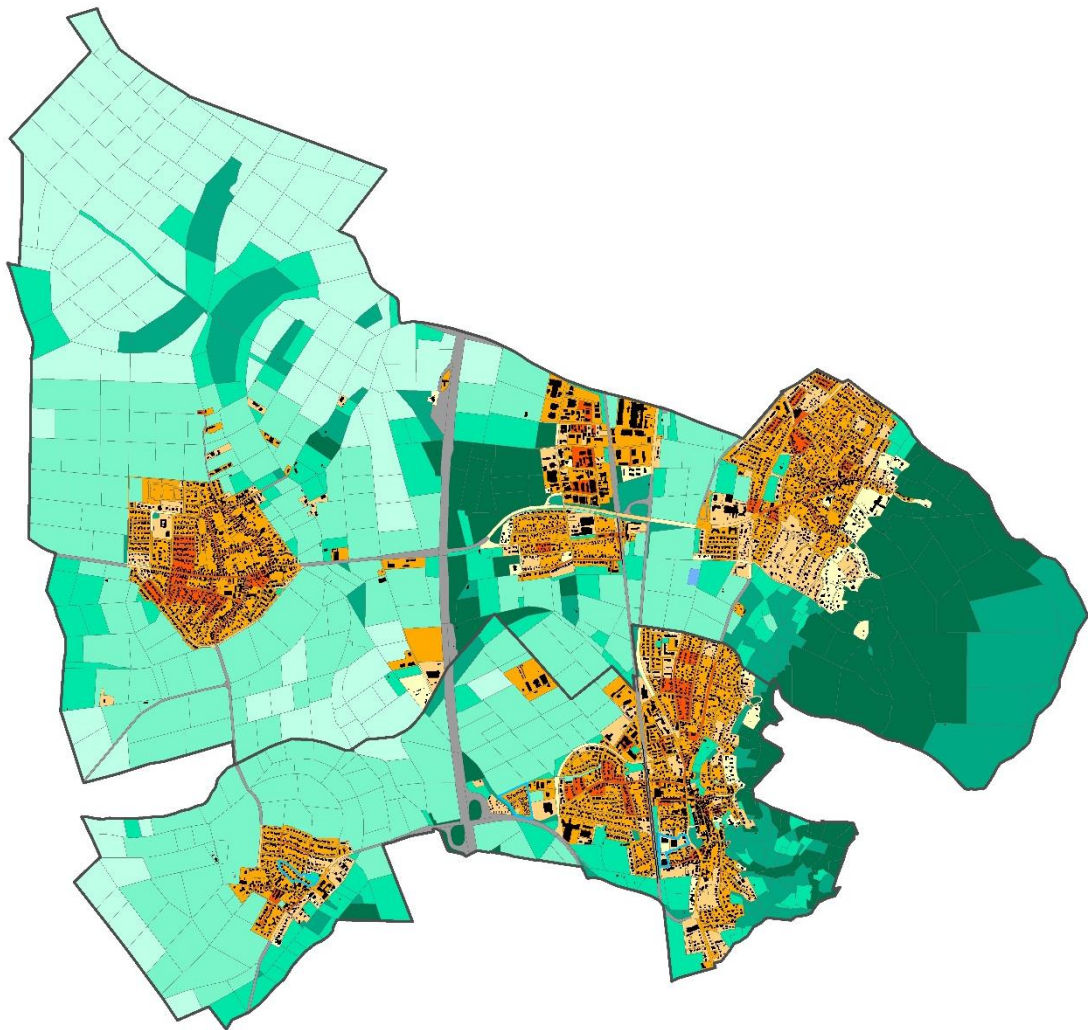


Stadtklimaanalyse für Alsbach-Hähnlein & Zwingenberg



Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover



Im Auftrag der

Gemeinde Alsbach-Hähnlein
Bickenbacher Straße 6
64665 Alsbach-Hähnlein

Stadt Zwingenberg
Untergasse 16
64673 Zwingenberg

November 2023



Auftraggeber

Gemeinde Alsbach-Hähnlein

Bickenbacher Straße 6
64665 Alsbach-Hähnlein

Projektbegleitung

Bauamt

Stadt Zwingenberg

Untergasse 16
64673 Zwingenberg

Projektbegleitung

Bauamt

November 2023

Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Tel: (0511) 388 72-00
www.geo-net.de



