iMA
Richter & Röckle

Immissionen
Meteorologie
Akustik

Auftraggeber: **Regionalverband Heilbronn-Franken**
Am Wollhaus 17
74072 Heilbronn

Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken

Projektnummer: **20-03-06-FR_Rev1.1_Entwurf**

Revisionsnummer: **1.1**

Umfang: **108 Seiten**

Datum: **11.04.2025**

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

iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Eisenbahnstraße 43
79098 Freiburg
Tel.: **0761/ 202 1662**
Fax: **0761/ 202 1671**
E-Mail: **ketterer@ima-umwelt.de**

gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis 5

Abbildungsverzeichnis 6

Zusammenfassung 9

1 Einführung und Aufgabenstellung 12

1.1 Vorgehen 13
1.2 Arbeitsprozess 14
1.3 Anwendungsbereich der Klimaanalyse 16

2 Bedeutung von Klima in der räumlichen Planung 17

2.1 Europäische Raumplanung 17
2.2 Raumplanung auf Bundesebene 17
2.3 Raumplanung auf Landesebene 18
2.4 Regionalplanung 19
2.5 Kommunale Planung 19

3 Allgemeine meteorologische Grundlagen 21

3.1 Mesoklima und Mikroklima 21
3.2 Thermische Komponente des Klimas 21
3.2.1 Lufttemperatur 21
3.2.2 Klimatologische Kenntage 22
3.2.3 Energiebilanz und anthropogener Wärmestrom 22
3.2.4 Urbane Wärmeinsel 24
3.3 Dynamische Komponente des Klimas: lokale Strömungssysteme 25
3.3.1 Kaltluftabfluss 25
3.3.2 Kaltluftproduktion 28
3.3.3 Volumenstromdichte 29
3.3.4 Flurwinde 29
3.4 Human-Biometeorologie 30
3.5 Wirkräume und Ausgleichsräume 32
3.6 Klimawandel 33

4 Datengrundlage und Methodik 36

4.1 Datengrundlage 36
4.1.1 Topographie 36
4.1.2 Nutzungsstruktur 38
4.1.3 Weitere meteorologische Daten 39
4.2 FITNAH 40
4.2.1 Das prognostische Modell FITNAH 40
4.2.2 Rechengebiet, räumliche und zeitliche Auflösung 40
4.2.3 Meteorologische Situation und Anfangszustand 41
4.2.4 Berechnete meteorologische Größen 41

4.2.5 Betrachtung des Klimawandels 42
4.2.6 Modellvalidierung 43
4.3 Ermittlung von Gunstfaktoren 43
4.3.1 Strömungssysteme 43
4.3.2 Luftleitbahnen 44
4.3.3 Kaltluftproduktionsgebiete 44
4.4 Ermittlung von Ungunstfaktoren 45
4.5 Bewertung der Ergebnisse und ermittelten Faktoren 46
4.5.1 Berechnung der Empfindlichkeit 48
4.5.2 Berechnung der Betroffenheit 48
4.5.3 Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete 50
4.5.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme 50
5 Ausblick Klimawandel 52
5.1 Klimawandel im Regionalverband Heilbronn-Franken 52
5.2 Lufttemperatur 54
5.3 Niederschlag 55
5.4 Klimatologische Kenntage 57
5.4.1 Heiße Tage und tropische Nächte 60
5.4.2 Frosttage 61
6 Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse 62
6.1 Kaltluft 62
6.2 Thermische Verhältnisse 64
6.2.1 Lufttemperatur 64
6.2.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur 65
6.2.3 Urbane Wärmeinsel 66
6.2.4 Häufigkeit von Sommertagen 68
Auswirkungen des Klimawandels 68
6.3 Bewertungsgrößen 70
6.3.1 Empfindlichkeit 70
6.3.2 Thermische Belastung 72
6.3.3 Thermische Betroffenheit 72
6.4 Regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete 72
6.5 Planungshinweiskarte 74
7 Vorschläge zur Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsflächen 76
8 Interpretation und Anwendung der Klimaanalyse in den Kommunen 78
8.1 Interpretation der Ergebnisse am Beispiel Langenbrettach 78
8.2 Die regionale Klimaanalyse als Abwägungsgrundlage 79
8.2.1 Verfeinerung der regionalen Klimaanalyse durch mikroskalige Simulationen 79
8.2.2 Berücksichtigung der klimatischen Belange in der Flächennutzungsplanung 81
9 Glossar 83

10 Literatur 91

Anhang 1: Bestimmung der Einwohnerdichte 95

Anhang 2: Messungen 96

Revision des Berichtes vom 24.04.2023: Die alten Bevölkerungsdaten basierend auf dem Zensus 2011 wurden durch den Bevölkerungsdatensatz aus dem Zensus 2022 ersetzt. Die Auswertungen und Karten wurden entsprechend überarbeitet.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Definition von klimatologischen Kenntagen nach DWD. 22
Tabelle 3-2: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997)).32
Tabelle 3-3: Beschreibung der Representative Concentration Pathways (RCP). 34
Tabelle 4-1: Räumliche Daten für die Klimaanalyse. 36
Tabelle 4-2: Räumliche Daten, die der Regionalen Klimaanalyse Heilbronn-Franken zugrunde liegen. ...39
Tabelle 4-3: Messdaten und weitere klimatologische Daten. 40
Tabelle 4-4: Bewertung der Empfindlichkeit des Strömungssystems anhand der Volumenstromdichte als Integral über den Gesamtvolumenstrom (Skala angelehnt an Schwab & Zachenbacher (2009), iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2022)). 44
Tabelle 4-5: Folgende meteorologische Größen wurden als Indikatoren für die Ermittlung der thermischen Bedingungen herangezogen. 45
Tabelle 4-6: Bewertung der Einwohnerdichte je 50 m x 50 m (bezeichnet als E in der Berechnungsformel in Kapitel 4.5.2). 48
Tabelle 4-7: Bewertung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET in °C) angelehnt an Matzarakis & Mayer (1997). Zur besseren Differenzierung der Hitzebelastung im Regionalverband Heilbronn-Franken wurden die letzten zwei Klassen ergänzt. 49
Tabelle 4-8: Bewertung der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI in °C). 49
Tabelle 4-9: Bewertung der Anzahl an Sommertagen (ST, Tage pro Jahr im Zeitraum 1971 – 2000). 49
Tabelle 5-1: Veränderung meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts. 53
Tabelle 5-2: Klimatologische Kenntage für verschiedene Klimanormalperioden ermittelt aus EURO-CORDEX Klimamodelldaten auf dem Gebiet von Neckarsulm. Kenntage für zukünftige Perioden basieren auf dem Szenario RCP 8.5. 59
Tabelle 5-3: Anzahl der jährlichen Sommertage für Heilbronn und Creglingen-Frauental in der historischen Klimanormalperiode 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100. Die Prognose beruht auf dem Klimaszenario RCP8.5. 59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Arbeitsprozess zur Erstellung der regionalen Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken. 15
Abbildung 3-1: Geschätzte mittlere jährliche und globale Energiebilanz der Erde (Werte in W/m², nach IPCC (2007) und ZAMG). 23
Abbildung 3-2: Merkmale des Stadtklimas, die zur Entstehung der urbanen Wärmeinsel beitragen (Grafik: Deutscher Wetterdienst). 24
Abbildung 3-3: Typischer Tagesgang der Lufttemperatur in der Stadt und im Umland bei sommerlichem Strahlungswetter (nach Oke, Zeuner & Jauregui (1992)). 25
Abbildung 3-4: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses. Zusätzlich dargestellt ist das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit an verschiedenen Punkten innerhalb der Kaltluft. 26
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Überströmung von Gebäuden. Oben: lockere Bebauung; Kaltluft aus dem Überdachniveau kann herabgemischt werden. Unten: dichte Bebauung; Kaltluft aus dem Überdachniveau bleibt über den Gebäuden (Oke (1988)). 27
Abbildung 3-6: Darstellung der Komponenten zur Bestimmung der Volumenstromdichte. 29
Abbildung 3-7: Veranschaulichung des Zusammenspiels aus urbaner Wärmeinsel und der Entstehung von Flurwinden (nach Christen (2019)). 29
Abbildung 3-8: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Einflussfaktoren der menschlichen Energiebilanz und die darauf basierende Berechnung thermischer Indizes (nach Matzarakis, Martinelli & Ketterer (2016)) 31
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung von Wirkraum und Ausgleichsraum. 32
Abbildung 3-10: Emissionsszenarien und der daraus resultierende Strahlungsantrieb für die verschiedenen RCPs. Die Abbildungen a bis d zeigen die Kohlendioxid- (CO_2), Methan- (CH_4), Lachgas- (N_2O) und Schwefeldioxid- (SO_2) Emissionen. In Abbildung e wird der zukünftig erwartete Strahlungsantrieb (W/m²) für die verschiedenen Emissionsszenarien dargestellt (https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_futurechanges.php, Stand 19.04.2023). 34
Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells (Grafik: Koßmann, Noppel & Früh (2014)). 35
Abbildung 4-1: Vorgehensweise für die Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken. 37
Abbildung 4-2: Digitales Geländemodell für den Regionalverband Heilbronn-Franken und die Umgebung. 38
Abbildung 4-3: Landnutzung für den Regionalverband Heilbronn-Franken. 39
Abbildung 4-4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Simulation der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Der terminbezogene Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine multiple lineare Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der EURO-CORDEX-Daten als Eingangsdaten dient. 42
Abbildung 4-5: Exemplarische Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (Schwab & Zachenbacher (2009)). 46
Abbildung 4-6: Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit und der thermischen Belastung. Die Empfindlichkeit wird aus der Einwohnerdichte und der klimasensiblen Nutzung berechnet. Die thermische Belastung setzt sich aus der Wärmebelastung tagsüber (PET, 13:00 Uhr), der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI, 04:00 Uhr) und der Anzahl an Sommertagen zusammen. 47
Abbildung 4-7: Ermittlung der thermischen Belastung. 48
Abbildung 4-8: Differenzierung innerhalb des Kaltluftstroms mithilfe von **Vorwärtstrajektorien** von jeder identifizierten Rasterzelle aus. 51

Abbildung 5-1: Beobachteter Klimawandel in Baden-Württemberg. Differenz der mittleren Lufttemperatur zum langjährigen Mittel in der Klimanormalperiode 1981 – 2010 von 1880 bis heute (Daten: DWD). 52
Abbildung 5-2: Änderung der Lufttemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. 54
Abbildung 5-3: Gemessene Jahresmittelwerte der Lufttemperatur 1971 – 2022 in Baden-Württemberg. Prognose 2023 – 2100 für das RCP 8.5 Szenario (Daten: Klimaatlas DWD). 55
Abbildung 5-4: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1971 – 2000 gemessen in Heilbronn (Daten: DWD). 55
Abbildung 5-5: Gemessene Abweichung des Jahresniederschlags in Baden-Württemberg 1971 – 2022 und Prognose 2023 – 2100 für das RCP 8.5 Szenario (Daten: Klimaatlas DWD). 56
Abbildung 5-6: Niederschlagsänderung in % bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben. 56
Abbildung 5-7: Saisonale Niederschlagsänderung für den Zeitraum 2031- 2060 (links) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben. 56
Abbildung 5-8: Änderung des Starkniederschlags im Winter (oben) und Sommer (unten) im Zeitraum 2071 – 2100 im Vergleich zum aktuellen Klima (1971 – 2000) bei Betrachtung des RCP 8.5. Starkniederschlag wird definiert als 95. Perzentil der Intensität aller Regenereignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020). 57
Abbildung 5-9: Anzahl der Sommertage (links) und der Frosttage (rechts) für die Klimanormalperiode 1991 – 2020 in Deutschland. Das Gebiet des Regionalverbands ist schwarz umrandet. (Quelle: DWD). 58
Abbildung 5-10: Anzahl der Sommertage in Baden-Württemberg zwischen 1951 und 2022 und Prognose für das Szenario RCP8.5 für den Zeitraum 2023 – 2100. (Quelle: Klimaatlas DWD). 58
Abbildung 5-11: Anzahl an Sommertagen während der Klimanormalperiode 1971 – 2000 (oben links) und Prognosen EURO-CORDEX für den Zeitraum 2031 – 2060 (Mitte) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. 60
Abbildung 5-12: Anzahl der Sommertage (ST) und der heißen Tage (HT) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5. 61
Abbildung 5-13: Anzahl der Frosttage (FT) und Eistage (ET) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5. 61
Abbildung 6-1: Gesamtvolumenstromdichte im Regionalverband Heilbronn-Franken in den Abendstunden (22:00 Uhr, oben) und in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr, unten). 63
Abbildung 6-2: Lufttemperatur in 2 m Höhe zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag. 64
Abbildung 6-3: Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag. 65
Abbildung 6-4: Urbane Wärmeinsel (UHI) in den Abendstunden (22:00 Uhr, oben) und in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr, unten). 67
Abbildung 6-5: Verteilung der mittleren Anzahl an Sommertagen pro Jahr im Regionalverband Heilbronn für den Zeitraum 1971 – 2000. 68
Abbildung 6-6: Verteilung der mittleren Anzahl an Sommertagen pro Jahr im Regionalverband Heilbronn für die Prognosezeiträume 2031 – 2060 (oben) und 2071 – 2100 (unten). Der Prognose liegt das Klimaszenario RCP8.5 zugrunde. 69
Abbildung 6-7: Verteilung der Einwohnerdichte (Einwohner je ¼ Hektar) im Regionalverband Heilbronn-Franken. 71
Abbildung 6-8: Empfindlichkeit der Bevölkerung bezogen auf klimatische Bedingungen. 71
Abbildung 6-9: Thermische Belastung im Regionalverband Heilbronn-Franken. 72
Abbildung 6-10: Thermische Betroffenheit der Bevölkerung im Regionalverband Heilbronn-Franken. 73
Abbildung 6-11: Siedlungsgebiete mit mindestens 1 ha Flächenanteil mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit. 73

Abbildung 6-13: Planungshinweiskarte für den Regionalverband Heilbronn-Franken mit Darstellung der regionalplanerisch relevanten Kaltluftströmungen. 75
Abbildung 7-1: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Regionalverband Heilbronn-Franken mit Darstellung der thermischen Betroffenheit und der Relevanz der Kaltluftströmung für den Siedlungsbereich. 78
Abbildung 7-2: Bodennahe Durchlüftung der Ortschaft Amorbach bei Neckarsulm. Teilergebnis der Stadtklimaanalyse Neckarsulm, die auf den Ergebnissen der regionalen Klimaanalyse aufbaut. 80
Abbildung 7-2: Verteilung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) in der Ortschaft Amorbach in Neckarsulm. Teilergebnis der Stadtklimaanalyse Neckarsulm, die auf den Ergebnissen der regionalen Klimaanalyse aufbaut. 81
Abbildung 7-2: Prognostizierte Änderungen der Lufttemperatur und der Kaltluftströmung durch Plangebiete. 82

Zusammenfassung

Durch den anthropogenen Klimawandel wird im 21. Jahrhundert weiterhin, wie in den letzten Jahrzenten schon beobachtet, ein Anstieg der mittleren →**Lufttemperatur**[1] sowie einer Zunahme von klimatischen Extremereignissen, wie der Dauer, Intensität und Häufigkeit von →**Hitzewellen** und der Anzahl an →**heißen Tagen** erwartet.

Die weltweite Zunahme von klimatischen Extremereignissen zeigt, dass massiver Handlungsbedarf zur Reduzierung der Emission klimaaktiver Gase besteht. Auf den Weltklimakonferenzen werden durch unterschiedlichste politische und wirtschaftliche Interessen im Wesentlichen nur Willensbekundungen zur Einsparung fossiler Brennstoffe festgelegt. Die Zeithorizonte bis durch globale Maßnahmen ein Abbremsen des Klimawandels stattfindet, dauern optimistisch noch mehrere Dekaden.

Umso wichtiger werden →**Klimaanpassungsmaßnahmen**, die insbesondere die Bevölkerung vor den Risiken wie Starkregen, Hochwasser, Unwetter, Trockenheit und Hitze schützen. Hier sind die Planer beim Land, in den Regionalverbänden und nicht zuletzt in den Städten gefragt. Sie sollen die Bedingungen in belasteten Siedlungsräumen möglichst durch Planungen nicht weiter verschlechtern und Flächen mit Klimaausgleichspotenzial erhalten.

Dazu müssen sie die Belastungsschwerpunkte und den Grad der Ausgleichsfunktion umliegender Flächen kennen. Dies soll die →**Klimaanalyse** leisten. Den Schwerpunkt stellt die zunehmende thermische Belastung dar. Die Erkenntnisse dienen für die Fortschreibung der Regionalpläne und der Flächennutzungspläne. Auch in die Bebauungspläne können Ergebnisse der Klimaanalyse einfließen.

Der Regionalverband Heilbronn-Franken will im Landschaftsrahmenplan den Belangen des Klimas Rechnung tragen. Unser Büro wurde beauftragt eine flächendeckende Klimaanalyse für den Regionalverband durchzuführen. Das Projekt wurde zudem durch KLIMOPASS-Fördermittel des Landes Baden-Württemberg unterstützt.

Die tiefer gelegenen Bereiche des Regionalverbands, insbesondere das Neckarbecken im Heilbronner Raum, aber auch die Flussniederungen von Kocher, Jagst und Tauber zählen zu den thermisch belastetsten Regionen in Deutschland. Nur entlang des Oberrheingrabens und punktuell am Hochrhein werden mehr →**Sommertage** beobachtet.

Durch das Relief ergeben sich aber auch Gunstfaktoren. In topographisch gegliedertem Gelände bilden sich bei windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen lokale →**Kaltluftabflüsse** aus. Diese sind in der Lage, thermische und lufthygienische Belastungen in den Abend- und Nachtstunden deutlich zu reduzieren.

Aus anthropozentrischer Sicht sind die Gunstfaktoren primär in thermisch belasteten Siedlungsbereichen zu erhalten und zu fördern. Die Sicherung klimabedeutsamer Flächen erfordert die Kenntnis, wo die belasteten Siedlungsbereiche liegen und welche Ausgleichsräume für eine Entlastung sorgen.

[1] *Die Glossareinträge werden bei ihrem ersten Auftreten referenziert.*

Dazu wurde eine flächendeckende Klimaanalyse für den Regionalverband angefertigt. Auf der Basis des digitalen Höhenmodells und der aktuellen Landnutzung (inklusiv der planfestgestellten Bauleitpläne) wurde mittels des mesoskaligen dreidimensionalen Klimamodells FITNAH ein hochsommerlicher Tag ohne übergeordneten Wind und ohne Bewölkung simuliert. Die räumliche →**Auflösung** betrug 50 m x 50 m.

Die Modellergebnisse umfassen die Strömungsverhältnisse, die Luft- und Bodentemperaturen, der Feuchteverteilung und Einstrahlung. Daraus lassen sich zum einen die nachmittägliche Hitzebelastung in Form der gefühlten Temperatur berechnen. Zum anderen wird die Ausprägung der nächtlichen →**urbanen Wärmeinsel** und der abend- und nächtlichen →**Strömungssysteme** ausgewiesen. Ferner geht die Häufigkeit der Belastung in Form der Zahl der Sommertage in die thermische Belastung ein. Aus der thermischen Belastung wird unter Berücksichtigung der Einwohnerdichte und der sensiblen Nutzungen (z.B. Krankenhäuser) die Betroffenheit (→**Vulnerabilität**) der Siedlungsräume (Wirkungsraum) berechnet.

Erhöhte thermische Belastungen findet man vor allem in den Siedlungen der Neckarniederungen (Landkreis Heilbronn), in den Unterläufen von Kocher und Jagst und im Taubertal. Aufgrund der Einwohnerdichte werden auch in den Mittelzentren Öhringen, Schwäbisch Hall, Künzelsau und Crailsheim Belastungsschwerpunkte ausgewiesen.

Die Kaltluftabflusssituation gestaltet sich eher differenziert. Es gibt zwar die großen Talsysteme Neckar, Kocher, Jagst und Tauber, diese sind jedoch überwiegend stark eingeschnitten und weisen in der Regel nur ein geringes Talgefälle auf, so dass dort meist keine besonders intensiven →**Bergwinde** auftreten. Intensivere Kaltluftströme treten in eher kleineren Talsystemen, z.B. von den Keuperwaldbergen im Süden des Regionalverbands auf. Häufig wird die abendliche Belüftung durch Hangabwinde bewerkstelligt, z.B. im Raum Heilbronn von den östlich gelegenen Weinbergen des Wartberg oder Schweinsberg.

In die Bewertung der Ausgleichsfunktion durch Kaltluftabflüsse geht die Betroffenheit des belüfteten Wirkungsraumes ein. Ein Kaltluftstrom, der eine thermisch belastete Siedlungsstruktur belüftet, hat demnach einen höheren Stellenwert als ein Kaltluftstrom, der eine thermisch gering belastete Siedlung erreicht. Auch wenn es zu einzelnen Fragestellungen der Bearbeitung VDI-Richtlinien und Verordnungen gibt, existieren bis heute keine Grenzwerte und Maßstäbe zur Bewertung bzw. zur planerischen Festlegung regional bedeutsamer Kaltluftströmungen. Die Simulationsergebnisse sind immer in Bezug zum jeweils zugrunde liegenden Untersuchungsraum zu interpretieren[2].

Die Ergebnisse liegen sowohl als einzelne Themenkarten wie auch als zusammenfassende Planungshinweiskarte vor. In dieser Karte sind die Siedlungsbereiche nach ihrer thermischen Betroffenheit und die Grün- und Freiflächen nach ihrer Relevanz für die abend- und nächtliche Ausgleichsfunktion eingefärbt. Aus regionalplanerischer Sicht sind die letzteren Flächen interessant, sofern sie kommunale Grenzen überschreiten. Die Stadtplanung kann zudem aus der thermischen Betroffenheit Maßnahmen ableiten, wo innerstädtisch eine stärkere Durchgrünung zielführender ist, als eine Nachverdichtung.

[2] *So ist beispielsweise ein Temperaturwert (z.B. 30 °C) in durchschnittlich wärmeren Gebieten anders zu interpretieren als in durchschnittlich kühleren Gebieten, in denen dieser Temperaturwert nie oder sehr selten erreicht wird.*

Bei der gewählten Auflösung ist eine detaillierte Darstellung in gebräuchlichen Maßstäben nicht mehr möglich. Die Ergebnisse werden deshalb als →**GIS**-Anwendung zur Verfügung gestellt, so dass sowohl die Planenden im Regionalverband als auch die Planenden in den Kommunen die Möglichkeit haben, mit diesen Daten weiter zu Arbeiten. Die Grafiken im vorliegenden Bericht vermitteln einen Überblick über die gesamte Raumschaft, sind aber für Detailbetrachtungen nicht geeignet.

Um den Handlungsbedarf zu unterstreichen, wurden auch die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die thermische Situation ausgewertet. Dazu wurden EURO-CORDEX-Daten für die nähere Zukunft (2031-2060) und die ferne Zukunft (2071-2100) mittels der Quader-Methode auf den Regionalverband verfeinert. Die →**Klimaprojektionen** wurden unter verschiedenen Treibhausgaskonzentrationen (→**RCP**4.5 bis RCP8.5) aufbereitet.

Aufgabe der Raumplanung ist es jetzt, die Flächenkonkurrenzen auch unter dem Gesichtspunkt lokalklimatischer Belange zu beurteilen. Dabei sind Querbeziehungen mit anderen Handlungsfeldern, z.B. dem Erhalt regionaler Grünzüge, einzubeziehen.

Die vorliegende Klimaanalyse stellt für den Regionalverband ein wesentliches Werkzeug dar, um eine fundierte Abwägung zu treffen, welche klimarelevanten Flächen unter Schutz zu stellen sind. Da die Ergebnisse auch den Kommunen zur Verfügung gestellt werden sollen, können diese ihre Flächennutzungsplanung oder Detailplanungen unter dem Aspekt einer nachhaltigen städtebaulichen Entwicklung optimieren.

1 Einführung und Aufgabenstellung

Der rechtskräftige Regionalplan Heilbronn-Franken hat als Zielhorizont das Jahr 2020. Der Landschaftsrahmenplan (LRP) des Regionalverbands Heilbronn-Franken stammt aus dem Jahr 1988 und kann heute nicht mehr als Arbeitsgrundlage herangezogen werden. Zur Vorbereitung der Fortschreibung des Regionalplans ist daher zunächst der Landschaftsrahmenplan fortzuschreiben. Flächenansprüche mit raumordnerischer Relevanz ergeben sich sowohl durch die wirtschaftliche Situation, die zu weiterem Flächenbedarf für Wohnen und Gewerbe, zum Ausbau von Verkehrsinfrastruktur und zu Änderungen der Agrarstruktur führt, als auch durch den Klimawandel, der Maßnahmen zum Klimaschutz sowie zur Klimaanpassung nach sich zieht. Im Hinblick auf diese aktuellen Erfordernisse soll der Landschaftsrahmenplan eine Beurteilungsgrundlage für die Sicherung wichtiger Landschaftsfunktionen und die konfliktminimierende Lenkung von flächenbezogenen Nutzungen durch die Regionalplanung schaffen.

Der Regionalverband Heilbronn-Franken möchte dem planerischen Vorsorgegedanken Rechnung tragen und die mögliche Bandbreite des Klimawandels im 21. Jahrhundert unter Berücksichtigung der Verwundbarkeit der Bevölkerung durch Hitze bei der Fortschreibung des Regionalplans einbeziehen.

Die Region Heilbronn-Franken ist mit 4.765 km² die flächenmäßig größte Region in Baden-Württemberg[3]. Die Bevölkerung im Regionalverband belief sich im Jahr 2021 auf 919.083 Einwohner. Mit einer Einwohnerdichte von 192 Einwohner pro km² gilt der Regionalverband im Baden-Württembergischen Vergleich als eher dünn besiedelt[1]. Jedoch sind insbesondere das Neckarbecken und auch das Taubertal thermisch vergleichsweise hoch belastet.

Durch den anthropogen bedingten Klimawandel wird im 21. Jahrhundert ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur erwartet (Kapitel 3.6, 4.2.5 und 5). Darüber hinaus wird ebenfalls die Anzahl der jährlichen Sommertage und der heißen Tage ansteigen (siehe Kapitel 6.2.4). Auch die Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzewellen wird durch einen Anstieg der mittleren Lufttemperatur in Zukunft zunehmen (Christidis, Jones & Stott (2015); Schär et al. (2004)). Die Vulnerabilität der europäischen und auch der deutschen Bevölkerung wurde bereits bei der Hitzewelle 2003 offensichtlich, als die hitzebedingte Mortalität europaweit mit mehreren zehntausend Fällen beziffert wurde (Robine et al. (2008)). Während Hitzewellen sind üblicherweise Kleinkinder, alte und gesundheitlich vorbelastete Menschen oder Menschen mit niedrigerem Sozialstatus, die in Städten leben (Basu (2009)) besonders betroffen. Das reduzierte Leistungsvermögen wirkt sich zudem negativ auf die Volkswirtschaft aus (Zander et al. (2015)).

Das thermische Empfinden des Menschen ist nicht nur von der Lufttemperatur abhängig. Dabei spielen neben dem Alter, der Gesundheit, der Bekleidung und der Tätigkeit die meteorologischen Größen Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und vor allem Strahlungsflüsse eine wichtige Rolle (siehe auch Kapitel 3.4). So empfindet der Mensch Hitze, kombiniert mit hoher Luftfeuchtigkeit, als körperlich belastender als trockene Hitze. Liegt die Lufttemperatur oberhalb der Hauttemperatur wird Wärme besonders über die Verdunstung von Schweiß abgegeben. Diese Verdunstungsrate sinkt mit steigender Luftfeuchtigkeit und nachlassender Windgeschwindigkeit. Die Thermoregulation des Körpers nimmt dadurch spürbar ab.

[3] https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/GebietFlaeche/01515020.tab?R=RV12, *zuletzt abgerufen am 30.09.2022*

Während die höchste gefühlte Temperatur in den Nachmittagsstunden auftritt (siehe 3.2), wird die →**Wärmebelastung** in den Nachtstunden hauptsächlich durch Überwärmung der Siedlungsbereiche gegenüber dem Umland (Stichwort „städtische Wärmeinsel“) bedingt (siehe auch Kapitel 3.2.4). Für den Temperaturausgleich können in den Abend- und Nachtstunden Kaltluftströmungen und →**Flurwinde** sorgen (siehe auch Kapitel 3.3). Die nächtliche Abkühlung ist sowohl für die menschliche Regenerierung (ausreichend tiefer Schlaf) wie auch für die Natur wichtig. Da die Bevölkerung nachts meist an ihren jeweiligen Wohnort gebunden ist, kommt der Zufuhr von Kaltluft in die Siedlungsräume ein besonders hoher Stellenwert für die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung zu. Ziel des Regionalplans ist daher die Sicherung der Kaltluftproduktionsflächen und der →**Luftleitbahnen**, die für die Durchlüftung insbesondere belasteter Siedlungsgebiete relevant sind. Thermische Belastung und Kaltluftabflüsse treten als lokalklimatische Besonderheiten insbesondere bei sommerlichen austauscharmen Wetterlagen mit geringem übergeordnetem Wind und geringer Bewölkung (sog. autochthone Wetterlagen) auf. Deshalb konzentriert sich diese Untersuchung auf eine autochthone hochsommerliche Wetterlage.

1.1 Vorgehen

Der Klimawandel birgt zahlreiche Risiken – Unwetter, Starkniederschläge, Hochwasser, Trockenperioden und Hitzewellen können erhebliche Schäden anrichten. Gewitter, Sturm, Hagel und Starkniederschläge treten sehr lokal auf und können nicht vorhergesagt werden. Trockenheit kann dagegen flächig auftreten. Für Maßnahmen bei Hochwasserereignissen stellt die LUBW Hochwassergefahrenkarten zur Verfügung.

Eine Vorbereitung auf diese Gefahren ist durch die Erarbeitung von Notfall- und Maßnahmenplänen, meist auf kommunaler Ebene, erforderlich. Unter dem Vorsorgegedanken, gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse auch bei erhöhter Wärmebelastung zu erhalten, sind Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen auf Ebene der regionalen und kommunalen Planung zielführend.

Die regionale Klimaanalyse hat das Ziel, die thermische Belastung in den Siedlungsgebieten, als auch die für Siedlungsgebiete durchlüftungsrelevanten Kaltluftströmungen mit ihren →**Kaltluftentstehung**sgebieten und →**Luftleitbahnen** zu lokalisieren und zu bewerten. Um die thermische Belastung und die Kaltluftströmung simulieren zu können, sind insbesondere möglichst aktuelle geographischen Daten, wie die Landnutzung und die Geländehöhen vonnöten (siehe Kapitel 4.1). Auf Basis dieser Daten werden →**numerische Modellierungen** durchgeführt, die die meteorologischen Größen wie Wind, Temperatur und Feuchte flächendeckend für einen heißen Sommertag für die Region berechnen (siehe Kapitel 4.2). Die Modellierung erfolgt mit dem dreidimensionalen mesoskaligen Klimamodell FITNAH. Die horizontale Auflösung beträgt 50 m.

Die Simulationen liefern die Strömungsverhältnisse und die thermischen Bedingungen innerhalb des Regionalverbands und darüber hinaus (siehe Kapitel 4.3). Aus den Daten wiederum lassen sich weitere Indikatoren und schließlich die sogenannten Gunst- und Ungunstfaktoren (siehe Kapitel 4.4) für das Lokalklima bestimmen.

Zu den Gunstfaktoren zählen die abend- und nächtlichen Strömungssysteme (Kaltluftabflüsse). Für die Bewertung der Kaltluftabflüsse ist das Wirkungsgefüge Kaltluftentstehung, Kaltluftleitung (Luftleitbahn) und Belüftungsfunktion maßgebend.

Bei den Ungunstfaktoren wird der thermische Wirkungskomplex betrachtet. Überwärmte Bereiche am Tag und in der Nacht können das Unwohlsein und den Stresslevel der Anwohner erhöhen. Daher werden die stark erwärmten Gebiete am Tag (über thermophysiologische Indizes) und in der Nacht (über die Ausbildung sogenannter städtischer Wärmeinseln) ermittelt und als Ungunstfaktoren in die Bewertung übernommen. Nicht nur die Intensität der thermischen Belastung, insbesondere auch ihre Häufigkeit wirkt belastend auf den Menschen. Die Häufigkeit der Wärmebelastung wurde mittels der vom Deutschen Wetterdienst entwickelten „Quader"-Methode (Früh, 2011) für die Vergangenheit (1971-2000) und die zwei zukünftige Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 berechnet (siehe Kapitel 4.2.5). Damit wurden, zur Berücksichtigung des Klimawandels, Daten aus einem Ensemble regionaler Klimamodelle, dem sogenannten ReKliEs-De (Hübener et al. 2017) und EURO-CORDEX Datensatz (Jacob et al. (2014)) von einer sehr groben räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km auf eine Auflösung von 50 m verfeinert.

Die meteorologischen Bedingungen werden dann in Bezug auf die Empfindlichkeit der Bevölkerung bewertet (siehe Kapitel 4.5.1). Die Empfindlichkeit der Bevölkerung ergibt sich aus der Einwohnerdichte und den klimasensiblen Nutzungen, wie z.B. Pflegeheime, Sanatorien, oder Krankenhäuser. Aus der Zusammenschau von Empfindlichkeit und thermischer Belastung ergibt sich die sogenannte Betroffenheit (siehe Kapitel 4.5.2).

Um nun die durchlüftungsrelevanten Strömungssysteme und die zugrundeliegenden Kaltluftproduktionsgebiete und ihre Luftleitbahnen zu ermitteln, müssen die Wirkungszusammenhänge zwischen →**Ausgleichs-** und →**Wirkraum** identifiziert werden (siehe Kapitel 4.5.3 und 4.5.4). Die Bewertung des Ausgleichsraums erfolgt über das Ausgleichspotential der Strömung: je höher die Summe der Betroffenheit der durchlüfteten Gebiete, desto höher wird die Relevanz des Ausgleichsaums gewertet.

1.2 Arbeitsprozess

Die Erstellung des Klimagutachtens wurde in zwei Leistungsphasen mit sechs Leistungspaketen gegliedert (Abbildung 1-1). Die Leistungsphase 1 umfasste die Beschaffung und Erhebung der Datengrundlage, die Modellierung, Validierung und Darstellung der Modellergebnisse. Die so ermittelte Datengrundlage wird – aufgrund der Ermangelung von Richtlinien und Verordnungen zur Bewertung klimatischer Belange – in Bezug auf den zugrundeliegenden Untersuchungsraum interpretiert und bewertet. Die Leistungsphase 2 umfasste die Ableitung von Planungshinweisen, der Erstellung der Planungshinweiskarte, sowie die Berichtserstellung und Datenübergabe.

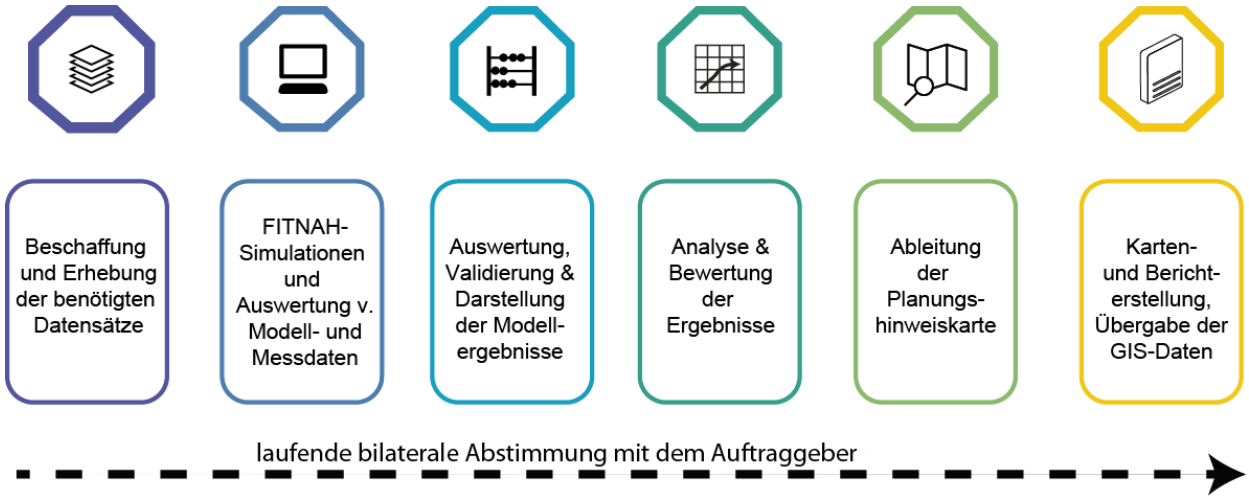


Abbildung 1-1: Arbeitsprozess zur Erstellung der regionalen Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken.

Der Arbeitsprozess wurde durch 6 Sitzungen mit dem Auftraggeber begleitet. Die Schwerpunkte lagen dabei auf der Beschaffung und Erhebung der Eingangsdaten sowie der iterativen Erarbeitung der Bewertungsmaßstäbe und der Planungshinweiskarte.

Zur politischen Partizipation wurde ein Arbeitskreis Klima gebildet. Dieser wurde aus Mitgliedern aller Fraktionen der Verbandsversammlung des Regionalverbands Heilbronn-Franken gebildet. Die prozessbegleitende Beteiligung im Arbeitskreis Klima erfolgt über mehrere Runden und wurde am 16. Mai 2022 mit dem Schwerpunkt der Information über die Zielsetzung und Vorgehensweise der Klimaanalyse gestartet. Am 26.07.2022 wurden neben den fachlichen Grundlagen auch erste Simulationsergebnisse präsentiert, sowie ein Ausblick auf die weiteren Schritte der Bewertung gegeben werden. In der Sitzung vom 15.11.2022 wurde die Bewertung der Ergebnisse und das methodische Vorgehen diskutiert. Bei einer letzten Sitzung am 31.01.2023 wurde die Zusammenschau der Ergebnisse präsentiert und die Leitlinien für die Ableitung von Planungshinweisen diskutiert.

Im Arbeitskreis Klima konnten Methodik und Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Ableitung von Planungshinweisen ausführlicher dargestellt werden, als dies in den Gremiensitzungen möglich ist. Zudem bestand in dem überschaubaren Teilnehmerkreis die Möglichkeit für Rückfragen und Diskussionen im Sinne einer Vorberatung für die abschließende Verabschiedung der Ergebnisse durch die Verbandsversammlung.

Das Projekt wurde bereits projektbegleitend in folgenden Sitzungen der Verbandsversammlung vorgestellt und der Projektstand und die Methodik präsentiert:

- 22.07.2022 in Eppingen,
- 09.12.2022 in Lauffen am Neckar,
- 24.03.2023 in Heilbronn.

1.3 Anwendungsbereich der Klimaanalyse

Die hochaufgelöste regionale Klimaanalyse stellt eine wesentliche Datengrundlage für die Fortschreibung der Regionalplanung für die Region Heilbronn-Franken dar (Maßstab 1:50.000). Die Auflösung der thematischen Fachkarten wird laut VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) den Maßstäben der Regionalplanung (1:50.000 bis 1:100.000), der vorbereitenden Bauleitplanung (Flächennutzungsplanung Maßstab 1:5.000 bis 1:25.000) und der verbindlichen Bauleitplanung (Bebauungsplanung, Maßstab 1:500 bis 1:1.000) gerecht.

Im Rahmen der Raumordnung kommt der Regionalplanung in diesem Zusammenhang in ihrer Mittler-, Beratungs- und Koordinationsfunktion zwischen Landes- und Kommunalebene eine besondere Bedeutung zu. Mittels ihrer Instrumente kann sie bindende Vorgaben für die kommunale Bauleitplanung machen und dabei die Raumnutzung auch über Gemarkungsgrenzen hinweg steuern, wodurch sie einen maßgeblichen Beitrag zur Klimaanpassung leisten kann[4].

Die erarbeiteten Ergebnisse können aber auch als Grundlage für Untersuchungen auf den nachgeordneten kommunalen Planungsebenen verwendet werden, wie z.B. in der Flächennutzungs- und Bauleitplanung oder detaillierten Fachplanungen. Diese bewegen sich in der Regel im Spannungsfeld zwischen großräumiger Raumordnungspolitik und den lokalen Bedürfnissen. Dies erfordert die Abwägung der Zielkonflikte.

Der Vorteil einer regionalen Klimaanalyse ist, dass sie gegenüber einer kleinräumigeren Analyse eine flächendeckend, methodisch einheitliche Datengrundlage liefert. Bei einer regionalen Betrachtung werden nicht nur jene Flächen ermittelt, die bedeutsam für das Lokalklima sind, auch der größere regionale Zusammenhang wird berücksichtigt und führt zur Identifizierung von lokal und regional bedeutsamen Flächen für das Klima. Das Schutzgut Klima kann so in der Planung gleichwertig berücksichtigt werden

Da dem Klima zukünftig ein größerer Stellenwert zukommt, werden im Einzelfall zusätzliche lokalklimatische Untersuchungen notwendig. Die Planungshinweiskarte der regionalen Klimaanalyse liefert Hinweise, in welchen Bereichen eine Bebauung unterbleiben oder nur unter Berücksichtigung klimatischer Belange erfolgen sollte. Inwieweit eine Planung als klimaverträglich anzusehen ist, d.h. Risiken minimiert oder vermieden werden, sollte durch Analysen mit einer höheren räumlichen Auflösung ermittelt werden, die die feinen Strukturen abbildet (z.B. Kaltluftstau an Straßen- und Bahndämmen oder die Ausrichtung von Gebäuden). Im Rahmen der verbindlichen Bauleitplanung/Projektplanung sind deshalb in klimasensiblen Bereichen →**mikroklimatische** Untersuchungen mit expliziter Berücksichtigung von Bebauung und Bewuchs empfehlenswert. Klimasensible Bereiche können Siedlungsbereiche mit mittlerer bis hoher thermischer Belastung sein, oder Ausgleichsräume mit mittlerer bis höchster Relevanz.

[4] *https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/24761, zuletzt besucht 20.02.2023*

2 Bedeutung von Klima in der räumlichen Planung

Das Klima ist ein Bestandteil des Ökosystems. Es wirkt unter anderem über Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit auf den →**Landschaftshaushalt**, die Artenvielfalt der Flora und Fauna und das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit des Menschen. Damit haben klimatische Bedingungen eine große Bedeutung für Wohn- und Arbeitsverhältnisse, Erholung und Tourismus, für die Landwirtschaft sowie für die Lebensräume von Tieren und Pflanzen.

Belastungen der Umwelt entstehen u.a. durch die Inanspruchnahme von Freiflächen, insbesondere für die Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung. Unversiegelte und naturnahe Flächen gehen verloren und der Material- und Energieverbrauch steigt. Deshalb ist der Vorsorgegrundsatz in der raumbezogenen Planung von großer Bedeutung. Die Herausforderung besteht darin, die auf den jeweiligen Planungsebenen angemessenen und ggf. auf den nachfolgenden Planungsebenen zu konkretisierenden Vorgaben zu verankern (hier: Schutz klimarelevanter Flächen). Dabei sind Wechselwirkungen mit anderen flächenrelevanten Nutzungen und Funktionen zu berücksichtigen und in Bezug zu anderen Belangen in die Abwägung einzustellen.

2.1 Europäische Raumplanung

Die Europäische Union (EU) unterstützt die Mitgliedsstaaten in der Raumordnung durch Instrumente und Initiativen oder wirkt durch Richtlinien auf die Planungs- bzw. Prüfmechanismen ein. Beispiele hierfür sind die Territoriale Agenda der EU[5], die Leipzig Charta[6] zur nachhaltigen europäischen Stadt, die FFH-Richtlinie[7] oder die Richtlinie über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme[8] (Strategische Umweltprüfung – SUP).

2.2 Raumplanung auf Bundesebene

Die Raumordnung in Deutschland wird durch die föderalistische Staatsordnung mit den drei Ebenen Bund, Länder und Gemeinden bestimmt. Dabei ist die Kompetenz- und Aufgabenverteilung rechtlich, organisatorisch und inhaltlich in den voneinander abgegrenzten Planungsebenen aufgeteilt.

Die Raumordnung des Bundes beschränkt sich mit wenigen Ausnahmen (z.B. vorbeugender Hochwasserschutz[9]) auf die Entwicklung von Leitbildern und Grundsätzen der Raumordnung.

Die im Raumordnungsgesetz (ROG) verankerten Grundsätze der Raumordnung sollen im Sinne der Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung durch Festlegungen in den Raumordnungsplänen (landesweiter Raumordnungsplan und Raumordnungspläne für die Teilräume der Länder) konkretisiert werden. Die wesentlichen Grundsätze zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel, die in der planerischen Abwägung zunächst gleichwertig neben den weiteren Belangen stehen, sind insbesondere (vgl. § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG i. d. F. v. 23.05.2017):

---

[5] *https://territorialagenda.eu/de/, zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

[6] *Z.B. https://www.bmuv.de/download/die-leipzig-charta, zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

[7] *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM:l28076, zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

[8] *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM:l28036, zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

[9] *Am 1. September 2021 ist die Verordnung über die Raumordnung im Bund für einen länderübergreifenden Hochwasserschutz in Kraft getreten.*

- Sicherung klimatisch bedeutsamer Freiräume bzw. Wiederherstellung ihrer klimatischen Funktionen;
- Sicherung von Flächen zum vorbeugenden Hochwasserschutz, zur Verbesserung der Siedlungsstruktur durch großräumig übergreifende Freiräume und Freiraumschutz.

