung.

Mit der Klassifizierung wird zugleich auf die klimatische Empfindlichkeit der Flächen gegenüber baulichen Eingriffen und Nutzungsintensivierungen hingewiesen. Insbesondere in Bereichen mit hoher klimatischer Bedeutung oder ausgeprägter klimarelevanter Funktion sind zusätzliche fachliche Prüfungen erforderlich.

Freiräume / klimatische Ausgleichsräume

Freiräume mit hoher klimatischer Bedeutung

Freiräume mit hoher klimatischer Bedeutung stellen klimaaktive Flächen dar, die in direktem oder funktionalem Zusammenhang mit dem Siedlungsraum der Stadt BENSHEIM stehen. Hierzu zählen insbesondere die großflächigen Vegetations- und Offenlandbereiche entlang der Bergstraßenhänge, der bewaldeten Odenwaldlagen sowie die Talräume und Geländeeinschnitte, über die nächtlicher Kaltluftabfluss in Richtung der bebauten Stadtbereiche erfolgt. Diese Flächen übernehmen eine zentrale Rolle für die nächtliche Kaltluftversorgung, die Frischluftzufuhr sowie die Durchlüftung der tiefer gelegenen Siedlungsräume, insbesondere der Kernstadt. Aufgrund ihrer hohen klimatischen Bedeutung sind diese Bereiche als besonders empfindlich gegenüber baulichen Eingriffen zu bewerten. Nutzungsänderungen, Versiegelungen oder Baukörper, die den Kaltlufttransport beeinträchtigen, können zu erheblichen negativen Auswirkungen auf das Stadtklima führen. Städtebauliche Entwicklungen sollten in diesen Bereichen grundsätzlich vermieden werden. Sofern Planungen dennoch in Betracht gezogen werden, sind diese nur im Rahmen einer vertieften klimatischen Untersuchung und unter Sicherstellung des Funktionserhalts zulässig.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Hierbei handelt es sich um Räume, die ein erhöhtes Kaltlufttransportvolumen besitzen und gleichzeitig damit direkt oder indirekt den Siedlungsraum im Planungsraum (administrativer Raum) klimatisch positiv beeinflussen. Entsprechend besitzen diese Flächen eine hohe Planungsrelevanz sowie aus klimatischer Sicht einen schützenswerten Charakter. Städtebauliche Entwicklungen sollten innerhalb dieser Flächen vermieden werden oder nur im Kontext einer dezidierten klimatischen Auseinandersetzung und planerischen Begleitung erfolgen, sofern eine klimatische Vorabprüfung eines Vorhabens die generelle Entwicklung für möglich hält. Damit sind Flächenentwicklungen und / oder Flächentransformationen möglich, sofern der klimatische Funktionserhalt sichergestellt wird. Nutzungsveränderungen im Kontext Photovoltaik (PV) sind ebenfalls möglich, sofern diese lokalspezifisch klimaangepasst erfolgt.
Klassendefinition
• Zugehörigkeit zu einem für den Siedlungsraum relevanten Kaltluftsystem über einen Zeitraum ≥ 4 Stunden
• Der Kaltluftvolumenstrom ist ≥ 7,5 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)

oder

• Zugehörigkeit zu einem für den Siedlungsraum relevanten Kaltluftsystem
• Der Kaltluftvolumenstrom ist ≥ 15 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)

Freiräume mit mittlerer klimatischer Bedeutung

Freiräume mit mittlerer klimatischer Bedeutung gehören zu den lokal wirksamen Kaltluft- und Belüftungssystemen, stehen jedoch meist nicht in einem direkten oder dauerhaften Austausch mit dem Siedlungsraum. Dazu zählen Teile des Offenlands in Randlagen sowie Übergangsbereiche zwischen den höher gelegenen Wald- und Freiflächen und den bebauten Gebieten.

Diese Flächen weisen eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen auf. Eine maßvolle Entwicklung ist aus klimatischer Sicht grundsätzlich möglich, sofern die bestehenden Kaltluftabflussstrukturen, Ventilationsbahnen und Grünzüge erhalten bleiben. Insbesondere lineare Strukturen wie Talzüge, Bachläufe und Hangschneisen sind bei Planungen freizuhalten.

Vor größeren Eingriffen wird eine fachliche klimaorientierte Begleitung empfohlen, um den Funktionserhalt im lokalen und gesamtstädtischen Kontext sicherzustellen.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Diese Räume stehen meist nicht im direkten Kontakt mit dem Siedlungsraum, gehören jedoch zu den dominierenden lokaltypischen Kaltluft- /Belüftungssystemen. Dadurch besitzen sie eine mittlere klimatische Bedeutung für die relevanten Siedlungsräume innerhalb des Planungsraums (administrativer Raum). Landnutzungsveränderungen wie die Entwicklung von PV-Flächen sind möglich, sollten aber lokalspezifisch angepasst entwickelt werden, so dass bspw. der Abstand und Höhe der Elemente angepasst wird, oder das Kaltluftabflussschneisen freigehalten werden. Städtebauliche Entwicklungen oder Landschaftstransformationen sollten im Vorfeld auf ihre klimatische Umsetzbarkeit geprüft werden, damit der Funktionserhalt der Flächen bzw. des Verbundraums sichergestellt wird.
Klassendefinition
• Zugehörigkeit zu einem für den Siedlungsraum relevanten Kaltluftsystem über einen Zeitraum ≥ 4 Stunden
• Der Kaltluftvolumenstrom ist < 7,5 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)
• Der Kaltluftvolumenstrom ist > 2,0 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)

oder

• Zugehörigkeit zu einem für den Siedlungsraum relevanten Kaltluftsystem über einen Zeitraum von 1 bis 3 Stunden
• Der Kaltluftvolumenstrom ist > 10 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)
• Der Kaltluftvolumenstrom ist < 15 m³/m²*s (bezogen auf den Median des Maximums der Nacht)

Freiräume mit geringer klimatischer Bedeutung

Freiräume mit geringer klimatischer Bedeutung besitzen aufgrund ihrer Lage, Exposition oder topographischen Einbindung nur eine untergeordnete Relevanz für die klimatische Situation der Siedlungsräume in BENSHEIM. Hierzu zählen vor allem siedlungsferne Kuppenlagen oder gut durchlüftete Offenlandbereiche ohne direkte Anbindung an relevante Kaltluftsysteme.

In diesen Bereichen sind bauliche Entwicklungen oder Landnutzungsänderungen aus klimatischer Sicht grundsätzlich möglich. Gleichwohl ist bei Vorhaben in Randlagen zu prüfen, ob Auswirkungen auf benachbarte Kommunen oder übergeordnete Kaltluftsysteme zu erwarten sind.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Primär in Abhängigkeit ihrer Lage, besitzen diese Räume für die Siedlungsgebiete innerhalb des Planungsraums eine nur untergeordnete klimatische Relevanz. Entsprechend sind Veränderung der Landnutzung sowie bauliche Entwicklungen grundsätzlich möglich. Bei Vorhaben in den Randbereichen des Planungsraums (administrativer Raum) sollte jedoch geprüft werden, ob ggf. eine klimatische Planungsrelevanz für Räume außerhalb der administrativen Grenzen bestehen.
Klassendefinition
• Alle verbleibenden Freiräume auf denen die Klassendefinitionen der „Freiräume mit mittlerer klimatischer Bedeutung“ nicht zutreffend ist

Siedlungsräume

Siedlungsräume mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen

Diese Kategorie umfasst vor allem dicht bebaute und stark versiegelte Siedlungsbereiche mit eingeschränkter Durchlüftung und erhöhter thermischer Belastung. In Bensheim betrifft dies insbesondere Teile der Innenstadt und ältere, kompakte Bebauungsstrukturen. Davon abgesehen gibt es aber auch punktuelle Räume im Gewerbe-, sowie im nördlichen Stadtgebiet.

Diese Bereiche sind aus stadtklimatischer Sicht als sanierungsbedürftig einzustufen. Handlungsschwerpunkte liegen hier auf Maßnahmen des klimaangepassten Stadtumbaus, wie der Erhöhung des Vegetationsanteils, der Reduzierung von Versiegelung, der Förderung von Dach- und Fassadenbegrünung sowie der Verbesserung der Durchlüftung. Bei allen baulichen Maßnahmen in diesen Bereichen ist eine klimatisch-lufthygienische Begleitung erforderlich.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Mit dieser Klasse werden Siedlungsräume beschrieben, die aufgrund ihrer stadtmorphologischen Charakteristik und Lage, klimatische / lufthygienische Belastungen aufweisen. Entsprechend handelt es sich hierbei um Räume, die keine zusätzliche klimatische Verschlechterung erfahren sollten. Die Belastungssituation wird primär geprägt durch eine gemessene hohe Oberflächentemperatur an einem heißen Tag (gegen 10:30 Uhr) in Kombination mit einer erhöhten Oberflächentemperatur am Abend (gegen 21:00 Uhr), ebenfalls gemessen an einem heißen Tag sowie eines intensiven berechneten Wärmeinseleffektes in Form einer hohen nächtlichen bodennahen Lufttemperatur bei einem geringen angenommen Ausgleichspotential. Über die Betrachtung der statistischen Räume lassen sich individuelle Defizite ablesen, die im Rahmen städtebaulicher Sanierungs- und/oder Umbaumaßnahmen Berücksichtigung finden sollten. Die städtebauliche Entwicklung in diesen Räumen sollte primär Charakter des klimaangepassten Stadtumbaus und der Stadtsanierung zum Ziel haben. Entsprechend bieten diese Räume das größte Potential für einen nachhaltigen klimawirksamen und klimaangepassten Stadtumbau.
Klassendefinition
• Oberflächentemperatur vormittags an einem heißen Tag ≥ 45 °C
• Oberflächentemperatur abends an einem heißen Tag ≥ 20 °C
• Bodennahe nächtliche Lufttemperatur an einem regionaltypisch heißen Tag ≥ 22,5 °C

Siedlungsräume ohne oder mit geringer klimarelevanter Funktion

Diese Kategorie umfasst den größten Teil der Siedlungsräume in BENSHEIM. Die Räume sind weder klimatisch belastet noch wird eine besondere klimarelevante Funktion für angrenzende Stadtteile übernommen. Es handelt sich häufig um gut durchlüftete Lagen oder Siedlungsbereiche mit moderater Bebauungsdichte und ausreichendem Vegetationsanteil.

Nutzungsintensivierungen oder Nachverdichtungen führen hier in der Regel nicht zu einer relevanten Verschlechterung der klimatischen Situation. Dennoch sollte bei Planungen auf den Erhalt bestehender Durchlüftungsstrukturen und Grünanteile geachtet werden. In der Regel reicht eine klimatische Stellungnahme zum Schutzgut Klima aus. Im Rahmen der Stellungnahme sollten die räumlichen lokalspezifischen Charakteristika zur Vegetationsausstattung und baulichen Offenheit untersucht und die potentiellen Auswirkungen neuer Bauprojekte in diesem Gebiet bewertet werden.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Diese Siedlungsräume besitzen keine übergeordnete planungsrelevante Bedeutung für den umgebenden Siedlungsraum, zudem sind sie klimatisch unbelastet. Bauliche Veränderungen bzw. städtebaulichen Entwicklungen führen in diesen Räumen per se nicht zu einer klimatischen Verschlechterung der lokalen Situation. In der Regel reicht eine Stellungnahme zum Schutzgut Klima aus. Im Rahmen einer Stellungnahme sollten die räumlichen lokalspezifischen Charakteristika zur Vegetationsausstattung, zur baulichen Offenheit sowie ggf. zur relevanten Kaltluftsituation berücksichtigt werden.
Klassendefinition
• Alle verbleibenden Siedlungsräume auf denen die Klassendefinitionen der „Siedlungsräume mit klimarelevanter Funktion“ nicht zutrifft