ÖKOPLANA

Seckenheimer Hauptstraße 98
68239 Mannheim
Tel: (0621) 474 626
www.oekoplana.de



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Glossar	1
1. Hintergrund und Anlass	3
2. Fachliche Grundlagen	4
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	4
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	8
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	11
3. Klima und Klimawandel im Raum Alsbach-Hähnlein & Zwingenberg	15
3.1 Datengrundlage und Methodik	15
3.2 Gegenwärtiges Klima	19
3.3 Zukünftige Klimaveränderungen	22
4. Analysemethoden	26
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	26
4.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	33
5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	44
5.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	44
5.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	51
5.3 Klimaanalysekarten	56
5.4 Wärmebelastung am Tage	61
6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte	64
6.1 Grundlagen	64
6.2 Geometrische Basis	65
6.3 Bewertungskarten	66
6.4 Planungshinweiskarte	75
7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima	90
Quellenverzeichnis	105
Anhang	109



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN	4
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR	5
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019	6
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	7
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015	8
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	9
ABBILDUNG 7: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN RCP-SZENARIEN UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100	16
ABBILDUNG 8: KONVENTIENEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	19
ABBILDUNG 9: KLIMADIAGRAMM FÜR ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DEN GEBIETSMITTELWERTEN DER DWD DATEN.....	20
ABBILDUNG 10: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2022	20
ABBILDUNG 11: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{MAX} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IM RAUM ALSBACH-HÄHNLEIN/ZWINGENBERG	21
ABBILDUNG 12: SAISONALE ABWEICHUNGEN VOM MITTELWERT DER BODENFEUCHTE IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG IM ZEITRAUM 1991 BIS 2022.....	21
ABBILDUNG 13: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG (ALLE RCP-SZENARIEN)	23
ABBILDUNG 14: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG (RCP 8.5) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 - 2000	23
ABBILDUNG 15: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN ZWEI ZUKUNFTSPERIODEN IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG (RCP 8.5).....	25
ABBILDUNG 16: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN (‘TSURF’) FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	28
ABBILDUNG 17: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR (‘TSURF’) SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR (‘T2M’) VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES.....	30
ABBILDUNG 18: DER SZENARIO-TRICHTER	31
ABBILDUNG 19: DIGITALES GELÄNDEMOMELL FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET, MIT GEBÄUDEKULISSE	33
ABBILDUNG 20: ERMITTLUNG VON BAUMSTANDORTEN MITTELS VEGETATIONSINDEX UND STRUKTURHÖHE (MUSTERDARSTELLUNG).....	35
ABBILDUNG 21: AUSSCHNITT KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG IM 5 M MODELL-RASTER.	35
ABBILDUNG 22: PRINZIPIKIZZE DES MISCHPIXELANSATZES. VERTEILUNGSBEISPIEL FÜR EINE ALS WOHN- GEBIET (LINKS) UND ALS GEWERBE- GEBIET (RECHTS) UMGESetzte ENTWICKLUNGSFLÄCHE.....	37
ABBILDUNG 23: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN ...	37
ABBILDUNG 24: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IM IST-ZUSTAND IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.....	45
ABBILDUNG 25: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IM SZENARIO „MODERATER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	46
ABBILDUNG 26: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IM SZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	46