Laut § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG i. d. F. v. 23.05.2017 sind sowohl Maßnahmen zu treffen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch Maßnahmen, die zur Klimaanpassung dienen. Die Maßnahmen sollen dabei die räumlichen Voraussetzungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien, für eine sparsame Energienutzung sowie für den Erhalt und die Entwicklung natürlicher Senken für klimaschädliche Stoffe und für die Einlagerung dieser Stoffe schaffen. Die Umsetzung des Grundsatzes erfolgt durch Instrumente der Raumordnung zur Gestaltung von CO_2-armen und energieeffizienten Raumstrukturen.

In den Raumordnungsplänen sind die Grundsätze der Raumordnung des Bundes über Festlegungen als Ziele und Grundsätze der Raumordnung zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums, insbesondere zu den Nutzungen und Funktionen des Raums, zu treffen. Die räumliche Konkretisierung durch Gebietsfestlegung erfolgt als →**Vorrang-** bzw. →**Vorbehaltsgebiete**.

Vorranggebiete (Ziel der Raumordnung) sind Gebiete, die für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen vorgesehen sind. Andere raumbedeutsame Funktionen und Nutzungen in diesem Gebiet sind ausgeschlossen, soweit diese mit den vorrangigen Funktionen oder Nutzungen nicht vereinbar sind.

Vorbehaltsgebiete (Grundsatz der Raumordnung) sind Gebiete, in denen bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Funktionen und Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen ist.

Bei der Aufstellung der Raumordnungspläne ist eine Umweltprüfung durchzuführen (vgl. § 8 ROG). In dieser sollen die erheblichen Auswirkungen einer Planung auf die Umwelt (u.a. Festlegungen zur Anpassung an den Klimawandel/Hochwasserschutz) frühzeitig ermittelt, beschrieben und bewertet werden.

2.3 Raumplanung auf Landesebene

Das Landesplanungsgesetz des Landes Baden-Württemberg (LplG i. d. F. v. 10.07.2003) enthält Regelungen, die das Raumordnungsgesetz ergänzen. Zudem wurde 2002 der Landesentwicklungsplan (LEP) für Baden-Württemberg beschlossen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2002)).

Der LEP fasst die Ziele der Landesregierung Baden-Württembergs für die Entwicklung des Landes zusammen. Als beschlossene Verordnung ist der LEP verbindlich für die Regionalplanung, die kommunale Bauleitplanung und fachliche Einzelplanungen. Im LEP wird unterschieden zwischen Zielen und Grundsätzen, welche jeweils bindend für die kommunale Bauleitplanung und die Fachplanung sind. Ziele sind dabei festgesetzte Vorgaben, die zwingend in den jeweiligen Planungen einzuhalten sind. Grundsätze sind allgemein formulierte Aussagen. Sie sind in der Abwägung und Ermessensausübung in der Planung zu berücksichtigen.

Die wichtigsten Ziele des LEP sind der Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen, die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Landes als Wirtschafts- und Wohnstandort, der Erhalt der

Primärfunktionen von Land- und Forstwirtschaft sowie die Offenhaltung angemessener Gestaltungsmöglichkeiten für kommende Generationen.

Unter anderem weist der LEP verschiedene Raumkategorien aus wie Verdichtungsräume und Randzonen um Verdichtungsräume, Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum und Ländlicher Raum. Auch werden Ober- und Mittelzentren, Entwicklungsachsen und Räume mit besonderen Entwicklungsaufgaben definiert. Auch mit Blick auf das lokale Klima lenkt der LEP die Nutzung und den Schutz von Freiräumen. Unter Punkt 1.9 wird der Grundsatz formuliert, dass das Naturgut Klima zu bewahren und die Landschaft in ihrer Vielfalt und Eigenart zu schützen und weiterzuentwickeln ist (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2002)). Ferner sind bedeutsame Freiräume zu sichern und zu einen Freiraumverbund zu entwickeln.

2.4 Regionalplanung

Die im Landesentwicklungsplan (LEP) festgelegte Planung für das Land Baden-Württemberg wird gemäß Landesplanungsgesetz von den Trägern der Regionalplanung weiter konkretisiert. Im Fall der Region Heilbronn-Franken obliegt diese Aufgabe dem Regionalverband Heilbronn-Franken.

Im Regionalplan wird die räumliche Entwicklung und Ordnung in Form von Zielen und Grundsätzen einer Region analog zum LEP festgelegt. Insbesondere werden Festlegungen zur Entwicklung der Siedlungsstruktur, Freiraumstruktur und Infrastruktur getroffen.

Für die Freiraumstruktur beinhaltet der Regionalplan beispielsweise die Ausweisung verschiedener Gebiete wie Vorranggebiete für Naturschutz oder Landschaftspflege. Auch werden regionale Grünzüge ausgewiesen. Diese Flächen sollen von einer Bebauung freigehalten werden und zur Sicherung von Freiflächen dienen.

2.5 Kommunale Planung

Die kommunale Planungshoheit umfasst das Recht der Gebietskörperschaften, die jeweilige städtebauliche Entwicklung im Rahmen der Bauleitplanung eigenverantwortlich zu gestalten. Die Bauleitplanung ist zweistufig aufgebaut: Für das gesamte Gemeindegebiet stellt der Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan) die sich aus der beabsichtigten städtebaulichen Entwicklung ergebende Art der Bodennutzung in den Grundzügen dar. Der Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan) konkretisiert diese für einzelne Teile des Gemeindegebietes. Die Bauleitpläne sind den Zielen der Raumordnung anzupassen.

Das Baugesetzbuch (BauGB, i. d. F. v. 03.11.2017) sieht zur Berücksichtigung von Klimaschutz und Klimaanpassung vor, dass

- bei der Aufstellung von Bauleitplänen insbesondere der Naturhaushalt, Wasser, Luft, Boden, Klima, der Mensch und seine Gesundheit sowie die Bevölkerung insgesamt zu berücksichtigen sind (§ 1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB);
- den Erfordernissen des Klimaschutzes sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden soll. Der Grundsatz nach Satz 1 ist in der Abwägung nach § 1 Absatz 7 zu berücksichtigen (§ 1a Abs. 5 BauGB);

- im Flächennutzungsplan Flächen einer Gemeinde dargestellt werden können, die dem Klimaschutz oder der Klimaanpassung dienen (§ 5 Abs. 2 Nr. 2 BauGB).

Auch in den Bebauungsplänen sind verschiedene Festsetzungen möglich, die dem Klimaschutz und der Anpassung an den Klimawandel dienen (z.B. die Auszeichnung von Flächen für den Naturschutz, § 9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB). Hierbei zeichnen sich zahlreiche Synergien mit dem Hochwasserschutz, dem Schutz von landwirtschaftlich genutzten Flächen, dem Schutz der Biodiversität sowie dem menschlichen Wohlergehen ab.

Während die Luftqualität in europäischen Richtlinien (z.B. EU-Richtlinie 2008/50/EG (2008)) und im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, i. d. F. v. 20.07.2022) gesetzlich geregelt und durch die Festlegung von Grenzwerten für Emissionen und Immissionen konkretisiert ist, gibt es bislang keine rechtlich verbindlichen Grenzwerte zur Beurteilung der thermischen sowie human-biometeorologischen Bedingungen. Einzig die Richtlinie für Kur- und Erholungsorte (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010)) behandelt die Anforderungen an Lärm, Luftgüte und die human-biometeorologischen Bedingungen für die Prädikatisierung von Luftkurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen.

Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung wurden gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022) herangezogen. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) stellt einen Leitfaden zur Untersuchung der Entstehung und Wirkung der Kaltluft dar. Sie bildet damit eine wichtige Grundlage für die regionale Klimaanalyse. Zur Bewertung der thermischen und Situation und zur Erarbeitung von Planungshinweisen wurde die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) zugrunde gelegt.

3 Allgemeine meteorologische Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die Grundlagen, um die meteorologischen Zusammenhänge besser nachvollziehen zu können. Die nachfolgenden Abschnitte definieren verschiedene meteorologische Fachbegriffe und Zusammenhänge, die in der regionalen Klimaanalyse verwendet werden.

3.1 Mesoklima und Mikroklima

Das Klima kann auf verschiedenen räumlichen Skalen betrachtet werden. In der Meteorologie wird häufig zwischen drei Skalen unterschieden: die Makroskala, die Mesoskala und die Mikroskala (z.B. Orlanski (1975)). Mit Blick auf das Klima beschäftigt sich die Makroskala mit dem Klima auf globaler Ebene. Hier werden räumliche Zusammenhänge in der Größenordnung von mehreren 1.000 km betrachtet. Es wird zum Beispiel unterschieden zwischen tropischem, gemäßigtem oder kaltem Klima.

Die Mesoskala und das damit verbundene →**Mesoklima** fällt in den Bereich des sich regional ausprägenden Klimas (z.B. Geiger, Aron & Todhunter (1995)). Dabei werden die regionalen klimatischen Zusammenhänge in der Größenordnung zwischen wenigen Kilometern bis etwa 2.000 km betrachtet. Dies fällt somit in den Betrachtungsrahmen der regionalen Klimaanalyse Heilbronn-Franken. Das Mesoklima wird wesentlich durch das Gelände (Berge, Täler, Hangneigung) und die großräumigen Oberflächenbeschaffenheiten (Landnutzung) bestimmt. Ein Beispiel für mesoskalige Phänomene ist die städtische Wärmeinsel – ein Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland (siehe Kapitel 3.2.4).

Das Mikroklima beschreibt die meteorologischen bzw. klimatischen Verhältnisse auf kleinstem Raum. Für die regionale Klimaanalyse wird das Mikroklima auf räumlichen Skalen zwischen wenigen Metern bis hin zu etwa 1 km betrachtet. Das Mikroklima wird wesentlich durch die Oberflächeneigenschaften bestimmt (z.B. Rotach & Calanca (2003)). Mit Pflanzen bedeckte Flächen wie Felder, Wiesen, Wälder oder Parks speichern Wärme deutlich anders als versiegelte Oberflächen wie Straßen oder Bauwerke. Die Wärmeaufnahme und -abgabe, aber auch die vorhandene Feuchtigkeit, bestimmen die Energieabgabe und somit die Temperatur der Atmosphäre auf kleiner Skala. Auch der Einfluss auf den Wind ist abhängig von der lokalen Nutzung der Flächen. Bauwerke sind Hindernisse, die den Wind umlenken oder abbremsen können. Bäume können hingegen vom Wind teilweise durchströmt werden. Sie reduzieren aber ebenfalls die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten. Felder und Wiesen haben nur einen geringen Einfluss auf das Strömungsgeschehen. Durch die unterschiedliche Ausbildung von Temperatur, Feuchte und Wind in verschiedenen Nutzungen spricht man schließlich von unterschiedlichen Mikroklimaten.

3.2 Thermische Komponente des Klimas

3.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist die Temperatur der Luft und wird entsprechend nationaler und internationaler Richtlinien typischerweise im Schatten in 2 m Höhe gemessen (Deutscher Wetterdienst (2020)). Die Messung erfolgt dabei in sogenannten Wetterhütten, um Messungen an verschiedenen Orten vergleichbar zu machen.

Die Lufttemperatur in 2 m Höhe, auch bodennahe Lufttemperatur genannt, weist in Mitteleuropa einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang auf. Sie ist mit der Energiebilanz des Erdbodens

eng verknüpft. Daher spielen die Landnutzung und die Topographie (Geländehöhe und Ausrichtung zur Sonne) eine wichtige Rolle.

Durch den Wind und die Turbulenz in der Atmosphäre wird die Luft durchmischt. Dadurch nimmt der Einfluss der Oberflächen mit zunehmender Höhe ab. Zudem sinkt die Lufttemperatur im Mittel um -0,65 °C je 100 m Höhe. Dieser Wert ist ein globaler Mittelwert.

Abhängig von der Einstrahlung oder der nächtlichen Abkühlung bilden sich unterschiedliche thermische Schichtungen aus. Labile Schichtung, d.h. eine starke Temperaturabnahme mit der Höhe, bildet sich tagsüber bei hoher Einstrahlung aus. Stabile Schichtung mit einer Temperaturzunahme mit der Höhe (Inversion) findet man dagegen in wolkenarmen und windschwachen Nächten.

3.2.2 Klimatologische Kenntage

Klimatologische Kenntage sind besonders warme oder kalte Tage. Sie sind definiert als Tage, an denen das Tagesmaximum oder das Tagesminimum einen festgelegten Schwellwert über- oder unterschreitet. Die klimatologischen Kenntage werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) wie in Tabelle 3 2 aufgeführt definiert.

Tabelle 3-1 Definition von klimatologischen Kenntagen nach DWD[10].

Bezeichnung	**Kriterium**
Heißer Tag	Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C
Sommertag	Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C
Frosttag	Minimum der Lufttemperatur < 0 °C
Eistag	Maximum der Lufttemperatur < 0 °C

3.2.3 Energiebilanz und anthropogener Wärmestrom

Die Lufttemperatur nahe dem Boden wird wesentlich durch die Energiebilanz der Bodenoberfläche bestimmt. Die Energiebilanz betrachtet alle Zu- und Abflüsse von Energie an einer Oberfläche (z.B. Geiger, Aron & Todhunter (1995)). Die einzelnen Komponenten der Energiebilanz sind der Energiefluss durch Strahlung[11] (Strahlungsbilanz), der Energiefluss durch fühlbare Wärme (sensibler Wärmestrom), der Energiefluss durch Verdunstung und Kondensation (→**latenter Wärmestrom**) und der Energiefluss in bzw. aus dem Boden (Bodenwärmestrom). Wird neben der Erdoberfläche die gesamte Atmosphäre mit in die Betrachtung einbezogen, kommen weitere Energieflüsse zum Tragen wie die Absorption, Reflektion und Abstrahlung an Wolken und Luftpartikeln. Dies ist in Abbildung 3-1 skizziert.

Der Energiefluss durch Strahlungsströme wird meist in vier Komponenten unterteilt: einfallende kurzwellige Strahlung, ausfallende kurzwellige Strahlung, einfallende langwellige Strahlung und ausfallende langwellige Strahlung. Die einfallende kurzwellige Strahlung entspricht im Wesentlichen dem sichtbaren Teil des Sonnenlichts. Sie ist die Hauptenergiequelle für die Strahlungs- und Energiebilanz. An der Erdoberfläche wird ein Teil dieser Strahlung reflektiert. Dies ist die ausfallende kurzwellige Strahlung. Da die Erdoberfläche eine Temperatur besitzt, strahlt sie

[10] https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, *zuletzt abgerufen am 04.10.2022.*

[11] *Als Strahlung wird hier die langwellige Infrarotstrahlung und kurzwellige sichtbare Strahlung („sichtbares Licht") bezeichnet.*

zudem langwellige Strahlung, d.h. Infrarotstrahlung, aus. Dies ist die langwellige Ausstrahlung in der Strahlungsbilanz. Da auch die Gase der Atmosphäre eine Temperatur besitzen (die Lufttemperatur) strahlen auch diese eine langwellige Strahlung ab. An der Erdoberfläche taucht dieser Teil in der →**langwelligen Gegenstrahlung** in der Strahlungsbilanz auf.

Am Tag ist die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche positiv. Die Energie aus der Strahlung fließt dann in die jeweiligen Komponenten der Energiebilanz. Ein Teil wird im Erdboden über den Bodenwärmestrom gespeichert. Ein weiterer Teil wird in Form von fühlbarer Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Steht Wasser für die Verdunstung zur Verfügung, wird Wärme auch über den latenten Wärmestrom vom Erdboden weg transportiert.

Beim latenten Wärmestrom spielt die Verdunstung (Evapotranspiration) eine wichtige Rolle. Pflanzen regulieren über die Evapotranspiration ihren Wärmehaushalt. Da dies hauptsächlich über die Verdunstung von Wasser möglich ist, muss ausreichend Wasser für die Pflanzen zur Verfügung stehen. Ist kein oder zu wenig Wasser vorhanden, versiegt die Evapotranspiration. Ein großer Teil der Wärme am Erdboden kann dann nicht mehr durch den latenten Wärmestrom abgeführt werden. Diese Wärme wird größtenteils über den fühlbaren Wärmestrom abgegeben und führt zu einer direkten Erhöhung der Lufttemperatur. Im Zuge des Klimawandels mit zunehmenden Trockenzeiten im Sommer werden diese Situationen immer häufiger auftreten. Da Bäume überwiegend über ihren Schattenwurf und untergeordnet über Verdunstung kühlen, sind diese auch in trockenen Sommer von großer Relevanz. Die Oberflächentemperatur einer Rasenfläche erhöht sich jedoch mit abnehmender Bodenfeuchte um mehr als 10 °C.

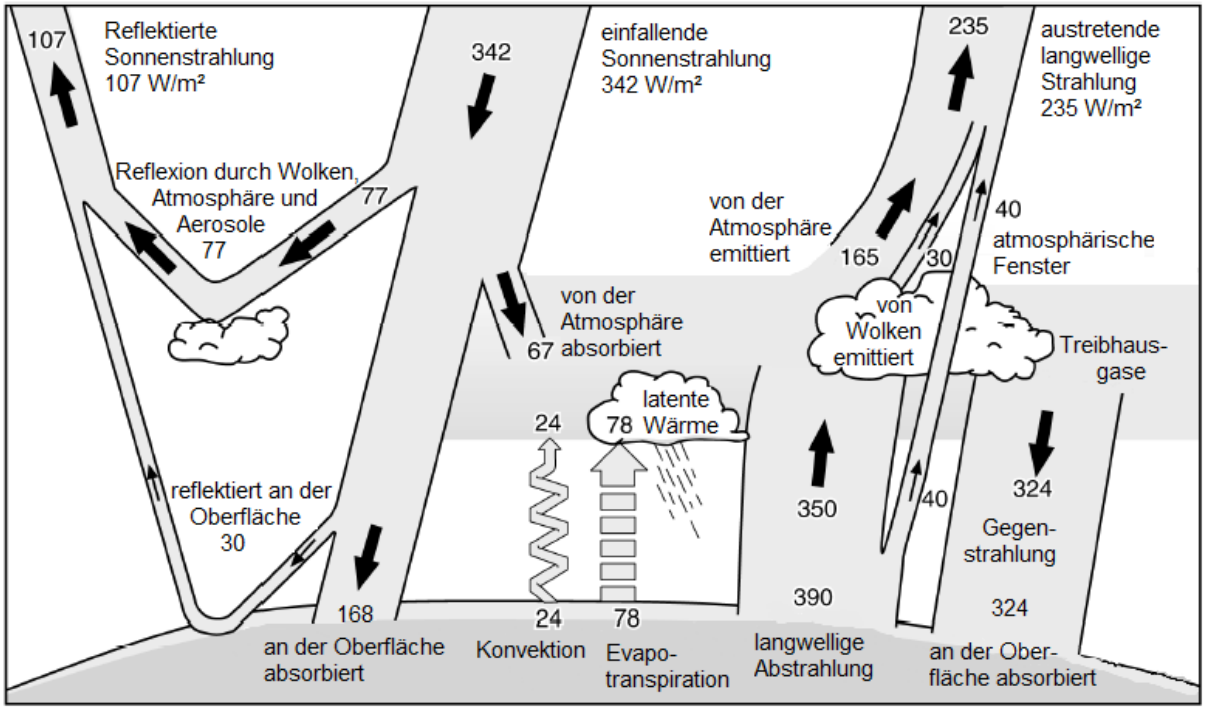


Abbildung 3-1: Geschätzte mittlere jährliche und globale Energiebilanz der Erde (Werte in W/m², nach →IPCC (2007) und ZAMG[12]).

[12] https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/energiebilanz-der-erde, *zuletzt abgerufen am 14.10.2022.*

In urbanen Räumen wird die Energiebilanz durch eine zusätzliche Komponente erweitert: den anthropogenen Wärmestrom. Der anthropogene Wärmestrom fasst die Energieströme zusammen, die durch den Menschen verursacht werden. Hierzu zählt zum Beispiel die Abwärme aus Industrieanlagen oder aus häuslichen Heizungen und Klimaanalagen. Auch der Verkehr ist eine Quelle anthropogener Abwärme.

Der zusätzliche Wärmeeintrag durch den anthropogenen Wärmestrom führt mit dazu, dass die Lufttemperatur in Städten (hoher anthropogener Wärmestrom) deutlich höher sein kann als im ländlichen Umland. Dies kann die Ausprägung der urbanen Wärmeinsel verstärken.

3.2.4 Urbane Wärmeinsel

Im städtischen Raum wird das Klima stark durch den Menschen geprägt. Die geänderte Nutzung der Erdoberfläche, insbesondere durch den hohen Anteil an versiegelten Flächen, führen zu einem signifikanten Unterschied im Energiehaushalt der Oberflächen im Vergleich zum ländlichen Umland. Versiegelte Straßen und Hauswände heizen sich am Tage deutlich stärker auf als Wiesenflächen oder Felder. In der Nacht wird diese Wärme über den fühlbaren Wärmestrom an die Umgebung abgegeben.

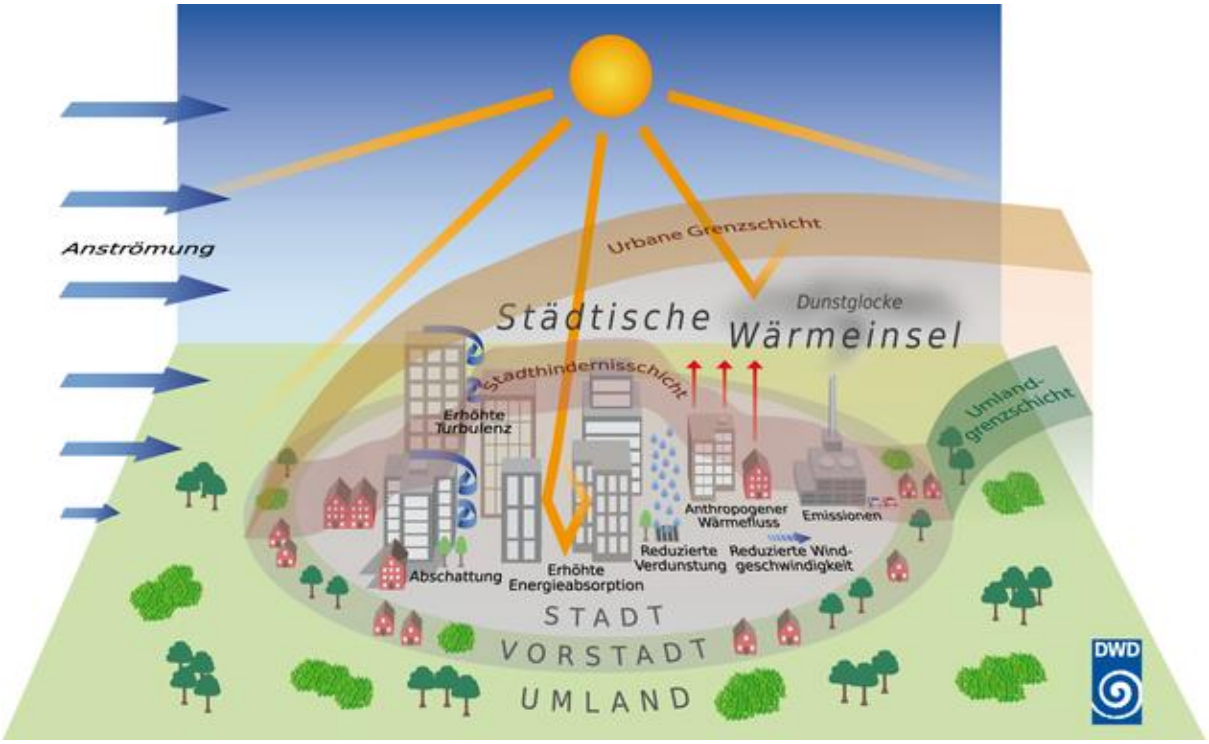


Abbildung 3-2: Merkmale des →Stadtklimas, die zur Entstehung der urbanen Wärmeinsel beitragen (Grafik: Deutscher Wetterdienst).

Da in Städten weniger Vegetation und Wasserflächen vorhanden sind als im Umland, ist auch der latente Wärmestrom geringer. Somit wird ein deutlich größerer Teil der Wärme über den fühlbaren Wärmestrom abtransportiert als im Umland. Die Folgen sind ein deutlich erhöhter →**Fühlbarer Wärmestrom** und damit deutlich höhere Lufttemperaturen in der Stadt als im Umland.

Verstärkt wird dieser Effekt durch enge Bebauung. Dichte Bebauung reduziert die Durchlüftung und damit auch den Abtransport von Wärme. Auch die nächtliche Ausstrahlung wird dadurch merklich reduziert. Neben diesen Effekten kommt noch der Beitrag durch den anthropogenen

Wärmestrom hinzu. Die Wärmeabgabe durch Industrie, Heizung, Klimaanlagen und Verkehr erwärmt die Luft in der Stadt noch zusätzlich.

Durch die Kombination all dieser Effekte ist zu beobachten, dass die Lufttemperatur innerhalb der Stadt insbesondere in den Abend- und Nachtstunden höher ist als im ländlichen Umland. Dieses Phänomen wird als urbane Wärmeinsel bezeichnet. Der Effekt beträgt häufig einige Grad Celsius und kann in Ausnahmefällen bis über 10 K betragen (Oke (1981)). Das Maximum wird in wolkenfreien, windschwachen Strahlungsnächten erreicht (Abbildung 3-4).

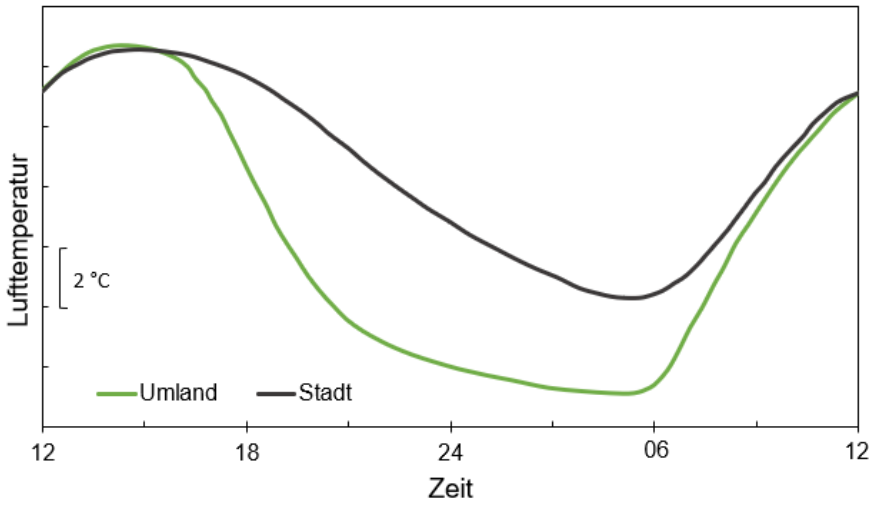


Abbildung 3-3: Typischer Tagesgang der Lufttemperatur in der Stadt und im Umland bei sommerlichem Strahlungswetter (nach Oke, Zeuner & Jauregui (1992)).

3.3 Dynamische Komponente des Klimas: lokale Strömungssysteme

Neben der thermischen Komponente spielt auch die dynamische Komponente, d.h. der Luftaustauch, eine wichtige Rolle für das Klima. Die dynamische Komponente ergibt sich aus dem Vorhandensein von Strömungssystemen, die durch räumliche Druckunterschiede entstehen. Die Strömung versucht diese Druckunterschiede auszugleichen und einen räumlich einheitlichen Zustand herzustellen. Die Druckunterschiede wiederum entstehen durch räumlich unterschiedliche Lufttemperaturen.

Im Folgenden wird auf solche Windsysteme eingegangen, die für die regionale Klimaanalyse von Bedeutung sind.

3.3.1 Kaltluftabfluss

Als Kaltluftabfluss wird das Abfließen kühlerer Luft entlang eines Hangs oder Tals bezeichnet. In der Nacht kühlen sich Oberflächen infolge der langwelligen Ausstrahlung ab, da der Wärmeeintrag durch die kurzwellige Strahlung der Sonne fehlt. Dadurch kühlt sich auch die bodennahe Luft, die mit diesen Oberflächen in Berührung kommt, ab.

Kalte Luft besitzt eine höhere Dichte als warme Luft. In ebenem Gelände verharrt die abgekühlte Luft vor Ort und kühlt weiter ab. In geneigtem Gelände setzt sich die Kaltluft entlang des Gefälles in Bewegung; es entsteht ein Kaltluftabfluss. Dieser nimmt durch Einmischung von Umgebungsluft mit zunehmender Laufzeit an Mächtigkeit zu (siehe Abbildung 3-4). Die Kaltluft weist typischerweise ein Vertikalprofil der Strömungsgeschwindigkeit auf, bei dem das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit in einer Höhe von ca. einem Drittel der Kaltluftmächtigkeit liegt. Erreicht

die Kaltluft eine Ebene, so geht der Antrieb verloren. Durch Reibung an der Oberfläche nimmt die Strömungsgeschwindigkeit bodennah ab, so dass sich das Strömungsmaximum in größere Höhen verlagert.

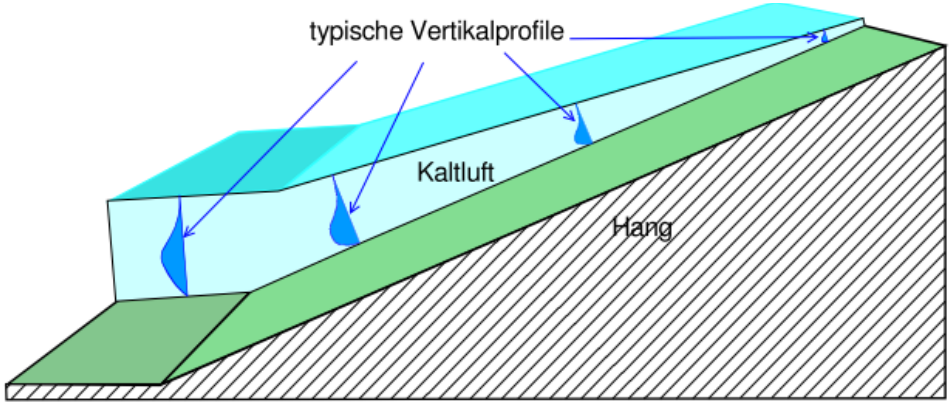


Abbildung 3-4: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses. Zusätzlich dargestellt ist das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit an verschiedenen Punkten innerhalb der Kaltluft.

Eine effiziente Abkühlung setzt windschwache und wolkenarme Verhältnisse voraus – eine sogenannte autochthone Wetterlage. Diese ist gekennzeichnet durch eine hohe solare Einstrahlung in den Tagstunden und eine hohe effektive Ausstrahlung nachts.

Der Kaltluftabfluss entwickelt sich, sobald die Oberflächen anfangen sich abzukühlen. Dies ist etwa zur Zeit des Sonnenuntergangs der Fall.

Kaltluftabflüsse und Kaltluftströmungssysteme (die Kombination verschiedener Kaltluftabflüsse) können sich bei autochthonen Wetterlagen das gesamte Jahr über in ähnlicher räumlicher Struktur ausbilden. Die Intensität ist mit dem Tagesgang der Lufttemperatur korreliert, so dass vor allem im Frühjahr mit den stärksten Abflüssen, im Winter mit den geringsten Abflüssen zu rechnen ist.

Auch die Funktion des Kaltluftabflusses im Siedlungsraum kann je nach Jahreszeit stark differieren. Während im Sommer der Wärmestress reduziert wird, kann im Winter der Kältestress durch Kaltluft zunehmen (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)).

Die typische Strömungsgeschwindigkeit von Kaltluftabflüssen beträgt zwischen 0,5 m/s und 3 m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit hängt vor allem von der Lufttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung sowie von der Hangneigung und der Oberflächen→**rauigkeit** ab. In bebauten Gebieten oder Wäldern kommt es durch die größere Oberflächenrauigkeit zu einer Erhöhung der Turbulenz und damit zu einer Minderung der Windgeschwindigkeit. Dies wiederum bedeutet schlechtere Durchlüftungsverhältnisse.

In orographisch gegliedertem Gelände fließt die Kaltluft von den Hängen in Tobeln und Tälern zusammen. Aus den meist geringmächtigen Hangabwinden können so vertikal mächtige Bergwinde (bzw. „Talabwinde“) entstehen. Dieses Strömungsgeschehen wird unter dem Begriff „Kaltluftströmungssystem“ zusammengefasst. Aufgrund der Beiträge vieler kaltluftproduzierender Flächen können solche Systeme eine bedeutende vertikale Mächtigkeit erlangen. Diese Systeme bleiben nach ihrer Bildung am Abend bzw. der frühen Nacht im weiteren Laufe der Nacht relativ stabil, d.h. sie ändern sich zeitlich nur unwesentlich.

Sind die Strömungssysteme eher schwach ausgeprägt, so kühlt die bodennahe Luft stärker ab, da eine turbulente Durchmischung fehlt. Die Stärke der Inversion nimmt zu, der vertikale Austausch infolge reduzierter Turbulenz ab, was zu einer Entkoppelung der Strömung führen kann. Während es bodennah dann nahezu windstill werden kann, findet der Kaltluftabfluss in größerer Höhe statt.

In Städten kommt eine bodennahe Kaltluftströmung mit geringer Kaltluftmächtigkeit oftmals nach wenigen hundert Metern zum Erliegen, da die Bebauung die Luftströmung blockiert. Weist die Kaltluft hingegen eine ausreichende Mächtigkeit auf, überströmt diese die bebauten Gebiete. Die bodennahe Belüftung geschieht in diesen Fällen durch das Herabmischen der Kaltluft aus dem Überdachniveau. Die Stärke der Belüftung ist dann abhängig von der Bebauungsdichte und der Stärke der Strömung im Überdachniveau. Je dichter die Bebauung ausfällt, desto weniger Kaltluft kann heruntergemischt werden, was eine schlechte Durchlüftung verursacht (Abbildung 3-5). Gerade im bebauten Gebieten ist daher sowohl die Betrachtung im bodennahen als auch im Überdachniveau notwendig, um die Durchlüftungsfunktion zu bestimmen.

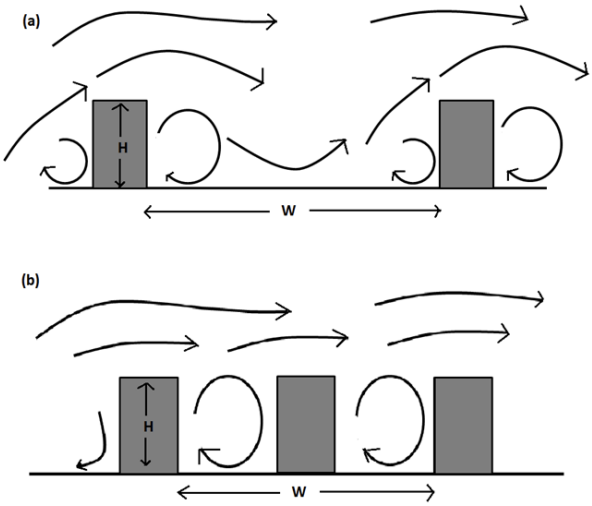


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Überströmung von Gebäuden. Oben: lockere Bebauung; Kaltluft aus dem Überdachniveau kann herabgemischt werden. Unten: dichte Bebauung; Kaltluft aus dem Überdachniveau bleibt über den Gebäuden (Oke (1988)).

Kaltluftströmungen treten in der Regel nur an bzw. in der Nähe von Hängen oder Bergen auf. In Einzelfällen können aber auch Kaltluftströmungen in ebenem Gelände auftreten. Ursache für Kaltluftströmungen in der Ebene können vier Mechanismen sein:

- ein in die Ebene hineinreichendes Kaltluftströmungssystem.
- ein übergeordnetes Regionalwindsystem, z.B. entlang des Oberrheingrabens, welches sich ebenfalls bevorzugt bei →**autochthonen Wetterlagen** ausbildet.
- bei geringer Schichtdicke der Kaltluft kann eine darüber liegende Strömung die Kaltluft in Bewegung setzen und zu einer Kaltluftströmung führen.
- stark ausgeprägte horizontale Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland (in diesem Fall spricht man vom sogenannten „Flurwind“, siehe Kapitel 3.3.4).

- stark ausgeprägte horizontale Temperaturunterschiede zwischen ausgedehnten Gewässern und dem Umland (in diesem Fall spricht man vom sogenannten „Landwind“; im Gebiet des Regionalverbands Heilbronn-Franken nicht von Bedeutung).

3.3.2 Kaltluftproduktion

Die Bildung bodennaher Kaltluft wird durch die Abkühlung der Erdoberfläche aufgrund einer negativen Energiebilanz verursacht. In der Regel geschieht dies durch den fehlenden Energieeintrag durch die Sonne, d.h. nach Sonnenuntergang. Zunächst kühlt sich die Oberfläche ab und infolgedessen die darüber befindliche Luftschicht.

Die Kaltluftproduktion hängt wesentlich von der Landnutzung (Bewuchs und Bebauung), den Oberflächeneigenschaften (Bodenwärmestrom, Wärmespeichervermögen, Bodenfeuchte), der Topographie und der Wetterlage ab. Diese Parameter bestimmen die Abkühlungsraten der Luft (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)). Der Einfluss der Vegetation auf die Kaltluftproduktion ist abhängig von der Art, Höhe und Dichte der Vegetation sowie von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche. So hat beispielsweise eine Streuobstwiese durch die Blattflächen der einzelnen Bäume ein großes Abkühlungsvermögen und die entstehende Kaltluft kann nahezu ungehindert abfließen. In einem dichten Baumbestand strahlt nur der obere Kronenraum ab, die abgekühlte Luft sinkt in den Bestand und kann dort eher schlecht abfließen. Wird die Exposition durch einen dichten Baumbestand reduziert, kann weniger Wärme vom Boden abgestrahlt werden. Die Kaltluftproduktion ist dadurch vermindert.

Bei den Bodenparametern sind die Wärmespeicherung und die Wärmeleitfähigkeit entscheidend für die Produktion von Kaltluft. Je mehr Wärme gespeichert wird, desto länger braucht der Boden zum Abkühlen. Entsprechend schlecht ist die Kaltluftproduktion. Die Wärmespeicherung und Wärmeleitfähigkeit eines Bodens bestimmen sich im Wesentlichen aus dessen Dichte, dem Porenvolumen sowie dem Luft- und Wassergehalt. Daneben sind die Speicherkapazität und Leitfähigkeit der Bodenmaterialien maßgebend.

Die höchsten →**Kaltluftproduktionsraten** können über unversiegelten Freiflächen gemessen werden (Ackerland, Grünland, Streuobstwiesen). In Wäldern verringert der Baumbestand nachts die Abkühlung und den Luftaustausch, was zu einer geringeren Kaltluftproduktionsrate im Vergleich zu Freiflächen führt. Bebautes Gebiet hat durch die hohe Wärmespeicherung der Oberflächen und der anthropogenen Wärmeproduktion ein reduziertes Kaltluftproduktionsvermögen.

Wasser hat ebenfalls eine hohe Wärmespeicherkapazität. Daher kühlen sich Wasserflächen nachts nur sehr wenig ab. Gegen Ende der Nacht weisen daher insbesondere stehende Gewässer die höchsten Oberflächentemperaturen auf. Wasserflächen wirken folglich temperaturausgleichend – sie kühlen die Luft tags und erwärmen sie nachts. Sie stellen somit nachts keine Kaltluftproduktionsflächen dar.

Jede Veränderung der Oberfläche beeinflusst auf Grund der genannten Einflüsse die Kaltluftproduktion. Flächenumwidmungen können deshalb einen signifikanten Einfluss auf die Produktion von Kaltluft haben.

Zu Beginn der Nacht sind die Abkühlungsraten über freien Flächen am höchsten. Daher sind die Kaltluftabflüsse zu dieser Zeit am stärksten ausgeprägt. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve ab, was die Kaltluftbildung reduziert. Kaltluft entsteht zunächst an Orten mit hoher

effektiver Ausstrahlung, also unabhängig von der Geländeneigung. In flachem Gelände verharrt die Kaltluft am Entstehungsort. Sie wird somit nicht Teil eines Kaltluftabflusses und ist nicht belüftungsrelevant. Daher ist zwischen Kaltluftproduktionsgebieten zu unterscheiden, die zu Kaltluftabflüssen beitragen oder an denen die Kaltluft stationär verbleibt.

3.3.3 Volumenstromdichte

Der Luftaustausch von Strömungssystemen kann durch den Luftdurchsatz in verschiedenen Höhen analysiert werden (Abbildung 3-6). Zur Bestimmung des Luftdurchsatzes wird die →**Kaltluftvolumenstrom**dichte (angegeben in m³/(s·m)) herangezogen. Sie ist ein Maß für die Menge an Luft, die pro Sekunde durch einen Querschnitt von 1 m Breite und der betrachteten Höhe strömt. Die Höhe kann dabei unterschiedlich definiert werden. Bei der Betrachtung von Kaltluftabflüssen wird häufig die vertikale Mächtigkeit des Kaltluftstroms (Gesamtvolumenstrom–dichte) verwendet. Gerade zur Bewertung der Durchlüftung von Siedlungsflächen kann auch eine andere Bezugshöhe, z.B. das Überdachniveau (bis 28 m über Grund) verwendet werden.

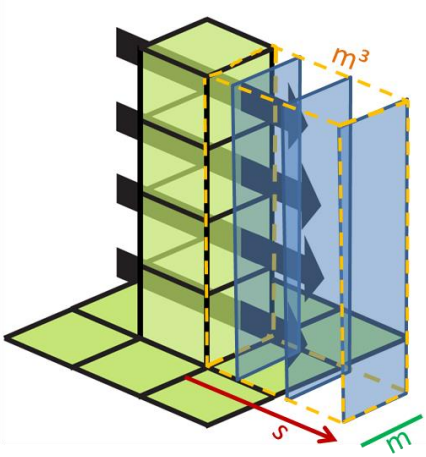


Abbildung 3-6: Darstellung der Komponenten zur Bestimmung der Volumenstromdichte.

Bei einer höheren Oberflächenrauigkeit, z.B. in Siedlungsbereichen, nimmt die Windgeschwindigkeit des Kaltluftabflusses bis weit über die Bebauung ab. Dies zeigt sich durch eine Abnahme der Volumenstromdichte.

3.3.4 Flurwinde

Der Flurwind ist eine spezielle Form einer Kaltluftströmung, die in ebenem Gelände beobachtet werden kann. Der Flurwind entsteht durch horizontale Temperaturunterschiede. In dicht bebauten Siedlungs- oder Industriegebieten wird nachts eine höhere Lufttemperatur beobachtet als im ländlichen Umland (urbane Wärmeinsel, siehe Kapitel 3.2.4). Die überwärmte städtische Luft steigt über der Stadt auf. Dadurch entsteht ein Sogeffekt am Boden, der die kühlere Luft aus dem Umland ansaugt (Abbildung 3-7). Es entsteht eine Strömung vom Umland (der „Flur“) in die Stadt. Dieser Wind wird daher als „Flurwind“ bezeichnet.

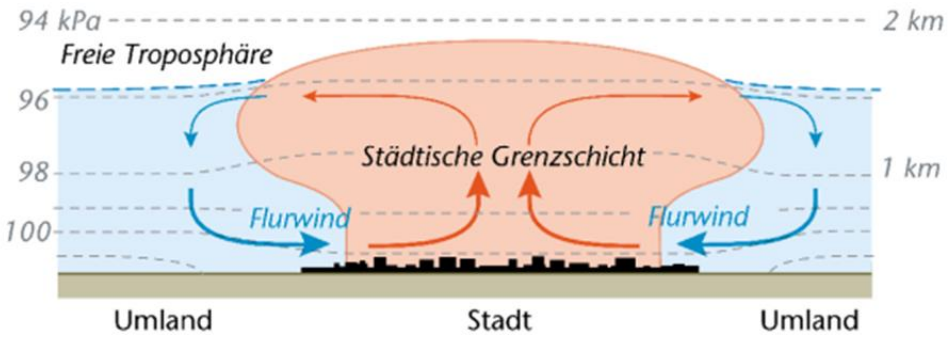


Abbildung 3-7: Veranschaulichung des Zusammenspiels aus urbaner Wärmeinsel und der Entstehung von Flurwinden (nach Christen (2019)).

Die Stärke des Flurwinds ist im Vergleich zu den oben beschriebenen Kaltluftabflüssen sehr gering. In der Regel werden Windgeschwindigkeiten von ≤ 1 m/s gemessen. Entsprechend liegt die vertikale Mächtigkeit der Strömung bei nur wenigen Metern.

Für die Entstehung von Flurwinden ist eine stark ausgeprägte urbane Wärmeinsel mit großen Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Umland notwendig. Dies wird nur bei größeren zusammenhängenden Siedlungs- oder Industriegebieten mit dichter Bebauung beobachtet. Zudem bewirken Hindernisse wie Gebäude oder dichte Vegetation, dass der schwach ausgeprägte Flurwind nur eine sehr geringe Eindringtiefe in das bebaute Gelände aufweist.