Siedlungsräume mit klimarelevanter Funktion

Siedlungsräume mit klimarelevanter Funktion sind durch eine günstige Kombination aus geringer thermischer Belastung, ausreichender nächtlicher Kaltluftversorgung und einer vergleichsweise offenen, durchgrünten Bebauungsstruktur gekennzeichnet. Diese Bereiche sind punktuell über das Stadtgebiet BENSHEIMS verteilt und übernehmen eine wichtige Funktion als Kalt- und Frischlufttransiträume für angrenzende, dichter bebaute Stadtteile. Dabei fungieren insbesondere breite und unbebaute Achsen, wie die B47 / WORMSER STRAßE oder die innerstädtische Bahntrasse als Transiträume. Eine städtebauliche Entwicklung ist grundsätzlich möglich, muss jedoch sensibel erfolgen. Ziel ist der Erhalt der klimatischen Funktionsfähigkeit. Entsprechend wird eine fachplanerische klimatische Begleitung von städtebaulichen Vorhaben empfohlen. Die Tiefe der gutachterlichen Begleitung sollte in Abhängigkeit der Lage sowie des städtebaulichen Umfangs durch die Stadt und einem geeigneten Gutachterbüro individuell festgelegt werden.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Siedlungsräume dieser Klasse sind geprägt durch eine gute Kaltluftversorgung in Form eines erhöhten Kaltluftvolumenstroms über einen längeren Zeitraum in der Nacht. Gleichzeitig besitzen sie eine geringe thermische Last. In Kombination mit der nächtlichen Kaltluftversorgung und einer weitestgehend offenen und vegetationsgeprägten städtebaulichen Charakteristik besitzen diese Siedlungsräume eine positive Funktion als Kaltluft- und Frischlufttransitraum, wodurch eine klimatische Gunstwirkung für angrenzende Siedlungsräume entsteht. Aufgrund ihrer klimarelevanten Funktion ist eine sensible städtebauliche Entwicklung möglich. In Abgleich mit den lokaltypischen Besonderheiten sollte auf klimatische Besonderheiten Rücksicht genommen werden. Ziel ist der Erhalt der klimatischen Funktionsfähigkeit der Räume. Entsprechend wird eine fachplanerische klimatische Begleitung von städtebaulichen Vorhaben empfohlen. Die Tiefe der gutachterlichen Begleitung sollte in Abhängigkeit der Lage sowie des städtebaulichen Umfangs durch die Stadt und einem geeigneten Gutachterbüro individuell festgelegt werden.
Klassendefinition
• Siedlungsräume ohne besondere klimarelevante Funktion
• Kaltluftvolumenstrom ≥ 7,5 m³/m²*s
• Vegetationsanteil auf 1 ha ≥ 40 %

Siedlungsräume mit bedeutender klimarelevanter Funktion

Diese Siedlungsräume übernehmen eine herausragende klimatische Funktion für sich selbst und für angrenzende belastete Bereiche. In BENSHEIM betrifft dies insbesondere Übergangszonen zwischen Offenland, Hanglagen und bebauten Bereichen, in denen Kaltluftabfluss und Durchlüftung eine zentrale Rolle spielen. Auffällig sind die linearen Strukturen mit Ost-West Ausrichtung und direkter Anknüpfung an Ausgleichsräume mit hoher klimatischer Bedeutung. Dabei sticht insbesondere der Bereich entlang der B47 / NIBELUNGENSTRAßE östlich des Innenstadtkerns hervor.

Aufgrund ihrer hohen klimatischen Bedeutung weisen Flächen dieser Kategorie eine erhebliche Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen auf. Im Vorfeld zu möglichen städtebaulichen Entwicklungsvorhaben, wird empfohlen einen detaillierten kontextbezogenen klimatischen Steckbrief zu erstellen oder von externen Sachverständigen erstellen zu lassen. Sollte im Ergebnis eine städtebauliche Entwicklung aus klimatischer Perspektive als möglich erachtet werden, sollte der Planungs- und Entwurfsprozess von Beginn an klimatisch-planerisch begleitet werden.

Textliche Ausführung auf der Planungshinweiskarte
Hierbei handelt es sich um Siedlungsräume, die eine besondere klimarelevante Funktion für klimatisch-lufthygienische belastete Siedlungsräume übernehmen. Dabei steht die Funktion als Kaltlufttransitraum im Fokus.
Planerisch gilt es diese Flächen in Ihrer Funktion als Kaltlufttransitraum zu sichern und zu fördern. In Abhängigkeit der lokaltypischen Besonderheiten einzelner Räume sollten Maßnahmen zum Erhalt und zu Förderung in Abhängigkeit der Aspekte der Vegetationsdichte, sowie der Mittleren Höhe der städtischen Morphologie sowie des Kaltluftvolumenstroms entwickelt werden. Eine städtebauliche Entwicklung dieser Räume ist dann möglich, wenn von einer klimatisch planungsrelevanten Verschlechterung der Funktionsleistung abgesehen werden kann, bzw. eine entsprechende funktionsgebundene Eingriffskompensation stattfindet.
Im Vorfeld zu möglichen städtebaulichen Entwicklungsvorhaben, wird empfohlen einen detaillierten kontextbezogenen klimatischen Steckbrief zu erstellen oder von externen Sachverständigen erstellen zu lassen. Sollte im Ergebnis eine städtebauliche Entwicklung aus klimatischer Perspektive als möglich erachtet werden, wird empfohlen, dass der Planungs- und Entwurfsprozess (von Beginn an) klimatisch-planerisch begleitet werden.
Klassendefinition
• Vorhandene Kaltluftversorgung zu belasteten Siedlungsräumen für mindestens 4 Stunden
• Entfernung zum belasteten Siedlungsraum maximal 3.600 m (entspricht einer mittleren bodennahen Geschwindigkeit von 0,25 m/s über 4 Stunden)
• Intensität des Kaltluftvolumenstroms ≥ 7,5 m³/m²*s (Klasse „mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential nach VDI 3787 Blatt 5)

Die Planungshinweiskarte der Stadt Bensheim stellt damit eine zentrale fachliche Grundlage für eine klimaangepasste Stadtentwicklung dar. Sie dient der frühzeitigen Identifikation klimatisch sensibler Bereiche und unterstützt die Abwägung zwischen Entwicklungsinteressen und dem Erhalt klimatischer Funktionen im Stadtgebiet.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Stadtklimaanalyse (SKA) stellt die Grundlage für eine zukünftige gezielte Klimaanpassung der Stadt Bensheim dar und begegnet damit frühzeitig auf kommunaler Ebene den Anforderungen des Bundes-Klimaanpassungsgesetzes (KAnG) sowie der wachsenden thermischen Belastung in der Region.

Da die Stadtklimaanalyse Geoinformationssystem-basiert (GIS-basiert) erstellt wurde und auch die Ergebnisse von verwendeten numerischen Simulationsprogrammen (wie KLAM_21 des DWD für Kaltluft und Airflow Analyst für Wind) ins GIS überführt wurden, stehen der Stadt Bensheim alle Daten der SKA zur Integration ins kommunale GIS zur Verfügung.

Konzeptionell umfasst die für die Stadt erstellte Stadtklimaanalyse drei Teile. Der erste Teil befasst sich mit der thematischen Einführung und den fachlichen Hintergründen. Der zweite Teil bildet den Kern der SKA, da er das Gemeindegebiet hinsichtlich seiner klimatisch relevanten Charakteristika analysiert und bewertet. Im dritten Teil werden die Ergebnisse planungsgerecht aufbereitet und in Handlungsempfehlungen übersetzt. Der Schwerpunkt der SKA liegt in ihrem zweiten Teil. Dieser beschreibt, analysiert und bewertet den aktuellen klimatischen Bestand im Untersuchungsraum hinsichtlich unterschiedlicher klimatischer Aspekte und verschiedener stadtmorphologischer Charakteristika. Die Analyse stützt sich unter anderem auf historische Klimadatenauswertungen mehrerer 30-jähriger Mittel und detaillierte Themenkarten (z.B. zur urbanen Morphologie, Versiegelung und Vegetation). Auf diese Weise wird flächendeckend die klimatische IST-Situation für das gesamte administrative Gemeindegebiet Bensheims abgebildet. Das Hauptprodukt der klimatischen Bestandsaufnahme stellt die Klimaanalysekarte dar. Entsprechend der VDI-Richtlinie (3787 Blatt 1) wird sie als thematische Fachkarte definiert, die sich grundsätzlich von amtlichen Festlegungskarten unterscheidet. Als solche gibt sie durch die flächenbezogene Visualisierung von Klimaeigenschaften und -phänomenen (wie Überwärmungsbereiche und Kaltluftflüsse) Aufschluss über alle klimatisch relevanten Belange des Stadtgebietes. Die Darstellung und Berechnung der Klimaanalysekarte erfolgten dabei individuell angepasst an die spezifischen topographischen und strukturellen Gegebenheiten Bensheims. Neben der Darstellung und Bewertung des klimatischen Status quo wird außerdem mittels der Auswertung von ausgewählten Klimaszenarien des Hessen Ensembles (RCP 2.6 und RCP 8.5; langjährige Mittel 2031–2060 und 2071–2100) die mittel- und langfristig projizierte Entwicklung der regionalen Temperaturen, Niederschläge, der klimatischen Wasserbilanz und relevanter Kenntage (z.B. Zunahme von heißen Tagen und Tropennächten, Abnahme von Eistagen) beschrieben. Ergänzend wurden Mehrwerte durch weitere spezifische Analysen generiert. Hierzu zählen insbesondere die detaillierte Simulation der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransports (mit Fokus auf die Zuflüsse aus dem Odenwald und den Tälern), die Analyse der Vegetationsstrukturen mittels aktueller Fernerkundungsdaten sowie eine Vulnerabilitätsanalyse, welche die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen (Kleinkinder und Senioren) aufzeigt. Basierend auf den Ergebnissen der klimatischen Bestandsanalyse und den Erkenntnissen der Klimaprojektionen wurde eine planungsrelevante klimatische Bewertung des administrativen Gemeindegebietes durchgeführt. Das Kernelement dieser Bewertung ist die Planungshinweiskarte. Sie transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte sowie weiterer Analysen und Szenarien in planungsangepasste Aussagen, die die Stadt Bensheim bei ihrer städtebaulichen, umweltplanungsrelevanten und zukunftsorientierten Stadtentwicklung unterstützen.

Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken (z.B. Hitzeinseln, Durchlüftungsbahnen, Vegetationsdefizite) können synergetische, aber auch konkurrierende Effekte für die kommunale Planung herausgearbeitet werden.

Abgeleitet wurden

- klimatisch wirksame Ausgleichsräume primär im Außenbereich (Gunstbereiche)
- klimatische Wirkräume im Siedlungsbereich (Wirkungsräume).

Neben den genannten raumbezogenen Planungshinweisen wurden auch thematische Planungshinweise in Form von Piktogrammen in der Planungshinweiskarte ausgewiesen. Sie stellen konkrete Handlungsempfehlungen dar (z.B. Sicherung von Kaltluftbahnen, Entsiegelung, Begrünung) und werden aus den unterschiedlichen Themenkarten und der Klimaanalysekarte abgeleitet.

Hierbei ist anzumerken, dass die Planungshinweiskarte kein pauschales „Verhinderungsinstrument“ darstellt, sondern unterschiedlich hohe Ansprüche an eine klimaangepasste Entwicklungsplanung formuliert. Auf der Maßstabsebene einer Stadtklimaanalyse werden entsprechende Handlungsempfehlungen in einem generellen Kontext getroffen. In einem höheren Auflösungsgrad verortete Individualmaßnahmen werden im Rahmen der SKA nicht definiert, da dies einen Maßstabssprung bedeuten würde. Der Stadt Bensheim stehen abschließend der Bericht zur Stadtklimaanalyse, die im Rahmen dieser Analyse verwendeten und erzeugten GIS-Daten sowie alle Karten- und Planwerke als digitale Karten zur Verfügung.

9 Anhang

9.1 Glossar

Begriff	Bedeutung
Absorption	wellenlängenabhängige Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, bei welcher Strahlungsenergie in Wärmeenergie überführt wird. Die Absorption von Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche ist Ursache für die unterste Heizschicht der Atmosphäre als Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungsvorgänge.
Aerosole	Aerosole sind (meteorologisch gesehen) Bestandteile von Beimengungen der Atmosphäre. Sie beteiligen sich wesentlich am luftchemischen Wirkungskomplex und spielen bei Strahlungsprozessen (Absorption, Streuung, Extinktion) eine wichtige Rolle.
Albedo	Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0,3 z.B. reflektiert 30 % der einfallenden Strahlung und absorbiert 70 %. Je heller die Oberfläche, desto größer ist ihre Albedo.
Allochthone Witterung	"fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung, die durch mehr oder weniger unperiodische Änderungen der Wetterelemente (kein ausgeprägter Tagesgang) gekennzeichnet ist.
Autochthone Witterung	"eigenbürtige", durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist.
Bergwind	weht abends, nachts und in der Frühe. Nachts kühlt sich die Luft im Gebirge stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt die Berghänge hinunter und weht zum Teil sehr kräftig durch die Täler hindurch.
Bioklima	Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus. Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden.
Eistag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt
Emission*	die Abstrahlung oder Aussendung elektromagnetischer Wellen oder Teilchen als Strahlung, ebenso wie der Ausstoß fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in die Außenluft sowie in Wasser oder andere Umweltbereiche
Evaporation	Übergang des Oberflächenwassers in den gasförmigen Zustand durch Verdunstung
Flurwind*	eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung
Frosttag	ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt
Globale Durchschnittstemperatur	die über die gesamte Erdoberfläche (Land/Wasser) gemittelte Temperatur in einem bestimmten Zeitraum.
Globalstrahlung	die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und (diffuser) Himmelsstrahlung
Hangwind*	Wind, der unter dem Einfluss der Tageserwärmung an Berghängen entsteht und tagsüber bergaufwärts (Hangaufwind), nachts bergabwärts (Hangabwind) weht. Hangwinde sind in der Regel bei einer ruhigen Strahlungswetterlage besonders gut ausgebildet.