ABBILDUNG 27: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM IST-ZUSTAND IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.....	48
ABBILDUNG 28: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM SZENARIO „MODERATER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	49
ABBILDUNG 29: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM SZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	49
ABBILDUNG 30: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM IST-ZUSTAND IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.....	52
ABBILDUNG 31: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IN DEN SZENARIEN MODERATER UND STARKER KLIMAWANDEL IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	53
ABBILDUNG 32: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM IST-ZUSTAND IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.....	54
ABBILDUNG 33: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM SZENARIO „MODERATER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	55
ABBILDUNG 34: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM SZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	55
ABBILDUNG 35: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN	57
ABBILDUNG 36: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION	58
ABBILDUNG 37: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DAS SZENARIO MODERATER KLIMAWANDEL.....	59
ABBILDUNG 38: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DAS SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL	60
ABBILDUNG 39: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IM IST-ZUSTAND IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG....	61
ABBILDUNG 40: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IM SZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	63
ABBILDUNG 41: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IM SZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	63
ABBILDUNG 42: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE.	65
ABBILDUNG 43: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN	66
ABBILDUNG 44: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHSRaum IN DER NACHT	69
ABBILDUNG 45: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION.	71
ABBILDUNG 46: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION	73
ABBILDUNG 47: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA.	78
ABBILDUNG 48: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE BP „ÖSTLICH AUF DER HEIDE UND NÖRDLICH DER ORBISSTRAßE“ (ORBISHÖHE) IN ZWINGENBERG.	83
ABBILDUNG 49: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE 2. ÄNDERUNG DES BEBAUUNGSPLANS „LANGE SCHNEISE“ IN ZWINGENBERG.....	84
ABBILDUNG 50: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE BP „WESTLICH DER BAHNLINIE, ZW. WIESENPROMENADE WEST, PLATANENALLEE UND AHORNSTRAßE SOWIE BLEICHSTRAßE“ IN ZWINGENBERG.	85
ABBILDUNG 51: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE BP „HAUPTSTRAßE 12“ IM STADTTTEIL RODAU.	86
ABBILDUNG 52: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE „QUARTIER 22“ AM WESTLICHEN ORTSRAND VON ALSBACH.	87
ABBILDUNG 53: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE BP „NÖRDLICH DER SPIEGASSE LL MIT KITA“ IM ORTSTEIL HÄHNLEIN.	89



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18)	12
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN. ..	14
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	22
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE SOWIE DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN IN ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	24
TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLOUFLÖSUNG VON 5-10 M.	27
TABELLE 6: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE	32
TABELLE 7: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS	34
TABELLE 8: IN DIE MODELLEINGANGSDATEN EINGEFLOSSENE B-PLÄNE UND AKTUELLE BAUVORHABEN	36
TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	39
TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	40
TABELLE 11: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	58
TABELLE 12: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	67
TABELLE 13: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT	68
TABELLE 14: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	72
TABELLE 15: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	72
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	74
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG AM TAGE IN BEZUG AUF DEN SIEDLUNGSRAUM, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	74
TABELLE 18: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG IN WOHNGEBIETEN SOWIE IN UNBEWOHNTE GEBIETEN.	75
TABELLE 19: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.	76
TABELLE 20: MIT DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN STADTKLIMA IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	77
TABELLE 22: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEWERTUNG AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG FÜR DIE FLÄCHEN IM AUSGLEICHRAUM.	79
TABELLE 22: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARFS UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHRAUMS.	80
TABELLE 23: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	81
TABELLE 26: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR ALSBACH-HÄHNLEIN UND ZWINGENBERG.	94



Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur → *autochthonen Wetterlage*.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen → *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.



Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das \rightarrow *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tag im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

NEWA (New European Windatlas): Im Neuen Europäischen Windatlas wurden mithilfe eines Wettermodells die Windverhältnisse der zurückliegenden 30 Jahre über ganz Europa mit einer Auflösung von drei Kilometern nachsimuliert. Der Atlas liefert für jeden Punkt in der EU Informationen über das langjährige Windklima. Er stellt unter anderem interaktive Karten, Zeitreihen sowie Statistiken von Windgeschwindigkeit und anderen windenergierelevanten Parametern in verschiedenen Höhen bereit.

PET (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen im Stadtgebiet (\rightarrow *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als \rightarrow *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage \rightarrow *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer \rightarrow *autochthonen Wetterlage*.