Die größten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland werden in den Abend- und Nachtstunden beobachtet. Am Tage sind die Temperaturunterschiede nur sehr gering. Daher treten Flurwinde nur in der Nacht auf.

Trotz der geringen Stärke und Reichweite stellt der Flurwind eine wichtige Belüftungsfunktion für die Randbereiche einer Stadt in ebenem Gelände dar. Für Städte ohne Nähe zu Hängen und damit ohne Kaltluftabflüsse sind Flurwinde die einzige Möglichkeit einer natürlichen Belüftung in autochthonen Wetterlagen, wenn keine sonstigen lokalen oder regionalen Strömungen vorliegen.

3.4 Human-Biometeorologie

In der →**Human-Biometeorologie** wird das lokale Klima mit Blick auf die gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen betrachtet und bewertet. Dabei wird die kombinierte Wirkung verschiedener Einflussfaktoren ermittelt und mittels einer geeigneten Bewertungsskala eingestuft.

Die betrachteten meteorologischen Größen sind die Lufttemperatur, der Wind, die Feuchte und die Sonneneinstrahlung. Zusätzlich werden weitere thermo-physiologische Parameter betrachtet wie die Aktivität, die getragene Kleidung und physische Faktoren wie Größe, Gewicht und Alter (Abbildung 3-8). Die gesammelten Effekte fließen in die Betrachtung der menschlichen Energiebilanz ein und dienen als Grundlage für die Bewertung des lokalen Klimas mit Blick auf das menschliche Wohlbefinden.

Ein möglichst hohes Wohlbefinden der städtischen Bevölkerung ist aus mehreren Gründen anzustreben. Bei stark belastenden Umwelteinflüssen sinkt nicht nur das Wohlbefinden und Produktivität der Bevölkerung. Auch die →**Morbidität** und →**Mortalität** steigen (z.B. Fisk (2000); Koppe, Jendritzky & Pfaff (2003); Nastos & Matzarakis (2012)). Hohe Temperaturen in der Nacht haben beispielsweise einen negativen Einfluss auf den Schlaf und somit auf die Erholungsphase (Haskell et al. (1981)). Bei länger anhaltenden Belastungssituationen können messbare volkswirtschaftliche Schäden in verschiedenen Sektoren auftreten (Zerbisch et al. (2005)). →**Hitzestress** senkt beispielsweise die Hilfsbereitschaft von Mitarbeitern (Belkin & Kouchaki (2017)) und führt zu einem Anstieg in der Kriminalität (Anderson, Bushman & Groom (1997)).

Menschen sind gleichwarme (homoiotherme) Lebewesen mit einer konstanten Kerntemperatur von ca. 37 °C, welche durch verschiedene Maßnahmen der Thermoregulation gehalten wird. Die thermische Belastung eines Menschen setzt sich aus der thermophysiologischen

Summenwirkung der meteorologischen Größen Lufttemperatur (T_a), Dampfdruck (v_p), Windgeschwindigkeit (v) und der →**mittleren Strahlungstemperatur** (T_{mrt}[13]) zusammen (Höppe (1984), (1999)).

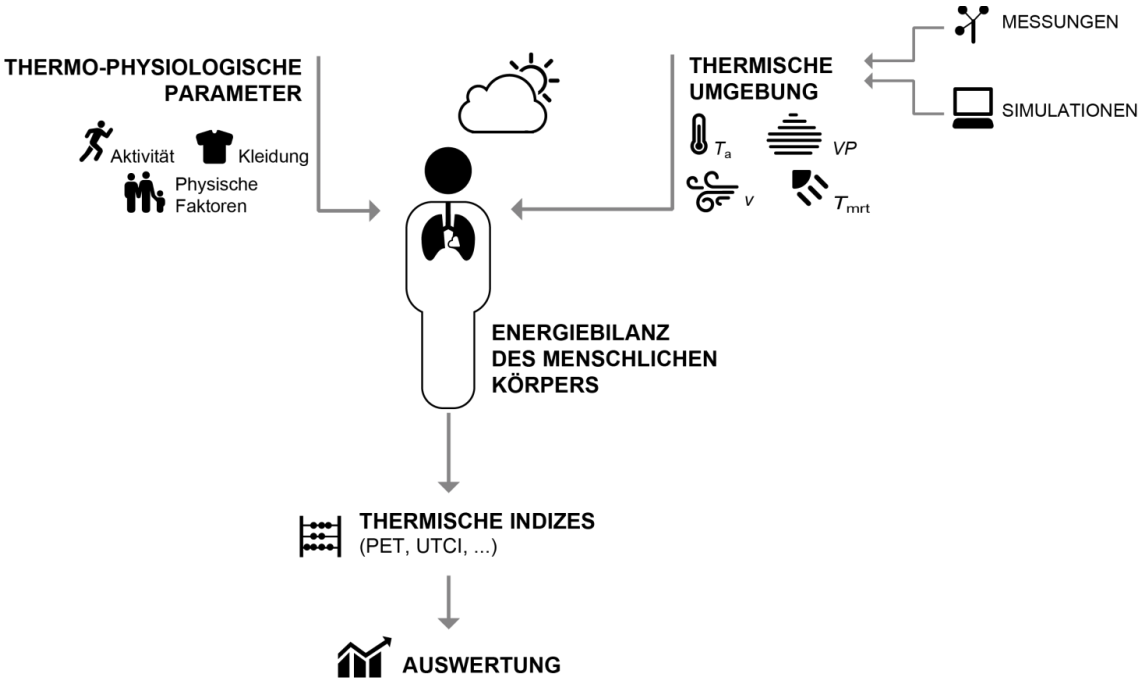


Abbildung 3-8: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Einflussfaktoren der menschlichen Energiebilanz und die darauf basierende Berechnung thermischer Indizes (nach Matzarakis, Martinelli & Ketterer (2016)).

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (→**PET**; Höppe (1999)), wurden entwickelt, um die auf den Menschen wirkenden thermischen Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz und der den Menschen beschreibenden Größen (Größe, Gewicht, Geschlecht, Kleidung) zu berechnen. Die PET entspricht dabei einer theoretischen Raumtemperatur, bei der der gleiche thermische Stress auf den Menschen, d.h. die gleiche mittlere Hauttemperatur und Schweißrate, ausgelöst wird wie unter den gemessenen meteorologischen Bedingungen[14]. Wird beispielsweise an einem warmen Sommertag auf einer sonnenbeschienenen Straße eine PET von 30 °C ausgewiesen, herrschen dort die gleichen Hitzebedingungen wie in einem geschlossenen Raum mit 30 °C Lufttemperatur.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältestress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts wurde die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis & Mayer (1997) verwendet (Tabelle 3-2).

[13] *Die mittlere Strahlungstemperatur ist definiert als einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche, die zum gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt, wie die unter Freilandbedingungen inhomogenen Strahlungsflüsse (Fanger (1972)).*

[14] *Für die Berechnung der PET wird ein Referenz-Raumklima definiert mit einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s, einer mittleren Strahlungstemperatur von 20 °C und einem Wasserdampfdruck von 12,5 hPa.*

Tabelle 3-2: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997)).

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

Die PET ist konform mit der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022) und eignet sich aufgrund ihrer Definition besonders für die Stadtplanung. Die PET wird darüber hinaus auch im Bereich der Kurort-Zertifizierung (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010)) und für den Tourismus angewandt.

3.5 Wirkräume und Ausgleichsräume

In Klimaanalysen wird unterschieden zwischen Wirkraum und Ausgleichsraum (Abbildung 3-9).

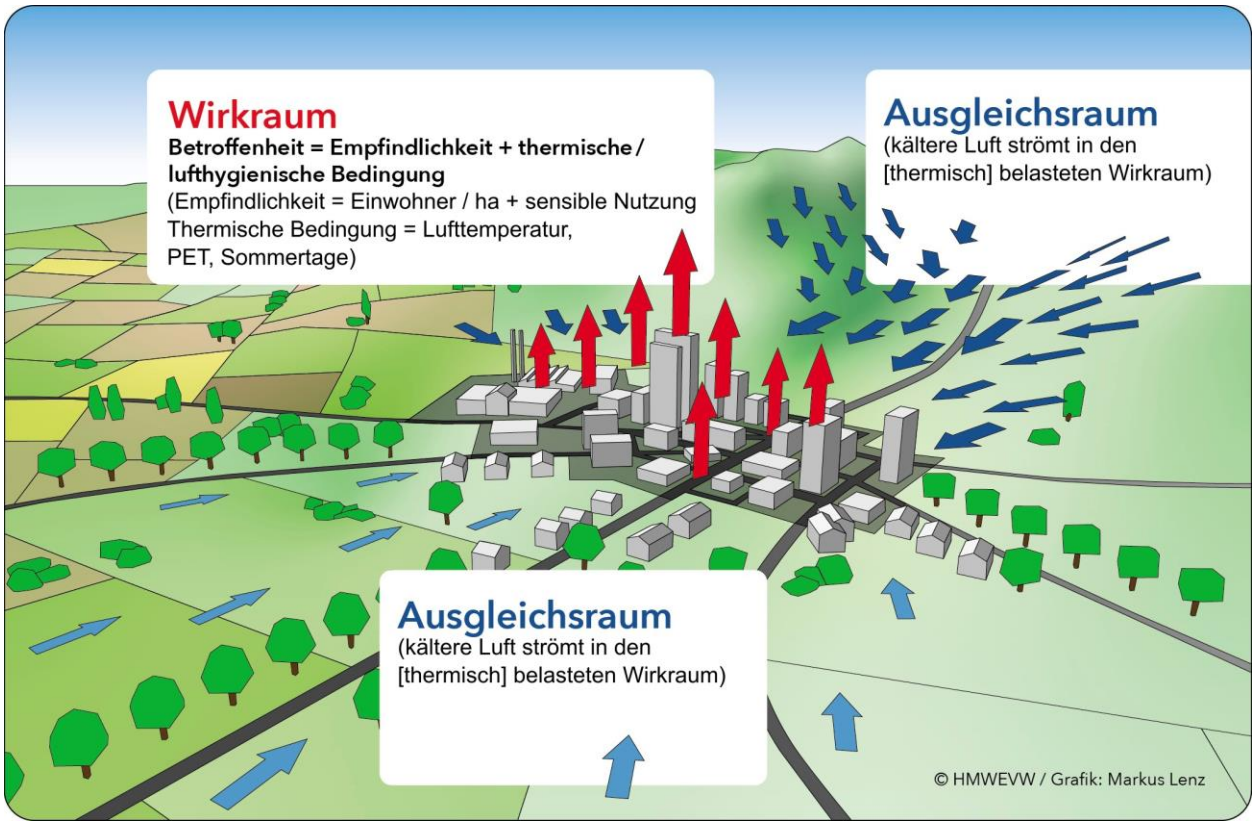


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung von Wirkraum und Ausgleichsraum.

Als Wirkraum werden Siedlungsgebiete bezeichnet, die eine hohe thermische Belastung aufweisen. Diese thermischen Belastungen treten meist im Zuge von windschwachen Strahlungswetterlagen auf. Bei diesen Wetterlagen findet man in Wirkräumen eine erhöhte Lufttemperatur.

Als Ausgleichsraum werden räumlich und funktional benachbarte, nicht bzw. nur gering versiegelte Räume bezeichnet, die zur Kaltluftproduktion beitragen. Die dort gebildete Kaltluft fließt in die Wirkräume und sorgt dort für eine Minderung der thermischen Belastung. Ausgleichsräume können auch tagsüber eine deutlich geringere thermische Belastung aufweisen als Wirkräume und folglich als Erholungsflächen dienen.

3.6 Klimawandel

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

Um sich an das künftig geänderte Klima frühzeitig anzupassen, werden Klimaprojektionen entwickelt, die die zu erwartenden zukünftigen klimatischen Bedingungen ermitteln. Dabei werden verschiedene Klimaprojektionen betrachtet basierend auf unterschiedlichen möglichen gesellschaftlichen Entwicklungen.

Eine wichtige Grundlage für die unterschiedlichen Klimaprojektionen sind die globalen Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die mögliche Entwicklung der Konzentrationen werden in so genannten „Emissionsszenarien“ (Representative Concentration Pathways, RCP) klassifiziert. Die verschiedenen Szenarien wurde vom zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erarbeitet und im fünften Sachstandsbericht veröffentlicht.

Abbildung 3-10 zeigt die Entwicklung des Strahlungsantriebs aus anthropogenen Quellen innerhalb der verschiedenen Szenarien. Dies ist indirekt ein Indikator für die mögliche Zunahme der globalen mittleren Lufttemperatur.

Die Grundlage der verschiedenen RCP-Szenarien bilden Annahmen über verschiedene sozioökonomische Entwicklungen. Jedem Emissionsszenario liegt ein Bewertungsmodell, welches die zukünftige Energieversorgung, Bevölkerungsentwicklung, Nahrungsmittelproduktion, Weltwirtschaft und ihre Wechselwirkung mit dem Klimasystem und der Landnutzung berücksichtigt, zugrunde (Moss et al. (2008); van Vuuren et al. (2011)). Die Unsicherheiten, die durch die Annahmen der zukünftigen Entwicklungen innerhalb jedes Szenarios entstehen, werden in Abbildung 3-10, (dünne farbliche Linien) abgebildet.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade (Abbildung 3-10, dicke Linien) für den fünften Sachstandsbericht ausgewählt (IPCC (2013)): RCP2.6 (relativ niedriger Strahlungsantrieb), RCP4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb), RCP6.0 (hoher Strahlungsantrieb) und RCP8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb).

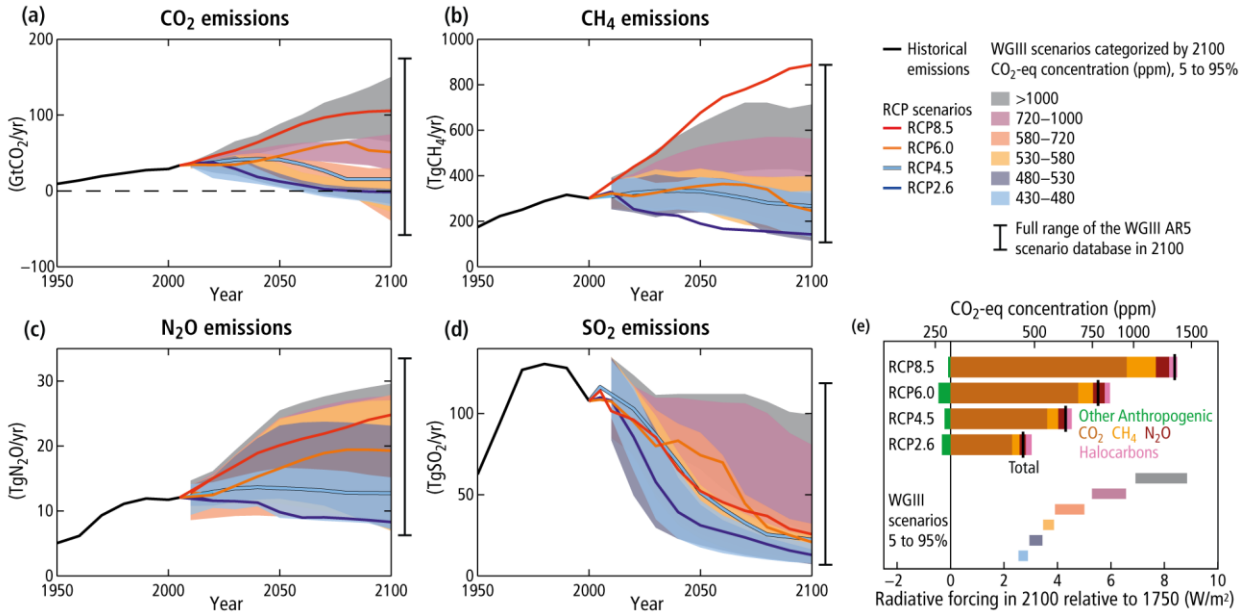


Abbildung 3-10: Emissionsszenarien und der daraus resultierende Strahlungsantrieb für die verschiedenen RCPs. Die Abbildungen a bis d zeigen die Kohlendioxid- (CO_2), Methan- (CH_4), Lachgas- (N_2O) und Schwefeldioxid- (SO_2) Emissionen. In Abbildung e wird der zukünftig erwartete Strahlungsantrieb (W/m^2) für die verschiedenen Emissionsszenarien dargestellt (https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_futurechanges.php, Stand 19.04.2023).

Mit RCP8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von 8,5 W/m² erreicht. RCP2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Er führt zu einem Strahlungsantrieb von etwa 3 W/m² um 2040 und geht zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von 2,6 W/m² zurück. Die beiden übrigen RCPs bewegen sich im mittleren Bereich (siehe auch Tabelle 3-3 und Abbildung 3-10).

Tabelle 3-3: Beschreibung der Representative Concentration Pathways (RCP).

Szenario	Beschreibung
RCP8.5	Bis über das Jahr 2100 ansteigender Strahlungsantrieb. Dieser beträgt im Jahr 2100 8,5 W/m² oder 1370 ppm CO_2-Äquivalent.
RCP6.0	Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei ca. 850 ppm CO_2-Äquivalent.
RCP4.5	Moderate Entwicklung. Anstieg des CO_2-Äquivalents auf 650 ppm bis 2100.
RCP2.6	„Peak-Szenario“, d.h. Anstieg der Treibhausgasemissionen bis 2020 auf ca. 490 ppm, danach konstanter Treibhausgasemission- und Strahlungsantriebsrückgang auf etwa 2,6 W/m² im Jahr 2100. Durch den drastischen Rückgang der Emissionen wird eine globale Erwärmung um mehr als 2 °C im Jahr 2100 sehr wahrscheinlich nicht überschritten. Das Szenario entspricht einem Ziel der Vereinbarungen von Paris.

Auf Grundlage der verschiedenen RCP-Szenarien werden auf globaler Ebene Klimaprojektionen berechnet. Mit regionalen Klimamodellen werden die Ergebnisse anschließend für einzelne Regionen verfeinert (Abbildung 3-11). Dies erlaubt genauere Aussagen über die Änderungen der mittleren Zustände und der Wetterextreme. Das Verfahren wird als Downscaling-Verfahren bezeichnet und verwendet sowohl statistische als auch dynamische Methoden. Bei dem Downscaling werden komplexe Topographie und die jeweilige Landnutzung durch die feinere Auflösung (Gitterweite) besser repräsentiert als in den globalen Klimaprojektionen (Wang et al. (2004)).

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

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

Im 2021/2022 veröffentlichten sechsten Sachstandsbericht (IPCC (2021)) werden die Zukunftsszenarien aktualisiert. Da die Ergebnisse des sechsten Sachstandsberichts erst vor kurzem veröffentlicht wurden, liegen noch keine Ensembledatensätze von regionalen Klimamodellen vor. Die Unterschiede in den betrachteten Szenarien zwischen dem fünften und sechsten Sachstandsbericht sind allerdings nur gering. Daher werden für die regionale Klimaanalyse weiterhin die RCP-Szenarien des fünften Sachstandsberichts verwendet.

Für die Zukunftsprojektionen der regionalen Klimaanalyse wurden die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 verwendet. Diese stellen die beste mögliche Entwicklung (RCP4.5; RCP2.6 wird seitens des IPCC bereits als unrealistisch eingestuft) und die schlechteste mögliche Entwicklung (RCP8.5) dar. Dadurch kann die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklung des Klimas im Regionalverband Heilbronn-Franken abgedeckt werden.

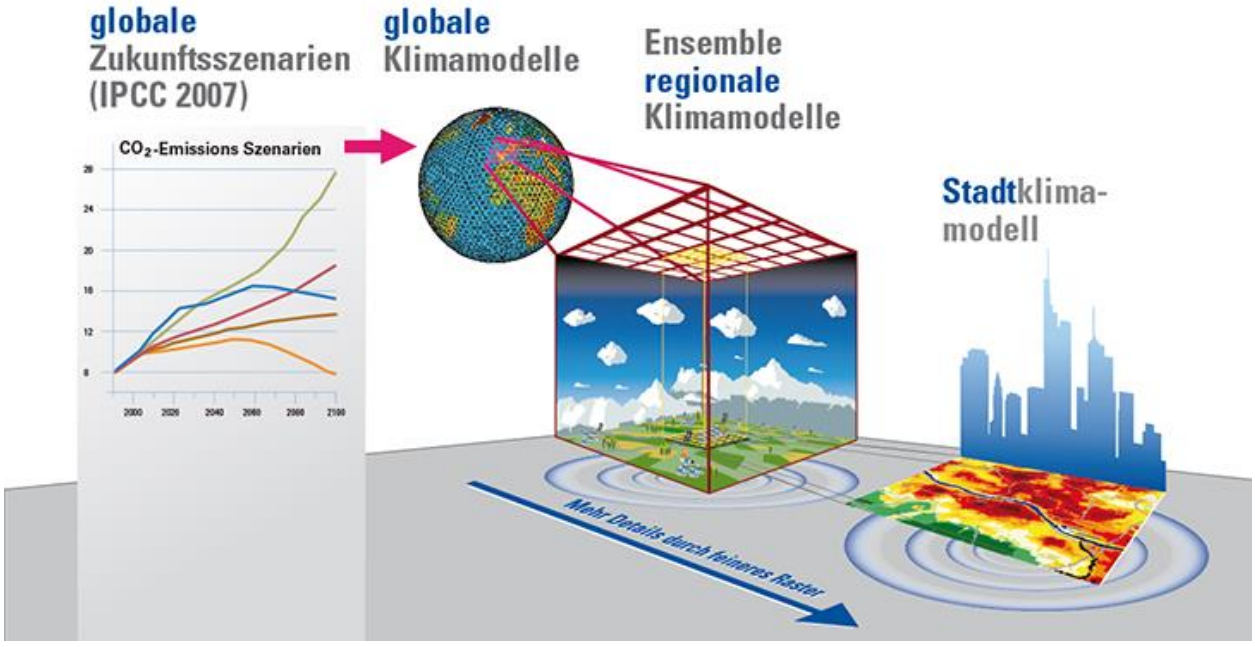


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC Emissionsszenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells (Grafik: Koßmann, Noppel & Früh (2014)).

4 Datengrundlage und Methodik

Eine räumlich hoch aufgelöste Differenzierung der meteorologischen Verhältnisse ist nur mithilfe von numerischen Modellen möglich. Diese Modelle benötigen raumbezogene Daten, wie das Gelände- und Gebäudemodell sowie die Landnutzung.

Aus den Modellergebnissen lassen sich Gunst- und Ungunstfaktoren berechnen. Dabei werden Kaltluftabflüsse und Luftleitbahnen als Gunstfaktoren, die urbane Wärmeinsel und thermische sowie human-biometeorologische Bedingungen als Ungunstfaktoren berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Empfindlichkeit aus der Einwohnerdichte und klimasensiblen Nutzungen und die Betroffenheit aus den Ungunstfaktoren und der Empfindlichkeit analysiert. Als finale Ergebnisse erfolgt die Auswertung und Bewertung in Form von Planungshinweiskarten.

Eine Übersicht der verwendeten Daten und Methoden ist in Form eines Fließbilds in Abbildung 4-1 dargestellt. Im Folgenden werden die Datengrundlage und die angewandten Methodiken erläutert.

4.1 Datengrundlage

4.1.1 Topographie

Für die meso- und mikroskaligen Simulationen wird ein digitales Geländemodell benötigt, welches auch die weiträumige Umgebung des Regionalverbandes beinhaltet. Dazu wurde das Geländemodell Baden-Württembergs in das Höhenmodell →**SRTM**[15] in einer Auflösung von einer Bogensekunde (entspricht etwa 30 m) integriert (siehe Tabelle 4-1 und Abbildung 4-2).

Tabelle 4-1: Räumliche Daten für die Klimaanalyse.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Digitales Geländemodell (DGM)	1 m - 5 m	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
Digitales Oberflächenmodell	1m	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
Digitales Höhenmodell SRTM V 4.1	1 Bogensekunde	Jarvis et al. 2008, earthexplorer.usgs.gov/

[15] *STS-99* Shuttle Radar Topography Mission.

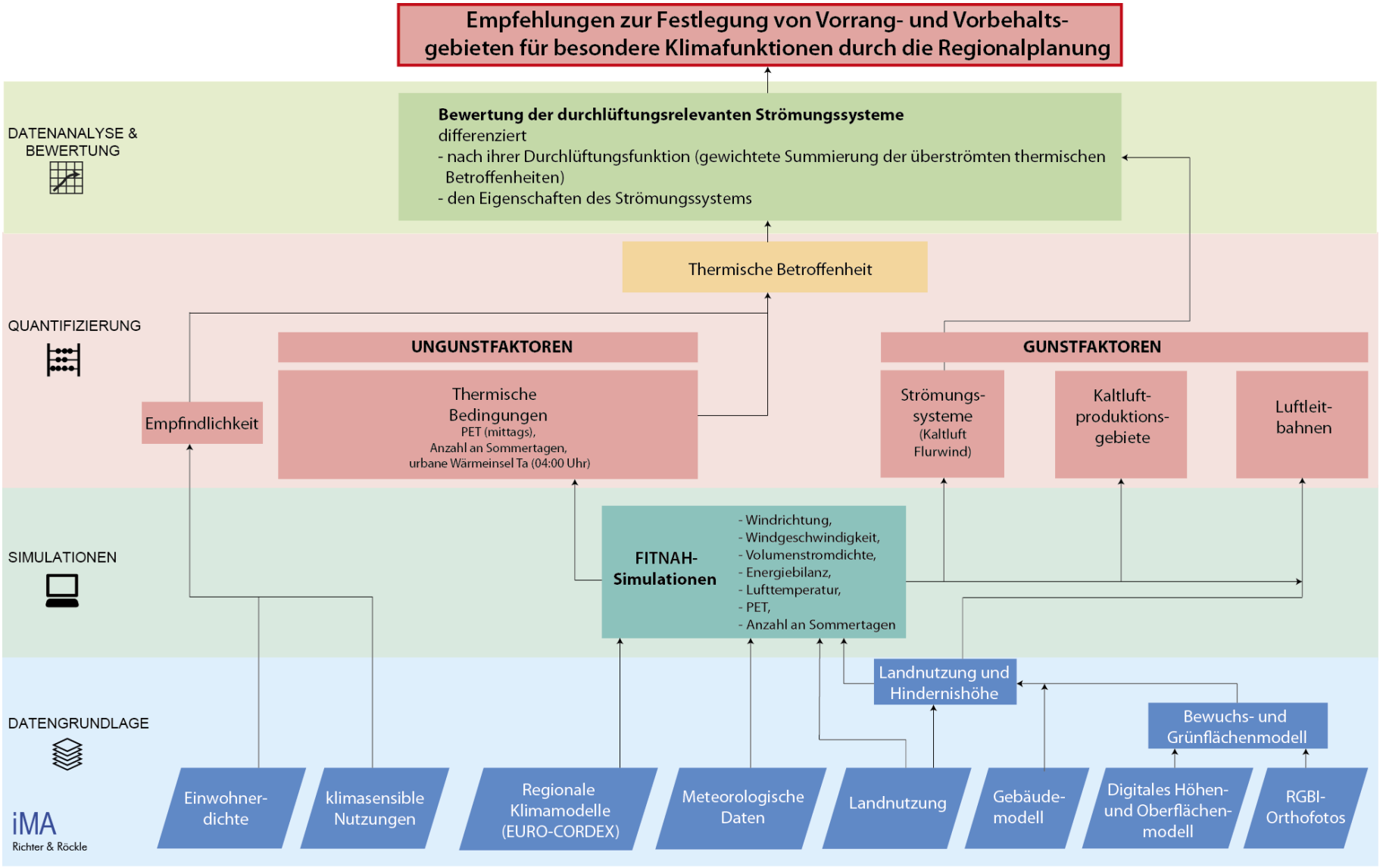


Abbildung 4-1: Vorgehensweise für die Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken.

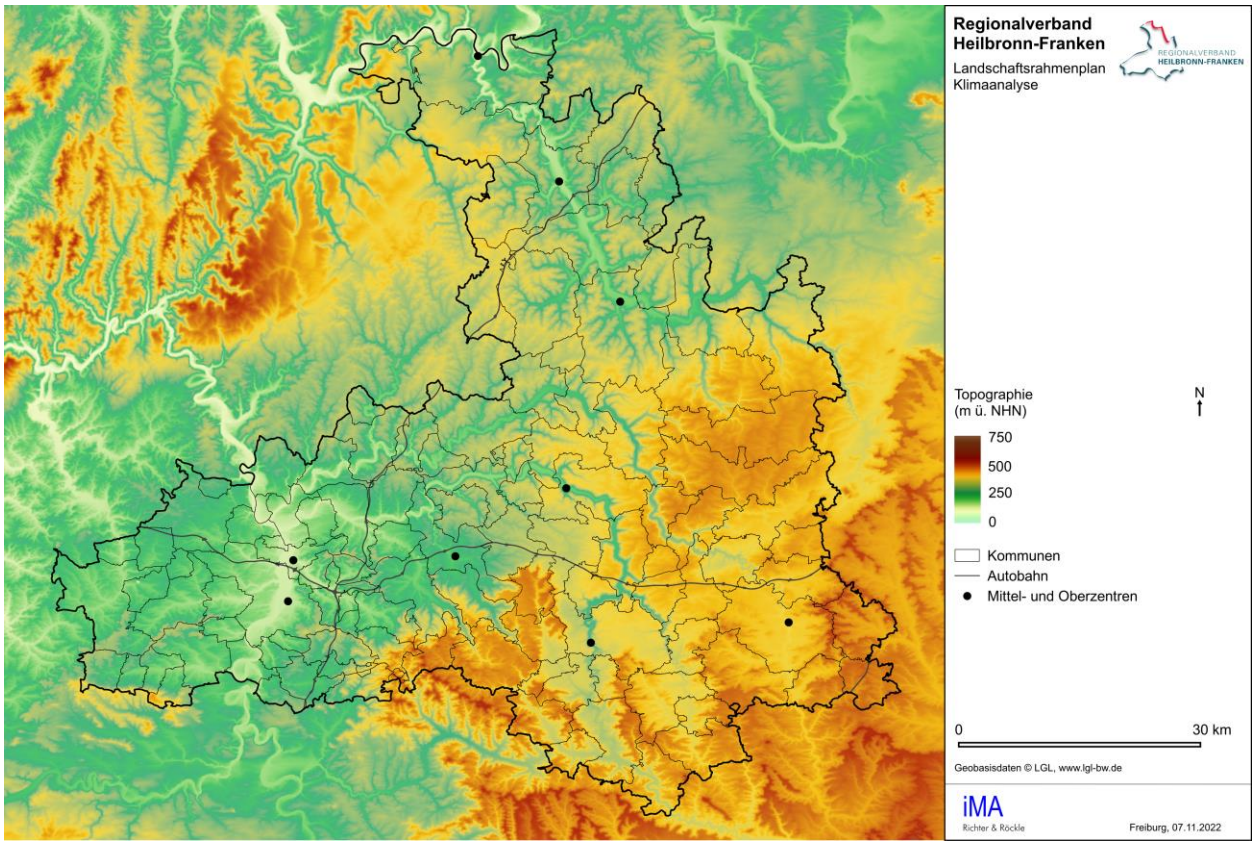


Abbildung 4-2: Digitales Geländemodell für den Regionalverband Heilbronn-Franken und die Umgebung.

4.1.2 Nutzungsstruktur

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

Zur Definition von Landnutzungsstrukturen aus klimatischer Sicht wurden die vom Regionalverband Heilbronn-Franken zur Verfügung gestellten Landnutzungsdaten sowie Daten aus weiteren Quellen verwendet (siehe Tabelle 4-2).

Die Landnutzungsdaten wurden für die Nutzung in den Modellen weiter aufbereitet und auf die jeweilige Auflösung harmonisiert. Aus den anteiligen Modell-Landnutzungsklassen wurde jeder Rechenzelle der vorherrschende Baumtyp, die Bewuchs- und Gebäudehöhe und der prozentuale Anteil der Landnutzungskategorien zugeordnet.

Tabelle 4-2: Räumliche Daten, die der Regionalen Klimaanalyse Heilbronn-Franken zugrunde liegen.

Daten	Auflösung/ Datenformat	Bereitgestellt durch
NORA-Basis-DLM NORA-ALKIS-Daten	shp	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
DOP - RGBI	geotif	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
LoD2-Gebäudedaten	gml	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover	100 m x 100 m	European Environment Agency (EEA) 2018
Einwohner	shp	Einwohnerzahl je Hektar Ergebnisse des Zensus 2022 pro ha © Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Wiesbaden 2024. (https://www.zensus2022.de)
Bebauungsplangebiete mit Siedlungsdichtewerten	shp	Regionalverband Heilbronn-Franken
Klimasensible Nutzung (z.B. Pflegeheim, Krankenhäuser, soziale Einrichtungen für Kinder und Jugendliche, etc.)	shp	Ermittlung auf Grundlage der LoD2 und ALKIS-Daten, Abfrage bei den Landkreisen durch den Regionalverband Heilbronn-Franken 2021/2022

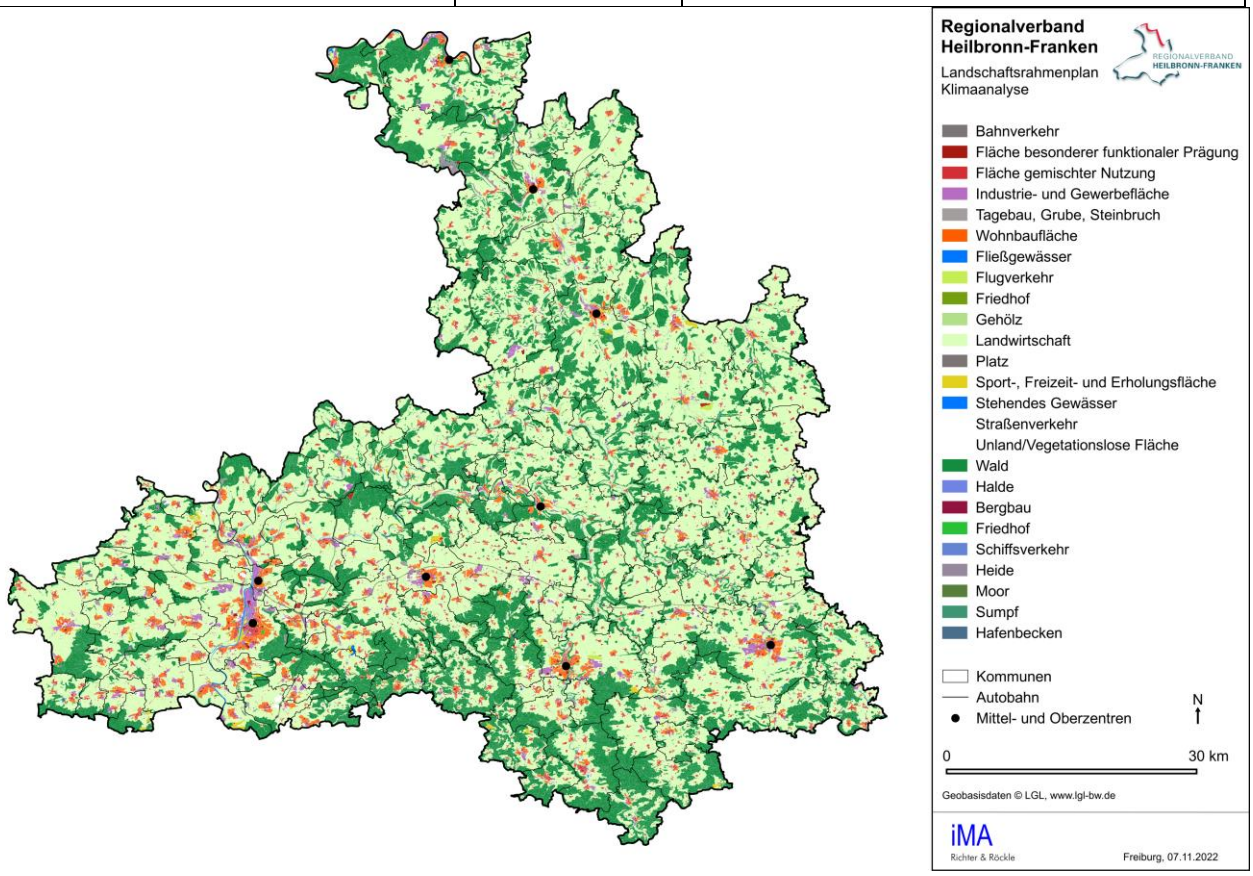


Abbildung 4-3: Landnutzung für den Regionalverband Heilbronn-Franken.

In Abbildung 4-3 ist die Landnutzung im Regionalverband dargestellt. Markant ist die relativ gleichmäßige Verteilung der Siedlungsbereiche, auch wenn diese oft nur kleine Flächenanteile aufweisen.

4.1.3 Weitere meteorologische Daten

Zur klimatischen Einordnung des Regionalverbandes Heilbronn-Franken, Analyse der Indikatoren und Validierung der Simulationsergebnisse wurden Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) herangezogen (Tabelle 3-1). Näheres dazu findet sich im Anhang 2.

Tabelle 4-3: Messdaten und weitere klimatologische Daten.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Karten des DWDs	1 km x 1 km	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
Messdaten des DWD		https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
Messdaten der LUBW		https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/

4.2 FITNAH

4.2.1 Das prognostische Modell FITNAH

Die mesoskaligen Simulationen der meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit) wurden mit dem Modell FITNAH (**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat-Sources) angefertigt. Das Modell löst u.a. die dreidimensionalen Bewegungs- und Erhaltungsgleichungen zur Berechnung der Strömung und der Temperaturen. Es basiert auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windvektoren im 3D-Raum (x-, y- und z-Richtung) sowie auf den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese Gleichungen werden auf einem geländefolgenden dreidimensionalen →**Rechengitter** in kleinen Zeitschritten fortschreitend gelöst. Unter Berücksichtigung des Sonnenstandes simuliert das Modell die Erwärmung bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft. Für die Berechnung müssen Eingangsdaten wie z.B. das digitale Höhenmodell, die Landnutzung und ein Anfangszustand der Atmosphäre vorgegeben werden.

4.2.2 Rechengebiet, räumliche und zeitliche Auflösung

Die räumliche Auflösung des FITNAH-Rechengebietes für die Klimaanalyse Regionalverband Heilbronn-Franken beträgt horizontal 50 m x 50 m, vertikal wurde das Rechengitter feiner aufgelöst. Durch die hohe Modellauflösung können kleinräumige Unterschiede der Landnutzung, die Bebauung und das Gelände sehr gut abgebildet werden. Die Landnutzungsdaten gingen, differenziert nach Bestands- bzw. Bebauungshöhen und ihren jeweiligen Flächenanteilen, in jede Rechenzelle des Rechengitters ein.

Um Einflüsse von Höhenzügen, Geländeformationen und Landnutzungen, die außerhalb der Landesgrenze von Baden-Württemberg liegen, berücksichtigen zu können, wurde das Simulationsgebiet soweit erforderlich in die angrenzenden Bundesländer hinein erweitert.

Das Modell rechnet kontinuierlich mit einer feinen zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich. Aus dem berechneten Tagesgang wurden drei repräsentative Zeiträume ausgewertet:

- Beginn der Kaltluftsituation in den Abendstunden mit dominierenden lokalen, hangfolgenden Kaltluftabflüssen (2,5 Std. nach Sonnenuntergang, 22:00 Uhr →**wahre Ortszeit**)

- Voll ausgebildete Kaltluftströmungssysteme später in der Nacht (0,5 Std. vor Sonnenaufgang, 04:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Thermische Bedingungen mittags (13:00 Uhr wahre Ortszeit).

4.2.3 Meteorologische Situation und Anfangszustand

Für die FITNAH-Simulation wurde von einer autochthonen Wetterlage ausgegangen (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)). Dies ist eine Wetterlage, bei der die großräumige Luftdruckverteilung kaum Druckunterschiede aufweist, was z.B. typischerweise im Kern von Hochdruckgebieten der Fall ist. Da aus diesem Grund keine dominierende übergeordnete Strömung vorhanden ist, bilden sich lokale thermische Strömungssysteme (nächtliche Kaltluftströmungen oder Flurwinde) am stärksten aus.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand sind:

- 30 °C mittlere bodennahe Lufttemperatur um 18:00 Uhr,
- 20 % relative Feuchte,
- kein übergeordneter →**geostrophischer Wind**,
- wolkenloser Himmel.

Die Ergebnisse der Simulation repräsentieren damit typische hochsommerliche Verhältnisse. Die Sonne steht mittags um 12:00 Uhr WOZ (wahre Ortszeit) im Zenit (Sonnenhöchststand), der Sonnenuntergang erfolgt an diesem Tag um 19:30 Uhr WOZ, der Sonnenaufgang am nächsten Tag um 4:30 Uhr WOZ.

4.2.4 Berechnete meteorologische Größen

Als Ergebnis liefert FITNAH flächendeckend u.a. die Strömungsverhältnisse (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Volumenstromdichte), die Lufttemperatur sowie alle meteorologischen Größen zur Berechnung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET).

Ergebnisse der FITNAH Simulationen sind Datensätze u.a. zu:

- Windrichtung und Windgeschwindigkeit bodennah (in 5 m über Grund) und im Überdachniveau (in 28 m über Grund) und – zur späteren Bestimmung der Gesamt-Volumenstromdichte – in einigen Höhenniveaus darüber.
  Die Datensätze, die Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeiten enthalten, werden sprachlich und in diesem Bericht auch als →**Windfelder** bezeichnet.
- Lufttemperatur in 2 m über Grund um 13:00 Uhr, 22:00 Uhr und 04:00 Uhr (WOZ).

Aus den FITNAH-Simulationsergebnissen direkt abgeleitete Datensätze sind z.B.:

- Volumenstromdichte[16] bodennah (Luftschicht 0 m bis 5 m über Grund), bis ins Überdachniveau (Luftschicht 0 m bis 28 m über Grund) und als Gesamt-Volumenstromdichte in der

[16] *Der Begriff Volumenstromdichte basiert hier auf der Definition der Kaltluft-Volumenstromdichte nach Matzarakis et. al. (http://www.stadtklima.de/DE/d_glossar.htm#K, Stand 2020): „Sie ist ein Maß für die Menge an fließender Kaltluft und wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit". Ausführlichere Erläuterung siehe Kapitel 3.3.3).*

für Bevölkerung und Bebauung als „bodennah einflussreich“ angesehenen Schicht von 0 m bis 65 m über Grund.

- Kaltluftproduktionspotential der unversiegelten Freiflächen, abgeleitet aus den Ergebnissen der Energiebilanz an der Erdoberfläche.
- PET in 1,1 m über Grund um 13:00 Uhr (WOZ).
- Anzahl an **Sommertagen** (Tage mit einem Höchstwert der Lufttemperatur in 2 m über Grund ≥ 25 °C).
- Anzahl an **Heißen Tagen** (Tage mit einem Höchstwert der Lufttemperatur in 2 m über Grund ≥ 30 °C).

4.2.5 Betrachtung des Klimawandels

Die EURO-CORDEX-Daten wurden mittels der vom Deutschen Wetterdienst entwickelten „Quader“-Methode (Früh et al. (2011)) in eine Auflösung von 50 m x 50 m überführt.

Die EURO-CORDEX-Daten wurden genutzt, um die möglichen Extremwerte der meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während der zukünftigen Dekaden zu ermitteln. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum („Quader“). Für die acht Eckpunkte dieses Quaders wurden acht FITNAH-Läufe durchgeführt (siehe Abbildung 4-4). Für die Werte der EURO-CORDEX-Daten wurde innerhalb des Ereignisraumes durch dreifache lineare Interpolation für jeden Punkt im FITNAH-Rechengitter eine Zeitreihe generiert. Damit kann beispielsweise die mittlere jährliche Anzahl klimatischer Kenntage, z.B. die Anzahl an Sommertagen, für die vergangene Klimanormalperiode (1971 – 2000) und unter zukünftig geänderten Klimabedingungen (für die Klimanormalperioden 2031 – 2060, 2071 – 2100) für das RCP4.5 und RCP8.5 (siehe Kapitel 3.6) berechnet werden.

Darauf aufbauend wurde die Zunahme der Häufigkeit von Wärmebelastung für die Mitte und für das Ende des 21. Jahrhunderts abgeleitet.

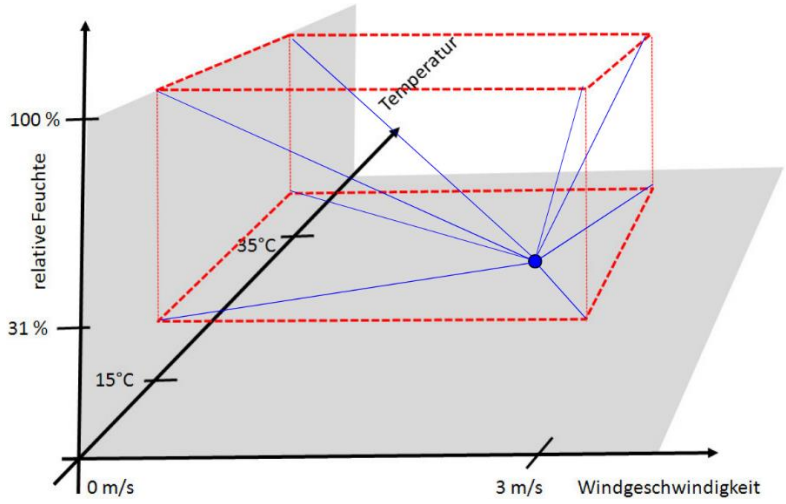


Abbildung 4-4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Simulation der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Der terminbezogene Zielwert (blauer Punkt) wird durch

eine multiple lineare Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der EURO-CORDEX-Daten als Eingangsdaten dient.