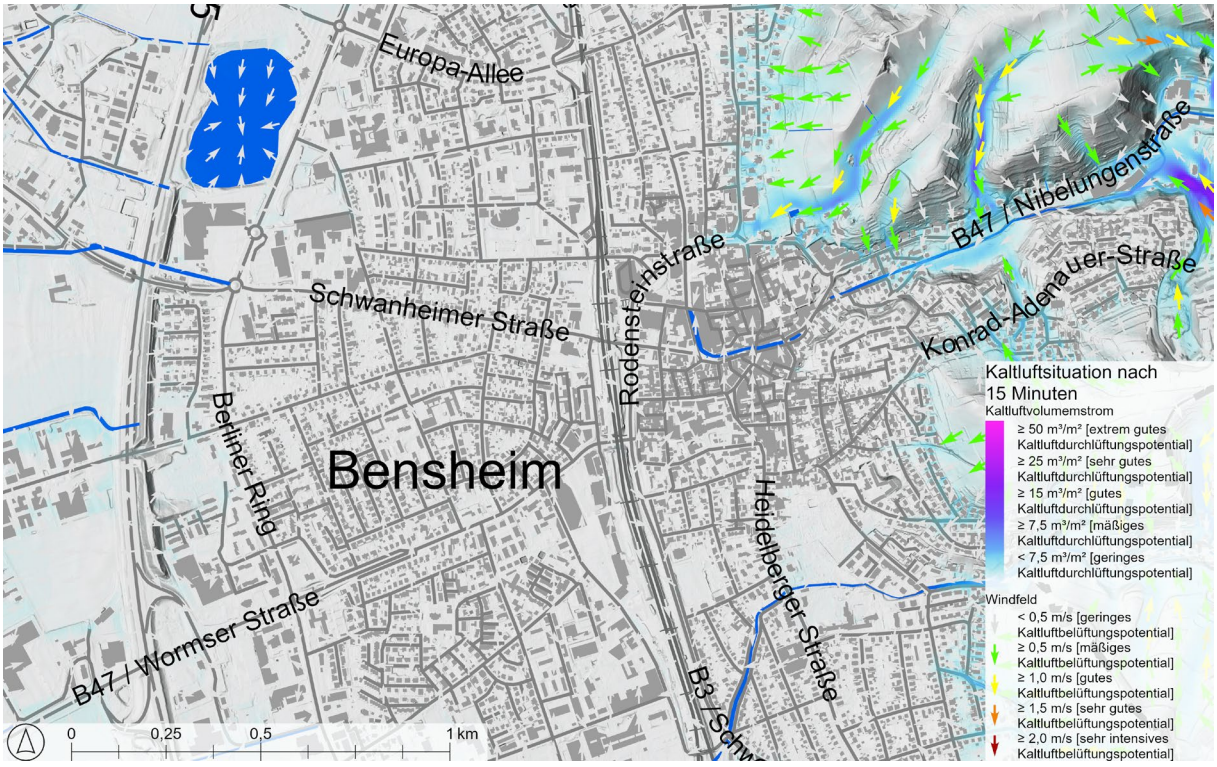
Heißer Tag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt (früher auch Tropentag).
Hitzewelle	eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Eine Hitzewelle ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann.
Immission*	Einwirkung von unmittelbar oder mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursachte Emissionen auf die Umwelt. Zu den Immissionen gehören vorwiegend Luftverunreinigungen, Geräusche, Gerüche, Erschütterungen, Licht, Strahlen und Wärme.
Interzeption	Anteil des Niederschlags (auch u.a. Schnee und Tau), der an den Pflanzen haften bleibt und dort wieder ungenutzt verdunstet
Klimafaktoren	(auch klimatologische Wirkungsfaktoren) sind Faktoren, welche die Klimaelemente (Temperatur, Luftfeuchte usw.) und damit das Klima eines Ortes beeinflussen.
Klimatop	Klimatisch räumliche Einteilung von Gebieten mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen hinsichtlich • des thermischen Tagesgangs, • der durch Bodenrauigkeitsänderungen bedingten Windfeldströmungen • der topographischen Lage und / oder Exposition sowie • der Art der realen Flächennutzung
Kaltluftabfluss	der nächtliche Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt - trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltluftfluss	die in windschwachen, klaren Nächten hangabwärts strömende kalte Luft. Sie sammelt sich am Erdboden und ist dann schwerer als die wärmere Luft der Umgebung. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hängt von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes, das heißt von der Größe des Gebietes in dem Kaltluft produziert wird, ab.
Kaltluftstau	die abriegelnde Wirkung eines Hindernisses auf einen Kaltluftfluss. Die Kaltluft kann sich sowohl vor orografischen Hindernissen (z.B. Hügelrücken) als auch vor künstlichen Hindernissen (z.B. Bauwerke, Dämme) stauen.
Klimamodell*	mathematisches Gleichungssystem welches das Klima bzw. dessen Änderungen simuliert. Als Variablen dienen physikalische und chemische Beziehungen.
Klimaprojektion	Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde unter Nutzung von Klimamodellen. Sie sind in der Lage alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre des Planeten, zu beschreiben. Mit ihnen können die beobachteten Änderungen des Klimas in der Erdgeschichte analysiert und nachvollzogen werden.
Kontinentalklima	Klima, welches charakteristisch für das Innere größerer Festlandsmassen ist. Im Allgemeinen ist das Kontinentalklima durch große jährliche und tägliche Schwankungsbereiche der Temperatur, eine geringe relative Feuchte sowie mäßigen oder geringen, unregelmäßig fallenden Niederschlag geprägt.
Lokalklima	Klima an einem konkreten Ort.

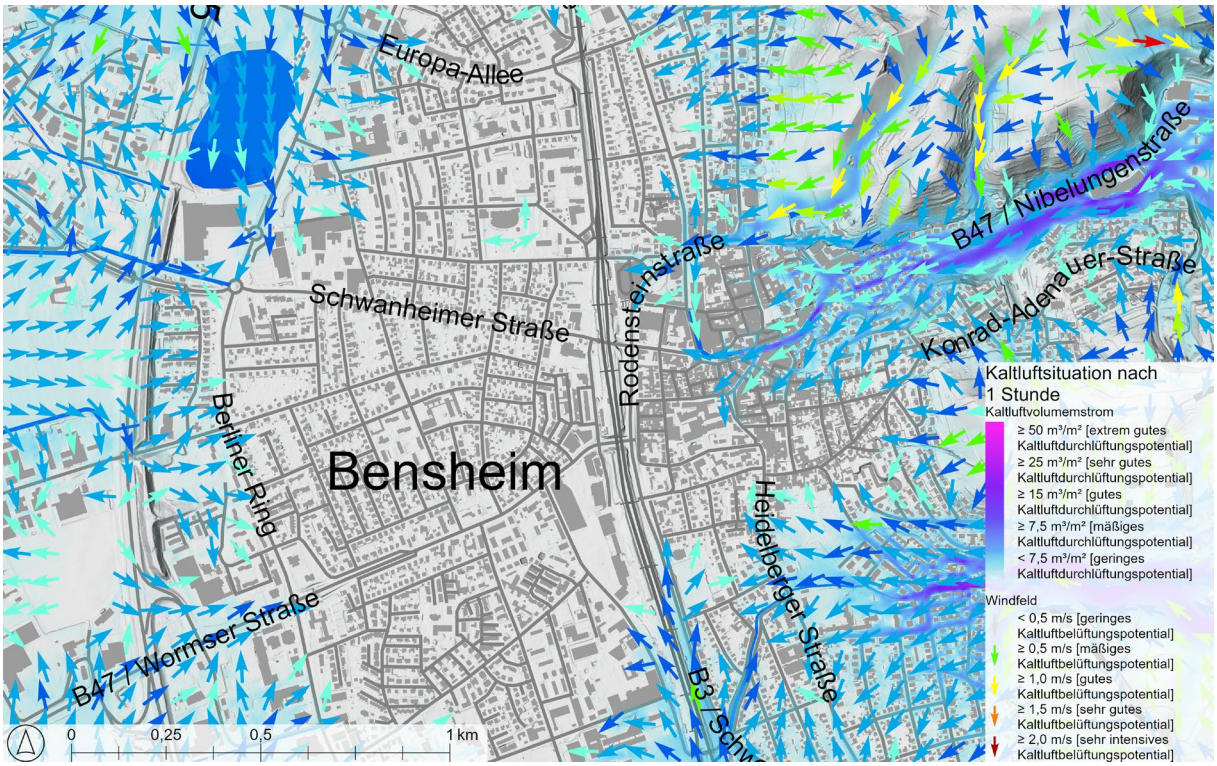
	Es ist eingebettet in das Regionalklima und wird zusätzlich durch Relief und Flächennutzung in der näheren Umgebung des Ortes bestimmt.
Makroklima	Klima, welches von großskaligen Prozessen geprägt ist
Maritimes Klima	Klima von Gebieten, die an die See bzw. das Meer angrenzen oder davon umgeben sind (auch ozeanisches Klima). Geringe Tages- und/oder Jahresgänge der Temperatur und hohe relative Luftfeuchte sind charakteristisch für das maritime Klima.
Mesoklima	Bereich, der zwischen dem Mikroklima und dem Makroklima liegt. Während das Makroklima hauptsächlich von großskaligen und das Mikroklima vor allem von kleinskaligen, lokalen Prozessen beeinflusst ist, ist es im Mesoklima eine Mischung von beiden. Damit umfassen die Skalen der mesoskaligen Phänomene etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000 km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche. Geländeform, Hangneigung und Beschaffung der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter.
Mikroklima	mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist.
Rauigkeit* **	(auch Rauheit) bezeichnet die Unebenheit von Oberflächen
Regionalklima	eng verwandt mit der Begrifflichkeit Mesoklima. Dabei sind Phänomene mit sehr ähnlichen Raum- und Zeitskalen gemeint, die sowohl durch groß- als auch kleinskalige Prozesse beeinflusst werden, aber auch von regionalen Gegebenheiten wie der Geländeform und der Landnutzung abhängen. Beim Regionalklima, im Gegensatz zum Mesoklima, wird deutlicher der Bezug zu natur- oder kulturräumlichen Klimabesonderheiten hergestellt.
Resilienz**	Die Leistungsfähigkeit eines Systems Störungen zu absorbieren und sich in Phasen der Veränderung so neu zu organisieren, dass wesentliche Strukturen und Funktionen erhalten bleiben.
Retention**	Rückhaltevermögen von unterschiedlichen Oberflächen für flüssiges Wasser.
Sommertag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt
Städtische Wärmeinsel*^{L}	ein typisches Merkmal des Stadtklimas, welches durch die Wechselwirkung mehrerer unterschiedlicher Effekte hervorgerufen wird. Durch die starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts werden die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer.
Strahlungsantrieb*^{S}	Maß für die global gemittelten klimarelevanten Störungen des atmosphärischen Strahlungs- und Energiehaushaltes
Strahlungsbilanz*	Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung einer Fläche. Insbesondere terrestrische und solare Strahlung sind dabei von Bedeutung.
Strahlungswetterlage*	eine Form des Hochdruckwetters mit geringer Bewölkung und höchstens mäßigen Winden
Synoptik	ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht (Analyse oder Wetterlage).