Synoptischer Wind: Großräumige, in der Regel über längere Zeiträume anhaltende Winde (z.B. Rheintalwind), die das Klima einer Region prägen. Synoptische Winde entstehen nur bei bestimmten Wetterlagen und grenzen sich von tagesperiodischen Winden ab, welche sich aller 24 Stunden mehr oder weniger intensiv wiederholen (z.B. Flurwinde).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Wohn- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



1. Hintergrund und Anlass

In Zeiten des Klimawandels lassen sich die Folgen insbesondere in Form von häufigeren Extremwetterereignissen oder Hitzeperioden bereits deutlich erkennen. Neben dem Klimaschutz durch Treibhausgasreduktion weist besonders die Klimaanpassung in Städten und Gemeinden eine hohe Relevanz auf. Vor allem die Stadt- bzw. Ortskerne sind durch erhöhte Hitzebelastung, geringe natürliche Versickerung und hohe Emissionen besonders betroffen. Gleichzeitig weisen Städte im Vergleich zum peripheren Umland eine höhere Bevölkerungsdichte und damit eine hohe Anzahl vulnerabler Bevölkerungsgruppen auf. Diese gilt es vor belastenden Umwelteinflüssen wie Hitze zu schützen und nach § 1 Absatz 5 Satz 2 BauGB eine „menschenwürdige Umwelt“ zu gewährleisten.

Das Schutzgut *Klima* ist demnach ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung. Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel, um Planungen sachgerecht zu beurteilen. Aus der Kenntnis des in einer Siedlungslage vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

Die siedlungsklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2031 - 2060 darstellen und abschließend bewerten. Die Ergebnisse sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen dienen und somit eine gezielte Einordnung der geplanten Bauflächen im Hinblick auf die klimatische Situation ermöglichen. Somit müssen neben der aktuellen Hitze- bzw. Wärmebelastung der Siedlungsflächen am Tage und in der Nacht auch die Ausgleichsleistungen der Grün- und Freiflächen erfasst werden. Letztere können in der Nacht bedeutende Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Luftleitbahnen darstellen. Sie stellen eine Durchlüftung der Siedlungsgebiete sicher und garantieren eine nächtliche Abkühlung, sodass eine Bebauung dieser Korridore zu vermeiden oder anzupassen ist. Zum anderen wird für die Tagsituation das Potenzial der Grün- und Freiflächen als kühler Erholungsraum untersucht.

Die Ergebnisse der siedlungsraumbezogenen Klimaanalyse sollen dazu dienen, das Schutzgut Klima in zukünftigen Planungen ganzheitlich zu berücksichtigen und klimatisch bedeutsame Fläche entsprechend zu berücksichtigen. Ziel ist es dabei nicht, zukünftige, in Diskussion befindliche Baugebiete ganzheitlich auszuschließen, sondern diese möglichst klimaverträglich zu gestalten.

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 5 m x 5 m-Raster erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung der bioklimatischen Situation in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 3) bis hin zu stadtklimatisch relevanten meteorologisch-physikalischen Prozessen im urbanen Umfeld (Kap. 2.2). Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die bodennahe atmosphärische Umgebung besitzt vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsumieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommen dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