4.2.6 Modellvalidierung

Zur Validierung der FITNAH-Modellergebnisse wurden kontinuierliche Messdaten der LUBW und des DWD herangezogen (siehe Tabelle 4-3). Die Winddaten wurden, sofern vorhanden, über einen 10-jährigen Zeitraum ausgewertet, wobei das besondere Augenmerk auf den Strömungsverhältnissen zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang während autochthoner Wetterlagen lag.

Der Vergleich Messung – Modellrechnung ist im Anhang 2 aufgeführt.

4.3 Ermittlung von Gunstfaktoren

Gunstfaktoren im Kontext der Klimaanalyse sind die Parameter, die eine bestehende moderate bioklimatische Situation unterstützen bzw. zur Reduktion einer bioklimatischen Belastungssituation beitragen. Gunstfaktoren sind insbesondere die nächtlichen Strömungssysteme (Kaltluftabfluss und Flurwinde, Kapitel 4.3.1), die Luftleitbahnen (Kapitel 4.3.2) und Kaltluftproduktionsgebiete (Kapitel 4.3.3).

4.3.1 Strömungssysteme

Für die menschliche Gesundheit ist ein gesunder Schlaf von besonderer Bedeutung. Entsprechend kommt den nächtlichen Kaltluft-Strömungssystemen aufgrund ihrer Ausgleichsfunktion (Durchlüftung) eine besondere Relevanz zu. Zu Beginn der Nacht (22:00 Uhr) sind die lokalen Kaltluftabflüsse meist am intensivsten, da die Abkühlungsrate über freien Flächen am höchsten ist. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve zwar ab, die Strömungssysteme in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) dauern jedoch länger an. Die Berechnung der Strömungssysteme geschieht mit dem FITNAH-Modell (siehe Kapitel 4.2).

Die Volumenstromdichte[17] ist ein Maß für die Intensität des Strömungssystems. Ein Strömungssystem mit hoher Volumenstromdichte ist in der Lage, kleinere Siedlungen zu überströmen, gut zu durchlüften und unter Umständen auch noch für nachfolgende Siedlungsgebiete Belüftungsfunktionen zu übernehmen. Ein Kaltluftstrom mit hoher Volumenstromdichte ist gegenüber baulichen Eingriffen weniger empfindlich. Die Empfindlichkeit eines Kaltluftstroms gegenüber einer Bebauung nimmt mit abnehmender Volumenstromdichte zu. Ein Kaltluftstrom mit geringer Volumenstromdichte wird durch zusätzliche Bebauung stark gestört und weist somit eine hohe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Eingriffen auf (Tabelle 4-4).

[17] *Die Volumenstromdichte wurde nur angelehnt an die VDI 3787 Blatt 5:2003 klassifiziert, da der Volumenstrom in der VDI-Richtlinie über einen Talquerschnitt bewertet wird. In der Klimaanalyse des Regionalverbandes Heilbronn-Franken wird hingegen die Volumenstromdichte einer Gitterzelle bewertet.*

Tabelle 4-4: Bewertung der Empfindlichkeit des Strömungssystems anhand der Volumenstromdichte als Integral über den Gesamtvolumenstrom (Skala angelehnt an Schwab & Zachenbacher (2009), iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2022)[18]).

Volumenstromdichte in m³/(m·s)	Empfindlichkeit gegenüber einem Eingriff
1 – 30	hoch
> 30 – 60	mittel
> 60	gering

4.3.2 Luftleitbahnen

Luftleitbahnen sollen nur in geringem Maße Rauhigkeitselemente (Gebäude, höhere Vegetation usw.) aufweisen. Gebiete mit einer geringen Rauigkeit (Rauigkeitslänge < 1 m), wurden durch eine Analyse der ATKIS® Basis-DLM-25 Daten und mit Hilfe der Differenz zwischen digitalem Oberflächenmodell und digitalem Geländemodell lokalisiert. Die Differenz zwischen Oberflächenmodell und Geländemodell ist ein Maß für die Höhe der Strömungshindernisse.

Diese hindernisarmen Gebiete können die Funktion einer klimarelevanten Luftleitbahn erfüllen, sofern sie Kaltluftströmungen in Wirkräume (Siedlungsgebiete) leiten.

4.3.3 Kaltluftproduktionsgebiete

Die Kaltluftproduktion ist primär abhängig von der Landnutzung, aber auch von der Exposition. Das **Kaltluftproduktionspotential** zeigt das Vermögen von Flächen Kaltluft zu bilden. Dies ergibt sich aus dem fühlbaren Wärmestrom zwischen Boden und Atmosphäre, der zwischen 22:00 Uhr und 04:00 Uhr integriert wurde (Methodik siehe Noppel (2017)).

[18] *iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2022): Erstellung einer landesweiten Klimaanalyse/Kaltluftströmungssituation unter Berücksichtigung des klimawandelbedingten Temperaturanstiegs. Datengrundlage für die Regionalplanung / Regionale Flächennutzungsplanung.*

4.4 Ermittlung von Ungunstfaktoren

Ungunstfaktoren bilden die Intensität und Häufigkeit der thermischen und human-biometeorologischen Belastung tagsüber und nachts im Sommerhalbjahr.

Zur Analyse der Intensität der thermischen Belastung wurde tagsüber die Physiologisch Äquivalente Temperatur PET um 13:00 Uhr und nachts die urbane Wärmeinsel (um 04:00 Uhr) analysiert. Die Häufigkeit der potentiell belastenden Situationen wird über die Anzahl an Sommertagen betrachtet (siehe Tabelle 4-5).

Während sich die PET tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet, korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur.

Tabelle 4-5: Folgende meteorologische Größen wurden als Indikatoren für die Ermittlung der thermischen Bedingungen herangezogen.

Parameter/Größe	**Grund**	**Bewertung nach**
Urbane Wärmeinsel um 04:00 Uhr	stärkste Ausprägung der urbanen Wärmeinsel	Höhe der urbanen Wärmeinsel
Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 13:00 Uhr	Tageshöchstwert der →**Globalstrahlung** und damit auch der PET	Matzarakis & Mayer (1997); VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022)
Anzahl an Sommertagen (Tage ≥ 25°C)	Berücksichtigung der Häufigkeit potenziell belastender Situationen	→**Perzentil**en (analog vergleichbarer Gutachten z.B. des DWD)

4.5 Bewertung der Ergebnisse und ermittelten Faktoren

Die Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken verfolgt in ihrer Herangehensweise einen anthropozentrischen Ansatz mit dem Ziel, durch raumordnerische Festlegungen eine Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der bioklimatischen Situation für eine möglichst große Anzahl der Bevölkerung bewirken zu können.

Ausgehend von dem anthropozentrischen Ansatz sind Strömungssysteme nur dann von planerischer Relevanz, wenn ihnen belastete Siedlungsgebiete (Wirkräume) zugeordnet werden können, die von den Ausgleichsleistungen profitieren. Insofern gilt: je größer die Betroffenheiten, desto (regionalplanerisch) bedeutender sind die Ausgleichsräume.

In Abbildung 4-5 ist eine idealisierte Situation skizziert. Die Grafik zeigt unterschiedlich belastete Wirkräume (hier charakterisiert durch die Bebauungsdichte, rote Flächen) und einen Kaltluftstrom, der die Tallage von Westen her belüftet. In dieser idealisierten Darstellung ist jedem ersichtlich, dass der Kaltluftstrom, der auf den belasteten Siedlungsraum trifft, eine höhere Ausgleichsrelevanz besitzt, als der identische Kaltluftstrom, der nur die mäßig belasteten Siedlungsgebiete oder das Umland belüftet.

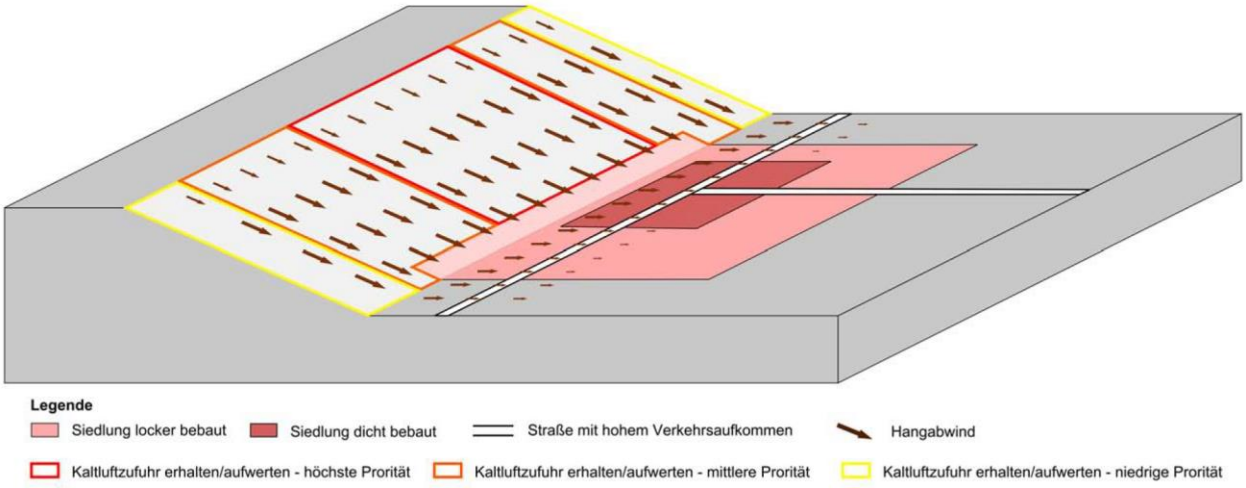


Abbildung 4-5: Exemplarische Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (Schwab & Zachenbacher (2009)).

In der Realität sind sowohl die Kaltluftabflussverhältnisse wie auch die Belastungssituation deutlich heterogener. Die Kaltluft kann aus unterschiedlichen Bereichen dem Siedlungsgebiet zuströmen, sie kann unterschiedliche Intensitäten aufweisen und sie kann unterschiedlich belastete Siedlungsbereiche treffen.

Die lokal sehr differenzierten Kaltluftabflüsse werden aus den FITNAH-Simulationen entnommen.

Die Vulnerabilität der Siedlungsbereiche (die roten Flächen des Wirkraumes) werden aus der thermischen Belastung und der Zahl der Betroffenen (Einwohnerdichte) abgeleitet.

Da keine einheitliche bundesweite Bewertungsskala existiert, ab welcher Temperatur und welcher Anzahl betroffener Personen ein Siedlungsraum – im regionalplanerischen Maßstab – als thermisch belastet einzustufen ist, wurde die nachfolgend dokumentierte Einstufungs-Kaskade zugrunde gelegt. Diese wurde zusammen mit Akteuren des Regionalverbandes Heilbronn-

Franken in iterativen Schritten erarbeitet und auf die siedlungsstrukturellen Verhältnisse des Regionalverbandes Heilbronn-Franken angepasst. Der relative Bezug auf die Teilräume der Planungsregion mit den vergleichsweisen höchsten thermischen Belastungen und den vergleichsweise höchsten Betroffenenzahlen ist für die Ermittlung der raumordnerischen Relevanz der dazugehörigen Ausgleichsräume wichtig.

Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in den Wirkräumen zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, wurde im Rahmen der Klimaanalyse ein automatisierter, allgemein gültiger, objektiver Algorithmus entwickelt, der auf das gesamte Gebiet des Regionalverbands angewandt werden kann.

Zur Identifizierung der Wirkräume – hier der human-bioklimatisch und thermisch belasteten Siedlungsgebiete – musste zunächst die „thermische Betroffenheit“ ermittelt und quantifiziert werden (Abbildung 4-6). Die thermische Betroffenheit wurde berechnet mit Hilfe der „Empfindlichkeit“ der Bevölkerung und der „thermischen Belastung“ (Abbildung 4-6).

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung basiert auf den Angaben zur Einwohnerdichte (Einwohner pro ¼ Hektar, entspricht einer 50 m · 50 m Rasterzelle) und den klimasensiblen Nutzungen (Abbildung 4-6 links). Die thermische Belastung wurde mit Hilfe der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) um 13:00 Uhr, der nächtlichen urbanen Wärmeinsel um 04:00 Uhr und der Anzahl der Sommertage berechnet (siehe Abbildung 4-6 rechts).

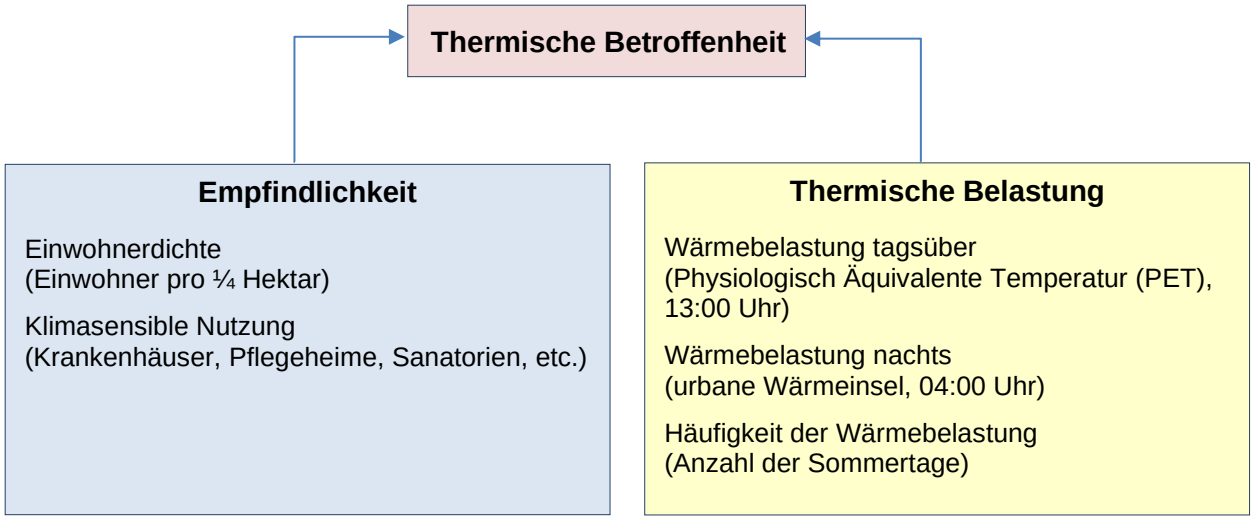


Abbildung 4-6: Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit und der thermischen Belastung. Die Empfindlichkeit wird aus der Einwohnerdichte und der klimasensiblen Nutzung berechnet. Die thermische Belastung setzt sich aus der Wärmebelastung tagsüber (PET, 13:00 Uhr), der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI, 04:00 Uhr) und der Anzahl an Sommertagen zusammen.

Je höher die Einwohnerdichte (**Empfindlichkeit**) und je belastender die thermischen Bedingungen sind, desto höher ist die thermische Betroffenheit und umso höher wird die Relevanz eines zugehörigen Strömungssystems eingestuft. Entsprechend sind Strömungssysteme nach ihrer Durchlüftungsfunktion und der Ausprägung der Volumenströme für die Siedlungsgebiete zu bewerten.

4.5.1 Berechnung der Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung wird aus der Einwohnerdichte pro 50 m x 50 m berechnet. Dazu wurde für jede Rasterzelle der Einwohneranteil abhängig von dem sich in der Rasterzelle befindlichen Gebäudevolumen der Wohngebäude berechnet. Die Bewertung der Einwohnerdichte erfolgt relativ durch Berechnung der Perzentile bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Regionalverband Heilbronn-Franken (Tabelle 4-6).

Die Berechnung der Einwohnerdichte in der Region Heilbronn-Franken gestaltete sich aufgrund der heterogenen Datengrundlage überraschend komplex. Das genaue Verfahren zur Bestimmung der Einwohnerdichte wird in Anhang 1 genauer ausgeführt.

Tabelle 4-6: Bewertung der Einwohnerdichte je 50 m x 50 m (bezeichnet als E in der Berechnungsformel in Kapitel 4.5.2).

Perzentil	Einwohner je 50 m x 50 m	Bewertung
<50.	≤ 6,0	sehr geringe Empfindlichkeit
≥50. - 75.	> 6,0 – 10,7	geringe Empfindlichkeit
≥75. - 85.	> 10,7 – 14,1	mittlere Empfindlichkeit
≥85. - 95.	> 14,1 – 23,1	hohe Empfindlichkeit
≥95.	> 23,1	sehr hohe Empfindlichkeit
Klimasensible Nutzung (z.B. Krankenhäuser, Pflegeheime)		sehr hohe Empfindlichkeit

4.5.2 Berechnung der Betroffenheit

Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der Zusammenschau der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit. Die thermische Belastung setzt sich zusammen aus der Intensität der Wärmebelastung, welche wiederum aus der täglichen und der nächtlichen Wärmebelastung besteht, und der Häufigkeit der Wärmebelastung (siehe Abbildung 4-7).

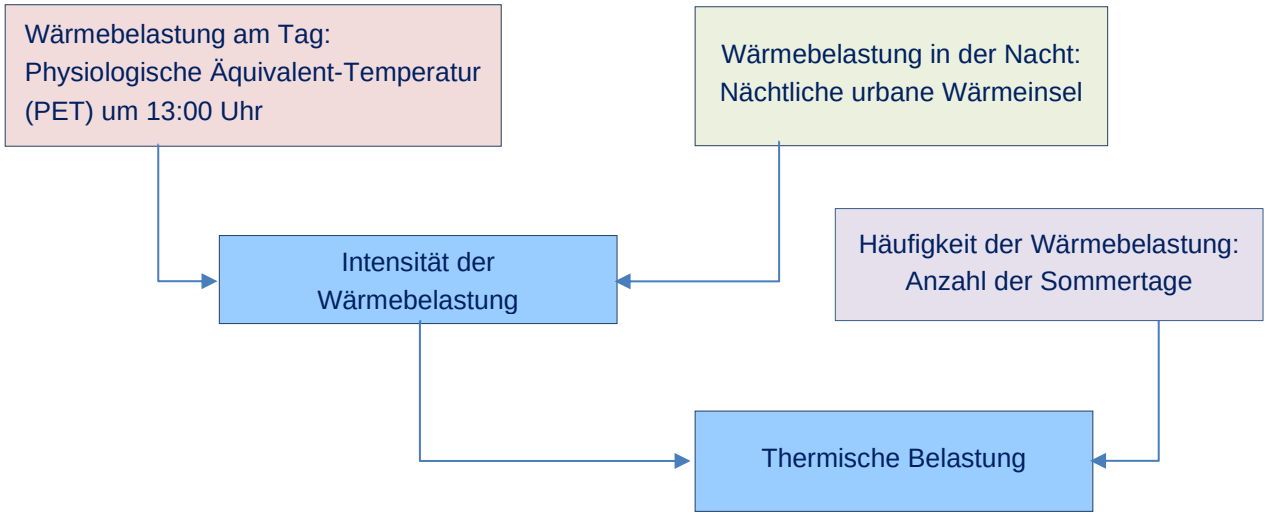


Abbildung 4-7: Ermittlung der thermischen Belastung.

Während sich die Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der solaren Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet,

korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur. Die nächtliche Wärmebelastung wurde anhand der Lufttemperatur in Form der urbanen Wärmeinsel bewertet. Zur Einordnung der Häufigkeit von Wärmebelastungen dient die Anzahl an Sommertagen pro Jahr.

Die Bewertungsgrundlagen der einzelnen Komponenten sind aufgeführt in Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-9. Die Bewertung der PET ist angelehnt an die Bewertung nach Matzarakis & Mayer (1997) und wurde für die bessere Differenzierung der Hitzebelastung im Regionalverband Heilbronn-Franken angepasst. Die Bewertung der urbanen Wärmeinsel und der Anzahl an Sommertagen erfolgt relativ anhand der berechneten Perzentile des jeweiligen Parameters.

Tabelle 4-7: Bewertung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET in °C) angelehnt an Matzarakis & Mayer (1997). Zur besseren Differenzierung der Hitzebelastung im Regionalverband Heilbronn-Franken wurden die letzten zwei Klassen ergänzt.

PET (°C)	Thermische Sensitivität
≤ 35,0	warm
> 35,0 – 41,0	heiß
> 41,0 – 47,0	sehr heiß
> 47,0 – 54,0	extrem
> 54,0	sehr extrem

Tabelle 4-8: Bewertung der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI in °C).

Perzentile	*UHI (°C)*	Bewertung (B2)
<75.	0,4	keine bis sehr geringe Überwärmung
≥75. - 90.	≥0,4 – 0,7	geringe Überwärmung
≥ 90. - 95.	≥0,7 – 1,0	mäßige Überwärmung
≥ 95. - 97.	≥1,0 – 1,3	mittlere Überwärmung
≥ 97.	≥1,3	starke Überwärmung

Tabelle 4-9: Bewertung der Anzahl an Sommertagen (ST, Tage pro Jahr im Zeitraum 1971 – 2000).

Perzentile	ST	Bewertung (B3)
< 50.	37,1	unterdurchschnittliche Anzahl an Sommertagen
≥ 50. - 80.	46,6	überdurchschnittliche Anzahl an Sommertagen
≥ 80. - 90.	51,3	hohe Anzahl an Sommertagen
≥ 90. - 95.	54,0	sehr hohe Anzahl an Sommertagen
≥ 95.	68,9	extreme Anzahl an Sommertagen

Die thermische Betroffenheit der Bevölkerung ergibt sich schließlich aus der Verrechnung der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit.

Mitunter werden die Größen (hier beispielsweise die Belastungszahlen) standardisiert und verschnitten. Mit einer z-Standardisierung (oder auch z-Transformation) können in der Statistik Werte unterschiedlicher Maßeinheiten und Stichproben in eine gemeinsame Einheit überführt

werden, um diese vergleichbar zu machen. Dazu wird die Abweichung vom Mittelwert durch die Standardabweichung dividiert. Da dieses Verfahren für schiefe Verteilungen, wie sie bei meteorologischen Größen vorliegt, zu einer Verschiebung der standardisierten Werte führen kann, wird hier auf eine andere Form der Bewertung angesetzt.

Die thermische Betroffenheit B ergibt sich aus der normierten Summe der jeweils gewichteten thermischen Bedingungen multipliziert mit der Empfindlichkeit E, die sich aus der Einwohnerdichte und den klimasensiblen Nutzungen ergibt:

$$B = \frac{f_{\mathrm{UHI}} \cdot \mathrm{UHI} + f_{\mathrm{PET}} \cdot \mathrm{PET} + f_{\mathrm{ST}} \cdot \mathrm{ST}}{\max\left(f_{\mathrm{UHI}} \cdot \mathrm{UHI} + f_{\mathrm{PET}} \cdot \mathrm{PET} + f_{\mathrm{ST}} \cdot \mathrm{ST}\right)} \cdot E$$

Mit den Wichtungsfaktoren f können den einzelnen Belastungswerten unterschiedliche Bedeutung zugemessen werden. In der regionalen Klimaanalyse wurden folgende Wichtungsfaktoren gewählt:

$$f_{\mathrm{UHI}} = 1;\ f_{\mathrm{PET}} = 0{,}5;\ f_{\mathrm{ST}} = 1$$

4.5.3 Ermittlung der regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete

Im Regionalverband Heilbronn-Franken sind häufig Gebiete mit einer hohen Siedlungsdichte und gleichzeitig geringen Bevölkerungsdichte anzutreffen. Bei der Berechnung der thermischen Betroffenheit werden diese Flächen wegen der geringen Empfindlichkeit (geringe Einwohnerdichte) allerdings gering gewichtet. Aus regionalplanerischer Sicht müssen diese Flächen (Wirkräume) allerdings stärker in die Beurteilung mit einfließen.

Als ein Kriterium zur Identifizierung und Differenzierung der Wirkräume kann dabei die flächenhafte Ausdehnung des Auftretens der thermischen Betroffenheit innerhalb eines zusammenhängenden Siedlungsgebietes herangezogen werden. Ziel ist es, regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete zu ermitteln.

Die thermische Betroffenheit eines Siedlungsgebiets wird als regionalplanerisch relevant eingestuft, wenn mindestens 1 ha des Siedlungsgebiets eine mittlere bis extreme thermische Betroffenheit (Wert der Betroffenheit > 50. Perzentil der gesamten Betroffenheit im Regionalverband) aufweist.

4.5.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme

Wesentliche Grundlage sind die mit FITNAH berechneten Windfelder und die flächendeckende Analyse der Belastungssituation. Daraus lassen sich in einem zweistufigen Verfahren die für Siedlungsgebiete relevanten →**Kaltlufteinzugsgebiete** (Ausgleichsräume) und in Zusammenhang mit der Betroffenheit der Wirkräume die Relevanz der Strömung bestimmen.

1. Abgrenzung der für den jeweiligen Wirkraum relevanten Strömungssysteme und der Kaltluftproduktionsgebiete, die für den zugehörigen Wirkraum von Bedeutung sind.
2. Von *allen* Raster-Zellen innerhalb dieser Kaltlufteinzugsgebiete wurden die →**Luftpakete** mit Hilfe von **Vorwärts→trajektorien** verfolgt, um eine Maßzahl aus der Betroffenheit der belüfteten Siedlungsgebiete zu berechnen.

Schritt 1:

Um die für die Wirkräume relevanten Kaltluftströmungen zu ermitteln, wurde – ausgehend vom Siedlungsraum in Richtung Freiraum – der Weg der Luftpakete zurückverfolgt. Dadurch konnte der zu betrachtende Ausgleichsraum abgegrenzt werden (in Abbildung 4-8 rot strichliert).

Schritt 2:

Im zweiten Schritt wurde aus jeder Rasterzelle, die sich im abgegrenzten Ausgleichsraum befindet, eine Vorwärtstrajektorie gestartet, um so den Weg des jeweiligen Luftpaketes zu verfolgen (vgl. Noppel (2017)). Die Relevanz der jeweiligen Strömung ergibt sich aus der Addition der Werte der thermischen Betroffenheit (siehe Kapitel 4.5.2), die von den Luftpaketen auf ihrem Weg überstrichen werden. Je höher die thermische Betroffenheit und je höher die Anzahl der überstrichenen Rechengitter, desto bedeutsamer ist die Strömung (Grüntöne und rosa in Abbildung 4-8).

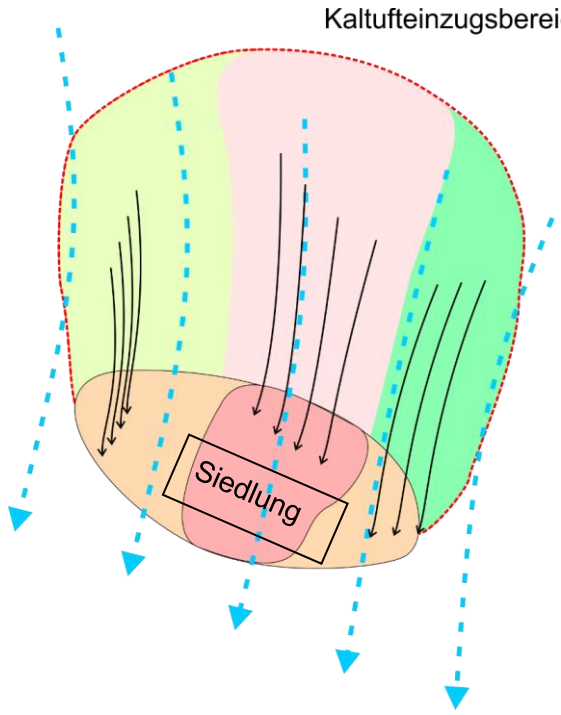


Abbildung 4-8: Differenzierung innerhalb des Kaltluftstroms mithilfe von Vorwärtstrajektorien von jeder identifizierten Rasterzelle aus.

Die berechnete Maßzahl wurde mit der reziproken Zeitdauer gewichtet, die ein Luftpaket abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit bis zu den jeweiligen Siedlungsgebieten zurückgelegt hat. Somit wurden siedlungsnahe Flächen (kurze Reisezeit) höher bewertet als siedlungsferne Flächen (lange Reisezeit).

Bei der Bewertung der Strömung zum Termin 22:00 Uhr WOZ wurde eine Verfolgungszeit von zwei Stunden angesetzt, um die für die Siedlungsgebiete relevanten Einzugsbereiche zu ermitteln. In der zweiten Nachthälfte wurde eine längere Verfolgungszeit von drei Stunden gewählt, um der längeren Fließzeit der Kaltluft Rechnung zu tragen.

5 Ausblick Klimawandel

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen, da die Witterungsabläufe während einzelner Jahre sehr unterschiedlich sein können. Zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse zu Klimaveränderungen bei. So ist seit etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der anthropogen bedingten Freisetzung von Treibhausgasen ist. Auch in Baden-Württemberg wird eine Zunahme der Lufttemperatur beobachtet (siehe Abbildung 5-1).

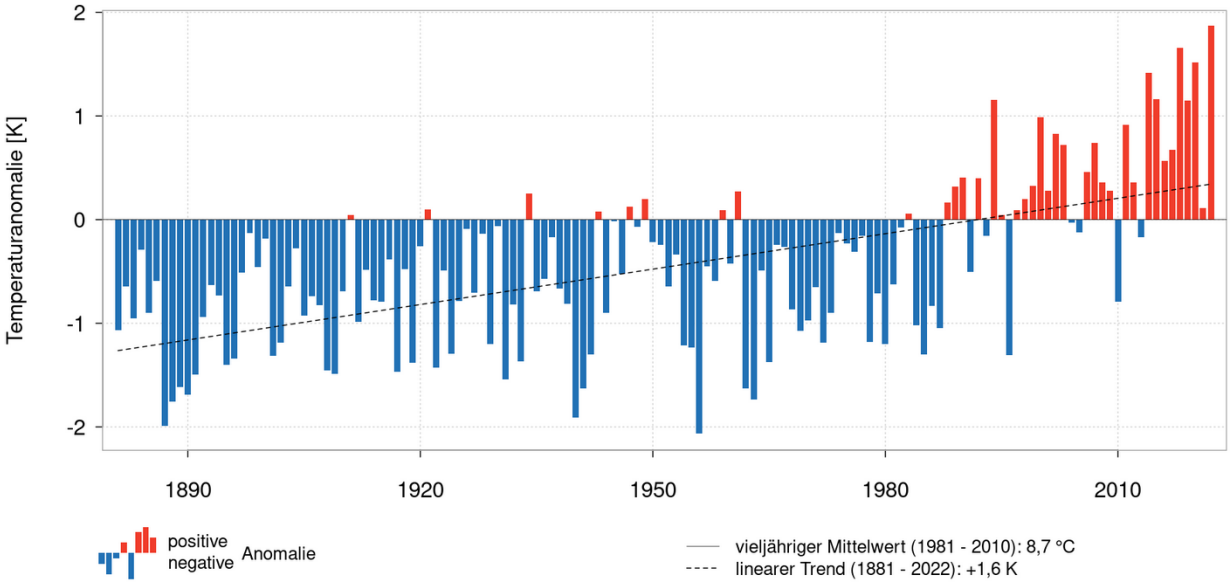


Abbildung 5-1: Beobachteter Klimawandel in Baden-Württemberg. Differenz der mittleren Lufttemperatur zum langjährigen Mittel in der Klimanormalperiode 1981 – 2010 von 1880 bis heute (Daten: DWD).

Eine wichtige Grundlage zur Projektion des Klimas spielt die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre und deren mögliche Entwicklung. Für die Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Klimas wurden die Klimaprojektionen auf Basis der EURO-CORDEX-Daten ausgewertet (siehe Kapitel 4.2.5). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse für Baden-Württemberg den Raum Heilbronn dargestellt. Dabei werden zunächst die Klimaelemente Lufttemperatur und Niederschlag und anschließend klimatologische Kenntage betrachtet.

5.1 Klimawandel im Regionalverband Heilbronn-Franken

Auf die Auswirkungen und Maßnahmen für unterschiedliche Akteure kann in einer Klimaanpassungsstrategie näher eingegangen werden. Hier sollen als Übersicht die klimatologischen Aspekte beleuchtet werden. Eine Übersicht über die betroffenen Bereiche findet sich auf der Webseite des Umweltbundesamts[19]. Klimasteckbriefe für die einzelnen Landkreise können auf der Webseite des Projektes LoKlim[20] oder GERICS[21] abgerufen werden. Darüber hinaus können

[19] https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse/uebersicht-betroffenheiten

[20] LoKlim: https://lokale-klimaanpassung.de/

[21] GERICS: https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/index.php.de

auch Informationen zu den zu erwartenden gesundheitlichen Folgen und möglichen Klimaanpassungsmaßnahmen bezogen werden.

In Tabelle 5-1 sind die potenziellen Änderungen der meteorologischen Größen dargestellt. Welche Auswirkungen sich auf die betroffenen Bereiche ergeben, ist in den anschließenden Kapiteln aufgeführt.

Tabelle 5-1: Veränderung meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts.

Meteorologische Größe	**Erwartete Änderung im 21. Jahrhundert**
Lufttemperatur	EURO-CORDEX_Daten: +2,0 K (Mitte des Jhd.) +4,0 K (Ende des Jhd.)
Niederschlag	EURO-CORDEX-Daten: +6 % (Mitte des Jhd.) +4 % (Ende des Jhd.) Innerhalb dieser Trends muss die jahreszeitliche Variabilität berücksichtigt werden. Hierbei ist generell von winterlicher Zunahme des Niederschlags und sommerlicher Abnahme auszugehen. Gleichzeitig wird eine Zunahme an Starkregenereignissen erwartet. Saisonale Variabilität: +9 % Winter (Mitte des Jhd.) +19 % Winter (Ende des Jhd.) +11 % Frühling (Mitte des Jhd.) +15 % Frühling (Ende des Jhd.) -3 % Sommer (Mitte des Jhd.) -9 % Sommer (Ende des Jhd.) keine Tendenz im Herbst
Starkwind	Zunahme[22]
Starkregen-Ereignisse	EURO-CORDEX-Daten: steigende Tendenz für Sommer (5 % – 15 %) und Winter (15 % – 25 %)
Hagel	Münchner Rückversicherung: etwa +0,1 Hageltage (Mitte des Jhd.)
Trockenheit	Sommerlicher Rückgang von Niederschlägen

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

5.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist die Temperatur der bodennahen Atmosphäre. Deren Messung soll nicht von Sonnenstrahlung oder anderen Wärmeströmen beeinflusst werden. Sie ist ein wesentlicher Parameter bei der Bestimmung der Wärmebelastung.

Weltweit wird durch den Klimawandel ein Anstieg der Lufttemperaturen erwartet. Lokal können sich jedoch Verhältnisse einstellen, die von weltweit prognostizierten mittleren Werten abweichen. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass weniger die Mittelwerte als vielmehr die Extreme für den Menschen und die Umwelt ein Problem darstellen. In unseren Breiten verschiebt sich die Verteilung der Temperaturen nicht nur zu höheren Werten hin, sie wird auch flacher. Eine flachere Verteilung bedeutet, dass sowohl die Extremtemperaturen im Sommer ansteigen, wie auch winterliche Kältephasen ausgeprägter auftreten können[23].

In Abbildung 5-2 ist die berechnete Zunahme der Lufttemperatur für die Klimanormalperioden 2031 – 2060 und 2071 – 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 dargestellt.

In dem betrachteten Szenario tritt eine deutliche Temperaturerhöhung auf. Diese äußert sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts in einer Zunahme um 2,0 K. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird eine deutliche Zunahme von 4,0 K prognostiziert.

Die grundsätzlich festgestellte Temperaturerhöhung wirkt sich außerdem auf die in den folgenden Kapiteln betrachteten Parameter maßgeblich aus.

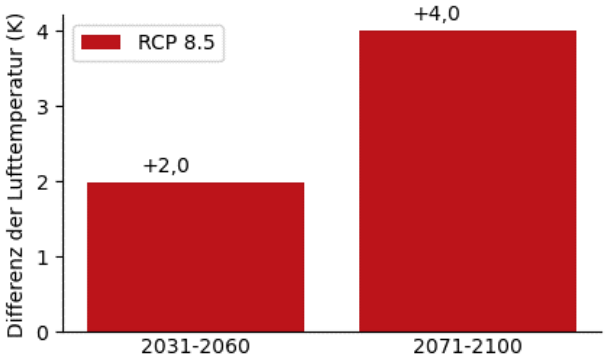


*Abbildung 5-2: Änderung der Lufttemperatur (→**Median**) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.*

Die Zeitreihe des Jahresmittelwerts der Lufttemperatur in Abbildung 5-3 verdeutlicht nochmals die prognostizierte Zunahme der Lufttemperatur bis 2100. Der grau hervorgehobene Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil*, zeigt, dass die Prognose um bis zu 4 K schwankt.

[23] *Vgl. auch https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/3-2-4_1_ipcc_srex_spm_grafik_deutsch Stand: März 2022*

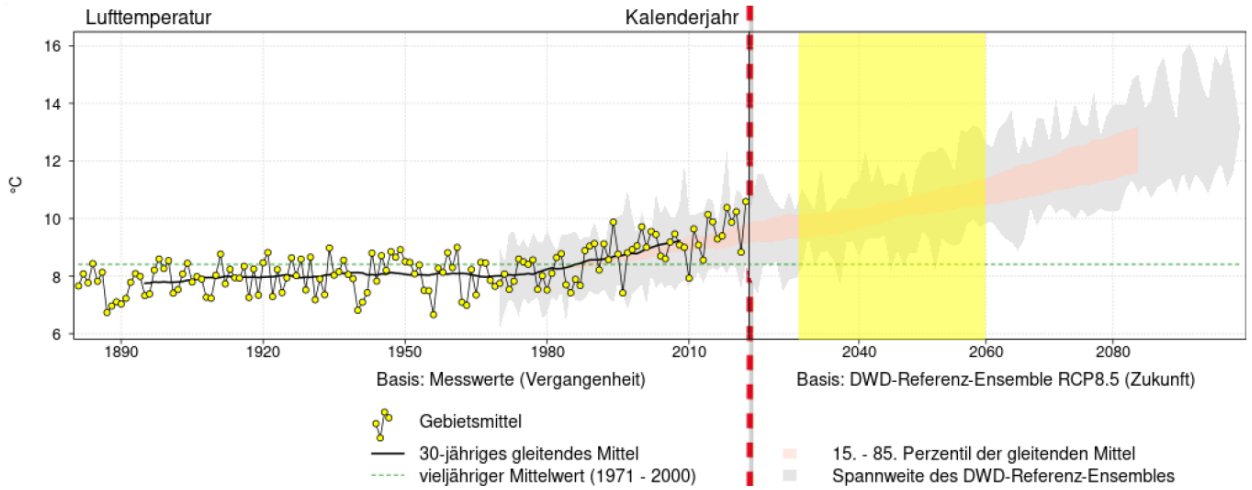


Abbildung 5-3: Gemessene Jahresmittelwerte der Lufttemperatur 1971 – 2022 in Baden-Württemberg. Prognose 2023 – 2100 für das RCP 8.5 Szenario (Daten: Klimaatlas DWD).

5.3 Niederschlag

Niederschlag ist das in flüssiger oder fester Form aus Wolken auf die Erde fallende Wasser.

Im Frühjahr (Januar bis April) fallen in der Regel die geringsten Niederschlagsmengen an. Das Maximum der Niederschlagsmenge fällt im Mai, Juni und Juli an (Abbildung 5-4), da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann und dadurch potenziell mehr Wasser in der Atmosphäre vorhanden ist.

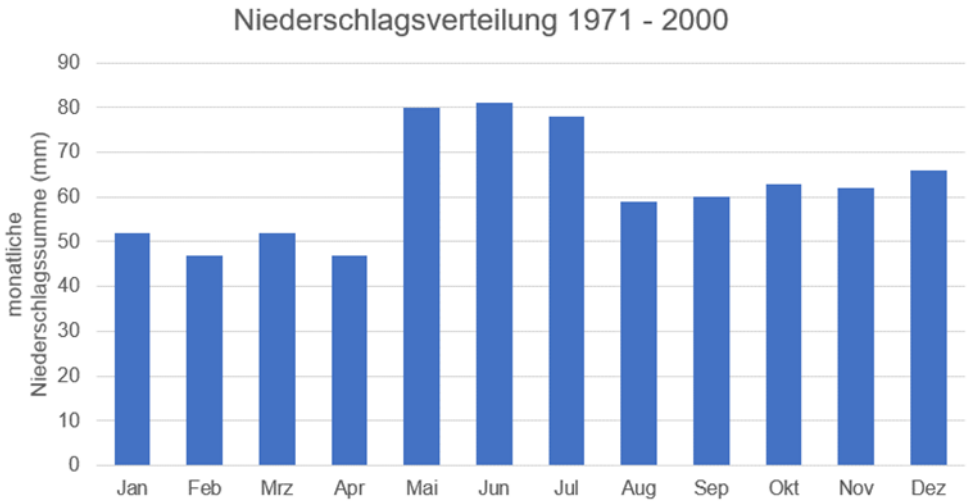


Abbildung 5-4: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1971 – 2000 gemessen in Heilbronn (Daten: DWD).

Für das 21. Jahrhundert wird keine eindeutige Änderung des Jahresniederschlags in Baden-Württemberg prognostiziert (Abbildung 5-5). Zwar wird im Mittel eine geringe Zunahme von etwa 6 % zur Mitte des Jahrhunderts bzw. von 4 % zum Ende des Jahrhunderts berechnet, allerdings lässt sich durch die hohe Variabilität keine gesicherte Aussage über die Entwicklung treffen (Abbildung 5-6).

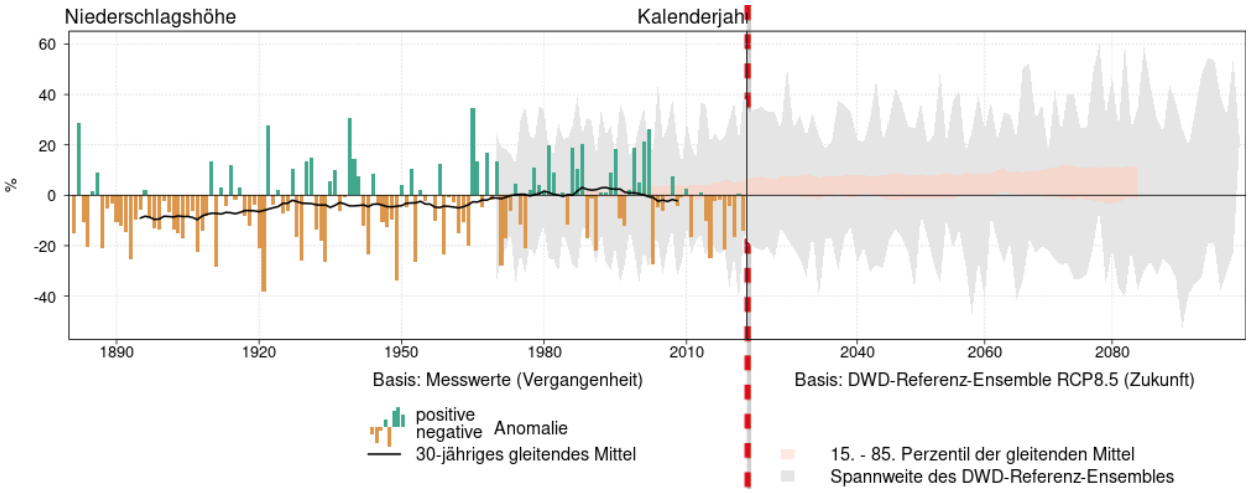


Abbildung 5-5: Gemessene Abweichung des Jahresniederschlags in Baden-Württemberg 1971 – 2022 und Prognose 2023 – 2100 für das RCP 8.5 Szenario (Daten: Klimaatlas DWD).