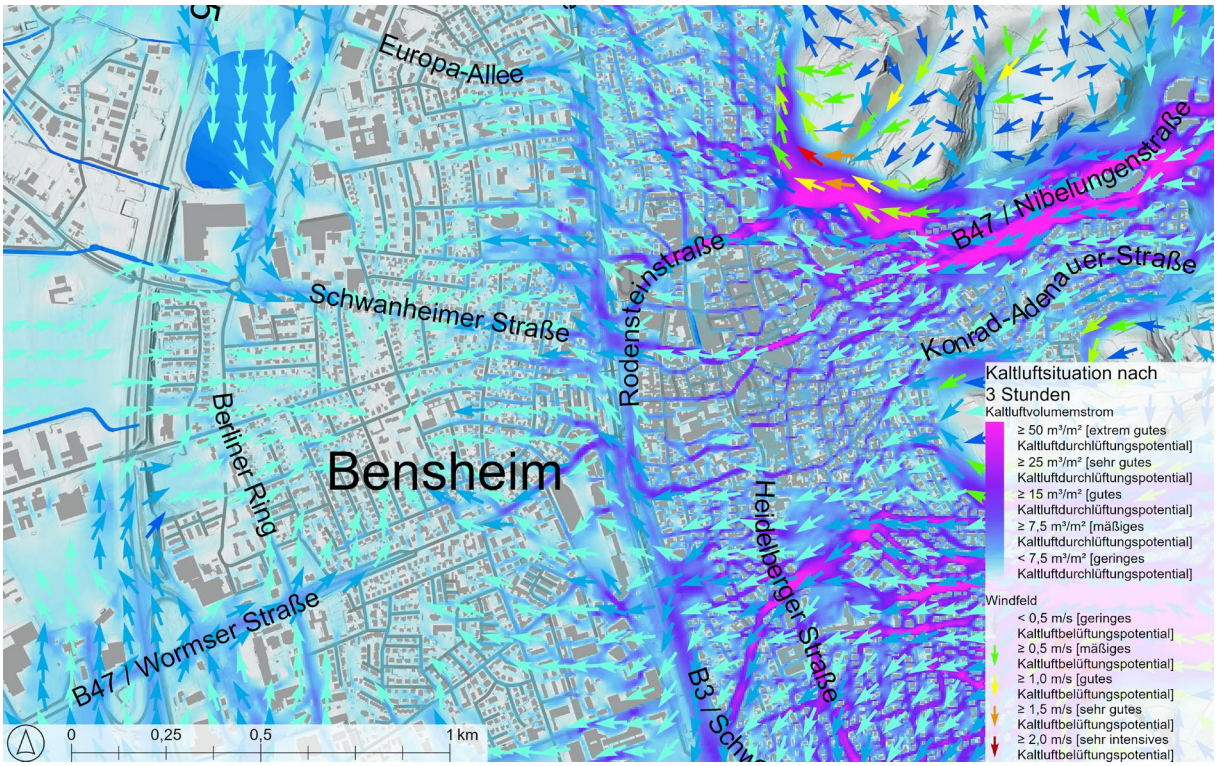
Talwind	bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als über der Ebene. Dadurch steigt die Luft nach oben und der Luftdruck sinkt über dem Gebirge. Zum Ausgleich beginnt die Luft unterhalb der Gipfel von außen - also durch die Täler - ins Gebirge einzuströmen.
Tropennacht	eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt
Übergangsklima*	beschreibt den fließenden Übergang zwischen dem maritimen Klima und dem kontinentalen Klima. Das Übergangsklima kommt überwiegend in Europa vor. Daher ist der Westen dieses Klimas ozeanisch geprägt, während der Osten eher kontinental beeinflusst wird
Überwärmungsakkumulationseffekt*L	während längeren Hitzeperioden kann die nächtliche Abkühlung die erhöhte tägliche Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht mehr kompensieren, d.h. auch die Minima der nächtlichen Temperaturen steigen an
Urban Canopy Layer	Atmosphärenschicht zwischen Erdoberfläche und mittlerer Hausdachhöhe in der Stadt
Vulnerabilität**	der IPCC definiert Vulnerabilität als das Maß, zu dem eine Person, Region oder ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Dabei wird die Vulnerabilität bzw. Verwundbarkeit als eine Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungsfähigkeit verstanden.
Wind Chill-Effekt	Durch eine erhöhte Windgeschwindigkeit tritt in den Fällen eine Abkühlung im Hautbereich auf, in denen die Hauttemperatur über der Lufttemperatur liegt, der sogenannte Wind Chill-Effekt. Dieser Abkühlungseffekt verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit.
Windstärke	anhand der Auswirkungen des Windes auf die Wasseroberfläche oder auf Objekte an Land geschätzter Stärkewert. In der international vereinbarten 13-teiligen Beaufort-Skala (0 = Windstille bis 12 = Orkan) sind jedem Stärkewert Windgeschwindigkeitsbereiche zugeordnet.

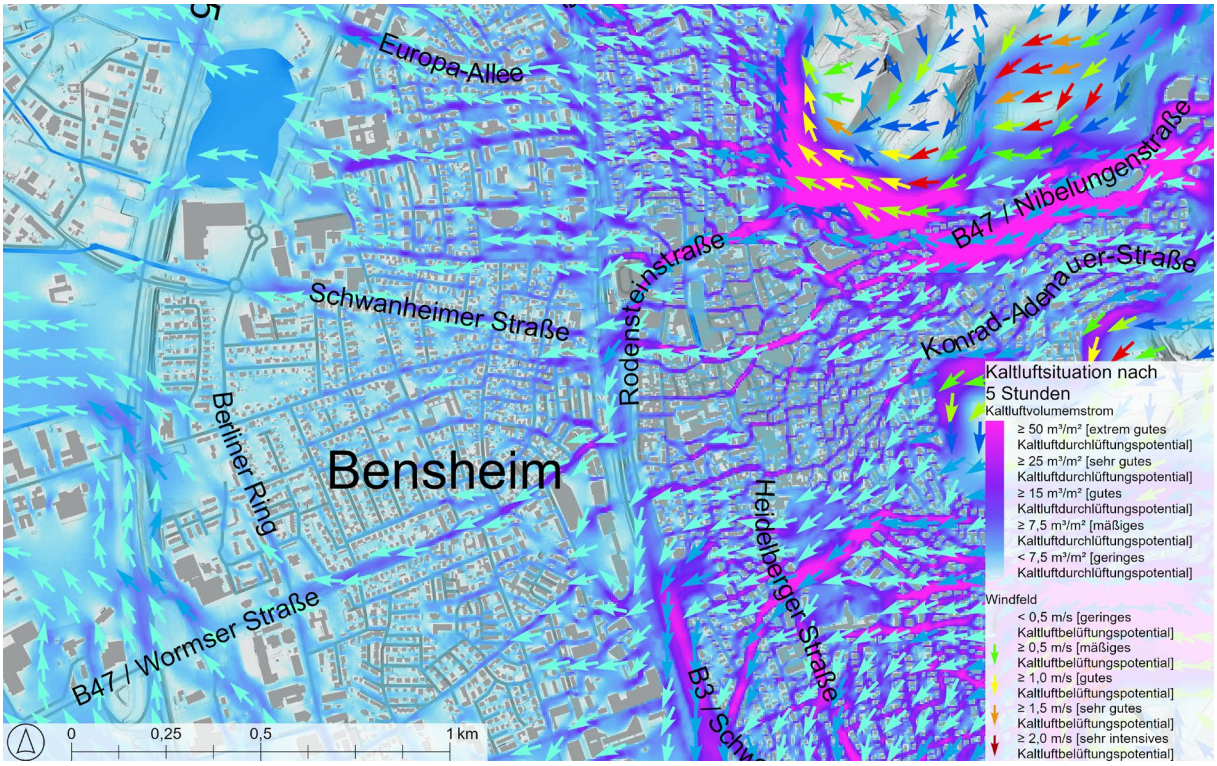
9.2 Ergänzende Detailkarten zum Thema Kaltluft