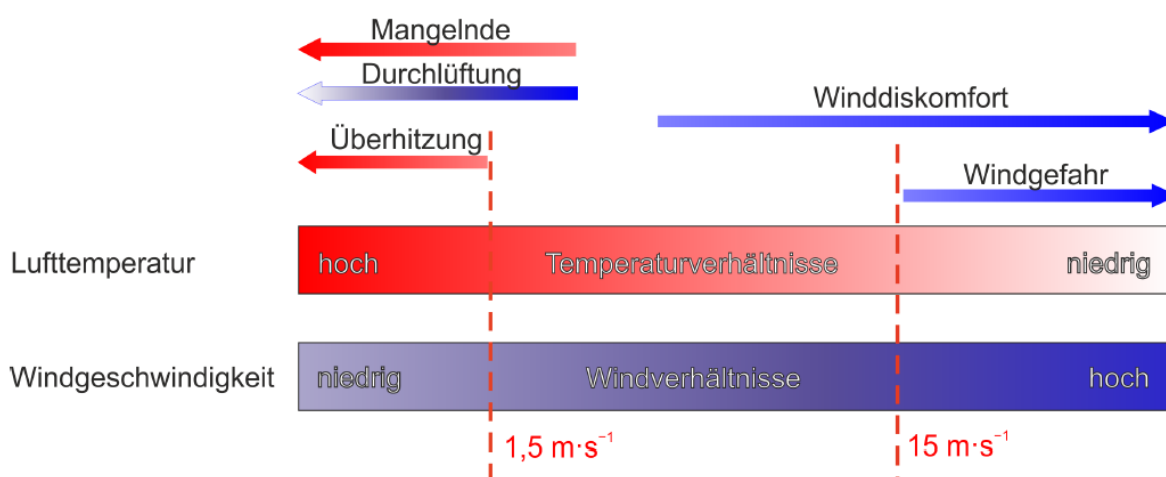


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrößen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Höppe und Mayer 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI: Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohe Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerterroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

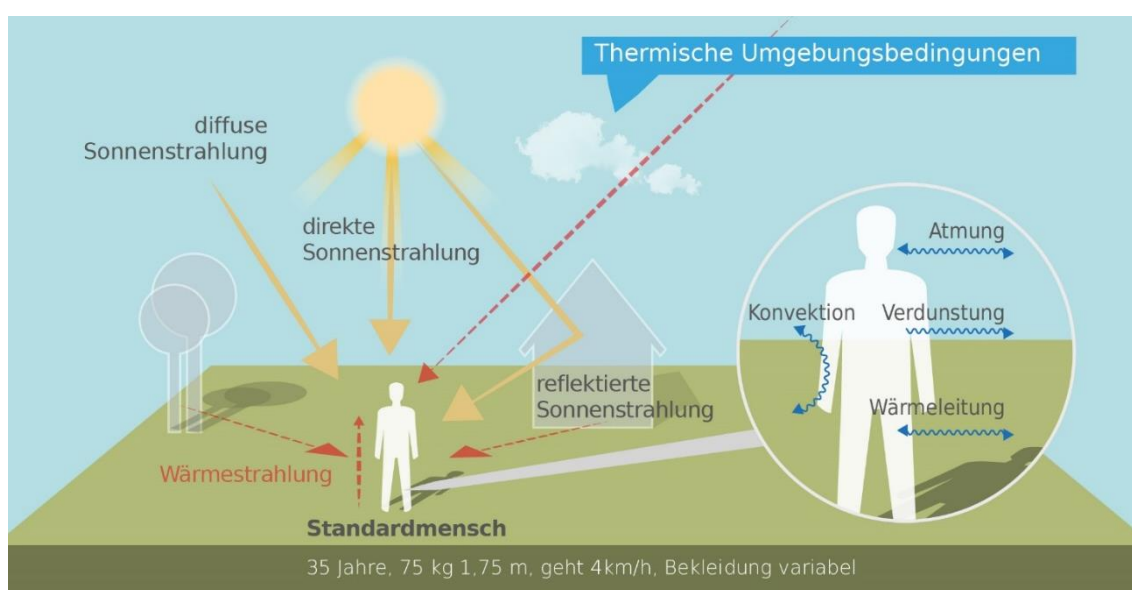


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: „Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist“ (VDI 2008a, 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten,

Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

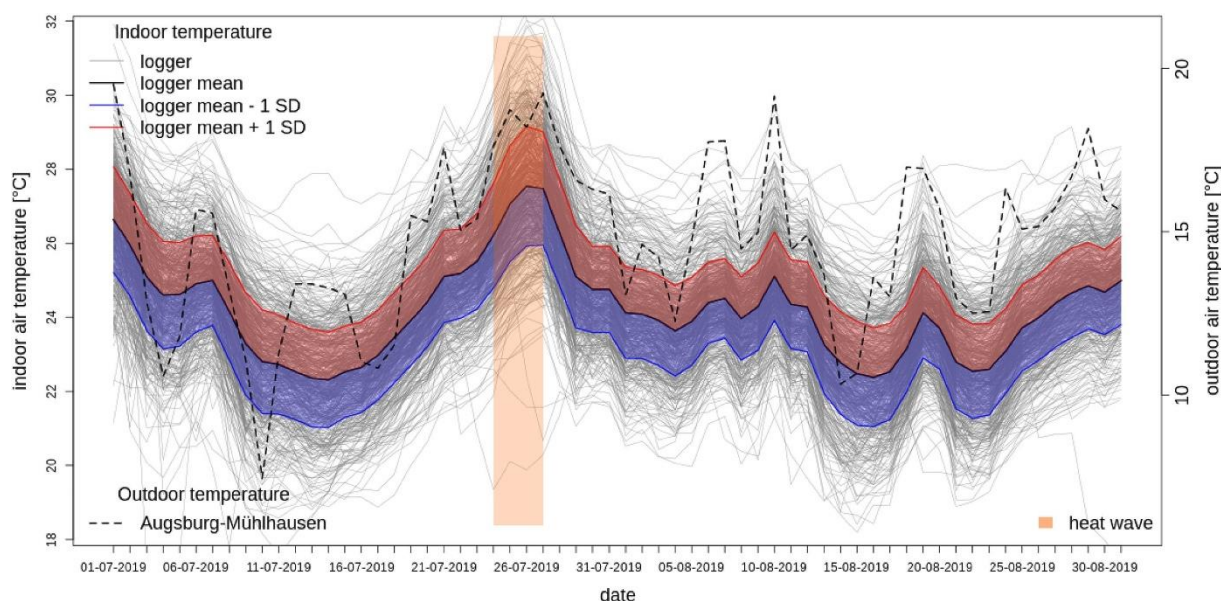


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: „Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen“ (VDI 2008a, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürgerinnen und Bürger entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C) (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 - 12 % aus (Urban & Steininger 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al. 2018).



Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorenangaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt. Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75–84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von > 20 °C ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (Abbildung 5). Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (An der Heiden et al. 2019). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