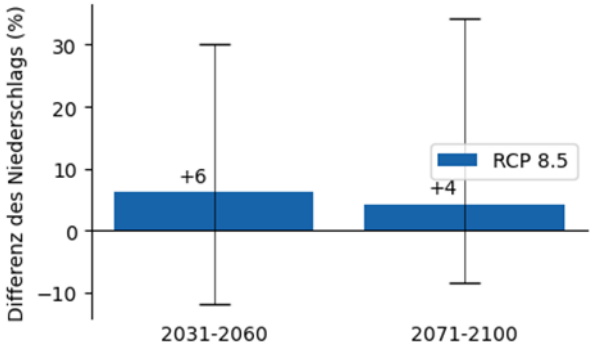


Abbildung 5-6: Niederschlagsänderung in % bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

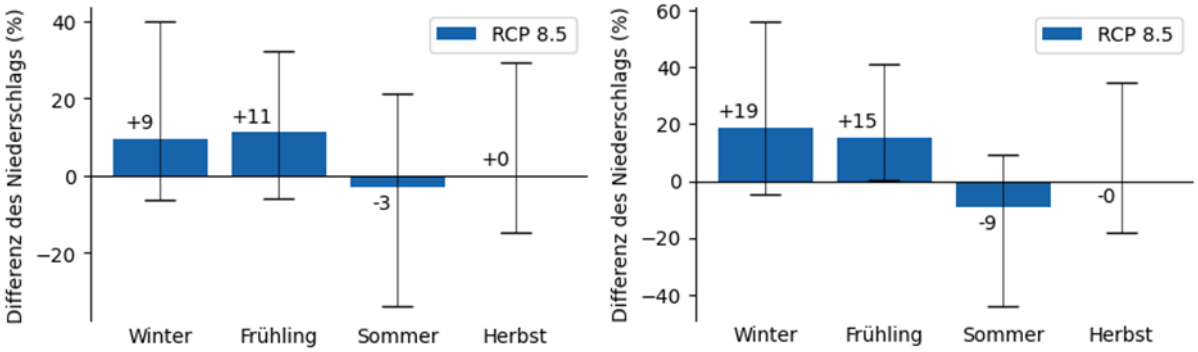


Abbildung 5-7: Saisonale Niederschlagsänderung für den Zeitraum 2031- 2060 (links) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

Die saisonale Betrachtung zeigt eine Verschiebung der Niederschlagsmenge vom Sommer in den Frühling und Winter hinein (Abbildung 5-7). Während die Niederschlagsmengen im Winter und Frühling um 9 % bis 11 % (Mitte 21. Jhd.) bzw. um bis zu 19 % (Ende 21. Jhd.) zunehmen,

wird mit einer Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer von 3 % bis Mitte des Jhd. bzw. 9 % bis Ende des Jhd. ausgegangen. Zu beachten sind die hohen Unsicherheiten der Prognosen.

Neben der Gesamtregenmenge ist auch die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen (z.B. durch unwetterartige Gewitter) von Bedeutung. Für den Winter wird eine Zunahme von 15 % bis 25 % für prognostiziert (Abbildung 5-8). Am Main und südwestlich von Heilbronn werden punktuell auch 25 % bis 35 % ausgewiesen. Im Sommerhalbjahr ist dagegen überwiegend nur mit einer leichten Zunahme von 5 % bis 15 % zu rechnen.

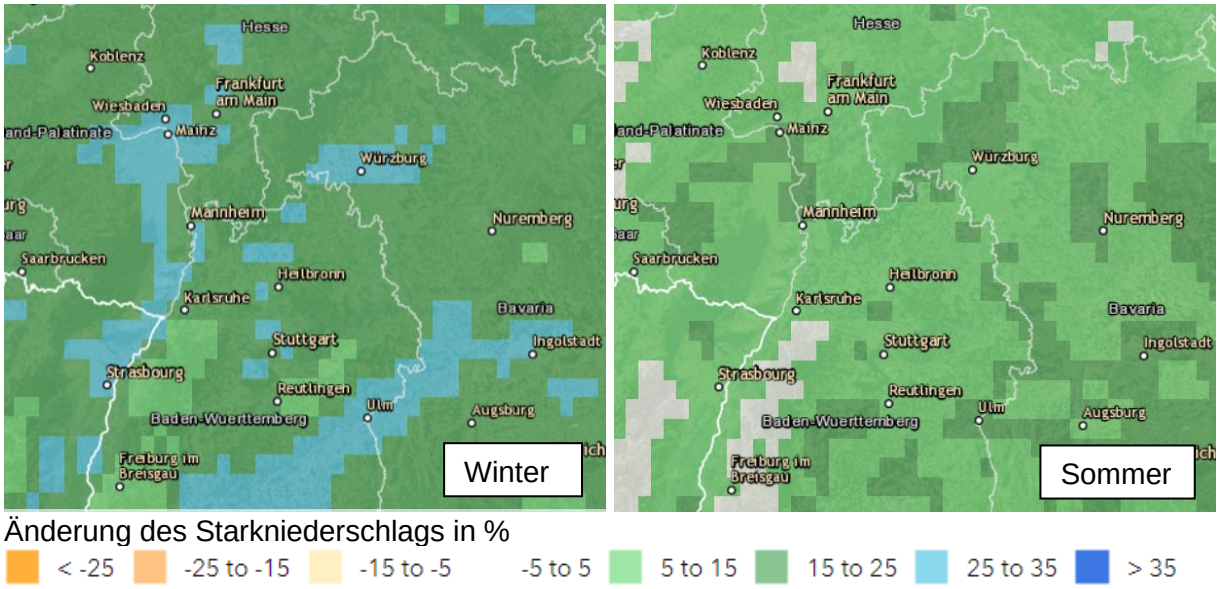


Abbildung 5-8: Änderung des Starkniederschlags im Winter (oben) und Sommer (unten) im Zeitraum 2071 – 2100 im Vergleich zum aktuellen Klima (1971 – 2000) bei Betrachtung des RCP 8.5. Starkniederschlag wird definiert als 95. Perzentil der Intensität aller Regenereignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020[24]).

5.4 Klimatologische Kenntage

Mittelwerte vermitteln nicht immer die klimatischen Charakteristiken. Deshalb zieht man als Klimaindikatoren Über- oder Unterschreitungshäufigkeiten heran. Einen Überblick über gebräuchliche Indikatoren wurde bereits in Kapitel 3.2.2 aufgeführt.

In Abbildung 5-11 sind exemplarisch die Anzahl der Sommertage und der Frosttage in Deutschland für die Klimanormalperiode 1991 – 2020 dargestellt. Die meisten Sommertage werden am Oberrhein beobachtet. Danach folgt auch schon bald der Heilbronner Raum, der ebenfalls deutliche Wärmebelastungen aufweist. Die wenigsten Sommertage werden an den Küsten, den Mittelgebirgen und am Alpenrand gemessen.

Bei den Frosttagen kehrt sich die Verteilung nahezu um. Die meisten Frosttage findet man am Alpenrand und in den Mittelgebirgen. Die wenigsten werden im norddeutschen Tiefland, am Niederrhein und am Oberrhein ausgewiesen. Auch der Heilbronner Raum hat vergleichsweise wenig Frosttage.

[24] https://experience.arcgis.com/experience/5f6596de6c4445a58aec956532b9813d, aufgerufen 20.02.2023

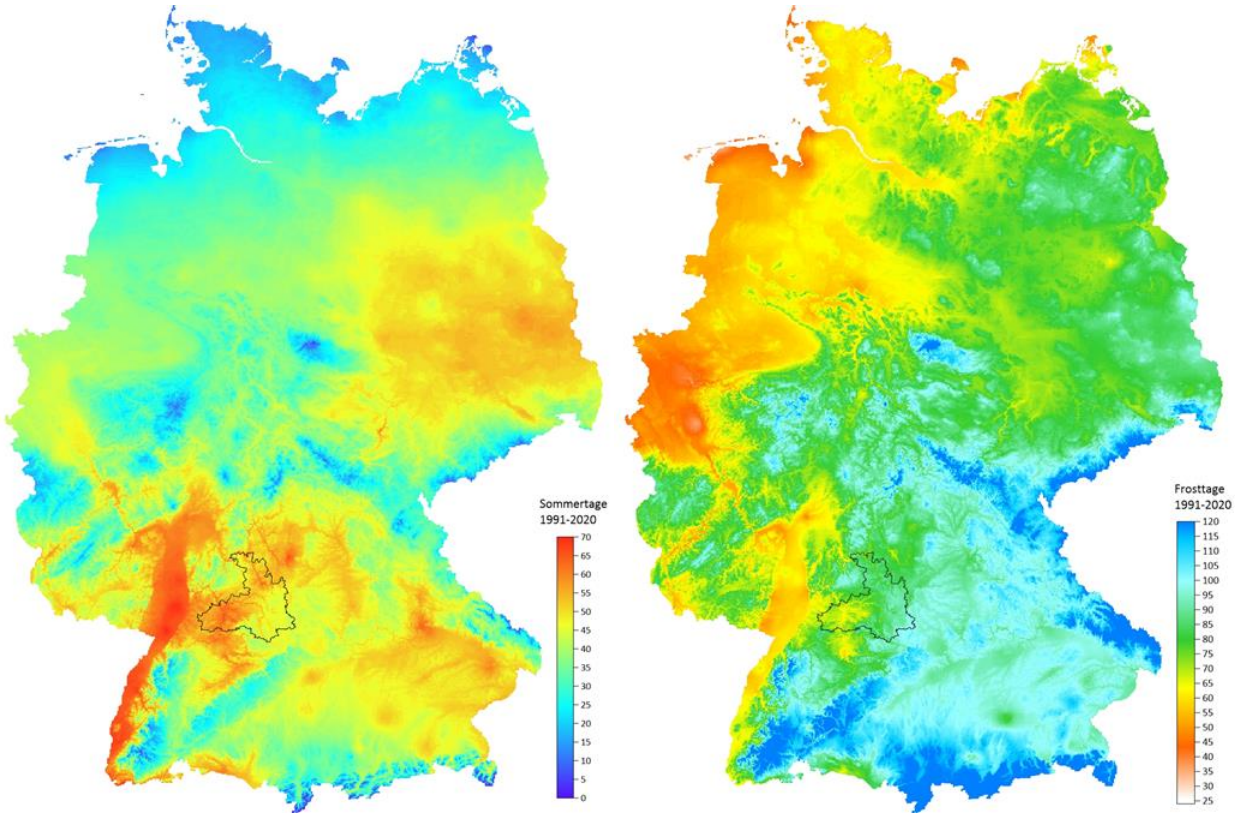


Abbildung 5-9: Anzahl der Sommertage (links) und der Frosttage (rechts) für die Klimanormalperiode 1991 – 2020 in Deutschland. Das Gebiet des Regionalverbands ist schwarz umrandet. (Quelle: DWD).

Durch die höheren Lufttemperaturen im Klimawandel nimmt zukünftig auch die Anzahl der Sommertage zu. Abbildung 5-10 zeigt die ab 1951 gemessenen Häufigkeiten in Baden-Württemberg und die Prognose für das RCP8.5-Szenario. Bereits in den letzten 70 Jahren ist eine merkliche Zunahme der Sommertage zu verzeichnen. Zukünftig ist von einer weiteren Zunahme auszugehen, so dass bei diesem Szenario eine Verdoppelung der Sommertage bis zum Ende des Jahrhunderts nicht auszuschließen ist.

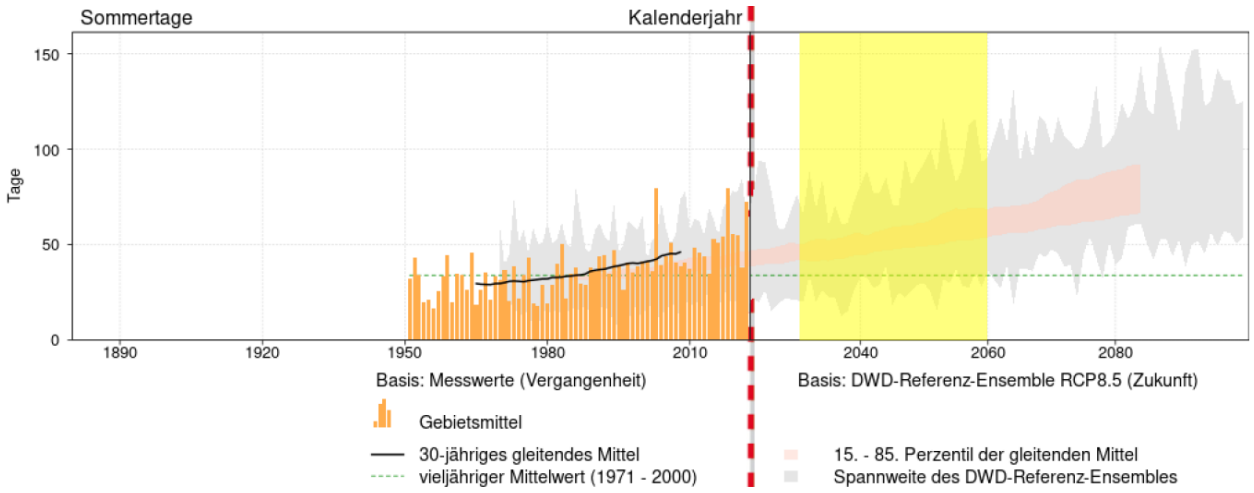


Abbildung 5-10: Anzahl der Sommertage in Baden-Württemberg zwischen 1951 und 2022 und Prognose für das Szenario RCP8.5 für den Zeitraum 2023 – 2100. (Quelle: Klimaatlas DWD).

In Tabelle 5-2 sind die klimatologischen Kenntage aufgeführt, die sowohl für den Zeitraum 1971 – 2010 (siehe Kapitel 3.2.2), als auch mit den Multi-Modell-Multi-Szenario-Klimadaten für die Zeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100 ermittelt wurden.

Tabelle 5-2: Klimatologische Kenntage für verschiedene Klimanormalperioden ermittelt aus EURO-CORDEX Klimamodelldaten auf dem Gebiet von Neckarsulm. Kenntage für zukünftige Perioden basieren auf dem Szenario RCP 8.5.

Klimatologischer Kenntag	1971 – 2000	2031 – 2060	2071 – 2100
Frosttage	71	42	22
Eistage	14	5	2
Sommertage	48	74	105
Heiße Tage	8	22	43

Tabelle 5-3: Anzahl der jährlichen Sommertage für Heilbronn und Creglingen-Frauental in der historischen Klimanormalperiode 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume 2031 – 2060 und 2071 – 2100. Die Prognose beruht auf dem Klimaszenario RCP8.5.

	1971 – 2000	2031 – 2060			2071 – 2100		
		15. Perz.	Median	85. Perz.	15. Perz.	Median	85. Perz.
Heilbronn	58,7	76,5	81,4	88,0	101,9	111,3	120,5
Frauental	40,3	56,4	60,0	67,2	82,7	91,2	103,0

Die regionalen EURO-CORDEX Projektionen haben eine Auflösung von 12,5 km. In Abbildung 5-11 sind die Anzahl der Sommertage in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 und die Projektionen für 2031 – 2060 und 2071 – 2100 dargestellt. In der oberen Reihe für das Szenario RCP2.6, unten für das Szenario 8.5.

Daraus geht auch in der Fläche hervor, dass die Zahl der Sommertage sowohl in den Verdichtungsräumen am Neckar wie auch in den Hochebenen im Osten des Regionalverbands ansteigt. Das erfolgt im bereits unrealistischen Szenario RCP2.6 noch langsam, im eher anzunehmenden Szenario RCP8.5 schon relativ drastisch.

Die Verfeinerung der Häufigkeit der Sommertage auf das 50 m-Raster mit Hilfe der Quader-Methode ist in Kapitel 6.2.4 dargestellt.

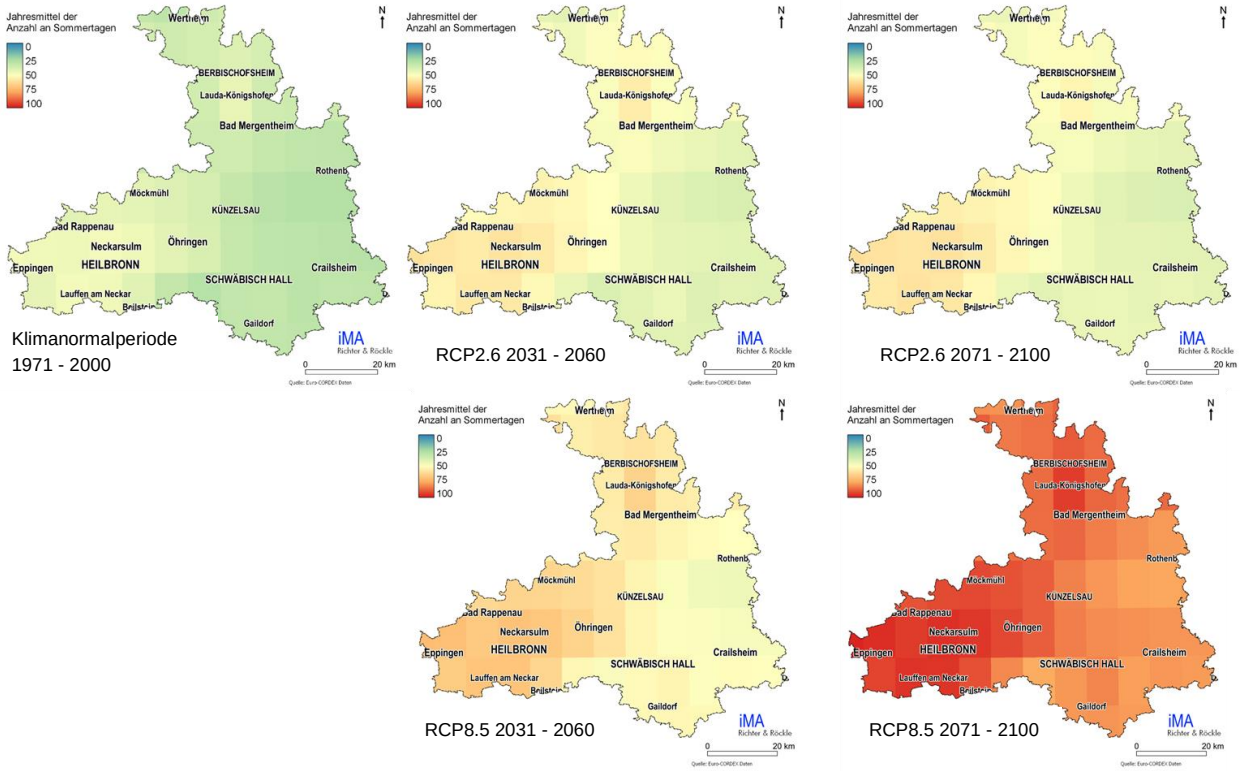


Abbildung 5-11: Anzahl an Sommertagen während der Klimanormalperiode 1971 – 2000 (oben links) und Prognosen EURO-CORDEX für den Zeitraum 2031 – 2060 (Mitte) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5.

5.4.1 Heiße Tage und tropische Nächte

Die Anzahl an heißen Tagen beschreibt in erster Linie ein Gütekriterium für den Sommer, was durch die Anzahl an Sommertagen ergänzt wird[25].

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird prognostiziert, dass die Anzahl der heißen Tage um etwa 14 Tage (RCP 8.5) ansteigt (Tabelle 5-2, Abbildung 5-12). Bis 2100 wird ein Anstieg um 35 Tage auf dann 43 Tage jährlich (RCP 8.5) erwartet. Zu beachten ist hier die große Unsicherheit, welche durch die Variabilität in der Temperaturzunahme bedingt ist (vgl. Abbildung 5-3).

Eine ähnliche Tendenz wie für die Anzahl an heißen Tagen lässt sich in Tabelle 5-2 auch für die Anzahl an Sommertagen erkennen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts könnte die Anzahl der Sommertage um etwa 26 Tage (RCP 8.5) ansteigen (Abbildung 5-12). Bis 2100 könnten es letztlich etwa 57 Tage (RCP 8.5) mehr sein als im Zeitraum 1971 – 2000.

[25] www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html

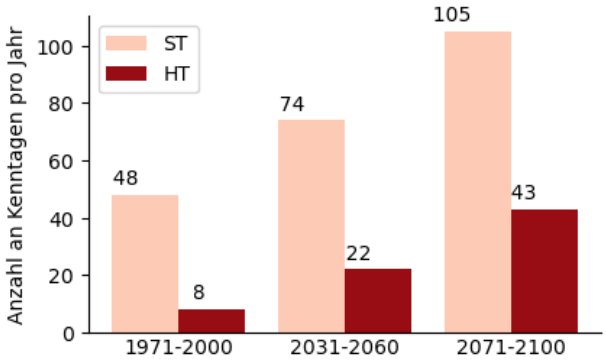


Abbildung 5-12: Anzahl der Sommertage (ST) und der heißen Tage (HT) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5.

Über die zukünftige Anzahl an Tropennächten kann aufgrund ihres seltenen Vorkommens aus statistischer Sicht keine aussagekräftige Tendenz abgeleitet werden. Mit einer Erhöhung der Lufttemperatur werden diese jedoch analog zu den heißen Tagen ebenfalls häufiger auftreten.

5.4.2 Frosttage

Die Anzahl an Frosttagen wird tendenziell abnehmen (Tabelle 5-2, Abbildung 5-13). Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird sich deren Anzahl um 29 Tage (RCP 8.5) verringern. Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die Anzahl um bis zu 49 Tage (RCP 8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 auf dann lediglich 22 Frosttage jährlich.

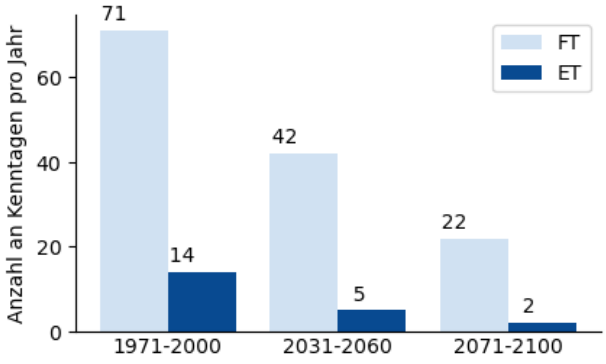


Abbildung 5-13: Anzahl der Frosttage (FT) und Eistage (ET) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5.

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

6 Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationen mit dem Strömungsmodell FITNAH (Kapitel 4.2) und die daraus abgeleitete Quantifizierung der Gunst- und Ungunstfaktoren (Kapitel 4.3 und 4.4) dargestellt.

Zu den Gunstfaktoren zählen die Strömungssysteme, die Kaltluftproduktionsgebiete und die Luftleitbahnen. Zu den Ungunstfaktoren gehören die thermischen Bedingungen tags und nachts. Die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels für den Regionalverband werden in Kapitel 6.2.4 dargestellt.

Im Kapitel 6.3 wird die Empfindlichkeit und Betroffenheit dargestellt.

6.1 Kaltluft

Zur Betrachtung der Durchlüftung ist neben dem bodennahen Wind (hier ausgewertet für den bodennahen Raum in 5 m über Grund) auch der Wind im Überdach-Niveau (hier: 28 m über Grund) von Bedeutung. Abbildungen der Strömung mittels Pfeilen sind im regionalen Maßstab nicht sinnvoll, da die Informationsdichte zu hoch ist. Eine Ausdünnung der Pfeile vermittelt ein verzerrtes Bild der Verhältnisse. Die Darstellung der Windpfeile bedarf der Darstellung in Geografischen Informationssystemen in einem größeren Maßstab.

Die Kaltluftverhältnisse im Regionalverband Heilbronn-Franken werden über die Volumenstromdichte (siehe Kapitel 3.3.3 und 4.3.1) für die Zeitpunkte 22:00 Uhr und 04:00 Uhr (Abbildung 6-1) ausgewertet. Die Volumenstromdichte ist ein Maß für die Intensität einer Strömung. Eher flache Hangabwinde können zwar eine hohe bodennahe Fließgeschwindigkeit aufweisen, aufgrund der geringen Kaltluftmächtigkeit kommen jedoch keine großen Volumenstromdichten zustande. Solche Strömungen können durch Hindernisse stark beeinträchtigt werden.

In Tälern, in denen sich Kaltluft ansammelt, entstehen große Kaltluftmächtigkeiten. Dann können auch geringe mittlere Windgeschwindigkeiten zu markanten Volumenstromdichten führen. Diese Strömungssysteme reagieren weniger auf Hindernisse, da sie diese in der Regel überströmen können.

Etwa zur Zeit des Sonnenuntergangs bilden sich bodennah Hangabwinde von vergleichsweise geringer Mächtigkeit. Die Kaltluft kann dann in Tobeln und Tälern zusammenfließen und bereits intensive Kaltluftabflüsse ausprägen. Diese sind in Abbildung 6-1 dunkelblau eingefärbt.

In weiten Teilen des Regionalverbands werden geringe bis mäßige Volumenstromdichten berechnet. Zum Beispiel werden in den Hochebenen der Kreise Niederstetten, Schrozberg und Blaufelden aufgrund der geringen Reliefierung kaum signifikante Kaltluftströme ausgewiesen. In diesen Bereichen wird auch schon durch schwache übergeordnete Winde die bodennahe Kaltluftbildung gestört, was dann die Abflüsse unterdrückt.

Die großen Flusstäler von Neckar, Kocher, Jagst und Tauber zeigen keine signifikanten Talabwinde. Meist sind die Zuflüsse aus deren Seitentälern deutlich intensiver als der Kaltluftstrom in den stark eingeschnittenen Tallagen. Zudem sind die Talgefälle gering, was am mäandrieren der Flussläufe zu erkennen ist. Außerdem ist durch die Besiedlung der Tallagen eine vergleichsweise hohe Rauigkeit vorhanden.

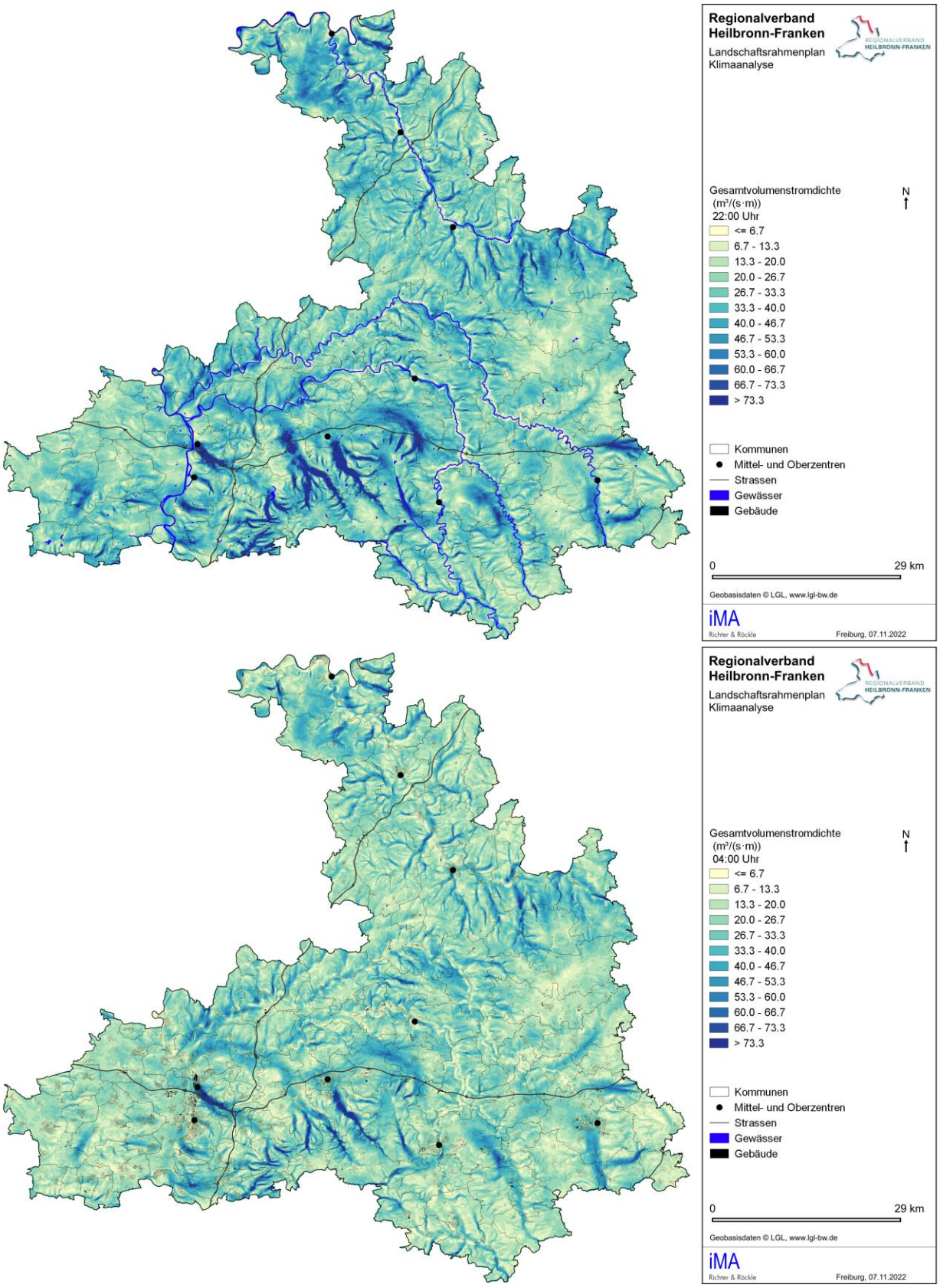


Abbildung 6-1: Gesamtvolumenstromdichte im Regionalverband Heilbronn-Franken in den Abendstunden (22:00 Uhr, oben) und in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr, unten).

Die intensivsten Kaltluftabflüsse findet man in den Tälern, die von der Keuperstufe nach Norden hin auslaufen. Hier wäre das Brettachtal und das Ohmtal südlich von Öhringen zu nennen.

Im Bereich Heilbronn – Neckarsulm stellt ein Kaltluftabfluss entlang der Sulm einen markanten Kaltluftabfluss dar („Sulmtäler“), der insbesondere Teile von Neckarsulm belüftet.

Im Laufe der Nacht füllen sich Täler und Senken zunehmend mit Kaltluft, so dass der Antrieb, der durch Temperaturunterschiede bedingt ist, zurückgeht. Infolge lässt auch die Intensität der Kaltluftabflüsse nach. Die größten Intensitäten werden in den Tälern von der Keuperstufe und im Sulmtal simuliert. Mittlere Intensitäten mit größerer räumlicher Ausdehnung finden sich an den Unterläufen von Kocher und Jagst, im Jagsttal südlich von Crailsheim oder im Bereich des Hirschbachtals östlich von Öhringen.

Strömungssysteme von geringer Intensität (gelb - hellgrün) zeigen sich überwiegend in Gebieten mit geringer Reliefenergie, hoher Rauigkeit und hohem Waldanteil.

6.2 Thermische Verhältnisse

6.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur in 2 m über Grund zeigt primär eine Abhängigkeit von der Höhenlage und der Landnutzung (vgl. Abbildung 6-2).

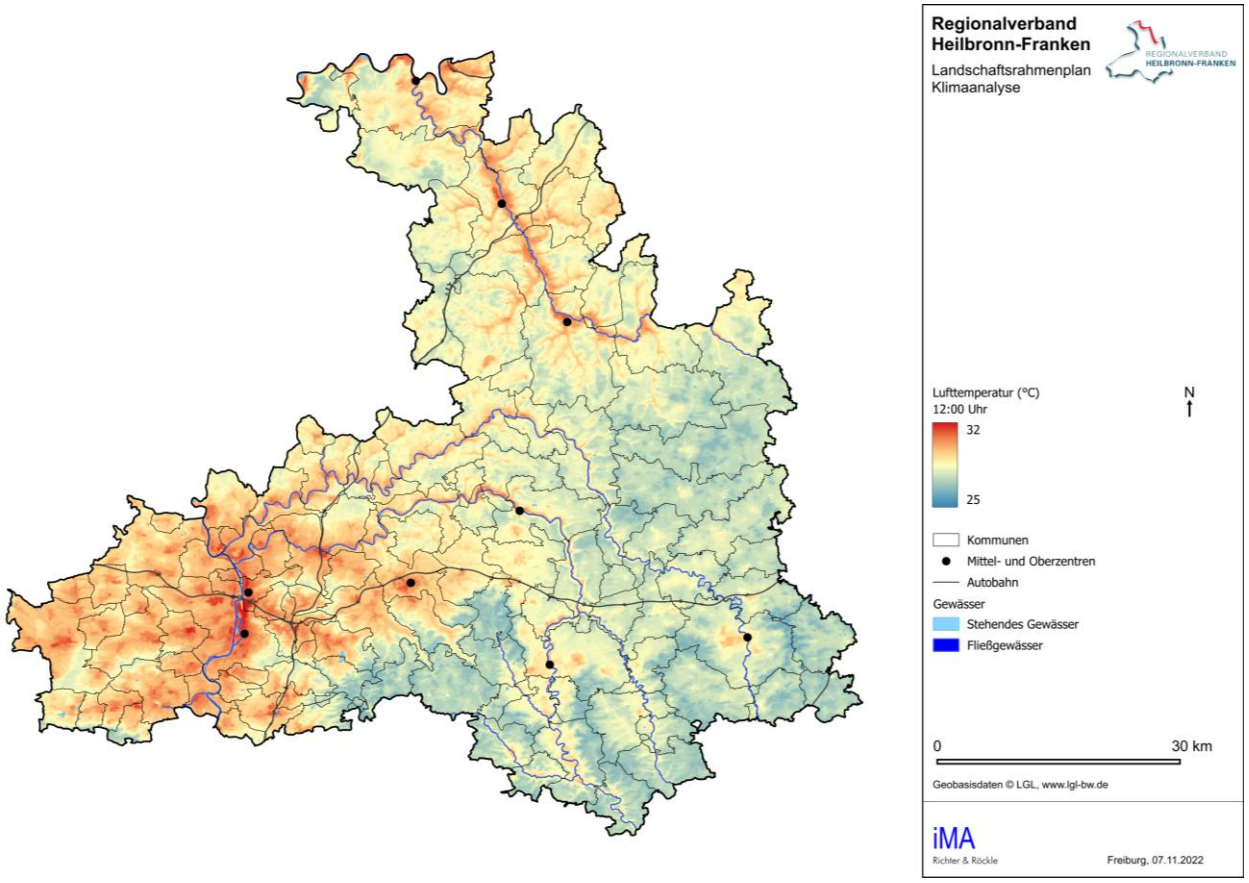


Abbildung 6-2: Lufttemperatur in 2 m Höhe zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag.

So ist die Lufttemperatur im Neckarbecken, an den Unterläufen von Kocher und Jagst, im Taubertal und an den Siedlungsgebieten entlang der A6 am höchsten. Die maximalen Temperaturen werden aufgrund des Versiegelungsgrades und der Tallage im Verdichtungsraum Heilbronn – Neckarsulm gefunden. Die kühlsten Gebiete befinden sich in den höheren Lagen im Osten und Südosten des Regionalverbandgebietes.

6.2.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist tagsüber ein Indikator für die Wärmebelastung des Menschen. Sie zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit der kurzwelligen Strahlung. PET wurde für die Mittagssituation an einem repräsentativen Sommertag berechnet (Abbildung 6-3).

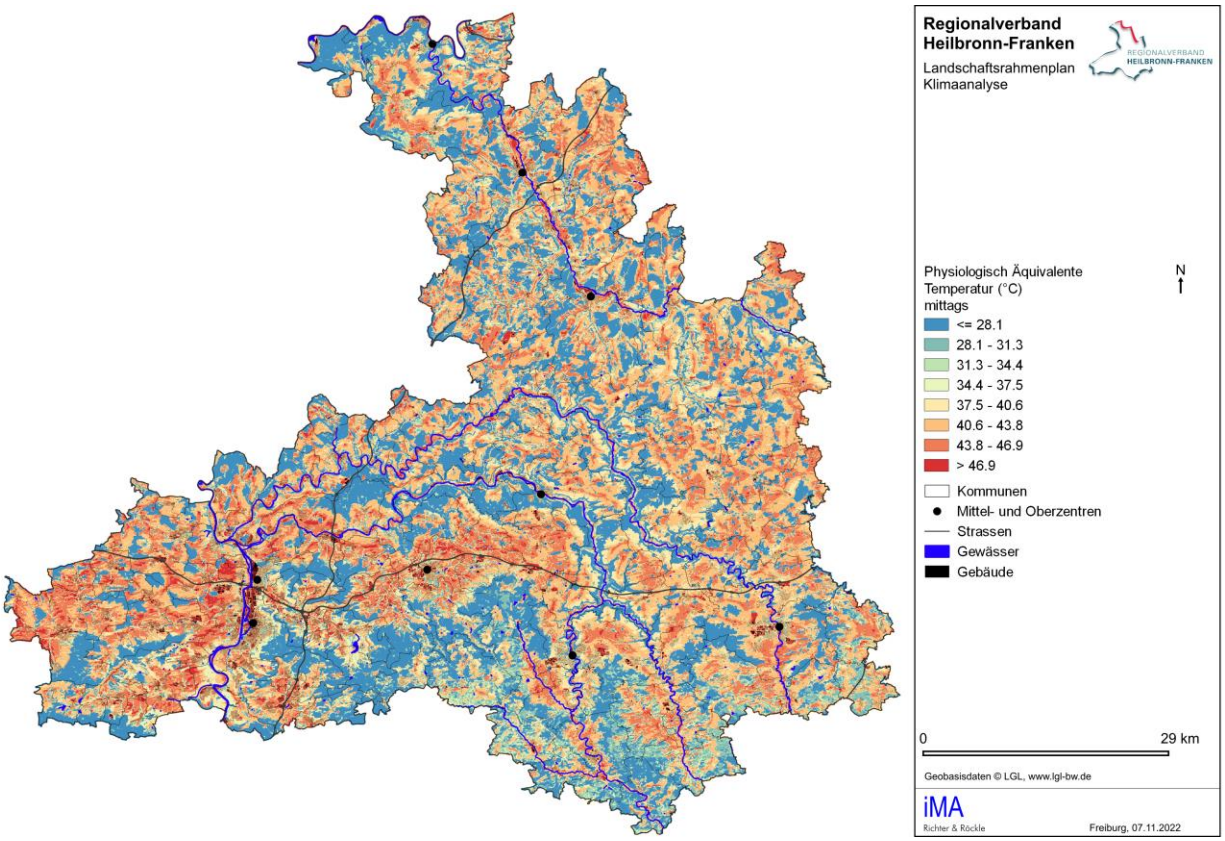


Abbildung 6-3: Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag.

Die Höhe der PET korreliert stark mit der kurzwelligen Sonneneinstrahlung. Somit ist eine starke Wärmebelastung nicht nur in Städten und dort besonders auf großen versiegelten, nicht abgeschatteten Flächen (z.B. Parkplätze oder Gleisanlagen), sondern auch im ländlichen Umland (z.B. auf landwirtschaftlichen Flächen – aufgrund der fehlenden Abschattung) zu finden. Industrie- und Gewerbeflächen fallen durch eine extreme Wärmebelastung auf. Dies ist bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad und einen eher geringen Anteil an Verschattung durch Baumbestand und oftmals einheitliche Gebäudehöhen. Die Wärmebelastung in Siedlungsgebieten variiert je nach Siedlungsdichte und Grünanteil.

Auch Freiflächen können, je nach Höhenlage, eine extreme Wärmebelastung aufweisen. In Wäldern ist aufgrund der Abschattung und je nach Höhenlage eine geringe Wärmebelastung zu finden. Dort ist noch ein ausreichender thermischer Komfort vorhanden.

6.2.3 Urbane Wärmeinsel

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

Zur Berechnung der UHI wurden die Ergebnisse der Simulation mit denen einer weiteren Simulation verglichen, in der die versiegelten und bebauten Flächen im Stadtgebiet durch Wald- und Feldflächen ersetzt wurden. Die Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen dem Bestand und dieser Simulation wird als UHI ausgewiesen.

In Abbildung 6-4 ist der Grad der UHI in den Abendstunden (oben) und in der zweiten Nachthälfte (unten) dargestellt. Die höchsten Werte mit über 3 K findet man im Verdichtungsraum Heilbronn – Neckarsulm. Auch die Mittelzentren weisen aufgrund der Größe der Städte noch eine deutliche Überwärmung auf. Die eher dörflichen Gemeinden besitzen nur eine geringe UHI.

Im Laufe der Nacht kühlen sich auch die städtischen Oberflächen ab, wodurch sich der Grad der urbanen Wärmeinsel abschwächt.

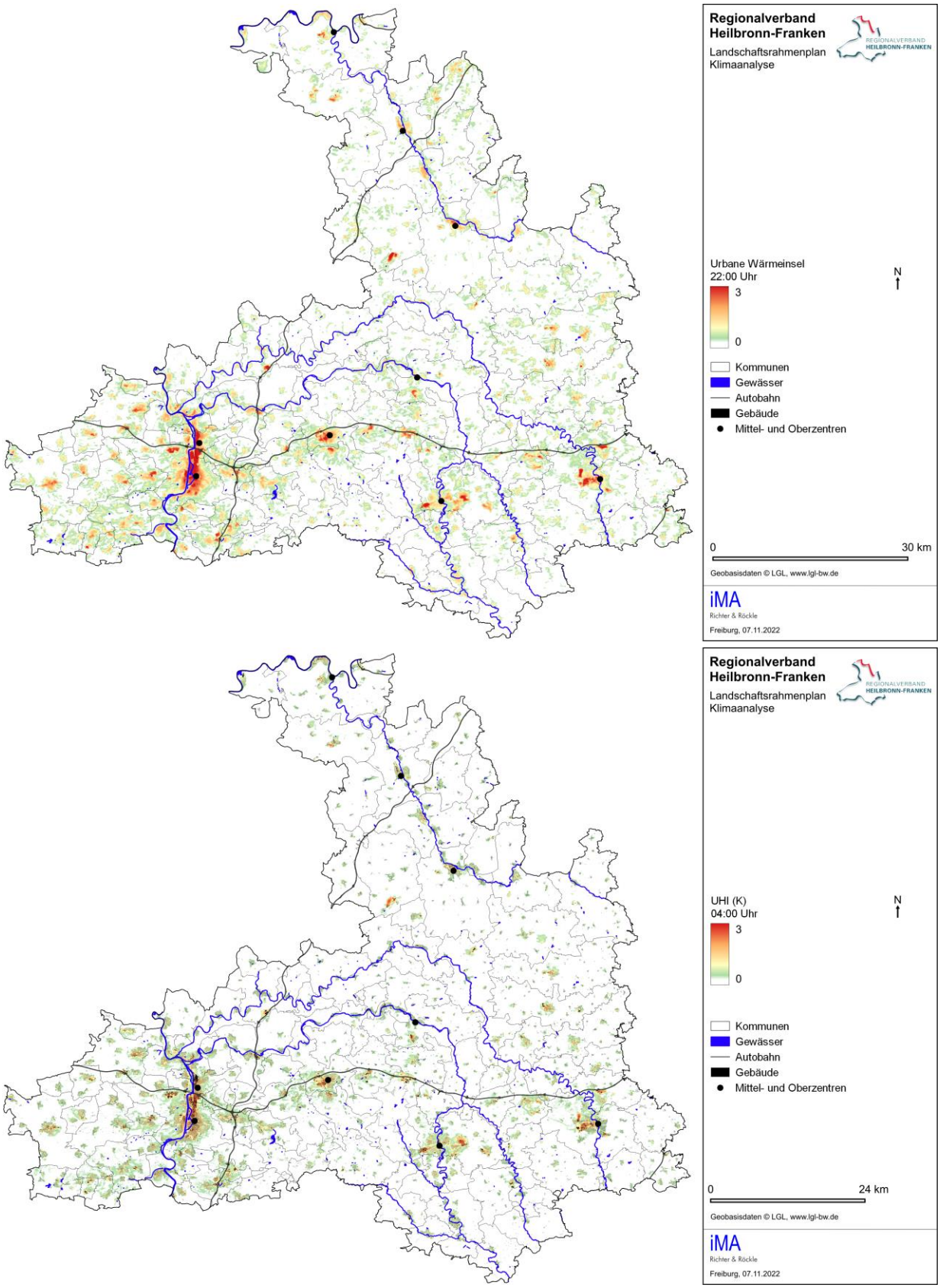


Abbildung 6-4: Urbane Wärmeinsel (UHI) in den Abendstunden (22:00 Uhr, oben) und in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr, unten).

6.2.4 Häufigkeit von Sommertagen

Die Anzahl an Sommertagen im Jahr kann als Indikator für die Auftrittswahrscheinlichkeit von Wärmebelastungen herangezogen werden. Im Rahmen der regionalen Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken wurden die mittlere Anzahl an Sommertagen flächendeckend ermittelt. Die Berechnung basiert dabei auf EURO-CORDEX Modellsimulationen (siehe Kapitel 3.6), die mittels Downscaling-Verfahren räumlich verfeinert wurden (iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2023).

In Heilbronn wurden im Mittel etwa 48 Sommertage pro Jahr im Zeitraum 1971 – 2000 registriert (siehe Kapitel 5.4). Mittels Downscaling-Verfahren ergibt sich die in Abbildung 6-5 gezeigte räumliche Verteilung. Da die Anzahl an Sommertagen direkt abhängig ist von der Lufttemperatur (ein Sommertag ist definiert als ein Tag mit einer Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C), folgt die Verteilung den bereits in den vorigen Abschnitten ermittelten Verteilungen der PET und UHI.