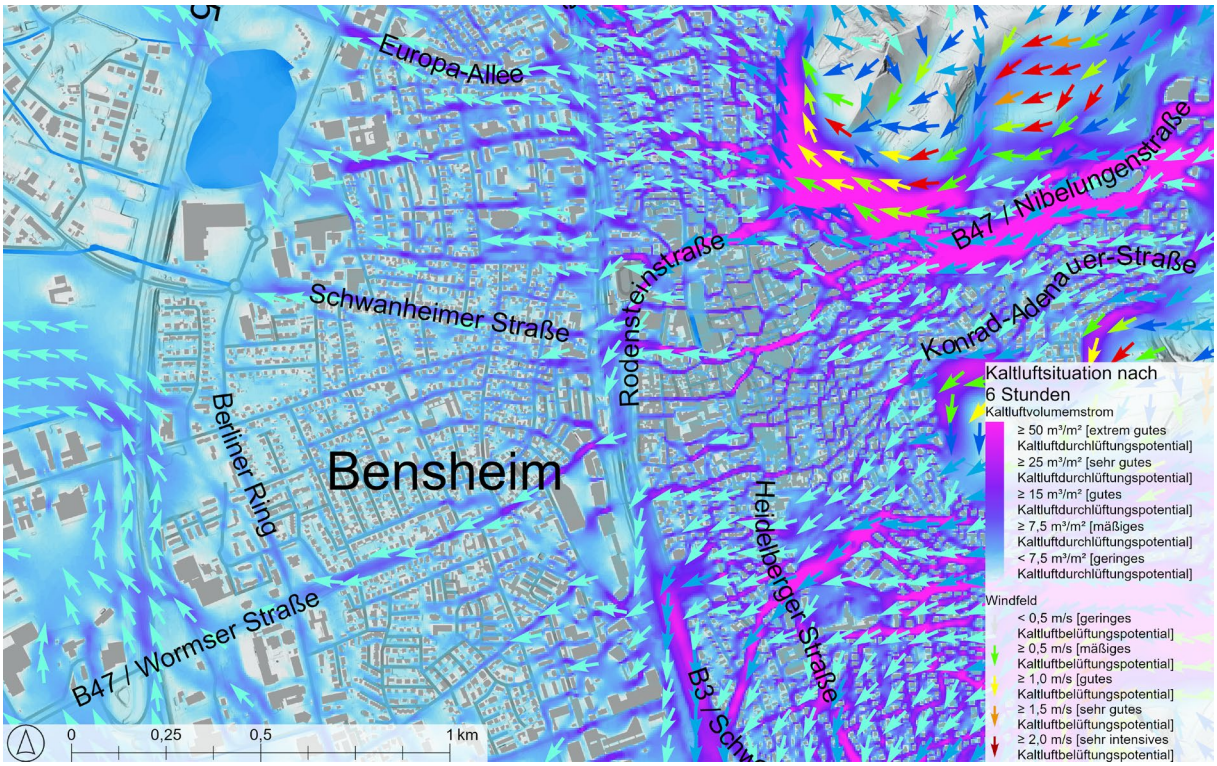
Kaltluftvolumenstrom

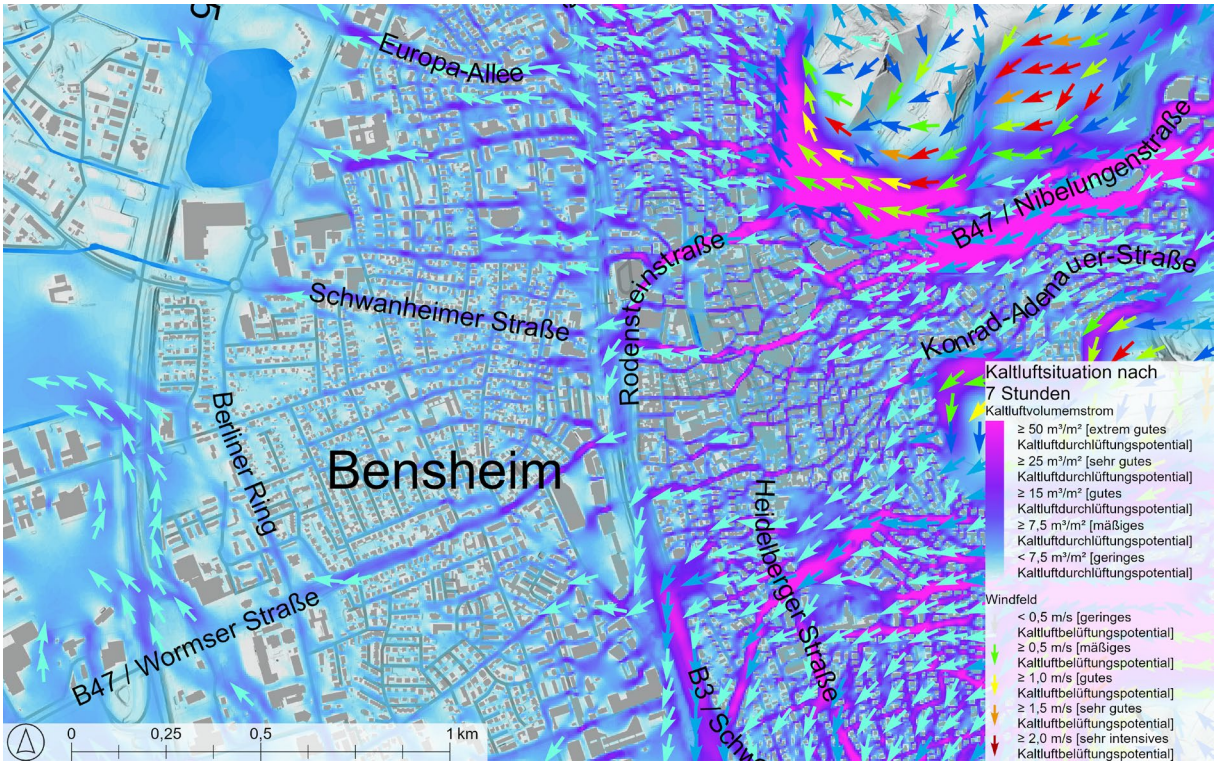


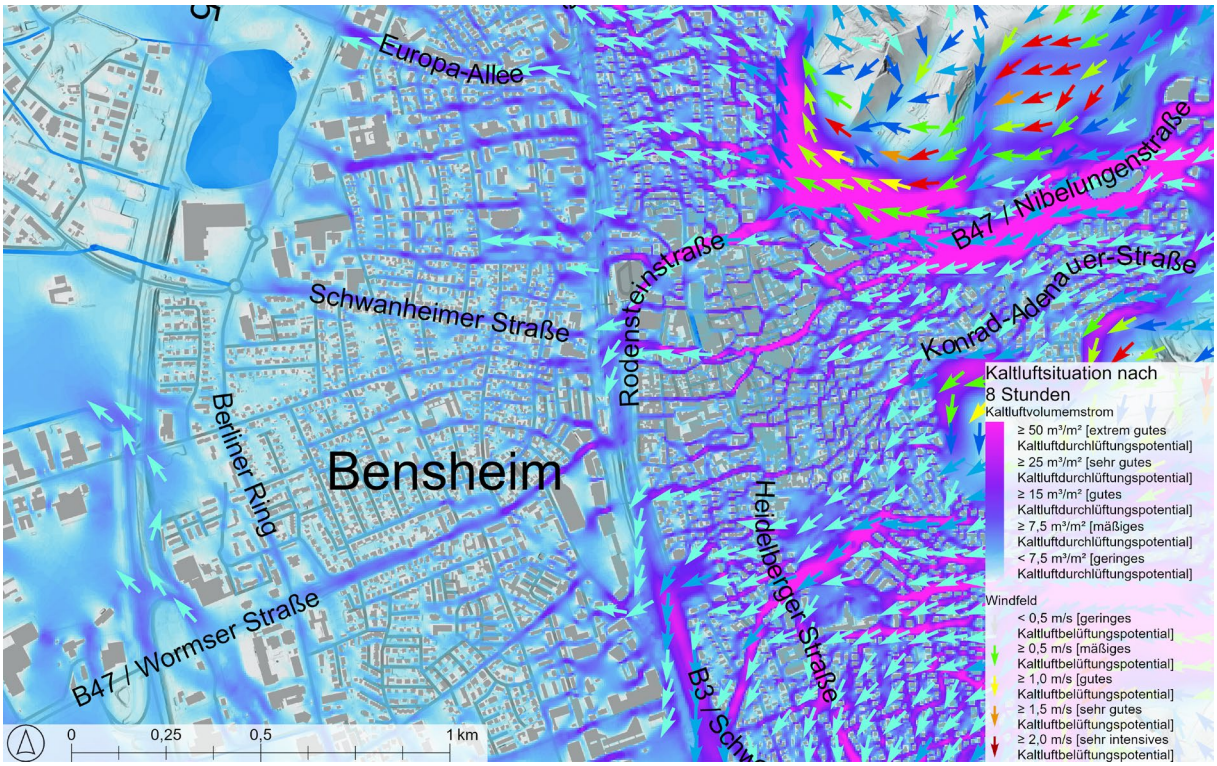



Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach 3 Stunden
Kaltluftvolumenstrom
≥ 50 m³/m² [extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 25 m³/m² [sehr gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 15 m³/m² [gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 7,5 m³/m² [mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential]
< 7,5 m³/m² [geringes Kaltluftdurchlüftungspotential]
Windfeld
< 0,5 m/s [geringes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 0,5 m/s [mäßiges Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,0 m/s [gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,5 m/s [sehr gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 2,0 m/s [sehr intensives Kaltluftbelüftungspotential]

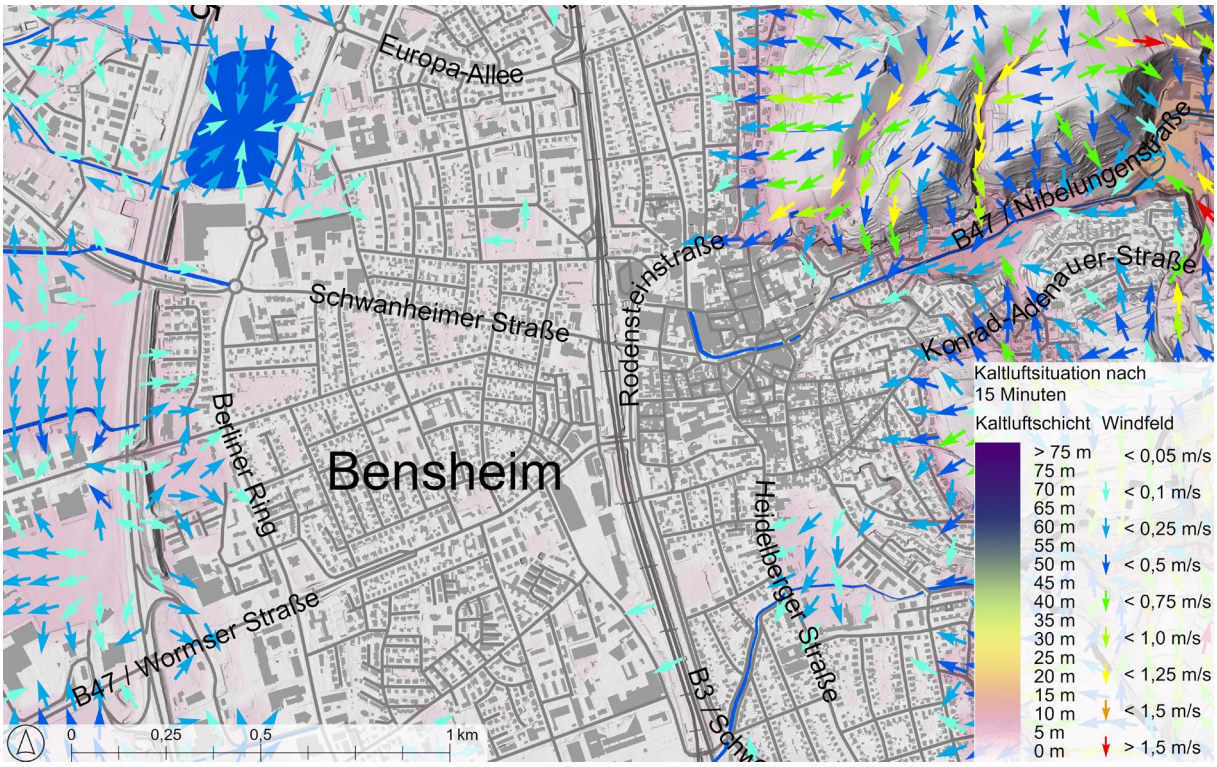

Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach 5 Stunden
Kaltluftvolumenstrom
≥ 50 m³/m² [extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 25 m³/m² [sehr gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 15 m³/m² [gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 7,5 m³/m² [mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential]
< 7,5 m³/m² [geringes Kaltluftdurchlüftungspotential]
Windfeld
< 0,5 m/s [geringes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 0,5 m/s [mäßiges Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,0 m/s [gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,5 m/s [sehr gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 2,0 m/s [sehr intensives Kaltluftbelüftungspotential]

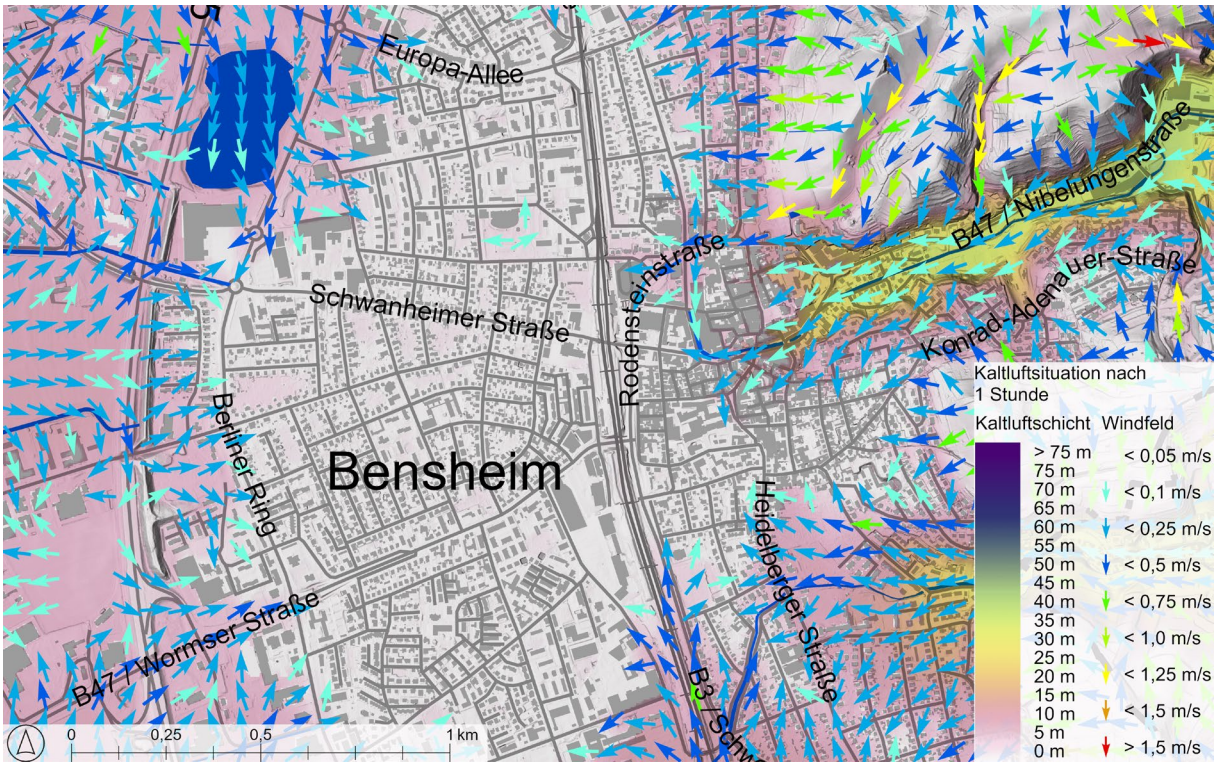

Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach 6 Stunden
Kaltluftvolumenstrom
≥ 50 m³/m² [extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 25 m³/m² [sehr gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 15 m³/m² [gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 7,5 m³/m² [mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential]
< 7,5 m³/m² [geringes Kaltluftdurchlüftungspotential]
Windfeld
< 0,5 m/s [geringes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 0,5 m/s [mäßiges Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,0 m/s [gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,5 m/s [sehr gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 2,0 m/s [sehr intensives Kaltluftbelüftungspotential]

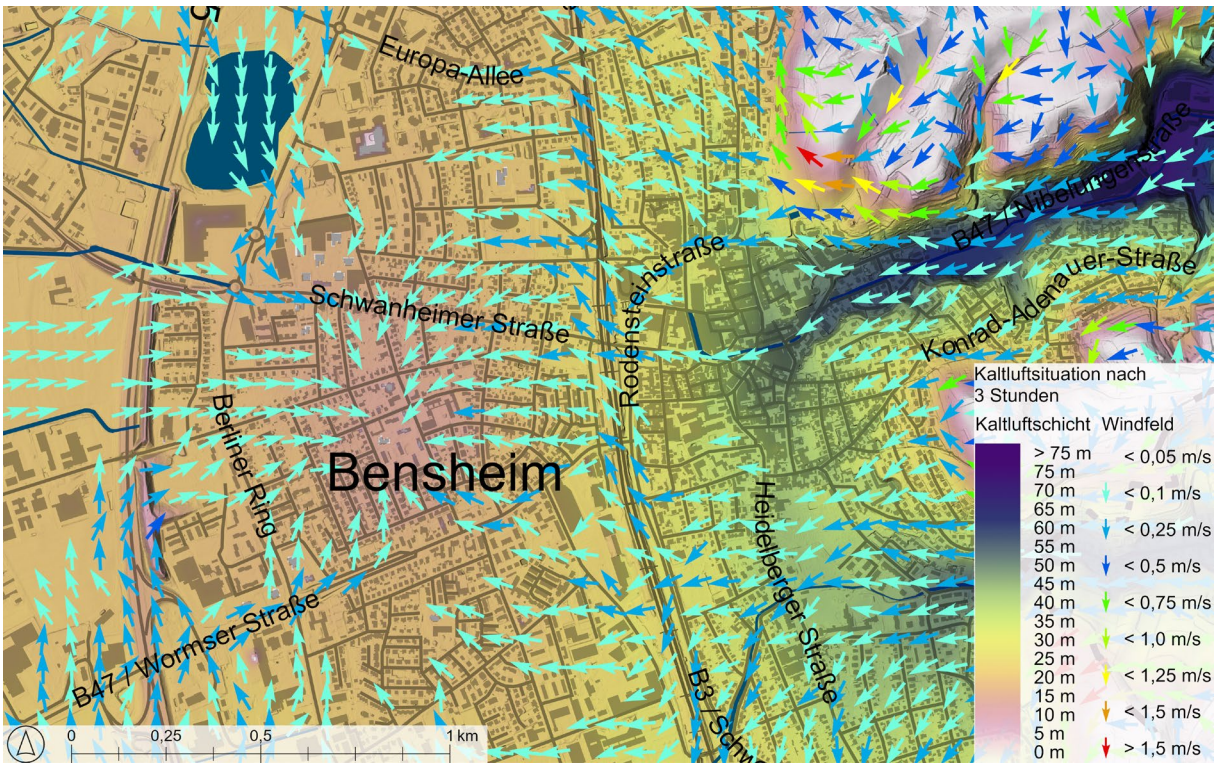

Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach 7 Stunden
Kaltluftvolumenstrom
≥ 50 m³/m² [extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 25 m³/m² [sehr gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 15 m³/m² [gutes Kaltluftdurchlüftungspotential]
≥ 7,5 m³/m² [mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotential]
< 7,5 m³/m² [geringes Kaltluftdurchlüftungspotential]
Windfeld
< 0,5 m/s [geringes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 0,5 m/s [mäßiges Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,0 m/s [gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 1,5 m/s [sehr gutes Kaltluftbelüftungspotential]
≥ 2,0 m/s [sehr intensives Kaltluftbelüftungspotential]