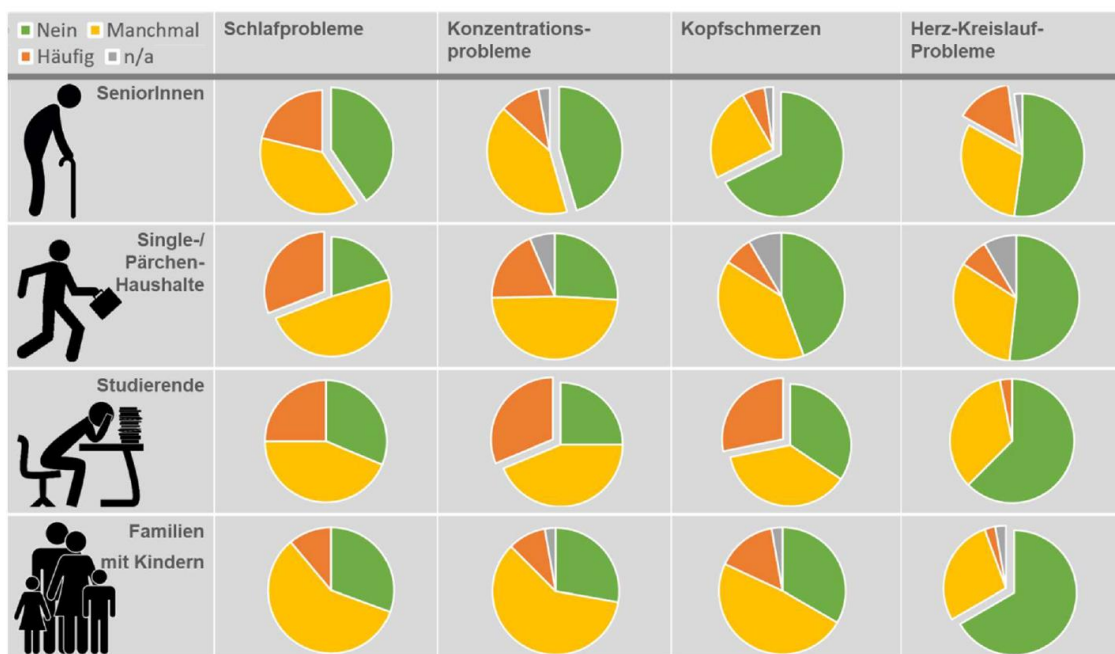


Abbildung 4: Gesundheitsliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

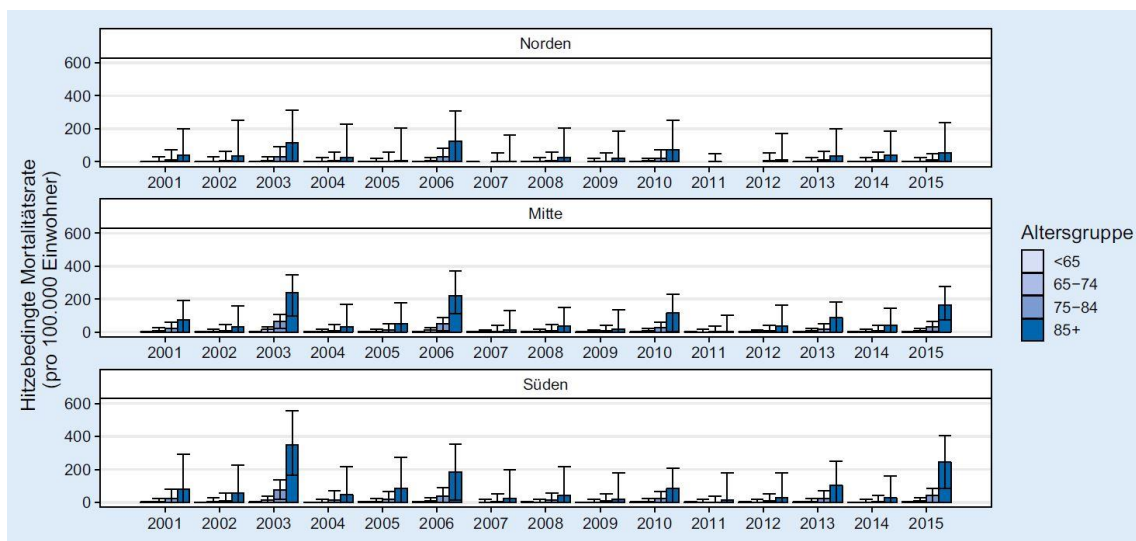


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFEK UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Siedlungskörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus siedlungsinternen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der im Siedlungsraum lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (vgl. Groß 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (12/2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmende Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.