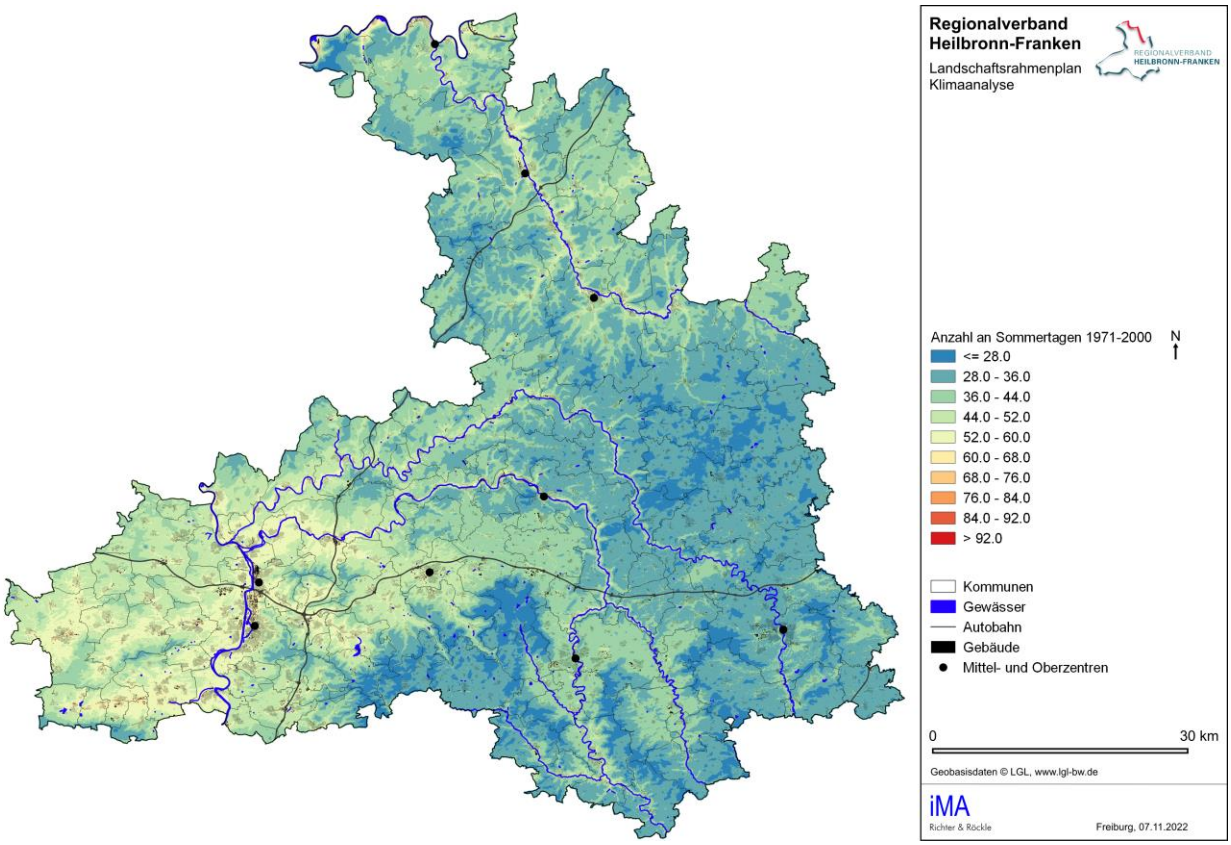


Abbildung 6-5: Verteilung der mittleren Anzahl an Sommertagen pro Jahr im Regionalverband Heilbronn für den Zeitraum 1971 – 2000.

Auswirkungen des Klimawandels

In Abbildung 6-6 oben ist die Anzahl der Sommertage für die nähere Zukunft 2031 – 2060 unter Maßgabe des Szenario RCP8.5 dargestellt. Die räumliche Struktur bleibt weitgehend erhalten, die Häufigkeit der Überschreitung der 25 °C-Marke nimmt aber schon merklich zu.

Dramatischer sieht es im Szenario RCP8.5 gegen Ende des Jahrhunderts aus (Abbildung 6-6 unten). Hier ist auch in den ländlichen Regionen und den Höhenlagen des Regionalverbands eine hohe Anzahl an Sommertagen zu erwarten.

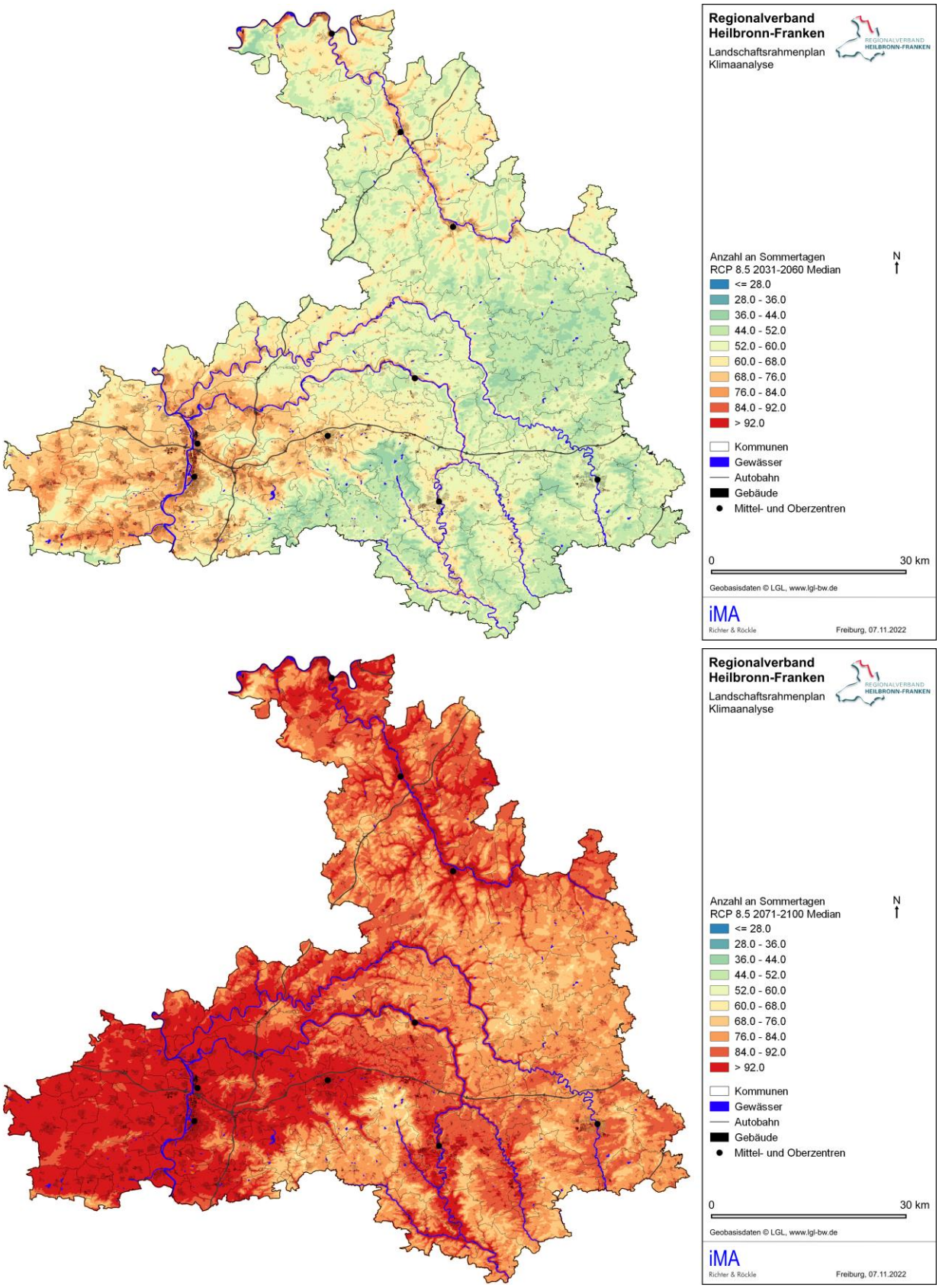


Abbildung 6-6: Verteilung der mittleren Anzahl an Sommertagen pro Jahr im Regionalverband Heilbronn für die Prognosezeiträume 2031 – 2060 (oben) und 2071 – 2100 (unten). Der Prognose liegt das Klimaszenario RCP8.5 zugrunde.

6.3 Bewertungsgrößen

6.3.1 Empfindlichkeit

Um die Relevanz der Strömungssysteme und der dazugehörigen Freiflächen für die Bevölkerung zu ermitteln, wurde die Empfindlichkeit der Bevölkerung in die Untersuchung mit einbezogen.

Die Empfindlichkeit wurde auf Basis der Einwohnerdichte und unter Berücksichtigung klimasensibler Nutzung ermittelt (siehe Kapitel 4.5.1). Die räumliche Verteilung der Einwohnerdichte ist in Abbildung 6-7, die daraus resultierende Empfindlichkeit in Abbildung 6-8 dargestellt.

Flächen ohne Bevölkerung oder mit sehr geringer Bevölkerungsdichte weisen eine geringere Empfindlichkeit und i.d.R. eine geringere thermische Betroffenheit auf. Je höher die Einwohnerdichte ist, desto höher wird die Empfindlichkeit eingestuft. Gewerbe- und Industriegebiete weisen eine sehr geringe Einwohnerdichte (meist nur Hausmeisterwohnungen) auf. Deren Betroffenheit ist deshalb sehr gering.

Die Berechnung der Empfindlichkeit ist in Kapitel 4.5.1 beschrieben. Siedlungen mit hoher Empfindlichkeit konzentrieren sich auf den Bereich Heilbronn-Neckarsulm und die dichter besiedelten Mittelzentren (Abbildung 6-8). In den größeren Siedlungsgebieten ist sehr wohl eine kleinräumige Differenzierung vorhanden, die aber in den Übersichtsdarstellungen nicht zur Geltung kommen.

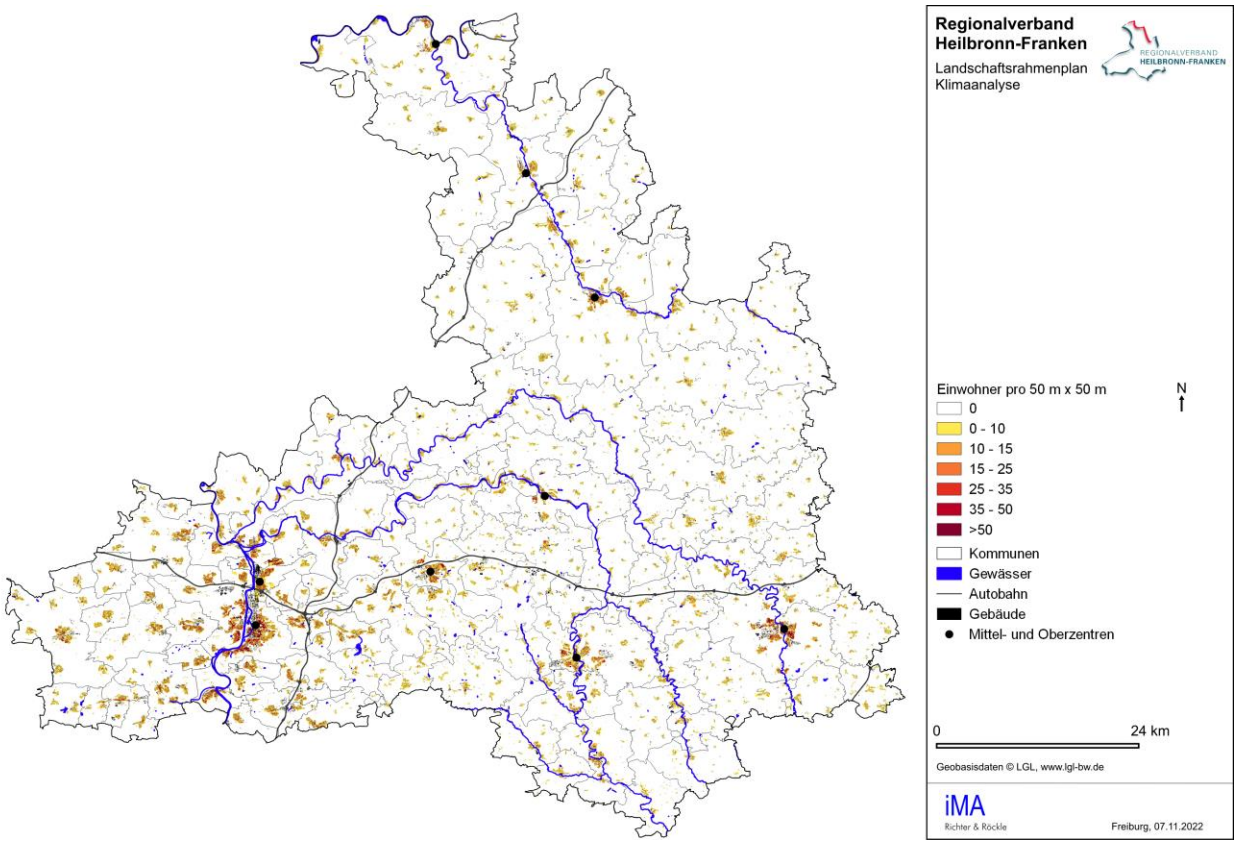


Abbildung 6-7: Verteilung der Einwohnerdichte (Einwohner je ¼ Hektar) im Regionalverband Heilbronn-Franken.

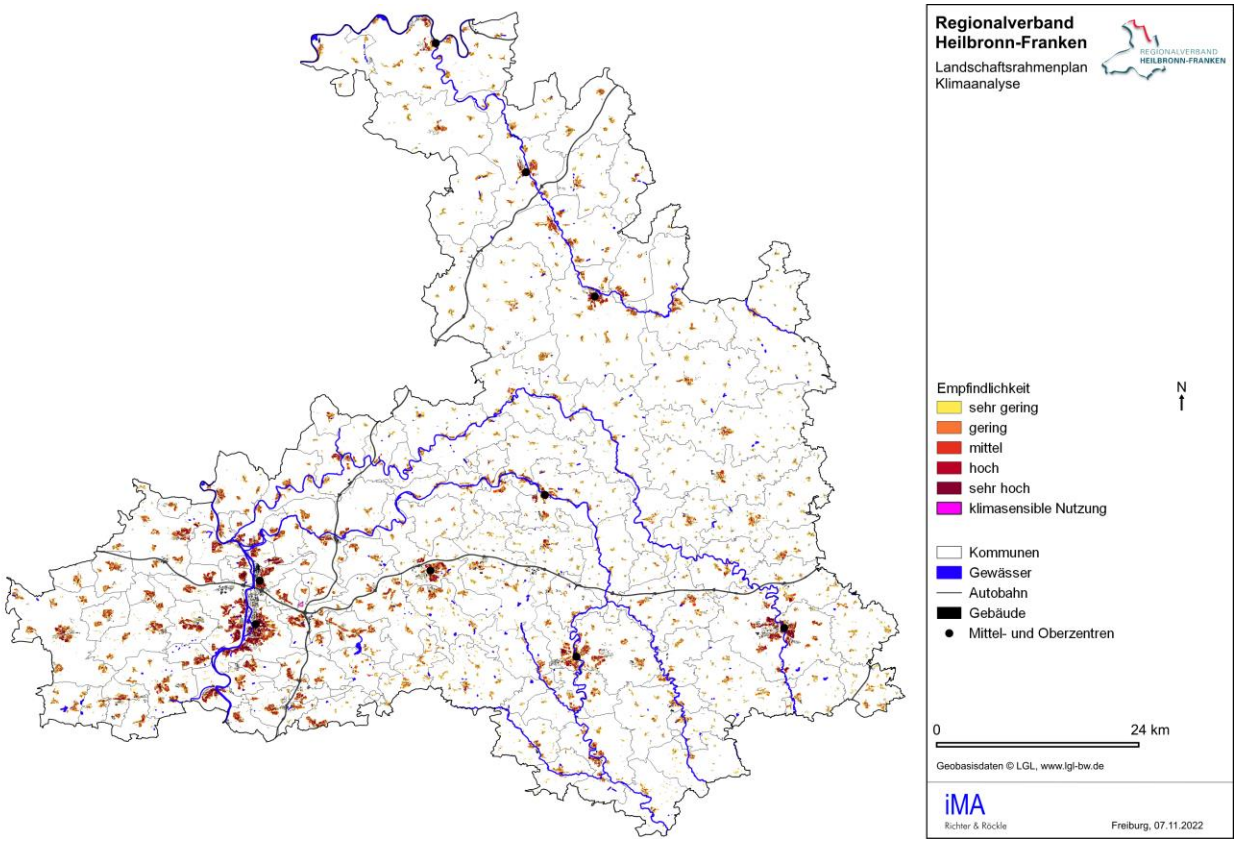


Abbildung 6-8: Empfindlichkeit der Bevölkerung bezogen auf klimatische Bedingungen.

6.3.2 Thermische Belastung

Die thermische Belastung ergibt sich gemäß Kapitel 4.5.2 aus der PET, der UHI und der Anzahl an Sommertagen. Die bewertete thermische Belastung im Regionalverband Heilbronn-Franken ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

Durch die PET ergeben sich auch auf den landwirtschaftlichen Freiflächen erhöhte thermische Belastungen. Sehr hohe Belastungen beschränken sich aber auf die größeren Siedlungsräume. In den Waldgebieten herrscht dagegen eine geringe thermische Belastung vor.

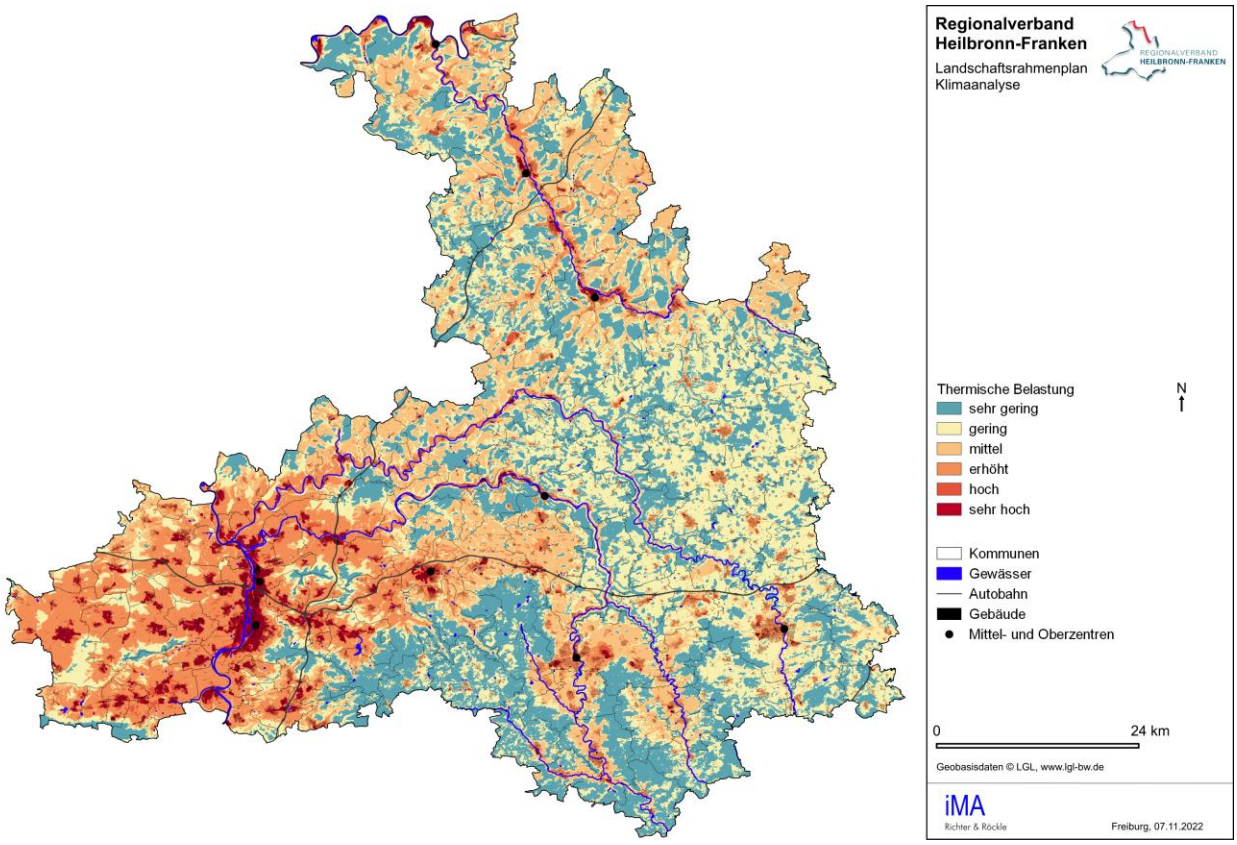


Abbildung 6-9: Thermische Belastung im Regionalverband Heilbronn-Franken.

6.3.3 Thermische Betroffenheit

Abbildung 6-10 zeigt die thermische Betroffenheit der Bevölkerung im Regionalverband Heilbronn-Franken. Die Berechnung der Betroffenheit wird in Kapitel 4.5.2 erläutert. Je höher die Einwohnerdichte und je größer die thermische Belastung, desto höher ist die Betroffenheit. Als Konsequenz sind damit die entlastenden Faktoren für das jeweilige Gebiet umso schützenswerter einzustufen je höher die Betroffenheit ausfällt (siehe auch Kapitel 6.5).

6.4 Regionalplanerisch relevante thermisch belastete Siedlungsgebiete

Um neben der Einwohnerdichte auch der Siedlungsdichte gerecht zu werden, wurden solche Siedlungsgebiete identifiziert, in denen mindestens 1 ha der Fläche mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit belastet ist. Diese Siedlungsgebiete werden als thermisch betroffene Siedlungsgebiete von regionalplanerischer Relevanz klassifiziert. Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 6-11 gezeigt.

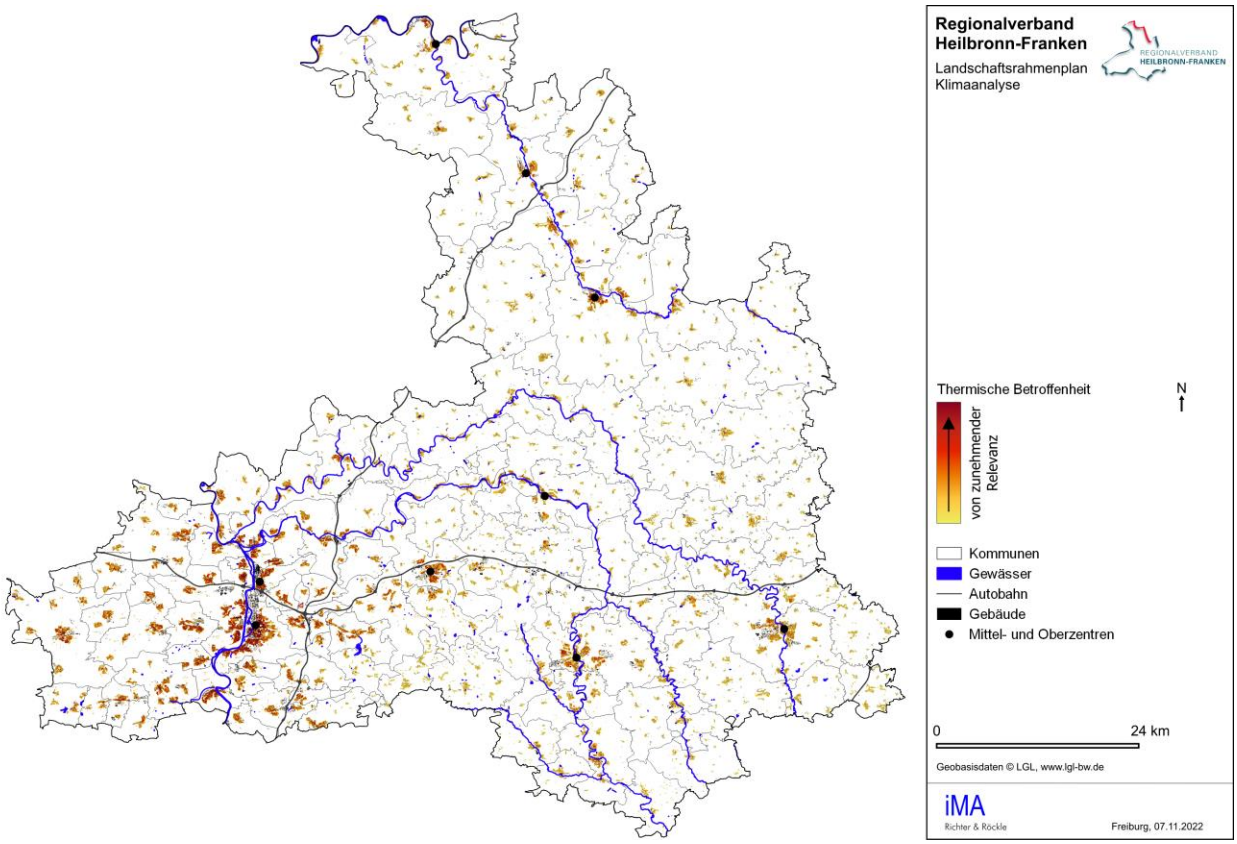


Abbildung 6-10: Thermische Betroffenheit der Bevölkerung im Regionalverband Heilbronn-Franken.

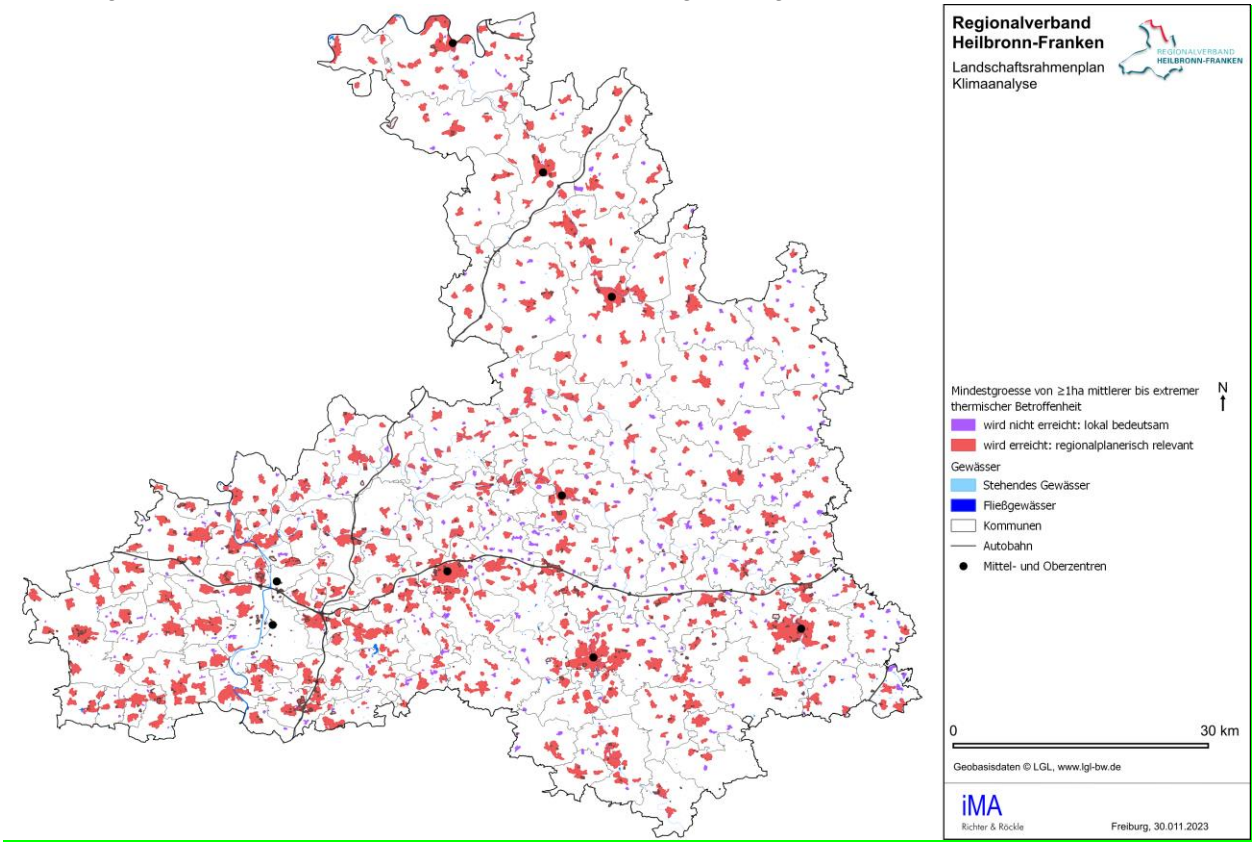


Abbildung 6-11: Siedlungsgebiete mit mindestens 1 ha Flächenanteil mit mindestens mittlerer thermischer Betroffenheit.

6.5 Planungshinweiskarte

In der Planungshinweiskarte (Abbildung 6-12) werden zum einen die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und zum anderen die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung klassifiziert. Dies ermöglicht die räumlich differenzierte Bewertung der Relevanz der thermisch belasteten Räume (Wirkungsraum) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen.

Die Siedlungsflächen werden im Hinblick auf die **thermische Belastung** bewertet. Rot eingefärbte Bereiche weisen die höchste Belastung auf. In den stark belasteten Bereichen ist es von Vorteil, die Wärmebelastung nicht weiter zu erhöhen und stattdessen Minderungsmaßnahmen anzustreben. Dies kann in Form von Ausgleichsflächen erfolgen, die stärker begrünt werden. Aber auch eine Verringerung des Anteils der versiegelten Fläche z.B. durch Fassaden- und Dachbegrünung, Bäume sowie Pocket-Parks verringern die Wärmebelastung. Nachverdichtungen in diesen Bereichen sind zwar möglich, es empfiehlt sich aber, sie durch Schaffung von Ausgleichsflächen zu kompensieren.

Die **Grünflächen** sind nach aufsteigender Relevanz für die nächtliche Durchlüftung von grün nach blau eingefärbt. Je blauer die Fläche, desto wichtiger ist diese für den Kaltluftzustrom. Um ihre Funktion zu erhalten, sollten diese Flächen von geschlossener Bebauung freigehalten werden. Einzelne Gebäude führen meist zu keinen wesentlichen Veränderungen der Strömungsverhältnisse, wenn sie die Höhe der angrenzenden oder umliegenden Bebauung nicht übersteigen.

Die dunkelblauen Bereiche die für die Belüftung der thermisch hochbelasteten Siedlungsgebiete verantwortlich sind, fallen zunächst ins Auge. Schwerpunkt liegt im Bereich der Siedlungen im Neckartal, insbesondere Heilbronn und Neckarsulm, und den östlich und westlich gelegenen Niederungen. Im Verbandsgebiet gibt es weitere Städte mit klimatisch bedeutsamen angrenzenden Frei- und Grünflächen. Hier sind Öhringen, Schwäbisch Hall, Crailsheim und Bad Mergentheim zu nennen.

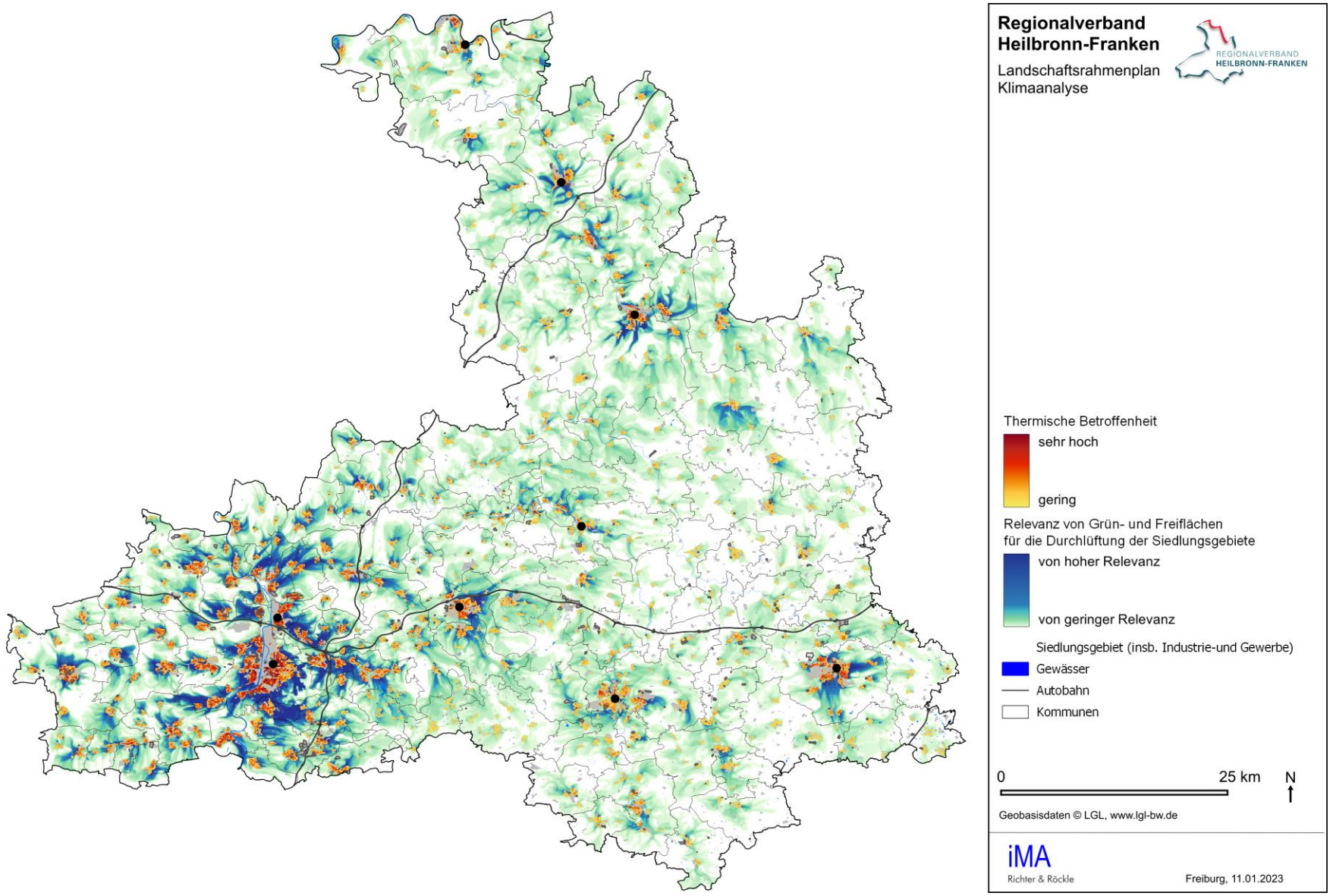


Abbildung 6-12: Planungshinweiskarte für den Regionalverband Heilbronn-Franken mit Darstellung der regionalplanerisch relevanten Kaltluftströmungen.

7 Vorschläge zur Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsflächen

Der Regionalverband konkretisiert nicht nur die Vorgaben des Landesentwicklungsplans. Er legt ferner die Siedlungs- und Freiraumstruktur fest. Dazu gehört auch die Sicherung von regional bedeutsamen Flächen durch die Ausweisung von Vorrang- oder Vorbehaltsgebieten. Der Fokus der regionalplanerischen Maßnahmen liegt auf der Sicherung von Flächen im Ausgleichsraum, während der Fokus städtebaulicher Klimaanpassungsmaßnahmen auf dem Wirkungsraum liegt.

In Vorranggebieten hat der Schutz der Kaltluftentstehungsgebiete und der Luftleitbahnen Vorrang, so dass eine Bebauung i.d.R. unzulässig ist.

In Vorbehaltsgebieten ist im Einzelfall eine Bebauung zulässig, wenn diese entsprechend „klimaverträglich“ erfolgt, sodass es zu keiner nennenswerten Verschlechterung der Durchlüftung der thermisch belasteten Siedlungsgebiete kommt. Die Abnahme der Kaltluftströmung sollte dazu laut VDI 3787 Blatt 5 unter 10 % liegen. Dies sollte durch ein qualifiziertes Klimagutachten nachgewiesen werden.

Weiterhin sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Sicherung regionalplanerisch bedeutsamer Ausgleichsräume für Siedlungsgebiete hoher thermischer Belastung ist nur für größere Siedlungsgebiete mit mindestens 1 ha Flächenanteil mittlerer bis extremer thermischer Betroffenheit zielführend. In kleinen Kommunen ist die Betroffenheit vergleichsweise gering.
- Einem regionalplanerisch bedeutsamen thermisch belasteten Siedlungsgebiet werden diejenigen Strömungssysteme zugeordnet, die zu dessen Belüftung beitragen. Luftleitbahnen und Kaltluftproduktionsgebiete sind an sich nicht schützenswert, wenn sie nicht zur Belüftung beitragen.
- Da Strömungssysteme mit geringer Gesamtvolumenstromdichte aufgrund ihrer schwachen Dynamik durch eine Erhöhung der Rauigkeit (z.B. durch eine Bebauung) stärker geschwächt oder gar zum Erliegen kommen, werden diese mit Blick auf die Festlegung von Vorranggebieten für besondere Klimafunktionen als planerisch schützenswerter eingestuft als solche mit großer Gesamtvolumenstromdichte (Gesamtvolumenstromdichte > 60 m³/(m·s)), die gegenüber Veränderungen robuster sind.
- Für Kommunen, welche in Senken liegen, sodass von mehreren Seiten Kaltluftströme die Stadt erreichen, sollten nur die für die betrachtete Kommune relativ am höchsten bewerteten Kaltluftströmungen (Legende ggf. anpassen) als Vorranggebiete ausgewiesen werden.
- Erstrecken sich die Kaltluftproduktionsgebiete und Luftleitbahnen zur Belüftung von Siedlungsgebieten mit hoher thermischer Belastung über das Hoheitsgebiet mehrerer Kommunen, so ist eine Ausweisung von Vorranggebieten seitens der Regionalplanung aus gutachterlicher Sicht sinnvoll.
- Der Schutz von Kaltluftströmungen, deren Kaltluftproduktionsgebiete und Luftleitbahnen und -flächen innerhalb des Hoheitsgebietes einer Kommune liegen, obliegt der Kommune selbst. Eine Ausweisung von Vorrang- oder Vorbehaltsgebieten seitens der Regionalplanung kann bei besonders thermisch belasteten Siedlungen aus gutachterlicher Sicht sinnvoll sein.

- Für Kommunen in Kessellagen oder im Zustrombereich mehrerer Seitentäler, welche von Kaltluftströmungen aus mehreren Himmelsrichtungen belüftet werden, reicht aus gutachterlicher Sicht eine Ausweisung von Vorbehaltsgebieten aus. Hier kann gefordert werden, dass bei einer Planung die Auswirkungen auf das lokale Klima zu begutachten sind.

Der Schutz von klimatisch relevanten Ausgleichsflächen kann nur ein Teil der →**Klimaanpassungsstrategien** sein. Wie auch beim Klimaschutz müssen bei der Anpassung viele unterschiedliche Akteure einen Teil beitragen, um aus lokalklimatischer Sicht „gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse“ sicherzustellen.

Es gibt zwar viele Empfehlungen den Klimawandelfolgen zu begegnen; da jede Kommune sowohl individuelle Merkmale aufweist, die sowohl das städtische Umfeld wie auch die lokalklimatischen Bedingungen betreffen, müssen auch die Anpassungsmaßnahmen flexibel gehandhabt werden.

8 Interpretation und Anwendung der Klimaanalyse in den Kommunen

8.1 Interpretation der Ergebnisse am Beispiel Langenbrettach

Die Planungshinweiskarte wird im Folgenden am Beispiel von Langenbrettach erklärt (Abbildung 8-1).

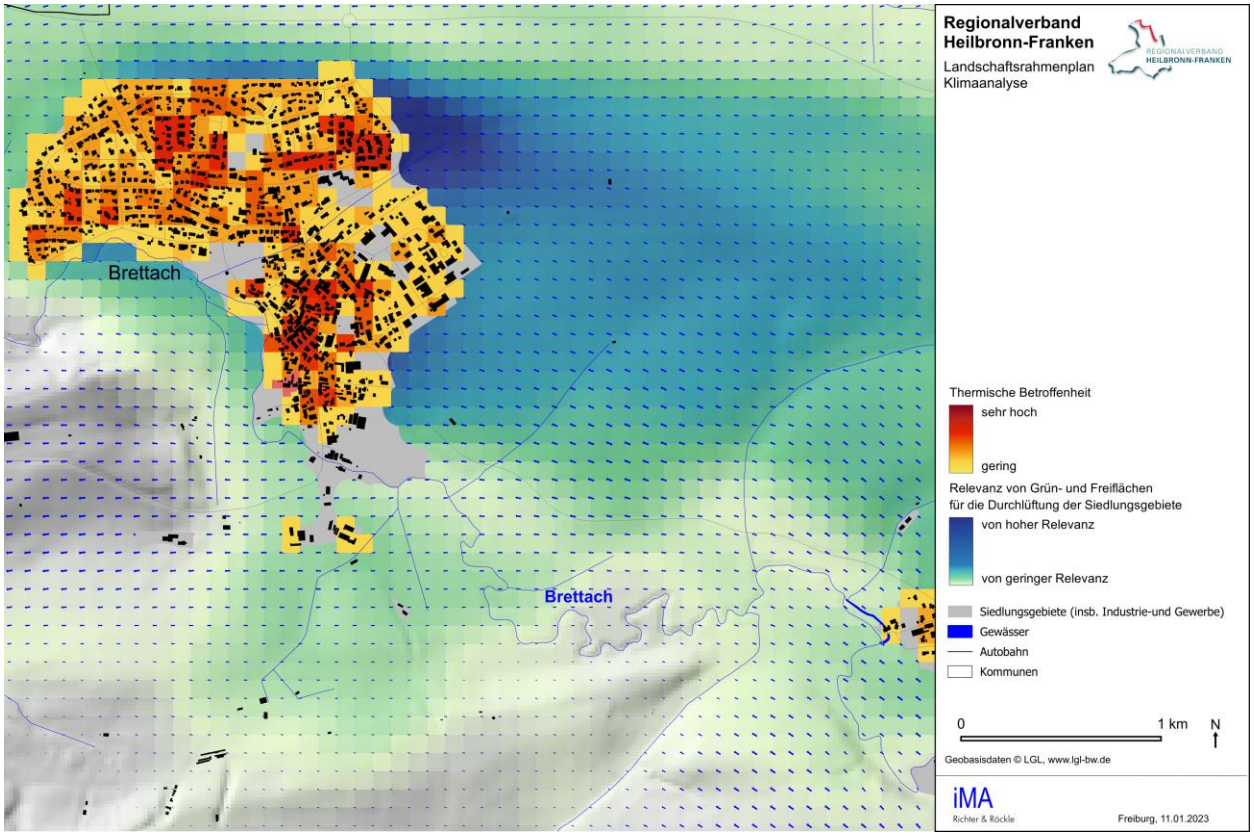


Abbildung 8-1: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Regionalverband Heilbronn-Franken mit Darstellung der thermischen Betroffenheit und der Relevanz der Kaltluftströmung für den Siedlungsbereich. Die Strömungspfeile stellen die Kaltluftströmung in der zweiten Nachthälfte im Überdachniveau dar.

Topographie und Kaltluftabflüsse

Langenbrettach liegt am Unterlauf der stark mäandrierenden Brettach und besteht aus dem Zusammenschluss der Gemeinden Langenbeutingen im Osten und Brettach im Westen. Brettach liegt auf einer Höhe von ca. 180 m ü. NHN im Süden und 214 m ü. NHN. Südöstlich und östlich von Brettach steigt das Gelände leicht an, sodass sich dort Kaltluftabflüsse bilden können, welche insbesondere die östlichen Siedlungsbereiche von Brettach belüften.

Im Süden von Brettach steigt das Gelände auf über 338 m ü. NHN an, sodass der südliche Ortsrand in den Abendstunden durch einen Kaltluftabfluss aus Süden belüftet wird (wird in Abbildung 8-1 nicht dargestellt). Da dort aber die Bevölkerungsdichte gering und eine gewisse Grundrauigkeit durch Vegetation und Gebäude vorhanden ist, ist die Kaltluftströmung aus Süden nicht im selben Maße durchlüftungsrelevant für die Bevölkerung, wie die Kaltluftströmung aus Osten.

Thermische Betroffenheit

Aufgrund der geringen Höhenlage ist mit einer für den Regionalverband vergleichsweise hohen Anzahl an Sommertagen mit Hitzestress in unverschatteten Bereichen zu rechnen. Nachts ist die Überwärmung aufgrund des relativ kleinen Siedlungsbereichs eher gering. In Brettach sind die Einwohnerdichten im alten Ortszentrum zwischen Hauptstraße, Kirchstraße und Mühlstraße, sowie im Nordosten („In der Rötelgrube“) am höchsten. Dementsprechend wird dort auch die thermische Betroffenheit am höchsten bewertet. Gleichzeitig zeichnet sich der Ort größtenteils durch seine gute Durchgrünung und gut erreichbaren Spielplätzen (z.B. Mühlwiese, Bergstraße) mit gutem Baumbestand aus.

Relevanz von Grün- und Freiflächen für die Durchlüftung der Siedlungsgebiete

Da in die Berechnung der Relevanz auch die zurückgelegte Wegstrecke reziprok eingeht, werden die siedlungsnahen Freiflächen höher bewertet, als die siedlungsfernen. Generell ist es eher ungünstig den östlichen Ortsrand zu bebauen. Sollte hier eine Bebauung geplant sein, sollte sie klimagerecht erfolgen, sodass die Kaltluft weiterhin die Bestandsbebauung erreichen kann.