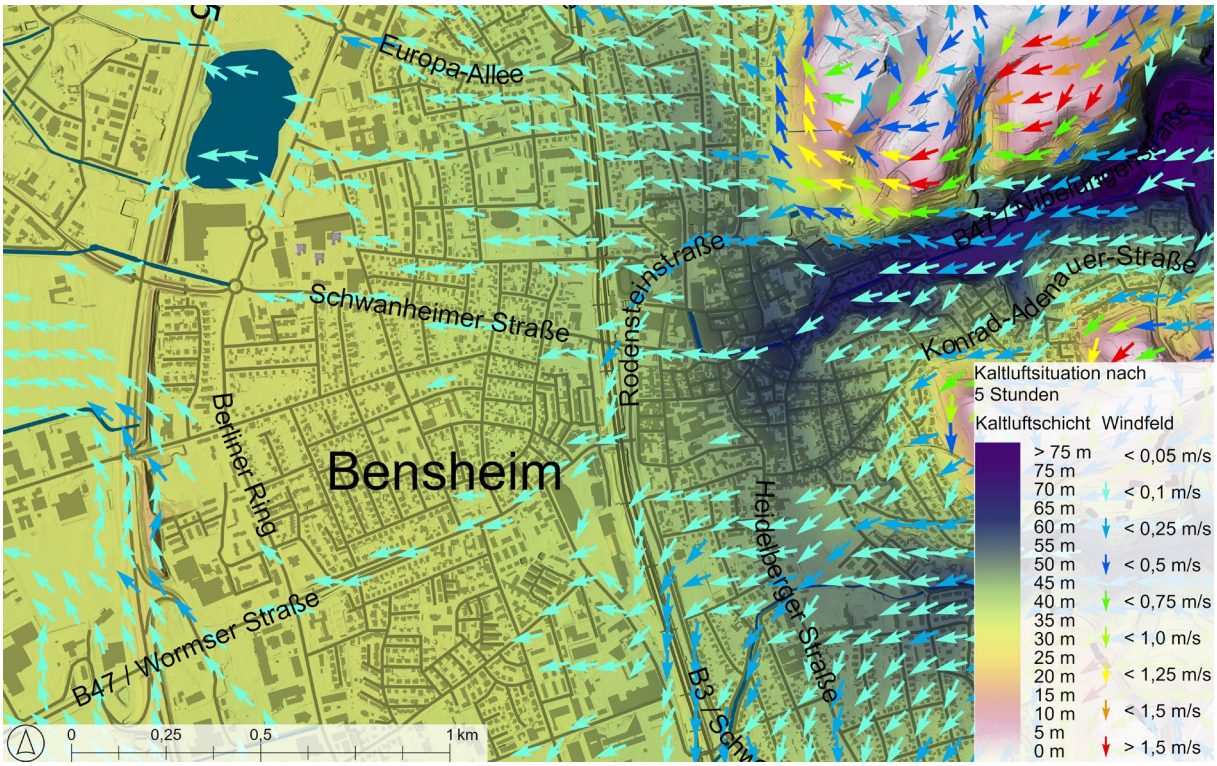


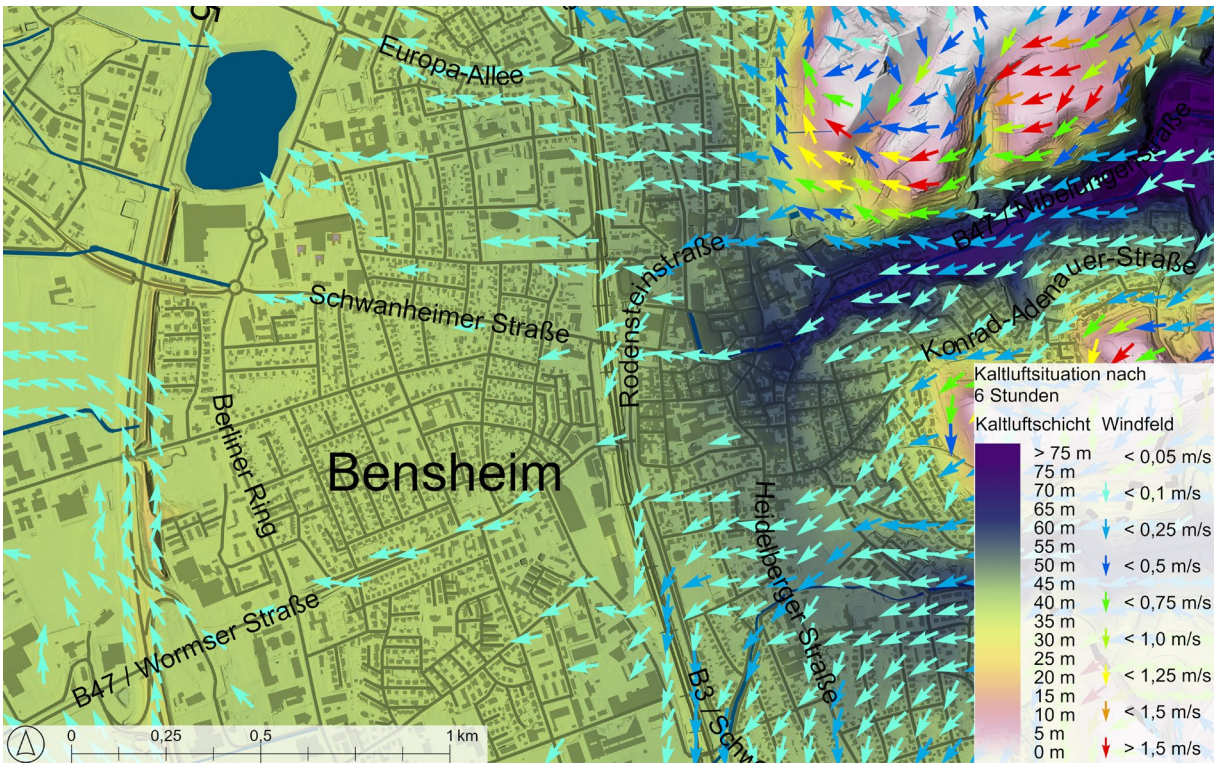
Kaltluftschichtdicke

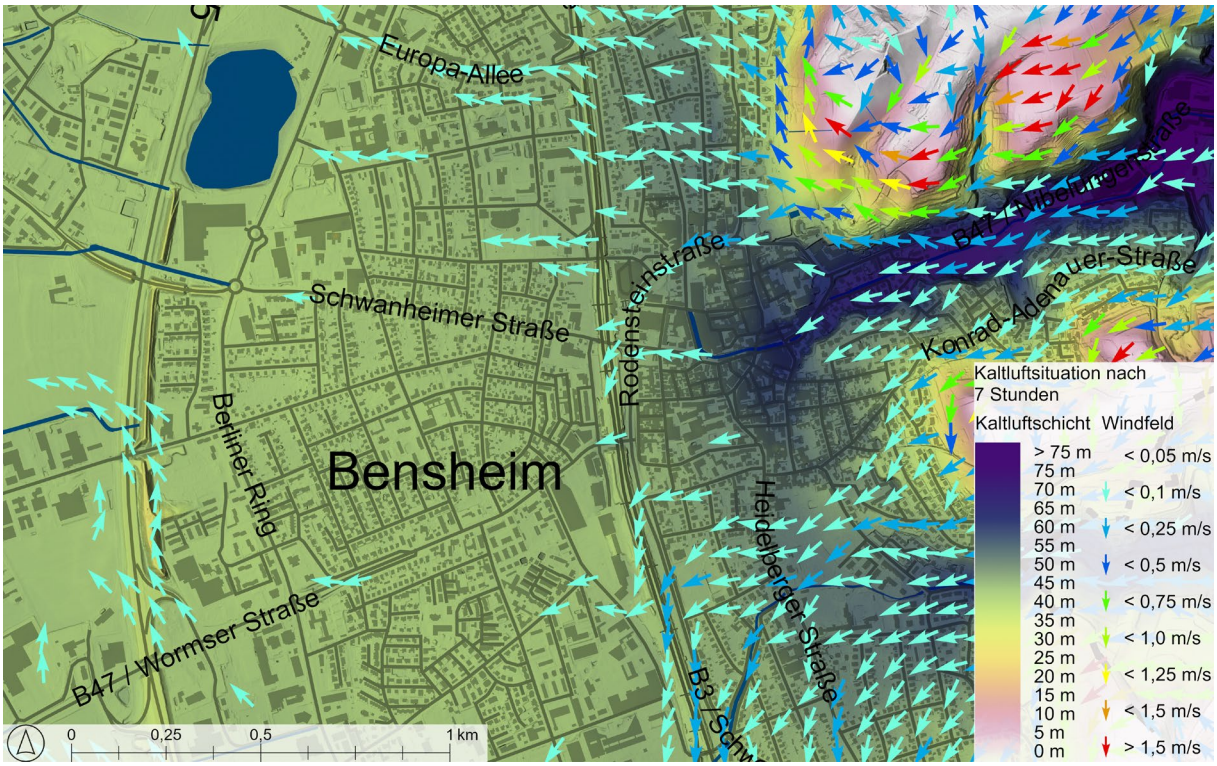


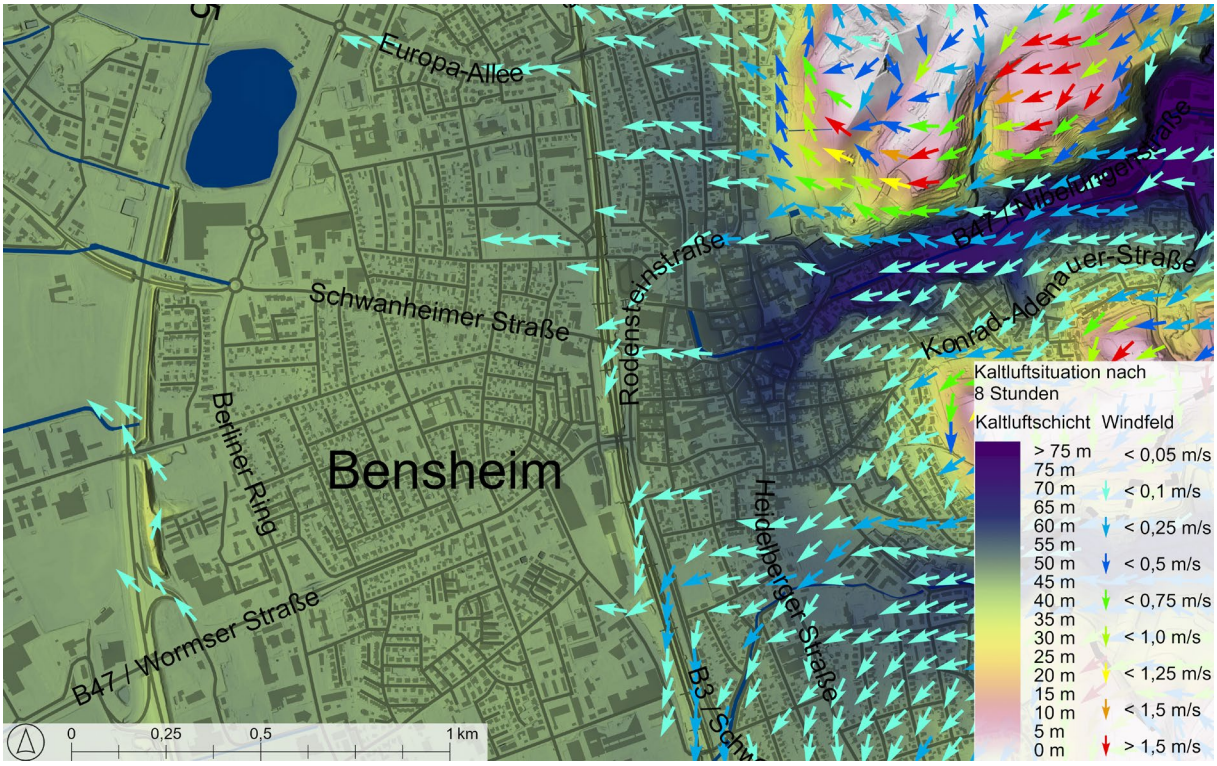

Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach
1 Stunde
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s


Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Berliner Ring
Bensheim
Heidelberger Straße
B47 / Wormser Straße
B3 / Schw
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach
3 Stunden
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s


Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
Berliner Ring
Bensheim
B47 / Wormser Straße
Heidelberger Straße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Kaltluftsituation nach
5 Stunden
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s
0
0,25
0,5
1 km


Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
Berliner Ring
Bensheim
B47 / Wormser Straße
Heidelberger Straße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
Kaltluftsituation nach
6 Stunden
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s
0
0,25
0,5
1 km


Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
Berliner Ring
Bensheim
B47 / Wormser Straße
Heidelberger Straße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach
7 Stunden
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s


Europa-Allee
Schwanheimer Straße
Rodensteinstraße
Berliner Ring
Bensheim
B47 / Wormser Straße
Heidelberger Straße
B47 / Nibelungenstraße
Konrad-Adenauer-Straße
0
0,25
0,5
1 km
Kaltluftsituation nach
8 Stunden
Kaltluftschicht
Windfeld
> 75 m
75 m
70 m
65 m
60 m
55 m
50 m
45 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m
5 m
0 m
< 0,05 m/s
< 0,1 m/s
< 0,25 m/s
< 0,5 m/s
< 0,75 m/s
< 1,0 m/s
< 1,25 m/s
< 1,5 m/s
> 1,5 m/s

9.3 Literaturverzeichnis

[1] N.N. (2023): Bundes-Klimaanpassungsgesetz. KAnG. In: Bundestag (Hrsg.): Bundesgesetzblatt.

[2] Perter Hupfer, Wilhelm Kuttler (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 11. Auflage. SpringerLink Bücher. [Place of publication not identified].

[3] Matzarakis, Andreas; Röckle, R.; Richter, C-J; Höfl, H-C; Steinicke, Wolfgang; Streifeneder, M.; Mayer, Helmut (2008): Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas - Am Beispiel von Freiburg im Breisgau. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 68. Jg., S. 334–340.

[4] Kuttler, Wilhelm (2011): Climate change in urban areas. Part 2, Measures. Environmental Sciences Europe, 23. Jg. (1).

[5] Bründl, W.; Mayer, H.; Baumgartner, A. (1986): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Grossstädten : Kennwort: Stadtklima Bayern ; Abschlussbericht zum Teilprogramm "Klimamessungen München". München.

[6] EPA – U.S. Environmental Protection Agency, o.A.): EPA 2008. Washington, DC. Zugriff: https://cfpub.epa.gov/roe/documents/eparoe_final_2008.pdf.

[7] Heidt, Volker; Neef, Marco (2008): Benefits of Urban Green Space for Improving Urban Climate. In: Carreiro, Margaret M.; Song, Yong-Chang; Wu, Jianguo (Hrsg.): Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives. New York, NY, S. 84–96.

[8] Dimoudi, Argiro; Nikolopoulou, Marialena (2003): Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. Energy and Buildings, 35. Jg. (1), S. 69–76.

[9] Verkehrsministerium Baden-Württemberg, o.A.): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.

[10] Bezirksdirektion für Forsten und Naturschutz (1985): Verordnung über das Naturschutzgebiet "Am Kleewoog von Gräfenhausen" vom 14. November 1985. Staatsanzeiger für das Land Hessen., 1985.

[11] Oke, T. R.; Mills, Gerald; Christen, Andreas; Voogt, James A. (2017): Urban climates. Cambridge.

[12] Mayer, Helmut; Beckroege, Wolfgang; Matzarakis, Andreas (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report, 5. Jg., S. 265–268.

[13] VDI/DIN-(KRdL) – VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss (Hrsg.) (2015): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. 3787. Auflage.

[14] LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2018): Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen. Fachbericht 86, (86).

[15] GEO-NET – GEO-NET Umweltplanung und GIS-Consulting GbR (2002): GIS-basierte Aufbereitung der Modellergebnisse zur Kaltluftsimulation für die Nutzung im Rahmen der

Landes- und Regionalplanung in Thüringen. Gutachten im Auftrag der Thüringer Staatskanzlei (Abt. Raumordnung und Landesplanung). Hannover.

[16] GEO-NET – GEO-NET Umweltplanung und GIS-Consulting GbR (2011): MORO-Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel Leitfaden „Klimaökologie Regionalplanung in Thüringen. Baden-Baden.

[17] VDI/DIN-(KRdL) – VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss (Hrsg.) (2003): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft (Entwurf).

[18] Burghardt, René (2015): Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors. Kassel, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung.

[19] René Burghardt (2014): Freiräume in der Stadt. klimabewusste Stadtgestaltung. Raum-Planung Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung, (Ausgabe 172). Zugriff: https://ifr-ev.de/raumplanung/freiraeume-in-der-stadt/.

[20] Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V., o.A.): Stellungnahmen. Zugriff: https://www.dmg-ev.de/die-dmg/publikationen/stellungnahmen/ [abgerufen am 10/2018].

[21] VDI/DIN (KRdL) – VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss (Hrsg.) (2022): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. 3787. Auflage.

[22] Kaspar, F.; Müller-Westermeier, G.; Penda, E.; Mächel, H.; Zimmermann, K.; Kaiser-Weiss, A.; Deutschländer, T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. Advances in Science and Research, 10. Jg. (1), S. 99–106.

[23] Fuss, Sabine; Canadell, Josep G.; Peters, Glen P.; Tavoni, Massimo; Andrew, Robbie M.; Ciais, Philippe; Jackson, Robert B.; Jones, Chris D.; Kraxner, Florian; Nakicenovic, Nebosja; Le Quéré, Corinne; Raupach, Michael R.; Sharifi, Ayyoob; Smith, Pete; Yamagata, Yoshiki (2014): Betting on negative emissions. Nature Climate Change, 4. Jg. (10), S. 850–853.

[24] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Geneva.

[25] Moss, R.; Edmonds, J.; Hibbard, K.; Manning, M.; Rose, S. K.; van Vuuren, D.; Carter T.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.; Mitchell, J.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.; Stouffer, R.; Thomson, A.; Weyant, J.; Wilbanks, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463. Jg. (7282), S. 747–756.

[26] Gelhardt, Ulrike (2022): ReKliEs-HNR. Berechnung und Bereitstellung von Klimasimulationsdaten für hessische Naturräume. Darmstadt.

[27] Thornthwaite, C. W. (1948): "An Approach toward a Rational Classification of Climate.". Geographical Review, 38. Jg. (1), S. 55–94.

[28] CSC – Climate Service Center Germany, o.A.): Vergleichendes Lexikon Annex 2: Formeln 1.

[29] VDI/DIN (KRdL) – VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss (2024): Umweltmeteorologie - Klima und Planung (Entwurf), 2024/11.

[30] Katzschner, Lutz; Thorsson, Sofia (2009): Microclimatic Investigations as Tool for Urban Design. Seventh Int Conf. Urban Clim.

[31] Lohmeyer, A. (Hrsg.) (2008): Lohmeyer, A. (2008): Klimafunktions- und Klimafunktions- und Klimaplanungskarten, Bd. 20.

[32] Oke, T. R. (2006): Towards better scientific communication in urban climate. Theoretical and Applied Climatology, 84. Jg. (1-3), S. 179–190.

[33] Oke, O. E.; Oso, O. M.; Logunleko, M. O.; Uyanga, V. A.; Akinyemi, F.; Okeniyi, F. A.; Akosile, O. A.; Baloyi, J. J.; Onagbesan, O. M. (2022): Adaptation of the White Fulani cattle to the tropical environment. Journal of Thermal Biology [abgerufen am 03/2025].

[34] Gartland, Lisa (2008): Heat islands. Understanding and mitigating heat in urban areas. London. Zugriff: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=430109.

[35] Ng, Edward (Hrsg.) (2015): The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning. A methodology for sustainable urban planning. Abingdon, Oxon, New York.

[36] DWD, 03/2016): Informationsblatt zum Kaltluftabflussmodell KLAM_21.

[37] Endlicher, Wilfried; Hendl, Manfred (2003): Klimaspektrum zwischen Zugspitze und Rügen. In: Leibniz-Institut für Länderkunde (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Klima, Pflanzen- und Tierwelt, S. 32–33.

[38] DWD – Deutscher Wetterdienst, o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Klimatologische Kenntage. Offenbach am Main. Zugriff: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101452&lv2=101334 [abgerufen am 8. 12. 2023].

[39] Deutschländer, T.; Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg, S. 47–56.

[40] Hansen, P.; Fuquay, J. (2011): Stress in Dairy Animals | Heat Stress: Effects on Reproduction. In: Lean, I. (Hrsg.): Encyclopedia of Dairy Sciences, S. 567–574.

[41] Gonzalez, D. (Hrsg.) (2016): Plant Transcription Factors.

[42] Wills, S. (2016): Extremes of Temperature: Hyperthermia. In: Payne-James, J.; Byard, R. (Hrsg.): Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine, S. 476–485.

[43] Bunz, M.; Mücke, H. (2018): Correction: Klimawandel – physische und psychische Folgen. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, 61. Jg. (1), S. 98.

[44] Akbari, H.; Matthews, D.; Seto, D.; Sherbinin, K. de; Solecki, W.; Grünstei, V.; Rosenzweig, C.; Gaffin, S. (2010): Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation. Energy and Emissions Control Technologies, S. 511–523.

[45] Pfahl, S.; Domeisen, D.; Wright, J. (2018): Impacts of Blocking on European Climate. Reviews of Geophysics, (56 Nr.3).

[46] Fenner, Daniel; Mücke, Hans-Guido; Scherer, Dieter (2015): Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins. Berlin, Heidelberg.

[47] C3S – Copernicus Climate Change Service, 2024): European State of the Climate 2023.

[48] DWD – Deutscher Wetterdienst, o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Tropennächte. Offenbach am Main. Zugriff: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102802 [abgerufen am 31. 10. 2023].

[49] DWD – Deutscher Wetterdienst, o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Frosttage. Offenbach am Main. Zugriff: https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussel/frosttage.html [abgerufen am 15. 05. 2024].

[50] DWD – Deutscher Wetterdienst, o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Eistage. Offenbach am Main. Zugriff: https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussel/eistage.html [abgerufen am 15. 05. 2024].

[51] Katzschner, L. (2019): Entwicklung geeigneter Stadtstrukturen in verschiedenen Klimazonen. In: Lozán, José L.; Breckle, Siegmar-Walter; Graßl, Hartmut; Kuttler, Wilhelm; Matzarakis, Andreas (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Städte. Wissenschaftliche Fakten. Warnsignal Klima. Hamburg, S. 275–279.

[52] EEA – European Environment Agency, o.A.): Wind - mean wind speed. Zugriff: https://www.eea.europa.eu/publications/europes-changing-climate-hazards-1/wind/wind-mean-wind-speed [abgerufen am 7. 06. 2023].

[53] Sedlmeier, Katrin; Tinz, Birger (2023): Wind in der Stadt. promet, (106), 2023, S. 39–49.

[54] Lozan, J.; Breckle, J.; Grassl, H.; Kasang, D.; Matzarakis, A. (2019): Städte im Klimawandel. In: Lozán, José L.; Breckle, Siegmar-W.; Graßl, Hartmut; Kuttler, Wilhelm; Matzarakis, Andreas (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Städte, S. 11–20.

[55] Katzschner, Lutz (2019): Bedeutung der Kaltluft und Ventilation in Städten. In: Lozán, José L.; Breckle, Siegmar-Walter; Graßl, Hartmut; Kuttler, Wilhelm; Matzarakis, Andreas (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Städte. Wissenschaftliche Fakten. Warnsignal Klima. Hamburg.

[56] Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International journal of biometeorology, 43. Jg. (2), S. 71–75.

[57] N.N. (2023): Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again).

[58] Kreienkamp, Frank; Huebener, Heike; Linke, Carsten; Spekat, Arne (2012): Good practice for the usage of climate model simulation results - a discussion paper. Environmental Systems Research, 2012. Jg. Zugriff: http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/1/1/9 [abgerufen am 7. 02. 2024].