8.2 Die regionale Klimaanalyse als Abwägungsgrundlage

Die hochaufgelöste Klimaanalyse für die Region Heilbronn-Franken stellt eine wesentliche Grundlage für die Ausarbeitung von Landschaftsplänen, Umweltberichten und Grünordnungsplänen dar. Durch die gewählte Auflösung sollen die Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse nicht nur der Regionalplanung, sondern auch Städten und Gemeinden als Hilfsmittel dienen, eigene klimatische Bewertungen im Zuge ihrer städtebaulichen Aufgaben durchzuführen. Planerische Vorsorgemaßnahmen können auf dieser Basis sowohl vom Regionalverband (Ausweisung von Vorrang-/Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktion) wie auch von den Kommunen (Klimaanpassungskonzepte, Flächennutzungsplanung) festgelegt werden.

Damit die Städte und Gemeinde des Regionalverbandes mit den Ergebnissen der Klimaanalyse arbeiten können, werden die Ergebnisse in einem WebGIS veröffentlicht und den Kommunen als georeferenzierte Datensätze kostenlos zur Verfügung gestellt. Somit können auch Landschaftsplaner und weitere Gutachter die Ergebnisse der Klimaanalyse berücksichtigen.

8.2.1 Verfeinerung der regionalen Klimaanalyse durch mikroskalige Simulationen

Für Fragestellungen mit einem hohen Detaillierungsanspruch können Analysen mit mikroskaligen Modellen, wie z.B. PALM-4U oder ENVI-met, die regionale Klimaanalyse ergänzen. Dreidimensionale mikroskalige Stadtklimamodelle berechnen das lokale Stadtklima hochauflösend mit einer →Maschenweite kleiner 10 m x 10 m. Dabei werden sowohl die Strömungsverhältnisse als auch die Lufttemperatur, Feuchte, die Strahlungsbilanz und die human-biometeorologischen Bedingungen detailliert betrachtet.

Die Ergebnisse der vorliegenden regionalen Klimaanalyse stellen für die mikroskalige Betrachtung die Grundlage der Untersuchung dar. Die ermittelten regionalklimatischen Bedingungen dienen den mikroskaligen Simulationen als Antrieb über Koppelung der Modelle mit den bereits berechneten Ergebnissen (sog. „Nesting“). Über solche Nesting-Verfahren können die regionalen klimatischen Verhältnisse in den mikroskaligen Simulationen angemessen berücksichtigt werden, was die Güte der mikroskaligen Analyse deutlich erhöht.

Mikroskalige Modelle berücksichtigen durch ihre hohe räumliche Auflösung (geringe Maschenweite) deutlich mehr Details. So werden Gebäude und die hohe Vegetation wie Straßenbäume explizit in den Simulationen berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Umströmung von Gebäuden oder der Schattenwurf von Bäumen detailliert berechnet wird und realitätsnah in die Ergebnisse eingeht. So können Aussagen zu Gebäudekonfigurationen und deren Einfluss auf die Durchlüftung in ihrer Umgebung getroffen werden.



Abbildung 8-2: Bodennahe Durchlüftung der Ortschaft Amorbach bei Neckarsulm. Teilergebnis der Stadtklimaanalyse Neckarsulm, die auf den Ergebnissen der regionalen Klimaanalyse aufbaut.

Als Beispiel einer detaillierten Analyse mithilfe von mikroskaligen Simulationen zeigt Abbildung 8-2 die Strömungsverhältnisse der Ortschaft Amorbach in Neckarsulm. Durch die verwendete räumliche Auflösung von 5 m liefern die Simulationen Informationen zu der Durchlüftung in den einzelnen Straßenzügen. Gut zu erkennen sind die positiven Effekte auf die Durchlüftung durch die „Grüne Mitte“, einer breiten Parkanlage ohne Bebauung. Die abendlichen Kaltluftströmung kann von Osten her in die Parkanlage einströmen und so die Bebauung nördlich und südlich des Parks belüften. Zeilenbebauung nördlich der Grünen Mitte sowie am südlichen Rand der Ortschaft verhindert teilweise das Eindringen von Kaltluft.

Ergebnisse zu den thermischen Verhältnissen helfen, sogenannte „Hot-Spots“ zu identifizieren, Bereiche mit hoher thermischer Belastung am Tag und fehlender Durchlüftung in der Nacht. Abbildung 8-3 zeigt beispielhaft die berechnete Verteilung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) am Tag in der Ortschaft Amorbach in Neckarsulm. Gut erkennbar sind sowohl die negativen Effekte von versiegelten Straßenzügen innerhalb der dichten Bebauung im südlichen Teil der Ortschaft, wie auch die positiven Effekte der Vegetation im Bereich der „Grünen Mitte“. Durch die hohe räumliche Auflösung ist auch die kühlende Wirkung von Straßenbäumen sowie der Schattenwurf einzelner Gebäude in den Daten erkennbar.

Ergebnisse dieser Art können für konkret geplante Bauprojekte wertvolle Zusatzinformationen liefern, um eine Verträglichkeit mit dem Lokalklima zu prüfen. Auch für größere Stadtgebiete können durch detaillierte mikroskalige Analysen stadtklimatische Problembereiche herausgearbeitet werden, um diesen anschließend gezielter durch stadtplanerische Maßnahmen entgegenzuwirken.

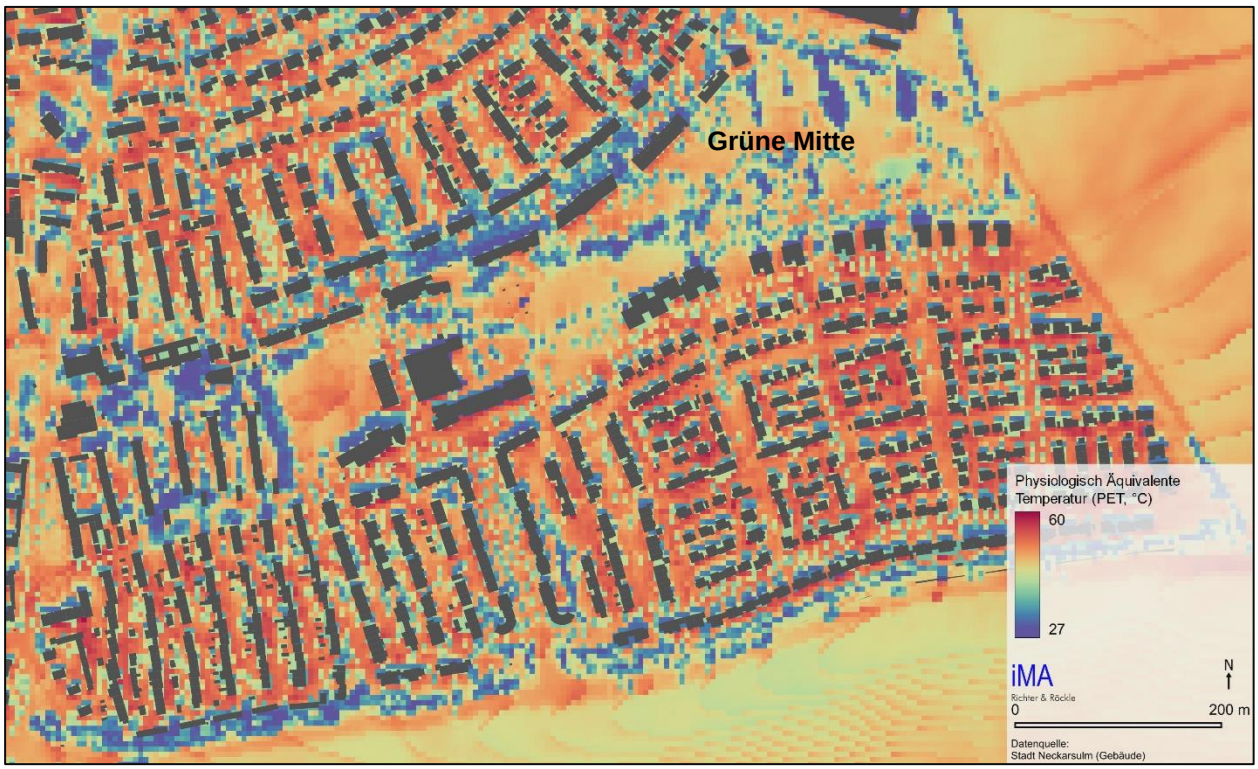


Abbildung 8-3: Verteilung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) in der Ortschaft Amorbach in Neckarsulm. Teilergebnis der Stadtklimaanalyse Neckarsulm, die auf den Ergebnissen der regionalen Klimaanalyse aufbaut.

8.2.2 Berücksichtigung der klimatischen Belange in der Flächennutzungsplanung

Zur Berücksichtigung der klimatischen Belange in der Flächennutzungsplanung wird zunächst die aktuelle klimatische Situation im Untersuchungsgebiet analysiert. Dafür werden die Ergebnisse der regionalen Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken für das Gebiet der Vereinbarten Verwaltungsgemeinschaft aufbereitet. Die aktuelle klimatische Situation wird analysiert und anhand der vorliegenden Ergebnisse eine für den Planungsraum angepasste Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte mit zugehörigem Kurzbericht angefertigt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann ein Planfall definiert werden, der die Plangebiete des zukünftigen Flächennutzungsplans enthält. Die Änderungen des Lokalklimas (Lufttemperatur, Kaltluftabflüsse, etc.) durch die Plangebiete können mithilfe des Mesoskalenmodells FITNAH in einer Auflösung von 50 m berechnet werden. Änderungen in der Lufttemperatur und der Volumenstromdichte durch Plangebiete werden exemplarisch in Abbildung 8-4 dargestellt. Auf Grundlage der klimatischen Situation und der zu erwartenden Auswirkungen der Plangebiete auf das Lokalklima können für jedes Plangebiet Planungshinweise ausgearbeitet werden. Die Ergebnisse lassen sich pro Plangebiet in Form von Steckbriefen darstellen.

Liegen bereits genauere Informationen zur geplanten Bebauung, wie der Position der einzelnen Gebäude, vor, so können auch mikroskalige Simulationen in einer höheren Auflösung von ca. 5 m · 5 m durchgeführt werden.

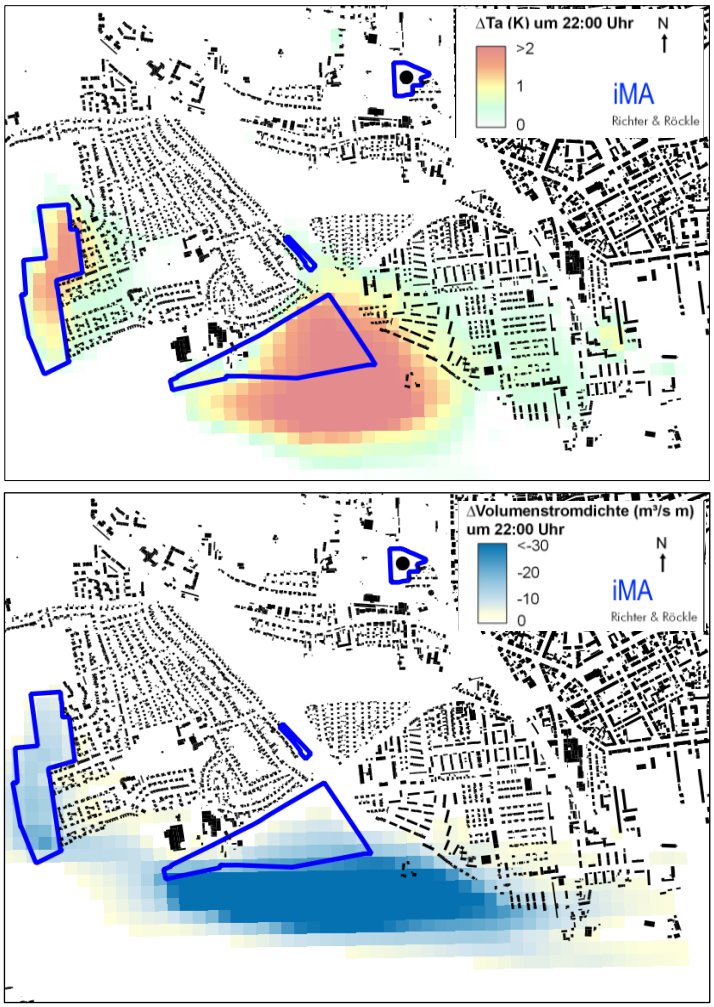


Abbildung 8-4: Prognostizierte Änderungen der Lufttemperatur und der Kaltluftströmung durch Plangebiete.

Freiburg, den 11.04.2025

Dr. Rainer Röckle
Geschäftsleitung
Diplom-Meteorologe

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

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

Dr. Tobias Gronemeier
Modellentwickler PALM, Sachverständiger
M.Sc. in Meteorologie

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt.

9 Glossar

Anpassungsstrategien	„sind langfristig angelegte planerische Vorhaben, Konzepte oder Verhaltensweisen einschließlich der zu ihrer Umsetzung eingesetzten Instrumente und Maßnahmen, um Nachteile von tatsächlichen oder erwarteten Klimaveränderungen mit deren Folgen zu mindern und Vorteile zu nutzen“ (Birkmann et al. 2013). Das Ziel einer Anpassungsstrategie ist die Abwendung oder Minimierung von Gefahren oder Schäden.
Atmosphärische Gegenstrahlung	Der Anteil der langwelligen Strahlung (Wärmestrahlung), der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde abgestrahlt wird.
Auflösung	Die räumliche Auflösung von Daten beschreibt die horizontale Größe einer Rasterzelle (z.B. 1 m x 1 m bei einem digitalen Geländemodell).
Ausgleichsraum	Landschaftsraum mit möglichst intakten Umweltbedingungen, der gegenüber Gebieten mit beeinträchtigten Umweltbedingungen eine Ausgleichsfunktion wahrnehmen soll (z.B. Erholung, Klimaausgleich, Biotop- und Artenschutz).
autochthone Wetterlage	Eine autochthone Wetterlage bezeichnet eine meteorologische Situation, in der das lokale Wetter rein durch lokale Gegebenheiten (lokale Landoberfläche und Gelände) bestimmt wird. Solche Situationen treten nahezu ausschließlich bei wolkenlosen und windschwachen Wetterlagen auf, meist in Verbindung mit Hochdruckeinfluss. Sie werden auch „Strahlungswetterlagen“ genannt, weil die nächtliche langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche wegen der fehlenden Bewölkung nahezu ungehindert ins Weltall abgestrahlt wird. Die autochthone Wetterlage erlaubt die markanteste Ausprägung lokaler und regionaler thermischer Windsysteme. In den Nachtstunden entwickelt sich oft eine Bodeninversion, eine stabile Schichtung mit gehemmter Durchmischung. Sie gilt daher auch als „austauscharme Wetterlage“.
Bergwind	Aus dem Wetterlexikon des DWD[26]: „Im Gegensatz zum →Talwind weht der Bergwind 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. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und dauert bis kurz nach Sonnenaufgang.“
Flurwind	Flurwinde sind eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung zwischen Stadt und Umland, welche nachts bzw. frühmorgens auftritt. Höhere Temperaturen in der Stadt (Wärmeinsel) als im Umland sorgen für einen konvektiven Aufstieg der warmen Luft über der Stadt, wodurch kühlere Luft aus dem Umland in Bodennähe nachströmt.
Frischluft	Weist eine (zugeführte) Luftmasse eine deutlich geringere Belastung mit Luftschadstoffen auf als eine vorhandene Luftmasse oder als die umgebende Luftmasse, so wird diese gering belastetere Luft als „Frischluft“ bezeichnet.
Fühlbarer Wärmestrom	Der fühlbare Wärmestrom (auch „sensibler Wärmestrom“) bezeichnet den Transport von Wärme (durch Strahlung oder Luftbewegung). Innerhalb der Atmosphäre besteht der größte Teil des fühlbaren Wärmestroms aus turbulenten Luftbewegungen. Er bewirkt je nach Ausrichtung eine Erwärmung (positiver Wärmestrom) oder eine Abkühlung (negativer Wärmestrom).

[26] https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, *zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

Geostrophischer Wind	Ein Wind, der durch großräumige Luftdruckunterschiede und die Erdrotation bedingt wird. Der geostrophische Wind kann nur in großen Höhen beobachtet werden, in denen die Erdoberfläche keinen direkten Einfluss mehr auf die Luftströmung zeigt.
GIS	Geoinformationssysteme zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Der Begriff umfasst die dazu benötigte Hardware, Software, Daten und Anwendungen.
Globalstrahlung	Die Summe der direkten und der diffusen Sonnenstrahlung, die auf eine horizontale Fläche auf der Erde trifft.
Hangwind	Der Hangwind (bzw. Hangabwind/Hangaufwind) ist Teil der Berg-/Talwindzirkulation. Der Hangwind weht entlang der Hangneigung und entsteht durch Temperaturunterschiede zwischen dem oberen und unteren Bereich des Hangs. Der Hangwind setzt kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. kurz nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten Ausgleichsströmungen zwischen Gebirge und Gebirgsvorland als Bergwind (nachts) bzw. Talwind (tags) ein.
Heißer Tag	Ein Tag wird in den amtlichen Statistiken als „heißer Tag“ registriert, wenn die Tageshöchsttemperatur 30 °C erreicht oder überschreitet.
Hitzestress	Als „Hitzestress“ wird die durch Hitze bedingte Belastung des menschlichen, tierischen oder pflanzlichen Organismus bezeichnet, häufig mit negativem Einfluss auf den Stoffwechsel, insbesondere auf den Wasserhaushalt (Gefahr der Austrocknung). Bei Menschen und Tieren ist zudem das Herz-Kreislaufsystem betroffen. Hitzestress stellt vor allem für Risikogruppen wie ältere Menschen oder Kinder eine ernste gesundheitliche Gefahr dar und vermindert allgemein die Leistungsfähigkeit.
Hitzewelle	Als „Hitzewelle“ wird eine längere Periode mit ungewöhnlich hohen Temperaturen und dadurch bedingten Hitzestress bezeichnet. Es gibt keine allgemein gültige Definition für eine Hitzewelle, da die Empfindung von Hitzestress von der Anpassung der lokalen Bevölkerung an das lokale Klima abhängig ist. Was in einem heißen Klima als normales Wetter erscheint, wird in einem kühleren Klima als Hitzewelle erlebt. Für Deutschland wird von manchen Forschern eine Folge von mindestens fünf Tagen mit einem Tagesmaximum von im Mittel mindestens 30 °C als Hitzewelle verstanden[27]. Hitzewellen können ernsthafte Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben, Waldbrände begünstigen und die Gesundheit von Menschen gefährden.
Human-Biometeorologie	Die Human-Biometeorologie ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
IPCC	Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist eine Institution der Vereinten Nationen. In seinem Auftrag tragen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewerten anhand anerkannter Veröffentlichungen den jeweils neuesten Kenntnisstand zum Klimawandel. Der IPCC bietet Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidungen der Politik, ohne jedoch konkrete Lösungswege vorzuschlagen oder politische Handlungsempfehlungen zu geben.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die Luft in ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige

[27] https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Hitzewellen_(einfach), *zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

	Zirkulation transportiert. Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von den meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab (Schirmer & Buschner (1987)).
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft. Dabei wird ausreichend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen zu.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (Wirkraum) von Bedeutung sind (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)).
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftleitbahn	Kaltluftleitbahnen sind Flächen mit geringer Bodenrauigkeit und gewisser Breite, die Kaltluftmassen vom Freiland in die Siedlungsgebiete transportieren und dort zur thermischen Entlastung dienen.
Kaltluftproduktionsrate Kaltluftproduktionspotential	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur Kaltluftbildung. Die Angabe der Stärke der Kaltluftbildung (Kaltluftproduktionsrate) erfolgt als über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche (m^3/s). Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch ein Kaltluftproduktionspotential (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Kilowattstunde pro Quadratmeter (kWh/m^3).
Kaltluftvolumenstrom	Der Kaltluftvolumenstrom ist das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3, die in jeder Sekunde durch den betrachteten Querschnitt fließt. (siehe auch Volumenstromdichte)
Klimaanalyse	Eine Klimaanalyse ermöglicht die räumlich detaillierte Einschätzung der klimatischen Situation von Siedlungsgebieten anhand der vorherrschenden Hitzebelastung. Zusätzlich zeigt sie das Entlastungspotenzial der Grün- und Freiflächen und Luftaustauschprozesse an. Sie kann für Gemeinden, Städte oder auch Regionen durchgeführt werden.
Klimaanpassung	beinhaltet „Initiativen und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen des Klimawandels zu verringern. Es können verschiedene Arten von Anpassungen unterschieden werden, darunter vorausschauende und reaktive, private und öffentliche, autonome und geplante Maßnahmen“ (UBA)
Klimaprojektionen	„Für die Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde werden Klimamodelle […] genutzt. […] Möchte man Aussagen über die Zukunft, z.B. die nächsten 100 Jahre machen, so benötigen die Klimamodelle angenommene Vorgaben („Szenarien“). […] Diese beruhen auf Annahmen über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen, die mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind. Man spricht deshalb nicht von Klimaprognosen, sondern von Klimaprojektionen.“ (Noppel, 2017)

Klimareferenzperiode	Eine Klimareferenzperiode ist der Zeitraum von in der Regel 30 Jahren, der zur Bestimmung der statistischen Kenngrößen der verschiedenen klimatologischen Parameter (Indikatoren) dient
Landschaftshaushalt	Gesamtbetrachtung des Ein- und Austrags in einem Gebiet über den Transport von Energie, Wasser und Stoffen und der dabei stattfindenden Stoffumwandlungsprozesse.
Latenter Wärmestrom	Umsetzung der Einstrahlung in die Verdunstung von Wasser, ohne eine Änderung der Lufttemperatur zu bewirken.
Luftleitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer Rauigkeit, d.h. frei von flächenhafter Bebauung und hoher, dichter Vegetation (z.B. Wälder).
Luftpaket	Begrenztes Luftvolumen, das mit der Strömung transportiert wird.
Lufttemperatur	Physikalisch betrachtet ist die Lufttemperatur ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens. Dieser wird bestimmt durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Molekularbewegung in der Luft. Je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, umso höher ist auch seine Lufttemperatur.
Maschenweite	Siehe Auflösung.
Median	Der Median ist der zentrale Wert in der Mitte einer Datenverteilung, wenn die Daten nach Größe sortiert werden. Die eine Hälfte aller Werte ist kleiner als der Median, die andere Hälfte der Werte ist größer. Der Wert ist nicht gleichbedeutend mit dem arithmetischen Mittelwert, wie aus dem folgenden Beispiel deutlich wird: Werte (nach Größe sortiert): 1, 2, 3, 4, 8, 9, 9, 10, 10 Der Median dieser Verteilung ist 8, der arithmetische Mittelwert ist 6,2.
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich subregional bis lokal innerhalb der →planetare Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (z.B. Geiger, Aron & Todhunter (1995)).
Mikroklima	Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das großräumige Klima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.
Morbidität	Häufigkeit der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung.
Mortalität	Sterblichkeit oder Sterberate der Bevölkerung.
Numerische Modelle	„Als numerische Modelle bezeichnet man im Allgemeinen Computermodelle, welche auf Grundlage mathematisch-physikalischer Gleichungen und mittels numerischer Methoden physikalische Vorgänge simulieren können. Beispiele aus der Meteorologie sind Wettervorhersagemodelle oder Klimamodelle. Die darin eingehenden Gleichungen beschreiben die atmosphärischen Zustände und die Kausalität der Abläufe.“ (Noppel 2017)
Planetare/atmosphärische Grenzschicht	Als planetare Grenzschicht wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 50 m – 2.000 m der Atmosphäre reicht, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Der Mittelwert der Höhe beträgt ca. 1.000 m. In der planetaren Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.

<table>
<tr><td>Perzentil</td><td>Ein Perzentil ist ein statistischer Wert auf einer Skala von Null bis Hundert, der den Prozentsatz an Datensatzwerten angibt, der gleich oder niedriger als er selbst ist. Das Perzentil wird oft genutzt, um die Extremwerte einer Verteilung abzuschätzen. So kann z.B. das 90. (10.) Perzentil verwendet werden, um die Schwelle für die oberen (unteren) Extremwerte zu bezeichnen. So ist bspw. das 90. Perzentil der Wert, der von nur 10 % der Stichprobe überschritten wird. Der Maximalwert ist für zahlreiche Fragestellungen weniger aussagekräftig, da er keinen Hinweis auf die Häufigkeit gibt.
Beispiel: Beträgt der Perzentilwert für die Anzahl von Sommertagen an einem Ort 95 %, so gibt es 5 % Orte, an denen eine höhere Anzahl von Sommertagen vorliegt, während bei 95 % der Orte eine geringere Anzahl der Sommertage auftritt.</td></tr>
<tr><td>PET</td><td>Physiologisch äquivalente Temperatur (engl: Physiological Equivalent Temperature). Index zur Beschreibung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz.</td></tr>
<tr><td>Rauigkeit</td><td>Charakterisierung der durchschnittlichen Unebenheit der Erdoberfläche, die die Reibung der Luftströmung am Boden beeinflusst. Maß der Rauigkeit ist die Rauigkeitslänge z_0, die in Meter angegeben wird.
Tabelle: Mittlere Rauhigkeitslänge in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des Landbedeckungsmodells Deutschland (TA Luft (2021), Anhang 2, Punkt 6)
<table>
<tr><td>z_0 in m</td><td>Klasse (LBM-DE)</td></tr>
<tr><td>0,01</td><td>Sandflächen, Wasserflächen</td></tr>
<tr><td>0,02</td><td>Gewässerläufe, Flächen mit spärlicher Vegetation, Salzwiesen, Mündungsgebiete</td></tr>
<tr><td>0,05</td><td>Abbauflächen, Deponien, Sport- und Freizeitanlagen</td></tr>
<tr><td>0,10</td><td>Flughäfen, nicht bewässertes Ackerland, Wiesen und Weiden, Sümpfe, Torfmoore, Meere und Ozeane</td></tr>
<tr><td>0,20</td><td>Straßen, Eisenbahn, Weinbauflächen, (Moor)Heiden, Felsflächen ohne Vegetation, städtische Grünflächen, natürliches Grünland</td></tr>
<tr><td>0,50</td><td>Hafengebiete, Obst- und Beerenobstbestände, Wald-Strauch-Übergangsstadien</td></tr>
<tr><td>1,00</td><td>Nicht durchgängig städtische Prägung, Industrie- und Gewerbeflächen, Baustellen</td></tr>
<tr><td>1,50</td><td>Nadelwälder, Mischwälder</td></tr>
<tr><td>2,00</td><td>Durchgängig städtische Prägung, Laubwälder</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>RCP4.5 / RCP8.5</td><td>Representative Concentration Pathways (RCP) – Repräsentative Konzentrationspfade: Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Sie sind Grundlage für den 5. Sachstandsbericht des IPCC.
RCP4.5: Moderate Entwicklung; RCP8.5 „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario.</td></tr>
<tr><td>Rechengitter</td><td>Bei den numerischen Simulationen wird das Rechengebiet mit einem Gitternetz überzogen. An dessen Knotenpunkte werden die meteorologischen Variablen mit dem zugrundeliegenden Gleichungssystem berechnet.</td></tr>
<tr><td>sensibler Wärmestrom</td><td>Siehe fühlbarer Wärmestrom.</td></tr>
<tr><td>Sommertag</td><td>Ein Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 25 °C erreicht oder überschreitet.</td></tr>
</table>

SRTM-Daten	Digitales Geländemodell, welches bei der STS-099 Shuttle Radar Topography Mission im Februar 2000 (Dauer 11 Tage, 6 h) aufgezeichnet wurde.
Stadtklima	Unter Stadtklima versteht man das gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen (wie z.B. Luftschadstoffe oder Abwärme) modifizierte Klima von Städten und Ballungsräumen. Während windschwacher Hochdruckwetterlagen reichert sich über der Stadt die Luftschadstoffkonzentration an. Das Stadtklima ist insbesondere durch die Eigenschaften von Baustoffen bezüglich Wärmespeicherung und Reflexion von Sonnenstrahlung, durch die starke Versiegelung des Bodens und durch das Fehlen von Vegetation gekennzeichnet. Am Nachmittag bildet sich deshalb eine urbane Wärmeinsel aus, welche nachts im Vergleich zur Umgebung am ausgeprägtesten ist. Im Sommer kann die Wärmeinsel zu einer erhöhten Wärmebelastung gegenüber dem Umland beitragen und die nächtliche Regeneration der Stadtbevölkerung beeinträchtigen. Die Windgeschwindigkeit wird durch die hohe Hinderniswirkung der Bebauung gegenüber dem Umland im Mittel reduziert, die Turbulenz jedoch erhöht. Aufgrund der vielfältigen Landnutzungen und Bebauungsstrukturen weist das kleinräumige Klima innerhalb der Stadt eine hohe räumliche Variabilität auf. Durch die tagsüber stärkere Konvektion über der Stadt kann es lokal zu stärkeren konvektiven Niederschlagsereignissen kommen.
mittlere Strahlungstemperatur	Die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ist die Temperatur der auf den Wärmehaushalt des Menschen (bzw. den Messpunkt) einwirkenden Wärmestrahlung aller Umschließungsflächen in Abhängigkeit von deren Emissionsvermögen.
Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde
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. Diese im Tagesgang immer stärker werdende Luftströmung wird als Talwind bezeichnet. Er setzt meist 2 bis 3 Stunden nach Sonnenaufgang ein und erlischt erst kurz nach Sonnenuntergang.[28]
Trajektorie	„Bahn oder Bewegungspfad, den ein Objekt, z.B. ein Luftpartikel, in einem gewissen Zeitraum durchläuft. Das bedeutet, dass die Trajektorie alle Orte verbindet, die ein Teilchen während seiner Bewegung einmal berührt hat. Durch die Berechnung von Trajektorien lässt sich z.B. die Herkunft und die weitere Verfrachtung von Luftverunreinigungen bestimmen. Geht man vom Endpunkt der Bahn aus und „verfolgt“ das Objekt zeitlich rückwärts bis zu seinem „Startpunkt“, spricht man von Rückwärtstrajektorien. Geht man vom Startpunkt aus und rechnet zeitlich vorwärts von einer Vorwärtstrajektorie.“ (Noppel, 2017)
Urban boundary layer	Bezeichnung für den Teil der bodennahen Luftschicht, der durch städtisch bebaute Gebiete beeinflusst wird.
Urban canopy layer	Luftschicht zwischen dem Boden und der mittleren Höhe der Gebäude und Bäume, in welchen mikroskalige Prozesse, wie Mehrfachreflexion oder Turbulenz, dominieren.
urbane Wärmeinsel **UHI**	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während autochthoner Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.

[28] *https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, zuletzt abgerufen am 06.10.2022.*

	"Die Ausprägung der Wärmeinsel hängt von der Größe der Stadt, der Bebauungsstruktur sowie der jeweiligen Wetterlage ab. Die höchsten Temperaturdifferenzen ergeben sich bei geringem Wind und hoher Ein- bzw. Ausstrahlung (d.h. geringer Bewölkung). In Städten, die in einer windschwachen Region liegen, wird der mittlere Wärmeinseleffekt also z.B. höher sein, als in Städten, in deren Umgebung in der Regel eine relativ hohe Windgeschwindigkeit herrscht." (Noppel, 2017)
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte, die das Produkt aus Geschwindigkeit und Schichtdicke ist, ist ein Maß für die Menge an abfließender Kaltluft. Sie wird angegeben in $m^3/(s \cdot m)$ und betrachtet somit den Volumenfluss durch einen Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit. In der vorliegenden Untersuchung wurde sie ausgegeben für: ▪ bodennahe Verhältnisse (math. Integral vom Boden bis in 5 m über Grund), ▪ vom Boden bis ins Überdachniveau (math. Integral vom Boden bis in 28 m über Grund) und ▪ als „Gesamtvolumenstrom" (math. Integral vom Boden bis in 65 m Höhe über Grund. Der Gesamtvolumenstrom soll die für die Bevölkerung und die Bebauung einflussreiche belüftungswirksame bodennahe Schicht erfassen.
Vorbehaltsgebiet	Gebiet, in dem bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen ist. Die Zulassung entgegenstehender Nutzung wird in Vorbehaltsgebieten nicht vollständig ausgeschlossen. Es handelt sich bei Vorbehaltsgebieten um Grundsätze der Raumordnung. Solche Grundsätze sind gemäß § 4 ROG zu berücksichtigen, d.h. ihre inhaltliche Ausrichtung ist bei weiteren, auf der Ebene der Raumordnung noch nicht abschließend vollzogenen Abwägungen mit anderen örtlichen oder sektoralen Belangen zu berücksichtigen.
Vorranggebiet	Vorranggebiete geben bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen Priorität und schließen andere raumbedeutsame Nutzungen in diesem Gebiet aus, soweit Letztere mit den vorrangigen Funktionen, Nutzungen oder Zielen der Raumordnung nicht vereinbar sind. Vorranggebiete dienen somit entweder der Sicherung standortgebundener Nutzungen oder Funktionen oder deren gezielter Entwicklung innerhalb eines bestimmten Gebiets. Es handelt sich dabei um Ziele der Raumordnung. Ziele der Raumordnung sind gemäß § 4 ROG zu beachten. Dies bedeutet, dass sie bereits letztverbindlich abgewogen sind. Sie können deshalb in Bauleitplänen und in Fachplanungen nicht erneut abgewogen (respektive: „verworfen") werden, sondern nur noch in dem jeweiligen Planungsmaßstab entsprechend konkretisiert werden.
Vulnerabilität	Oder „Empfindlichkeit", beschreibt, wie empfindlich das jeweilige Objekt auf innere und äußere Störereignisse reagiert. Dies schließt die Wahrscheinlichkeit für mögliche Schäden ein (Turner et al. (2003)), aber auch die Fähigkeit, wie das System mit den Einflüssen umgeht, um die Systemdienstleistungen weiterhin aufrechterhalten zu können (Birkmann et al. (2013)). In Bezug auf den Klimawandel, kann die Vulnerabilität als ein Maß dafür verstanden werden, inwieweit ein System anfällig für die Auswirkungen von Klimaextremen, -schwankungen und -veränderungen ist bzw. nicht fähig ist, diese zu bewältigen (IPCC (2022)). Gemäß dieser Definition setzt sich die Vulnerabilität aus den Teilen Exposition (z. B. veränderte

	Niederschlags- oder Temperaturbedingungen), Sensitivität (Empfindlichkeit) und Anpassungskapazität zusammen.
Wahre Ortszeit	Die wahre Ortszeit beschreibt die Sonnenzeit bezogen auf einen bestimmten Ort, hier: im Berechnungsgebiet. Charakteristisch für die wahre Ortszeit ist, dass zum Mittagstermin – 12:00 Uhr – der Sonnenhöchststand eintritt (Durchgang der Sonnenmitte durch den lokalen Meridian). Im Regionalverband Heilbronn-Franken beträgt der Unterschied zur mitteleuropäischen Sommerzeit etwa 1:20 Std (14:00 Uhr WOZ entspricht 15:20 Uhr MESZ).
Wärmebelastung (des Menschen)	Um weder zu stark auszukühlen noch aufzuheizen, müssen sich Wärmegewinn und Wärmeabgabe des Menschen die Waage halten. Dazu besitzt der Organismus eine Reihe unwillkürlich ablaufender Regulationsmechanismen. Die gesundheitliche Bedeutung hängt insbesondere mit der engen Vernetzung von Thermo- und Kreislaufregulation zusammen. Ist die Wärmeabgabe behindert – was hauptsächlich bei sommerlichen, gering bewölkten Wetterlagen mit hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchte und schwachem Wind der Fall ist – droht Überhitzung und die Thermoregulation muss verstärkt wirksam werden. Die Umgebung wird dann als belastend empfunden, man spricht von Wärmebelastung.
Windfeld	Als „Windfeld“ wird ein für einen bestimmten Zeitraum gültiger Datensatz im dreidimensionalen Rechengitter bezeichnet, der Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeiten enthält. Das Windfeld wird auch als „Strömungsfeld“ bezeichnet.
Wirkraum	Besiedelter Raum, in den die Kaltluft oder →Frischluft eindringt. Er kann thermisch und/oder lufthygienisch belastet sein.

10 Literatur

Anderson, C.A., B.J. Bushman & R.W. Groom (1997): Hot Years and Serious and Deadly Assault: Empirical Tests of the Heat Hypothesis. Journal of Personality and Social Psychology (73)6: 1213–1223.

Basu, R. (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. Environmental Health (8)1: 40.

Belkin, L.Y. & M. Kouchaki (2017): Exploring the impact of ambient temperature on helping. European Journal of Social Psychology (47)5: 525–538.

Birkmann, J., H.R. Böhm, F. Buchholz, D. Büscher, A. Daschkeit, S. Ebert, M. Fleischhauer, B. Frommer, S. Köhler, W. Kufeld, S. Lenz, G. Overbeck, J. Schanze, S. Schlipf, P. Sommerfeldt, M. Stock, M. Vollmer & O. Walkenhorst (2013): Glossar Klimawandel und Raumentwicklung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover.

Christen, A. (2019): Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler, and A. Matzarakis (Eds), Warnsignal Klima: Die Städte. , S. 36–42.

Christidis, N., G.S. Jones & P.A. Stott (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. Nature Climate Change (5)1: 46–50.

Deutscher Wetterdienst (2020): Richtlinie - Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD.

EU-Richtlinie 2008/50/EG (2008): Richtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa.

Fanger, P.O. (1972): Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill, New York.

Fisk, W.J. (2000): Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. Annual Review of Energy and the Environment (25)1: 537–566.

Früh, B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau & U. Wienert (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. Journal of Applied Meteorology and Climatology (50)1: 167–184.

Geiger, R., R.H. Aron & P. Todhunter (1995): The Climate Near The Ground. 5th ed. F. Vieweg & sohn, Braunschweig.

Haskell, E.H., J.W. Palca, J.M. Walker, R.J. Berger & H.C. Heller (1981): The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology (51)5: 494–501.

Hewitt, C.D. (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. Eos, Transactions American Geophysical Union (85)52: 566.

Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology (43)2: 71–75.

Höppe, P.R. (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Ludwig-Maximilians University Munich.

Hübener, H., K. Bülow, K. Keuler, Ch. Menz, K. Radke, A. Spektat, Ch. Steger, K. Warrach-Sagi (2017): ReKliEs-De. Ergebnisbericht.

IPCC ed. (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC ed. (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC ed. (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC ed. (2022): Climate Change 2021: Impacts, Adaption and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Jacob, D., J. Petersen, B. Eggert, A. Alias, O.B. Christensen, L.M. Bouwer, A. Braun, A. Colette, M. Déqué, G. Georgievski, E. Georgopoulou, A. Gobiet, L. Menut, G. Nikulin, A. Haensler, N. Hempelmann, C. Jones, K. Keuler, S. Kovats, N. Kröner, S. Kotlarski, A. Kriegsmann, E. Martin, E. van Meijgaard, C. Moseley, S. Pfeifer, S. Preuschmann, C. Radermacher, K. Radtke, D. Rechid, M. Rounsevell, P. Samuelsson, S. Somot, J.-F. Soussana, C. Teichmann, R. Valentini, R. Vautard, B. Weber & P. Yiou (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change (14)2: 563–578.

Koppe, Ch., G. Jendritzky & G. Pfaff (2003): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. Klimastatusbericht: 152–162.

Koßmann, M., H. Noppel & B. Früh (2014): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse in Offenbach am Main als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 70S.

Matzarakis, A., L. Martinelli & C. Ketterer (2016): Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island. In: F. Musco (Ed), Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. Springer International Publishing, Cham, S. 93–107.

Matzarakis, A. & H. Mayer (1997): Heat stress in Greece. International Journal of Biometeorology (41)1: 34–39.

Mayer, H., W. Beckröge & A. Matzarakis (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report (5): 265–268.

Moss, R.H., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J.A. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, E. Lin, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J.F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R.

Pichs, K. Riahi, S. Rose, P.J. Runci, R. Stouffer, D. VanVuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J.P. van Ypersele & M. Zurek (2008): Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins & D.A. Stainforth (2004): Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. Nature (430)7001: 768–772.

Nastos, P.T. & A. Matzarakis (2012): The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. Theoretical and Applied Climatology (108)3–4: 591–599.

Noppel, H. (2017): 249 Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis. Deutscher Wetterdienst (Ed). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Oke, T.R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. Journal of Climatology (1)3: 237–254.

Oke, T.R. (1988): Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings (11)1–3: 103–113.

Oke, T.R., G. Zeuner & E. Jauregui (1992): The surface energy balance in Mexico City. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere (26)4: 433–444.

Orlanski, I. (1975): A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. Bulletin of the American Meteorological Society (56)5: 527–530.

Robine, J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel & F.R. Herrmann (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes Rendus Biologies (331)2: 171–178.

Rotach, M.W. & P. Calanca (2003): Microclimate. In: J. R. Holton (Ed), Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Academic Press, Oxford, S. 1301–1307.

Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger & C. Appenzeller (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature (427)6972: 332–336.

Schirmer, H. & W. Buschner (1987): Meyers kleines Lexikon “Meterologie.” Meyers Lexikonverlag, Mannheim and Wien and Zürich.

Schwab, A. & D. Zachenbacher (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO): Wissenschaftlicher Abschlussbericht.

TA Luft (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021.

Turner, B.L., R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J. McCarthy, R.W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J.X. Kasperson, A. Luers, M.L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher & A. Schiller

(2003): A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences (100)14: 8074–8079.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015): Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022): Umweltmeteorologie, Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003): Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010): Umweltmeteorologie. Human- biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation.

van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith & S.K. Rose (2011): The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change (109)1: 5.

Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGREGOR, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding & F. Kimura (2004): Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II (82)6: 1599–1628.

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2002): Landesentwicklungsplan 2002 Baden-Württemberg. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart. Verordnung, 152S.

Zander, K.K., W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellström & S.T. Garnett (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. Nature Climate Change (5)7: 647–651.

Zerbisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Haße, U. Fritsch & W. Cramer (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt.

Anhang 1: Bestimmung der Einwohnerdichte

Um die Aktualität der Untersuchung zu gewährleisten und die Aussagekraft der Klimaanalyse zu stärken, ist es essentiell, dass die genutzten Datengrundlagen den aktuellen Sachstand darstellen. Da jedoch festgestellt wurde, dass in den Daten der Landesvermessung viele neu erschlossene Baugebiete noch nicht abgebildet sind, hat der Regionalverband Heilbronn-Franken beschlossen, zusammen mit ihren Kommunen ergänzend eine Auswertung der Bebauungspläne der vergangenen Jahre vorzunehmen, um diese bereits realisierten oder mit hoher Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft umzusetzenden Baugebiete in die Datengrundlage einfließen zu lassen.

Die rechtskräftigen Bebauungspläne sollen in die Modell-Eingangsdaten eingepflegt werden, um die Aktualität der Eingangsdaten sicherzustellen. Dies ist für die Plausibilität der Berechnungsergebnisse sehr wichtig. Die rechtskräftigen Bebauungspläne wurden dazu vom AG bei den Städten und Gemeinden des Regionalverbands Heilbronn-Franken angefragt.

Neben der Berücksichtigung der Neubaugebieten in der Modellierung müssen auch die Einwohnerzahlen aktualisiert werden, damit die Einwohner der Neubaugebiete in der Betroffenheitsanalyse dargestellt werden können. Auch hier liegt kein flächendeckender, hochaufgelöster Datensatz für den Regionalverband Heilbronn-Franken vor.

Ein räumlich differenzierter Datensatz stellen die Zensusdaten von 2022 (Einwohnerdichte pro Hektar) dar. Dieser Datensatz wurde um die Einwohnerdichten in den von Regionalverband seit 2016 erfassten Neubaugebiete ergänzt, sofern die Einwohnerzahlen aus den Zensusdaten nicht bereits mindestens 80% der zu erwartenden Einwohner erreicht. Um diese zu ergänzen, wurde der Einwohnerdatensatz (Zensus 2022 und Neubaugebiete seit 2016) auf das Wohngebäudevolumen (aus den LoD2-Daten) umgerechnet. Der dabei entstandene Datensatz Einwohner pro m³ Wohngebäude wurde auf negative Abweichungen im Vergleich zum ortstypischen Niveau untersucht. Zusätzlich wurden auch die beiden nicht aktuellen und nicht deckungsgleichen Landnutzungsdatensätze Basis-DLM und das Raumordnungskataster (AROK) auf Wohnnutzung analysiert. Diese Abweichungen wurden händisch kontrolliert und die Einwohnerzahlen ggf. korrigiert.

Anhang 2: Messungen

Im Gebiet des Regionalverbands gibt es amtliche Messstationen des Deutschen Wetterdienstes und Stationen der LUBW. Im Rahmen der Klimaanalyse Heilbronn wurden im Raum Heilbronn zusätzliche Messungen durchgeführt.

Stationen des DWD

Die meisten DWD-Stationen sind Klimamessstationen, an denen keine Windverhältnisse erfasst werden.

In Abbildung A- 1 ist die Lage der Stationen eingetragen. Die Messstelle in Heilbronn kann als innerstädtisch angesehen werden. Die anderen Stationen liegen eher in dörflich geprägtem Umfeld.

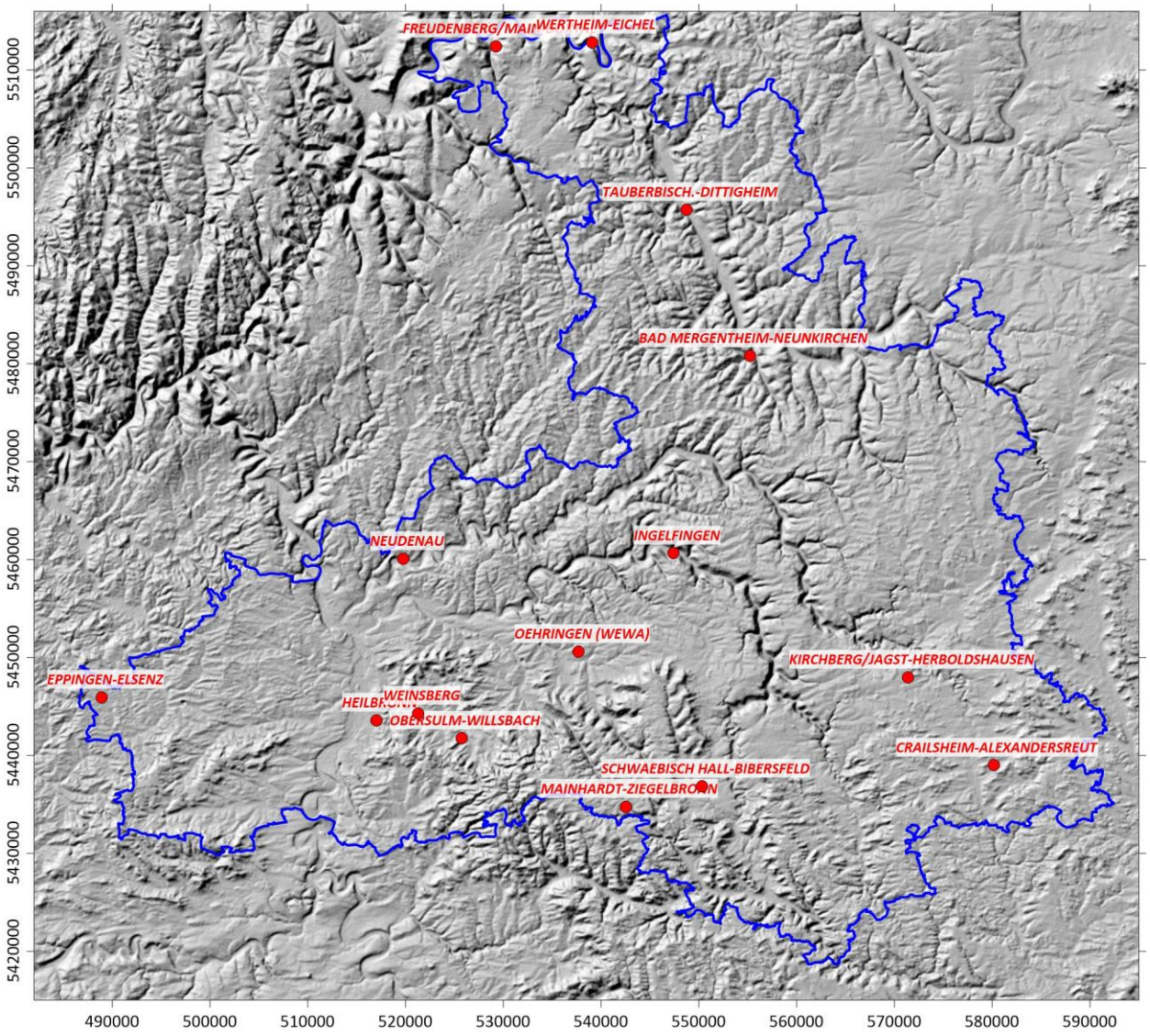


Abbildung A- 1: Stationen des DWD auf dem Gebiet des Regionalverbands Heilbronn-Franken.

In Tabelle A- 1 ist die Lage der Stationen und 30-jährige Mittelwerte der Lufttemperatur, der Niederschlagsmenge und der Sonnenscheindauer aufgeführt. Minimale Werte in jeder Spalte sind

blau unterlegt, maximale Werte gelb. Werte in Kursivschrift sind vom DWD interpolierte Werte aus umliegenden Stationen, da im 30-jährigen Zeitraum keine vollständigen Messungen vorlagen.

Bei den mittleren Lufttemperaturen weist die Messstelle Heilbronn die höchsten Werte auf. Zwischen der Normalperiode 1971 – 2000 und 1991 – 2020 hat die mittlere Lufttemperatur dort um 0,8 K zugenommen. Die kühlsten Temperaturen werden an den Stationen mit einer Höhenlage über 400 m registriert (Crailsheim, Kirchberg, Mainhardt). Auch dort hat die mittlere Temperatur um ca. 1 K zugenommen.

Die höchsten Niederschlagsmengen mit über 1000 mm/a wurden in Mainhardt-Ziegelbronn gemessen. Die niedrigsten mit ca. 650 mm/a in Tauberbischofsheim-Dittigheim. Tendenziell ist an vielen Stationen eine leichte Abnahme der Niederschlagsmengen vorhanden.

Die mittlere Sonnenscheindauer variiert zwischen ca. 1500 Stunden pro Jahr (Stationen am Main) und knapp 1800 Stunden pro Jahr in Eppingen-Elsenz. Zwischen der Normalperiode 1971 – 2000 und 1991 – 2020 ist die Sonnenscheindauer im Mittel um über 120 Stunden angestiegen.

In Tabelle A- 2 sind die klimatologischen Kenntage, soweit vom DWD veröffentlicht, dargestellt. Da viele Stationen vor 2005 stillgelegt wurden, sind für die aktuelle Normalperiode 1991 – 2000 nur zwei Stationen (Bad Mergentheim-Neunkirchen und Öhringen) vollständig.

Die Zahl der Eistage ist an beiden Stationen mit über 17 Tagen pro Jahr in der Periode 1971 – 2000 und knapp 14 Tagen pro Jahr im Zeitraum 1991 – 2020 nahezu gleich. Auch die Zahl der Frosttage geht an beiden Stationen zurück, wobei Bad Mergentheim-Neunkirchen etwas mehr Tage ausweist.

Die Zahl der Sommertage und der heißen Tage steigt dagegen deutlich an. Die Sommertage in Bad Mergentheim-Neunkirchen nehmen von 45 auf ca. 63 zu, in Öhringen von 41 auf 56. Die Anzahl der heißen Tage verdoppelt sich nahezu.

Tabelle A- 1: Stationen des DWD, Lage und 30-jährige Mittelwerte der Lufttemperatur, der Niederschlagsmenge und der Sonnenscheindauer. Minimale Werte – blau, maximale Werte – gelb unterlegt. Werte in Kursivschrift sind vom DWD interpolierte Werte aus umliegenden Stationen, da im 30-jährigen Zeitraum keine vollständigen Messungen vorliegen. (Quelle: DWD[29])

Name der Station	Stations-ID	Höhe ü. NN	Breite	Länge	Lufttemperatur		Niederschlag		Sonnenscheindauer		Zeitraum
		m	°	°	°C	°C	mm/a	mm/a	h/a	h/a	
					1971-2000	1991-2020	1971-2000	1991-2020	1971-2000	1991-2020	
CRAILSHEIM-ALEXANDERSREUT	881	423	49,0985	10,0979	8,2	*9,2*	813,6	*783,0*	1516,8	*1729,5*	bis 2003
EPPINGEN-ELSENZ	1255	226	49,1661	8,8483	*9,8*	10,4	*789,1*	750,1	*1605,2*	1782,6	ab 2002
FREUDENBERG/MAIN-BOXTAL	7187	194	49,7636	9,4063	*9,5*	10,1	*727,3*	738,0	*1511,3*	1658,9	ab 2004
HEILBRONN	2095	167	49,1448	9,2333	10,1	*10,9*	747,0	*711,9*	1607,6	*1734,2*	bis 2003
INGELFINGEN	2406	209	49,2967	9,6520	*8,5*	10,2	*830,3*	805,0	*1630,2*	1740,5	bis 2002
KIRCHBERG/JAGST-HERBOLDSHAUSEN	2575	432	49,1804	9,9800	*8,4*	9,2	*837,9*	*783,6*	*1618,0*	*1756,1*	ab 2007
MAINHARDT-ZIEGELBRONN	3135	473	49,0643	9,5820	*8,1*	*9,2*	*1015,9*	*1007,0*	*1626,2*	*1750,0*	bis 1983
BAD MERGENTHEIM-NEUNKIRCHEN	3257	251	49,4773	9,7622	8,9	9,8	719,3	763,3	1583,8	1705,3	
NEUDENAU	3486	212	49,2931	9,2722	9,7	*10,5*	779,9	754,2	1610,4	1726,8	bis 2004
OBERSULM-WILLSBACH	3734	230	49,1280	9,3525	*9,8*	10,6	*836,9*	808,0	*1620,1*	1742,1	ab 2004
OEHRINGEN (WEWA)	3761	276	49,2070	9,5176	9,4	10,5	837,7	785,1	1682,1	1771,9	
SCHWAEBISCH HALL-BIBERSFELD	4582	358	49,0823	9,6892	8,8	*9,8*	847,7	*872,0*	1610,3	*1742,5*	bis 2001
TAUBERBISCHOFSHEIM-DITTIGHEIM	4987	179	49,6122	9,6747	9,0	*9,8*	647,2	*650,0*	1543,8	*1680,6*	bis 2004
WEINSBERG	5429	219	49,1512	9,2920	*10*	*10,8*	*747,5*	*714,9*	*1612,5*	*1736,9*	bis 1984
WERTHEIM-EICHEL	5498	140	49,7667	9,5428	9,6	*10,1*	686,1	*704,1*	*1504,2*	1663,8	bis 2004

Lufttemperatur	Mittel der Temperatur in 2 m über dem Erdboden	°C (Grad Celsius)
Niederschlag	Mittlere Jahressumme der Niederschlagshöhe	mm (Millimeter)
Sonnenscheindauer	Mittlere Jahressumme der Sonnenscheindauer	h (Stunden)

[29] https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html?nn=495662&lsbId=343278, *zuletzt aufgerufen 20.02.2023*

Tabelle A- 2: Stationen des DWD, Lage und klimatologische Kenntage für die Klimanormalperioden 1971 – 2000 und 1991 – 2020. (Quelle: DWD).

Name der Station	Eistage		Frosttage		Sommertage		Heiße Tage		Zeitraum
	1971-2000	1991-2020	1971-2000	1991-2020	1971-2000	1991-2020	1971-2000	1991-2020	
CRAILSHEIM-ALEXANDERSREUT	23,8	–	99,6	–	35,6	–	5,6	–	bis 2003
EPPINGEN-ELSENZ	16,5	–	68,5	–	42,2	–	7,5	–	bis 2002
HEILBRONN	11,9	–	65,3	–	50,9	–	12,2	–	bis 2003
BAD MERGENTHEIM-NEUNKIRCHEN	17,7	13,9	88,4	83,6	44,8	62,7	9,4	18	bis heute
NEUDENAU	14,3	–	72,5	–	51,3	–	12,4	–	bis 2004
OEHRINGEN (WEWA)	17,6	13,7	74,1	67,4	41,2	55,7	7,1	14	bis heute
WERTHEIM-EICHEL	14,2	–	71,8	–	50,0	–	12,4	–	bis 2004

Eistage	Tage mit Tagesmaximum der Temperatur < 0 °C
Frosttage	Tage mit Tagesminimum der Temperatur < 0 °C
Heiße Tage	Tage mit Tagesmaximum der Temperatur ≥ 30 °C
Sommertage	Tage mit Tagesmaximum der Temperatur ≥ 25 °C

Eine langjährige Messstation des DWD ist die Wetterwarte in Öhringen. Sie liegt am Rand eines von Nordost nach Südwest verlaufenden Grünzugs am Nordostrand von Öhringen. In Abbildung A- 2 ist die Häufigkeitsverteilung aller auftretenden Windrichtungen dargestellt. Hauptsächlich kommt der Wind aus westlicher Richtung. Daneben gibt es noch zwei kleinere Maxima für Winde aus Ostnordost und Winde aus Südost.

Betrachtet man ausschließlich die für Kaltluftabflüsse typische Ausbreitungssituation bei stark stabiler Schichtung (rechte Windrose), so kann man feststellen, dass ein Großteil der Ostnordost- und der Südostströmung auf Kaltluftabflussereignisse zurückzuführen ist.

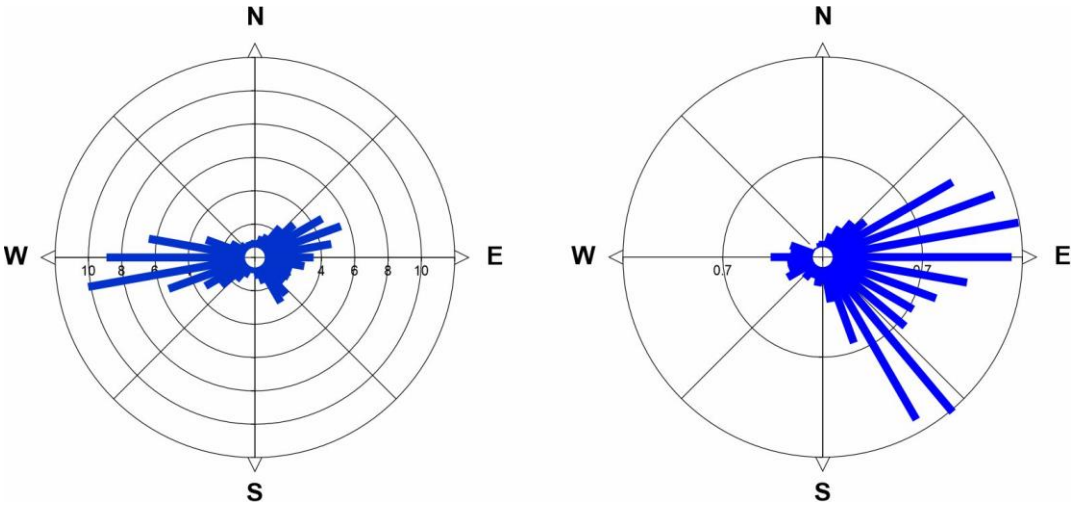


Abbildung A- 2: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen in Öhringen. Links – gesamtes Jahr, rechts – nur stark stabile Schichtung (Ausbreitungsklasse I).

In Abbildung A- 3 und Abbildung A- 4 sind für den Nordosten von Öhringen die simulierten Kaltluftströmungsverhältnisse dargestellt. Die Lage der Messstation ist rot eingekreist.

In den Abendstunden (22:00 Uhr, Abbildung A- 3) wird im Überdachniveau an der Messstation eine nordöstliche Strömung berechnet. Im Laufe der Nacht dreht der Wind auf südöstliche Richtung (vgl. Abbildung A- 4, 4:00 Uhr).

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Beobachtungen überein. Für weitere Validierungen lagen uns vom DWD keine aktuellen Daten vor. Im Folgenden werden jedoch noch andere Messungen angeführt.

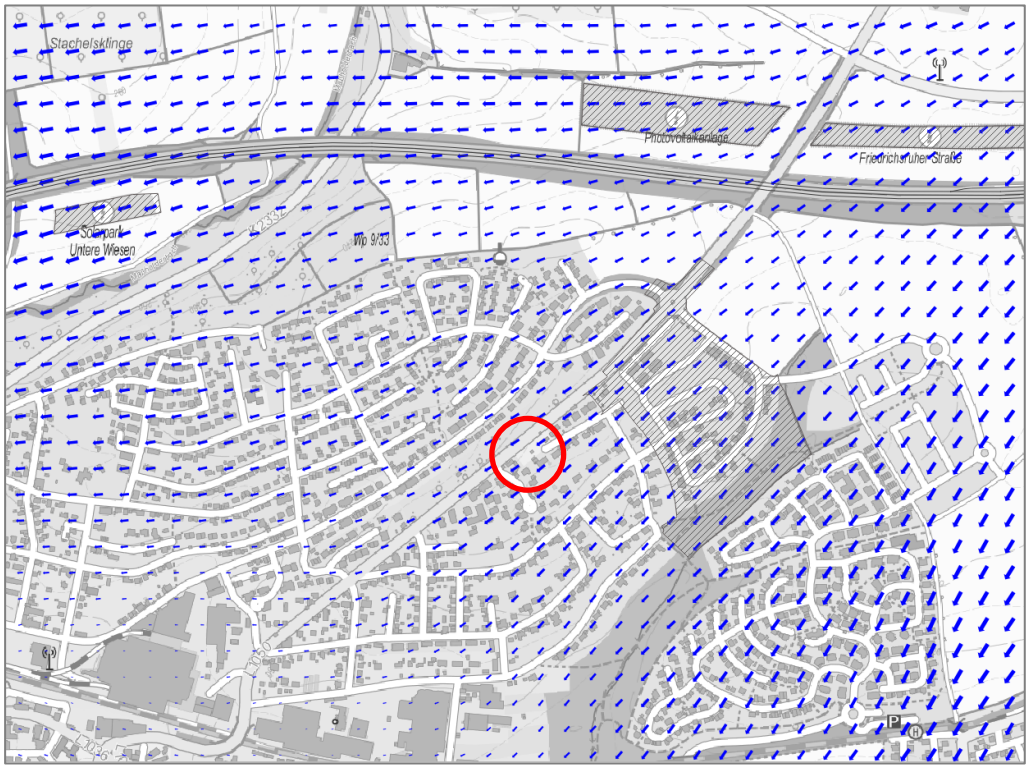


Abbildung A- 3: Simulation der Kaltluftströmung um 22:00 Uhr in 28 m ü. Grund.



Abbildung A- 4: Simulation der Kaltluftströmung um 4:00 Uhr in 28 m ü. Grund.

Stationen der LUBW

Auch die LUBW betreibt in Baden-Württemberg ein Messnetz. Dies dient zwar überwiegend zur Messung der Luftbelastung, an einigen Stationen werden aber auch meteorologische Messungen durchgeführt.

In Tabelle A- 3 sind Messstandorte im gebiet des Regionalverbands aufgeführt. Die Messzeiträume sind häufig kurz und liegen schon einige Jahre zurück.

Tabelle A- 3: Stationen der LUBW, Lage (UTM), Geländehöhe der Station und Messzeiträume.

LUBW-Stationen	OST	NORD	Höhe (m)	von-bis
Wertheim	536375	5514208	147	1994-1995
Neckarsulm	516643	5449809	160	1994-2001
Ilsfeld	516368	5434585	293	1996-1998
Heilbronn	516393	5445875	152	1997-2006
Bühlertann	566188	5432886	390	1978-1979
Schwäbisch Hall	553543	5439638	300	1997-2006
Künzelsau	550405	5458780	214	1993-2002
Krensheim	558901	5499139	352	1990-1992
Tauberbischofsheim	547506	5498239	177	1997-2006

Exemplarisch wird auf drei Standorte eingegangen. Betrachtet wird jeweils ein Tag (3. August 2003) aus dem Hitzesommer 2003 (wg. Messzeiträumen) zu Beginn der damaligen Hitzewelle.

Die Abbildungen zeigen jeweils die Lage der Messstation und die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen, wie sie dem Daten- und Kartendienst der LUBW entnommen werden können. Darunter ist die Zeitreihe der Windrichtung (blaue Striche, Einteilung linke Achse), die Windgeschwindigkeit (graue Linie, Einteilung rechte Achse) und die Lufttemperatur (orangefarbene Linie, Einteilung rechte Achse) für den gewählten Tag dargestellt. Die Nachtzeiträume sind grau hinterlegt.

Abbildung A- 5 zeigt die ungefähre Lage der Messstation. Diese liegt nicht im Talgrund, sondern in einer Ausbuchtung des Tales auf der westlichen Talseite. Entsprechend findet man in der Windrose auch kaum eine Kanalisierung der Strömung in Tallängsrichtung.

Die Zeitreihe (Abbildung A- 6) zeigt, dass die Lufttemperatur bis ca. 5:00 Uhr MEZ auf gut 17 °C abnimmt. Danach steigt sie bis 10:00 Uhr steil an und verharrt auf einem hohen Niveau von knapp 35 °C. Nach Sonnenuntergang (der reale findet aufgrund der Tallage früher als der astronomische statt) nimmt die Lufttemperatur vergleichsweise langsam ab und liegt um Mitternacht noch bei über 23 °C.

Die Windgeschwindigkeit nimmt zwar nach dem realen Sonnenuntergang deutlich ab, die Windrichtung stellt sich aber erst gegen 22:30 Uhr MEZ von nordwestlichen auf eine östliche Windrichtung um.

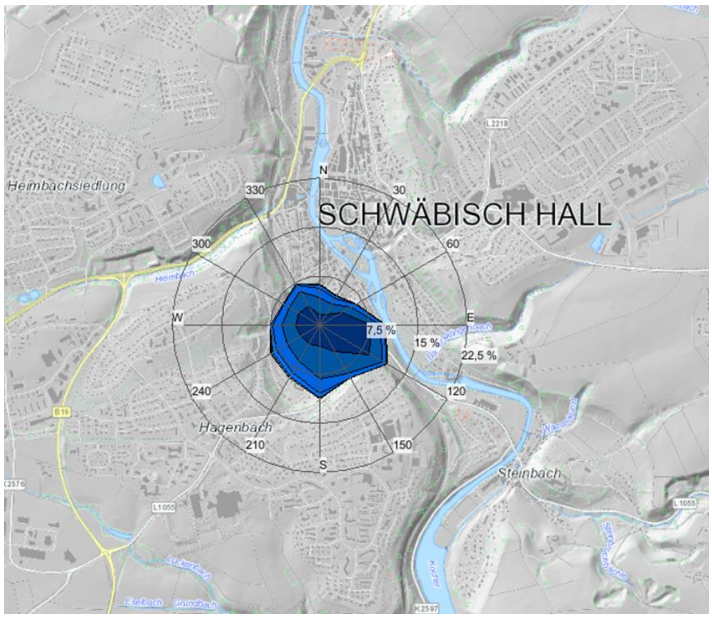


Abbildung A- 5: Lage und Windrose der LUBW-Station Schwäbisch Hall (Quelle: Daten- und Kartendienst der LUBW).

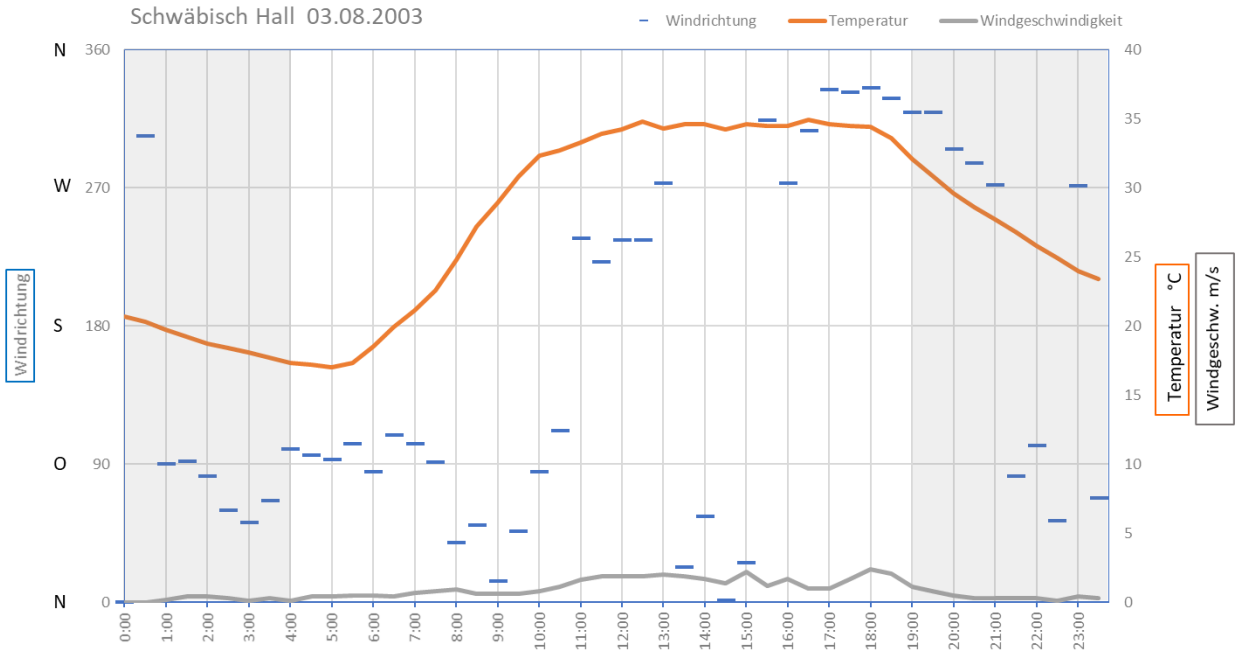


Abbildung A- 6: Tagesgang der Lufttemperatur (orange), der Windrichtung (blau) und der Windgeschwindigkeit (grau) am 3. August 2003 an der LUBW-Station Schwäbisch Hall.

Die Messstelle in Heilbronn lag am östlichen Rand des Gewerbegebiets nördlich der Stadt (vgl. Abbildung A- 7). Die Strömung wird durch die Gebäude im Gewerbegebiet und die nach Osten ansteigende Orographie beeinträchtigt, so dass man nicht wie erwartet eine Nord-Süd Ausrichtung, sondern eine Südwest-Nordost Ausrichtung vorfindet.

Die Zeitreihe am 3. August 2003 verläuft ähnlich wie in Schwäbisch Hall. Zunächst nimmt die Lufttemperatur bis ca. 5:30 Uhr (wahrscheinlich der reale Sonnenaufgang über den östlich gelegenen Weinbergen) auf knapp über 17 °C ab. Sie steigt dann bis 15:30 Uhr auf knapp über 35 °C an, verharrt bis 19:00 Uhr auf einem hohen Niveau, um dann (zum Zeitpunkt des Sonnenuntergangs) rapide auf ca. 27 °C abzufallen. Dies geht mit einer spontanen Drehung der Windrichtung von nördlichen Richtungen auf östliche Richtungen einher. Ein Indiz für den abkühlenden Kaltluftabfluss aus den östlichen Hangzonen, der dafür sorgt, dass thermische Belastungen rasch abgebaut werden. Danach schläft der Wind ein und die Abkühlung erfolgt nur noch langsam. Gegen Mitternacht werden noch ca. 22 °C gemessen.

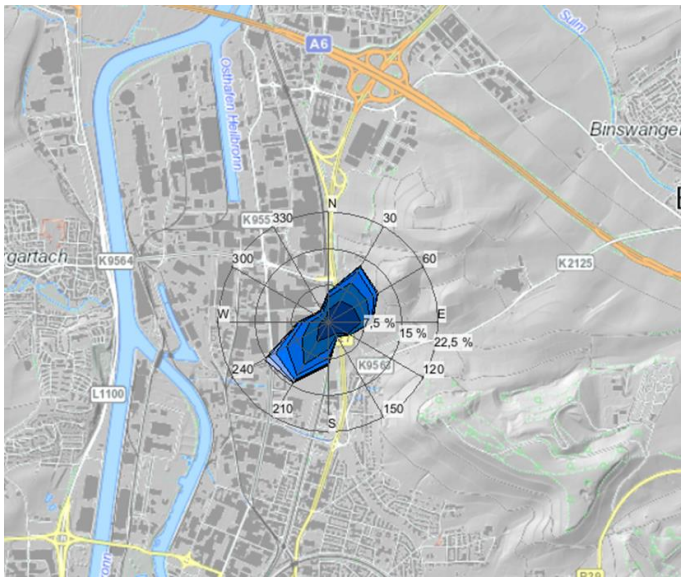


Abbildung A- 7: Lage und Windrose der LUBW-Station Heilbronn (Quelle: Daten- und Kartendienst der LUBW).

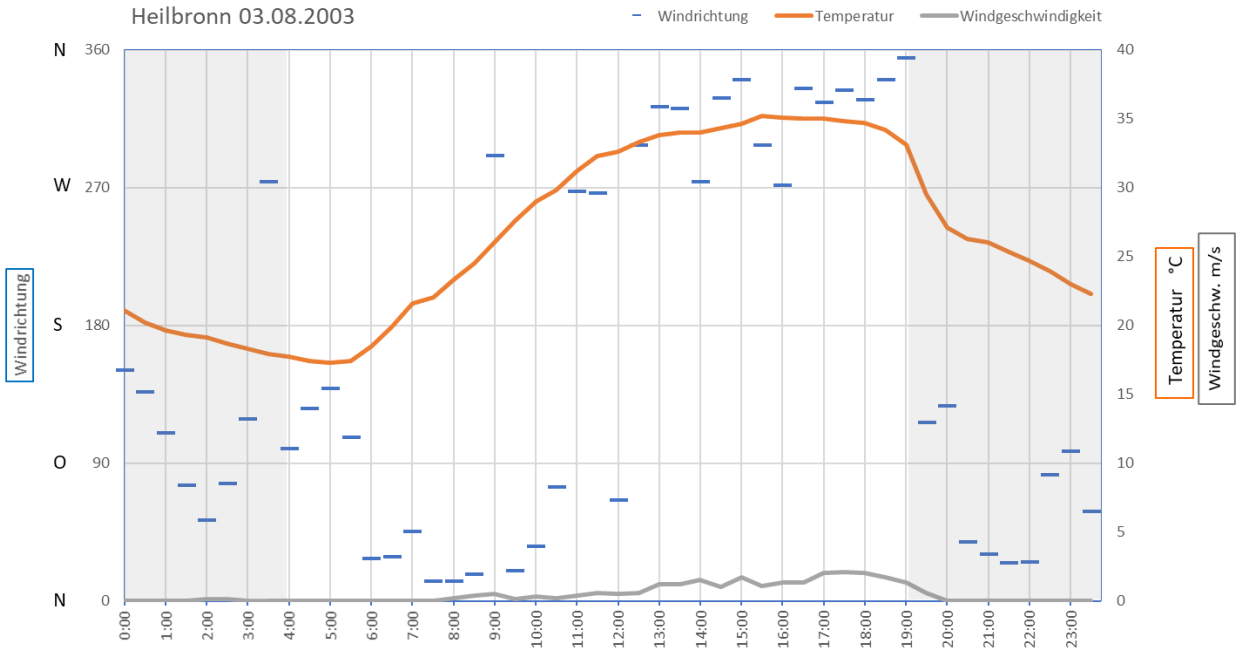


Abbildung A- 8: Tagesgang der Lufttemperatur (orange), der Windrichtung (blau) und der Windgeschwindigkeit (grau) am 3. August 2003 an der LUBW-Station Heilbronn.

In Tauberbischofsheim lag die Messstation nördlich der Stadt am Rand eines Gewerbegebietes (Abbildung A- 9). Durch die Lage im Talgrund findet man erwartungsgemäß eine Kanalisierung der Strömung in Tallängsrichtung.

Die Zeitreihe (Abbildung A- 10) verläuft ähnlich wie in Schwäbisch Hall. Die Abkühlung in der Nacht auf etwas über 14 °C dauert bis zum realen Sonnenaufgang (wegen der Horizonteinschränkung im Tal später als astronomisch möglich) an. Dann erfolgt ein rascher Anstieg bis gegen 11:00 Uhr und ein Plateau mit einem Maximum von 34,3 °C. Auch hier dreht der Wind nach Sonnenuntergang auf östliche Richtungen, verbunden mit einer deutlichen Abkühlung. Gegen Mitternacht werden 18 °C erreicht.

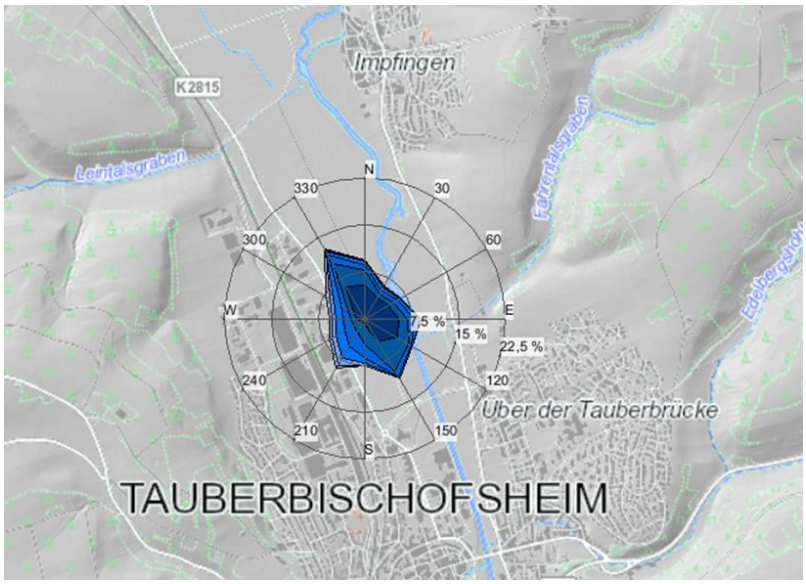


Abbildung A- 9: Lage und Windrose der LUBW-Station Tauberbischofsheim (Quelle: Daten- und Kartendienst der LUBW).

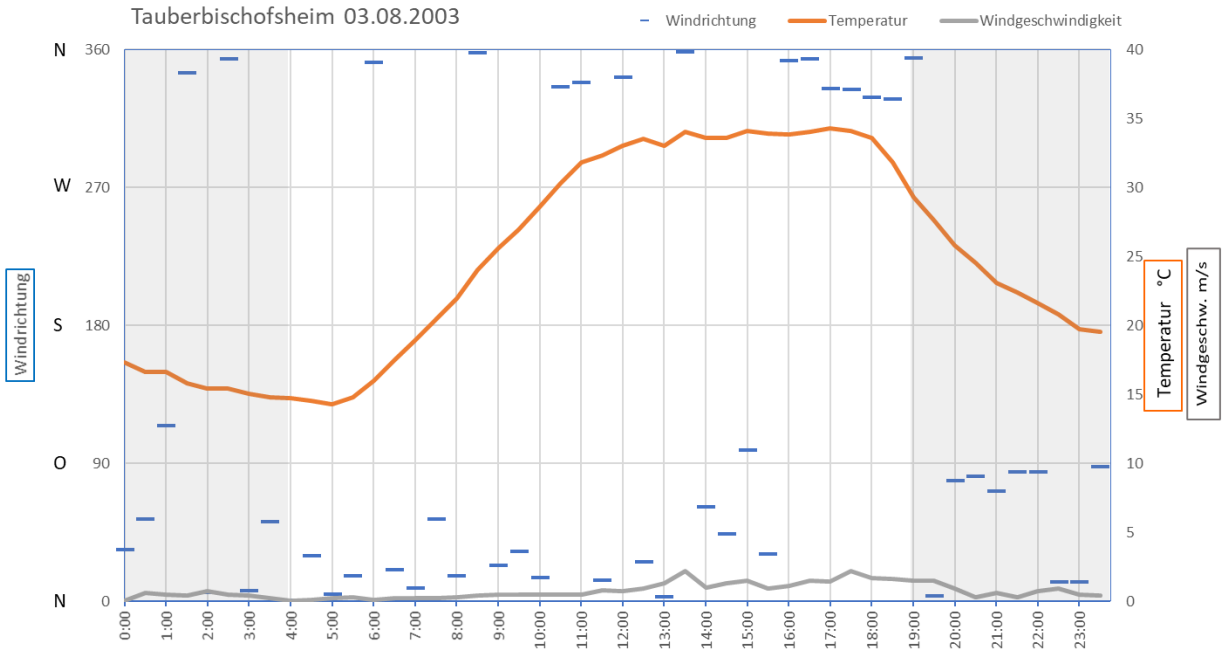


Abbildung A- 10: Tagesgang der Lufttemperatur (orange), der Windrichtung (blau) und der Windgeschwindigkeit (grau) am 3. August 2003 an der LUBW-Station Tauberbischofsheim.

Aus den Zeitreihen kann anschaulich abgeleitet werden, dass dort, wo Kaltluft wirksam wird, eine stärkere Abkühlung in der ersten Nachthälfte wirksam wird. Diesen Gunstfaktor gilt es zu erhalten.

Klimaanalyse der Stadt Heilbronn

Im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse für die Stadt Heilbronn (Rau et al., 2017[30]) wurden einjährige Messungen von 2015 bis 2016 durchgeführt.

Abbildung A- 11 zeigt die Lage der Messstationen und die Windrosen, aufgeschlüsselt nach Tag- (rötlich) und Nachtzeitraum (hellblau).

Die innerstädtischen Standorte 1 und 2 zeigen uneinheitliche Strömungsverhältnisse, sowohl in den Nacht- wie auch in den Tagstunden. Dies mag auch an der geringen Messhöhe von 4 m über Grund liegen, die in der Regel durch Bebauung und Vegetation gestört wird.

Am Standort 5 (DWD-Station an der Hans-Rießer-Straße, Messhöhe 10 m) werden im Untersuchungszeitraum nachts nordnordöstliche bis östliche Windrichtungen registriert. Hier sind Hinderniseinflüsse von den Gebäuden des direkt angrenzenden Gewerbegebiets nicht auszuschließen.

Am Standort 3 (Segelfluggelände Riegelwiesen, Messhöhe 4 m) zeigt in den Nachtstunden Vorzugsrichtungen aus westlicher bis nordwestlicher Richtung. Die simulierten Strömungsverhältnisse sind in Abbildung A- 12 dargestellt. Es werden westnordwestliche Winde berechnet, was sich mit den Messungen deckt.

Standort 4 (Pfühlpark, Messhöhe 4 m über Grund) zeigt eine deutliche Kanalisierung der Strömung. In den Nachtstunden wurden fast ausschließlich Ostnordostrichtungen registriert. Dass keine dem talverlauf entsprechende Ostrichtung gemessen wurde, kann auf die geringe Messhöhe und den Führungseinfluss des südlich verlaufenden Bahndammes zurückgeführt werden.

Abbildung A- 13 zeigt den Vergleich der simulierten Strömung an der Messtelle 4 (Pfühlpark). Die Simulationsergebnisse am Messpunkt weisen eine schwache östliche Strömung aus. Einflüsse des Bahndammes können bei einer räumlichen Auflösung der Simulationen von 50 m nicht erfasst werden.

[30] https://www.heilbronn.de/fileadmin/daten/stadtheilbronn/bilder/umwelt_mobilitaet/klimaschutz/Gesamtstaedtische_Klimaanalyse.pdf *zuletzt abgerufen am 20.2.2023*

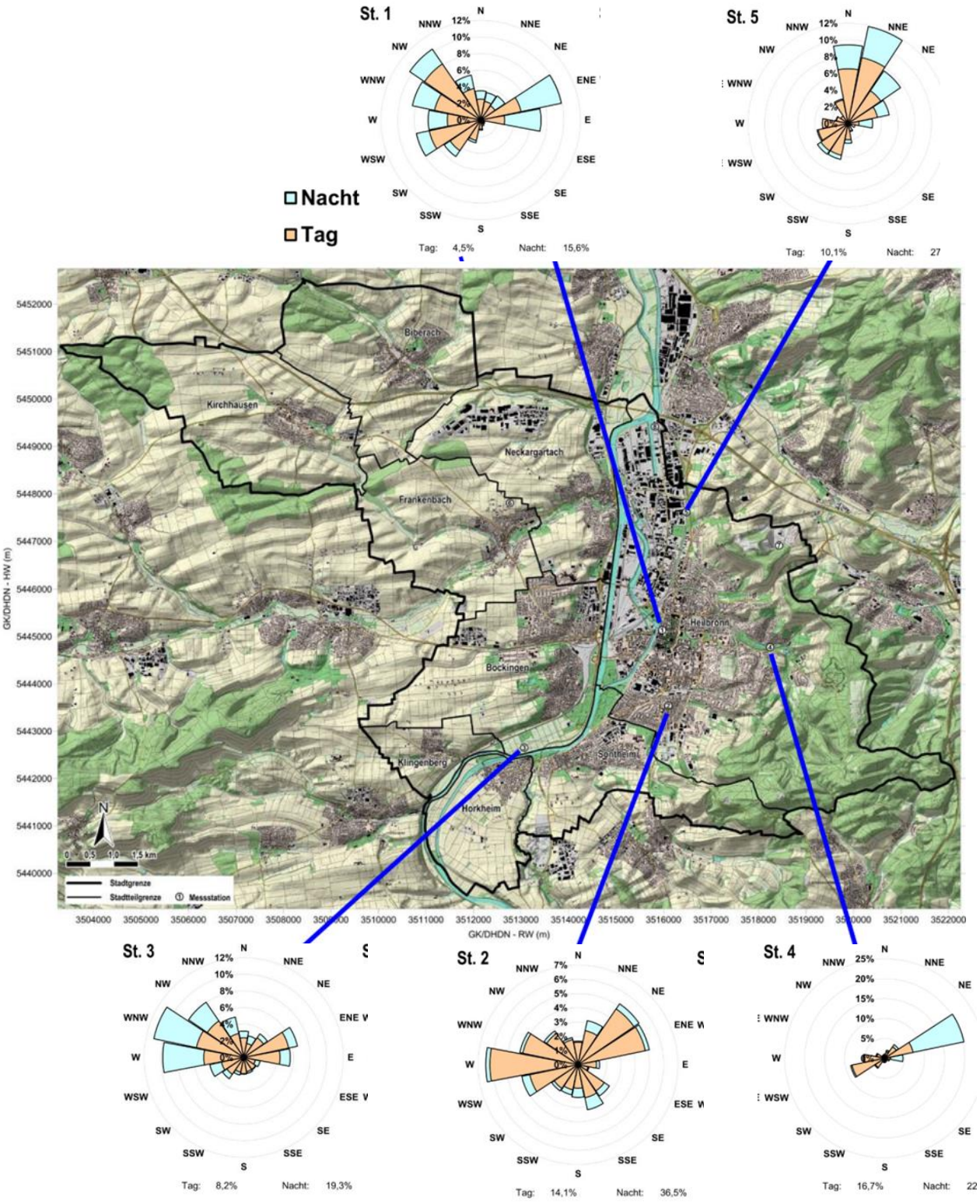


Abbildung A- 11: Im Rahmen der Klimaanalyse Heilbronn an 58 Strahlungstagen gemessene Windrosen. Hellblau – Nachtstunden; rötlich – Tagstunden (Quelle: Klimaanalyse Heilbronn).



Abbildung A- 12: Vergleich der Simulation mit den gemessenen Windrosen am Standort 3 (Segelflugplatzgelände).

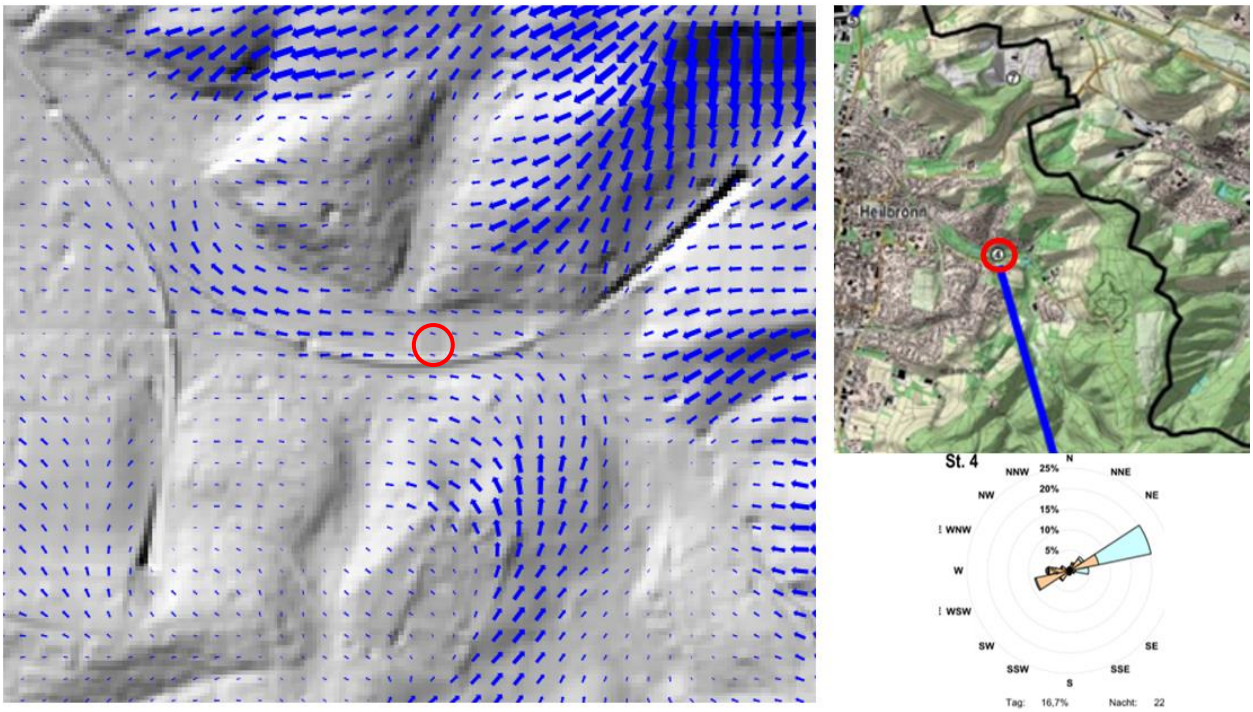


Abbildung A- 13: Vergleich der Simulation mit den gemessenen Windrosen am Standort 4 (Pfühlpark).