9.4 Verzeichnis der ergänzenden Literatur / Quellen

L. 1 Bensheim o.J.: Stadtportrait. Online-Quelle: https://bensheim.de/leben-in-bensheim/stadt-portrat/

L. 1.2 Bensheim o.J.: Gewerbestandort Bensheim. Online-Quelle: https://www.wirtschaftsregion-bergstrasse.de/Wirtschaft/Gewerbeflaechen-Immobilien/Gewerbestandort-Bensheim

L. 1.3 Wegweiser Kommune 2025: Demografische Entwicklung Bensheim (im Landkreis Bergstraße). Online-Quell: https://www.wegweiser-kommune.de/data-api/rest/export/demografische-entwicklung+bensheim+2017-2019+tabelle.pdf

L. 1.4 Bensheim 2019: Stadt Bensheim Demographiebericht 2019. Bevölkerungsprognose 2018 bis 2043 für die Gesamtstadt. Online-Quelle: https://bensheim.de/wp-content/uploads/2024/07/Demographiebericht_2019_Bevoelkerungsprognose_2018-2043.pdf

L .2 Landschaften in Deutschland

L .3 https://bensheim.de/leben-in-bensheim/klima-umwelt-energie/umwelt/

L. 4 https://natureg.hessen.de/mapapps/resources/apps/natureg/index.html?lang=de

9.5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Klimaebenen mit dem korrespondierenden (typischen) Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten. 6
Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der typischen Durchschnittstemperaturen (Sommer, aber nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Landnutzung (unterschiedliche Stadtcharakteristika). Die orangen Graphen stellen die durchschnittlichen Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen die durchschnittlichen Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Stadtstrukturen (Materialien, Objekte). Beispiel Stillgewässer: Die durchschnittliche Temperatur eines Wasserkörpers liegt am Tag unter der durchschnittlichen Lufttemperatur. Auf Grund der guten Wärmespeicherungskapazität des Wassers fällt sie nachts ohne Strahlungseintrag aber kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen dar. In der Regel bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen [6]. 9
Abbildung 3: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel. Zwischen dem wärmeren Siedlungsraum der Stadt und dem kühleren Umland bildet sich, vorzugsweise bei wolkenfreien und windschwachen Wetterbedingungen während der Nacht, eine Lufttemperaturdifferenz aus. Je weniger „kühlende“ Faktoren (Vegetation, unversiegelte Flächen, Be- und Durchlüftungsachsen) und desto mehr Baumassen in ungünstiger Anordnung vorhanden sind, desto stärker i.d.R. der städtische Wärmeinseleffekt. 9
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand und dem freien Land (Umland). Das Windprofil wird im urbanen Bereich deutlich stärker beeinflusst bzw. verformt als im Umland. Z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, Z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (vertikale Streckung des Profils) und den Raum (UCL) unterhalb der mittleren Gebäudehöhe (UC). Die unterschiedenen Parameter werden im nachfolgenden Kapitel 2.4.1 genauer erläutert. 11
Abbildung 5: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruralen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz). 15
Abbildung 6: Schematische Darstellung eines der Orographie folgenden Kaltluftabflusses. Ähnlich einer Flüssigkeit versucht die Kaltluft Hindernisse wie bspw. Gebäude zu umströmen. 16
Abbildung 7: Orthogonal zum Kaltluftstrom ausgerichtete größere Hindernisse, wie bspw. Gebäuderiegel oder Straßendämme bremsen bzw. stauen die Kaltluft. 16
Abbildung 8: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen. 19
Abbildung 9: Der thermische Wirkungskomplex nach der VDI-RL 3787 Blatt 2 [21]. Schematische Darstellung der unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken, wie bspw. direkte Sonneneinstrahlung oder Windgeschwindigkeit, aber auch Wärmeabstrahlungen von Umgebungsoberflächen. 19

Abbildung 10: Darstellung der verschiedenen Eingangsdaten in Kombination mit den Bezugsräumen und den ausgewerteten klimatischen Parametern.....21
Abbildung 11: Abbildung der Temperaturveränderungen seit dem Jahr 1850 und Darstellung des projizierten Verlaufs unterschiedlicher Klimaszenarien [23]. Die ausgewerteten RCPs 2.6 und 8.5 sind blau bzw. rot dargestellt.....22
Abbildung 12: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung der Klimaanalysekarte und der Planungshinweiskarte. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen. 28
Abbildung 13: Die unterschiedlichen Daten und Analysen der Stadtklimaanalyse ermöglichen konkrete Aussagen zu unterschiedlichsten Fragestellungen und klimatischen Aspekten im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung. 29
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (links) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität (rechts) zu schaffen. 30
Abbildung 15: Übersicht Gemarkung 32
Abbildung 16: Klimatische Gliederung der Gemarkung Bensheim und der Region (nach Endlicher und Hendl 2003 [37]) nach thermoklimatischer Typisierung (jahreszeitliche Temperaturschwankungen) und pluvioklimatischer Typisierung (Jahresniederschlagssumme). Eigene Darstellung mit Daten des DWD. 35
Abbildung 17: Bivariate Darstellungsform der klimatischen Verhältnisse während des Gesamtjahres (links) und während des Sommers (Juni, Juli, August – rechts). Die genauen Wertebereiche der unterschiedlichen Klassen für Temperatur (a bis d) und Niederschlagssummen (1 bis 4) sind der Tabelle 6 zu entnehmen. 37
Abbildung 18: Historische Dynamik der Lufttemperatur in 2 m über Grund im Jahresmittel (Säulen) und im 5-jährige Mittel (Graph) von 1880 bis 2023 in Hessen. 38
Abbildung 19: Die Lufttemperatur (2 m über Grund) in einer Auflösung von 1 km x 1 km. Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der Sommermonate Juni, Juli und August. 41
Abbildung 20: Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund für das langjährige Mittel 1981-2000 mit Fokus auf die Gemarkung Bensheim und der regionalen Übersicht. Blautöne geben geringe Windgeschwindigkeiten an, Rottöne symbolisieren Windgeschwindigkeiten von 4 m/s und darüber. 47
Abbildung 21: Kartenauszug der Analysekarte Mittlere Höhe der urbanen Morphologie für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkle Rottöne zeigen eine größere Mittlere Höhe in der urbanen Morphologie an, als bspw. blassgelbe Einfärbungen. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 53
Abbildung 22: Kartenauszug der Analysekarte Grundflächenzahl und Geschossflächenzahl für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelgelbe Bereiche stellen eine hohe GRZ mit niedriger GFZ und hellblaue Bereiche eine hohe GFZ mit niedriger GRZ dar. Braunrote Bereiche kennzeichnen Areale wo sowohl die GRZ, wie auch die GFZ hoch ist. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 57
Abbildung 23: Schematische Darstellung zur Erfassungsmethodik von Vegetation. Auf Grund eines höheren Chlorophyllanteils (Blattgrün) reflektieren vitale Grünstrukturen stärker im

Nahinfrarotbereich als geschädigte, während gleichzeitig der Rotbereich des sichtbaren Lichts weniger stark reflektiert wird. 59
Abbildung 24: Kartenauszug der Themenkarte Vegetationsflächen und Vegetationshöhen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Gelbtöne zeigen einen relativ niedrigen Vegetationsanteil auf Flurstücksebene an, während Grün & Blautöne im Verhältnis einen hohen Vegetationsanteil markieren. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 62
Abbildung 25: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 30min. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 65
Abbildung 26: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 30min. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 65
Abbildung 27: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 2Std. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 66
Abbildung 28: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 2Std. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 67
Abbildung 29: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 4Std. Dargestellt wird der Kaltluftvolumenstrom (m³/m²) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Pinke Farbfüllungen geben einen starken Kaltluftvolumenstrom wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 68
Abbildung 30: Kartenauszug der Analysekarte Kaltluftsituation nach 4Std. Dargestellt wird der Kaltluftschichtdicke (m) und das zugehörige Windfeld (m/s) mittels farbiger Vektorpfeile für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Dunkelblaue Farbfüllungen geben eine hohe Kaltluftschichtdicke wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 68
Abbildung 31: Kartenauszug der Analysekarte bodennahe nächtliche Lufttemperatur. Dargestellt wird die simulierte bodennahe nächtliche (04:00Uhr) Lufttemperatur (2m ü.G.) während eines für die Region typischen Heißen Tages (LTmax: 31,6°C, LTmin: 16,9°C) für den

Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Rötliche Farbfüllungen geben höhere Temperaturen (°C) wieder. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 70
Abbildung 32: Kartenauszug zur **Klimaanalysekarte** für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Die unterschiedlichen Klimatope werden fließend dargestellt, der Kaltluftvolumenstrom in den zugehörigen Vektorpfeilen. Für den gesamten administrativen Raum liegt eine separate Karte als hochaufgelöstes PDF vor. 75
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Entwicklung der Emissionspfade der RCP-Klimaszenarien.....78
Abbildung 34: Projizierte bodennahe Lufttemperatur während des Gesamtjahres (links) und die Sommermonate (rechts) für die langjährigen Mittel 2031-2060 und 2071-2100 des RCPs 8.5.....83
Abbildung 35: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Sommertage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).....85
Abbildung 36: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Heiße Tage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).....85
Abbildung 37: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Tropennächte“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).....86
Abbildung 38: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Frosttage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).....87
Abbildung 39: Projizierte klimatische Dynamik der klimatischen Kenntage „Eistage“ für die langjährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts) auf Grundlage der Annahmen des RCP 8.5 Szenarios (nach Daten des DWD und HLNUG).....87
Abbildung 40: Kombinierte Darstellung der klimatischen Kategorisierung auf Basis kommunaler Verwaltungsgrenzen für die Klimaparameter Niederschlag und Lufttemperatur (über die Darstellung der Heißen Tage). Die historischen Daten (1971-2000) werden flächig über ein bivariates Schema, die projizierten relativen Veränderungen (RCP 8.5 2071-2100) über Konturen dargestellt (nach Daten des DWD und HLNUG).....88
Abbildung 41: Kartenauszug der Analysekarte Vulnerabilität Grundlagen – (hitze)vulnerable Altersklassen (Kleinkinder ≤ 4 Jahre) und sensible Einrichtungen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Grüntöne zeigen eine niedrige Dichte, Blau- und Violetttöne eine höhere Dichte der vulnerablen Gruppe an. Sensible Einrichtungen werden über Piktogramme dargestellt. Die Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 91
Abbildung 42: Kartenauszug der Analysekarte Vulnerabilität Grundlagen – (hitze)vulnerable Altersklassen (Senioren ≥ 60 Jahre) und sensible Einrichtungen für den Innenstadtbereich von Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Gelbtöne zeigen eine niedrige Dichte, Magenta- und Violetttöne eine höhere Dichte der vulnerablen Gruppe an. Sensible Einrichtungen werden über Piktogramme dargestellt. Die

Karte mit technischer Beschreibung liegt flächendeckend als hochaufgelöstes separates PDF vor. 92
Abbildung 43 Kartenauszug der Planungshinweiskarte für Bensheim. Die Analyse wurde für den gesamten administrativen Raum der Stadt erarbeitet. Flächenhaft gliedert die Planungshinweiskarte den Untersuchungsraum in Freiräume und Siedlungsräume mit jeweils unterschiedlicher klimatischer Planungsrelevanz. Dabei zeigen grüne Flächen Ausgleichräume mit geringer, mittlerer und hoher klimatischer Bedeutung. Der Siedlungsraum wird in drei Gelbtöne sowie einen rötlichen Ton aufgegliedert. Ferner werden die Durchlüftungsachsen für den Tag (auf Grundlage der Haupt- und Nebenanströmung), sowie der Nacht, in Form des bodennahen nächtlichen Strömungsfeldes nach 3 Stunden visualisiert. Informatorisch ergänzend werden klimasensible Einrichtung verortet.....96

9.6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für typische (anthropogene) Modifikationen / Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen / Risiken (rechte Spalte) im städtischen Raum. 7
Tabelle 2: Beispiele für Rauigkeitslängen und Nullpunktverschiebungen unterschiedlicher Oberflächen (nach Oke 2017 [11])....12
Tabelle 3: Strömungsregime mit zugehörigen Höhen-Weiten-Verhältnissen und grafischen Beispielen....14
Tabelle 4: Zusammenfassung der Charakteristiken der unterschiedlichen RCPs. Hinsichtlich der Temperaturveränderungen ist anzumerken, dass diese nicht homogen, sondern heterogen verteilt sind. De facto bedeutet dies, dass manche Gebiete und Regionen stärkere Temperaturanstiege erfahren als andere. Das RCP 2.6 würde unterhalb des politisch definierten 2 °C-Ziels verlaufen. 23
Tabelle 5: Grundlegende klimatische Aspekte und deren Ursprung bzw. ihre Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klimafunktionen herangezogen werden. 26
Tabelle 6: Wertebereiche der verschiedenen Code-Kombinationen (1 bis 4 und a bis d) der Temperatur- und Niederschlagsdarstellungen. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Wertebereiche bei der Jahres- und der Sommer-Darstellung unterscheiden. 36
Tabelle 7: Zu Diagramm 1 korrespondierende Wertetabelle der Änderungssignalen der drei klimatischen Parameter zum Referenzzeitraum. Bei der Lufttemperatur werden verhältnismäßig starke Anstiege im Jahresgang rot hervorgehoben. Bei den wasserbezogenen Werten werden Anstiege grün und Verluste rot hinterlegt. 39
Tabelle 8: Übersicht zu den ausgewerteten historischen Klimadaten für das Verwaltungsgebiet von Bensheim der letzten zwei 30-jährigen Mittel sowie zu den deutschlandweiten Werten. Die klimatischen Kenntage werden im nächsten Kapitel näher beschrieben. 43
Tabelle 9: Typische temperaturbezogene Kenntage mit ihren zugehörigen Definitionen, die im Rahmen der Stadtklimaanalyse ausgewertet wurden. 44
Tabelle 10: Haupt- und Nebenkomponenten der regionaltypischen Anströmung während der Tagesstunden (08-18 Uhr) und der Nachtstunden (22-04 Uhr) an der DWD-Station 5906)...49
Tabelle 11: Übersicht zu den ausgewerteten projizierten Klimadaten des RCP 2.6 für die Region Bensheim für zwei 30-jährige Mittel sowie zu den hessischen Werten. 79
Tabelle 12: Übersicht zu den ausgewerteten projizierten Klimadaten des RCP 8.5 für die Region Bensheim für zwei 30-jährigen Mittel sowie zu den hessischen Werten. 80
Tabelle 13: Übersicht zu den Änderungssignalen der projizierten bodennahen Lufttemperatur und der Niederschlagssumme im Jahresverlauf für die VWG Bensheim 82