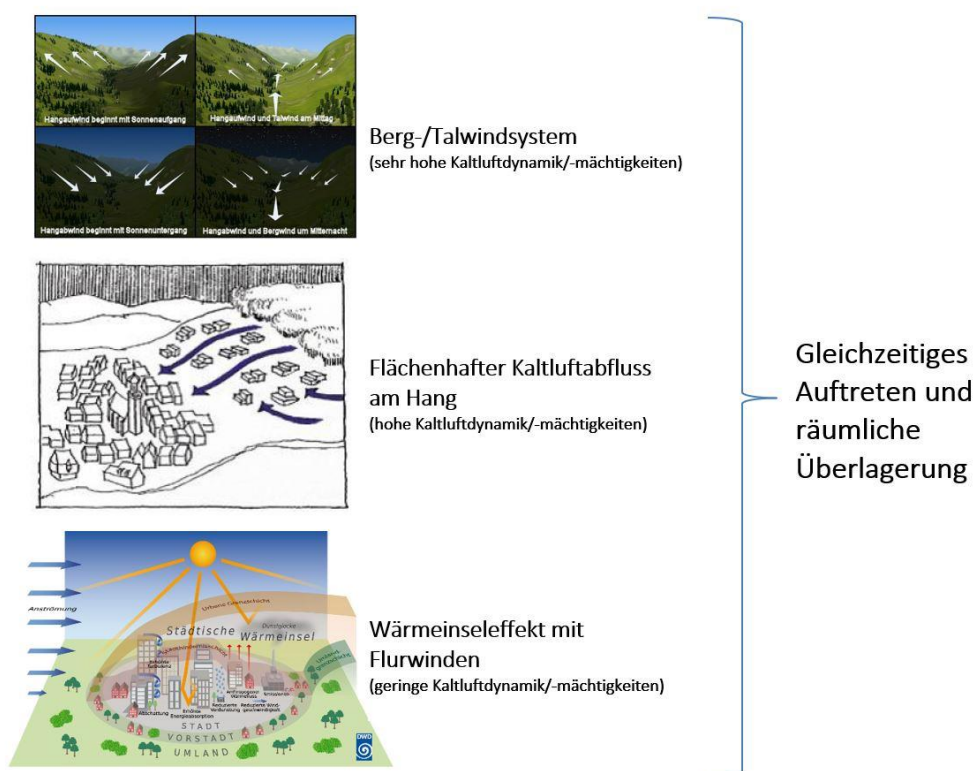


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in Städten und Gemeinden modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al. 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Siedlungskörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Siedlungsgebiet hinein („Flurwindensystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus siedlungsnahen und siedlungsinternen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindensysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindensystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der



Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindsystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum Thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrunde liegenden Methoden und Instrumente unterlagen seither allerdings einer stetigen Fortentwicklung, die durch die Aktivitäten zur Klimafolgenanpassung insbesondere seit den 2010er Jahren stark an Dynamik und Qualität gewonnen hat. Anders als beispielsweise beim lufthygienischen Wirkungskomplex oder der Lärmbelastung gibt es für die thermische Belastung bisher noch keine normative Regelung zu Richt- oder gar Grenzwerten. Als Konsequenz daraus ist die Definition, welches Belastungs-/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z.B. verbindliche Bebauungsplanung, Bauflächen-sanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2008): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Luft-hygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; Veröffentlichung für 02/2024 angekündigt) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Tabelle 1). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).



Tabelle 1: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaeigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc-) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt- / Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere / große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen
Erforderliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/ -höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimatope • Klimaanalysekarte 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten



Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die Numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analyseverfahren den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder flächenhaft und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Aus diesen Ergebnissen können im sogenannten postprocessing stadtklimatisch relevante Kenngrößen in ihrer quantitativen Ausprägung abgeleitet werden (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes). Numerische Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, Planungsvarianten und Maßnahmen in ihrer Wirkung quantitativ analysieren und auf diese Weise einen validen Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von (raum-)planerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Maßstabsebenen leisten zu können.

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 2). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt von Kategorie 1 zu Kategorie 3 der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet mit



den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert, aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff Online-Nesting rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschließenden, gröber aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

Tabelle 2: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder



3. Klima und Klimawandel im Raum Alsbach-Hähnlein & Zwingenberg

3.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2022a, DWD 2022b, Kaspar et al. 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Siedlungsgrenzen Alsbach-Hähnleins und Zwingenbergs wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km-Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können.

Die aus Stationsdaten erzeugten Gitterdaten weisen gewisse Unsicherheiten auf, die aus einer über die Zeit veränderten Stationsdichte und der Lage der für die Interpolation verwendeten Stationen, resultieren können. Ferner hat sich die Messtechnik im betrachteten Zeithorizont weiterentwickelt, sodass bei älteren Zeitreihen höhere Messungengenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngerer Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Erwarteter Klimawandel

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt¹.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik und der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden

¹ Homepage: www.euro-cordex.net



(Tabelle A1 im Anhang). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den Model-
 lergebnissen permanent aktualisiert werden, können bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes
 weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind.

Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen
 als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitli-
 nien zur Interpretation von Klimamodellaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler
 Klimamodellaten“ durchgeführt (Linke et al. 2016).

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag
 und einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten
 aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifi-
 kation und Auswahl des dem Mittelpunkt von der zusammengenommenen Siedlungsfläche Alsbach-Hähnleins
 und Zwingenbergs am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an die-
 sen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden
 Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhal-
 ten (vgl. DWD 2020a).

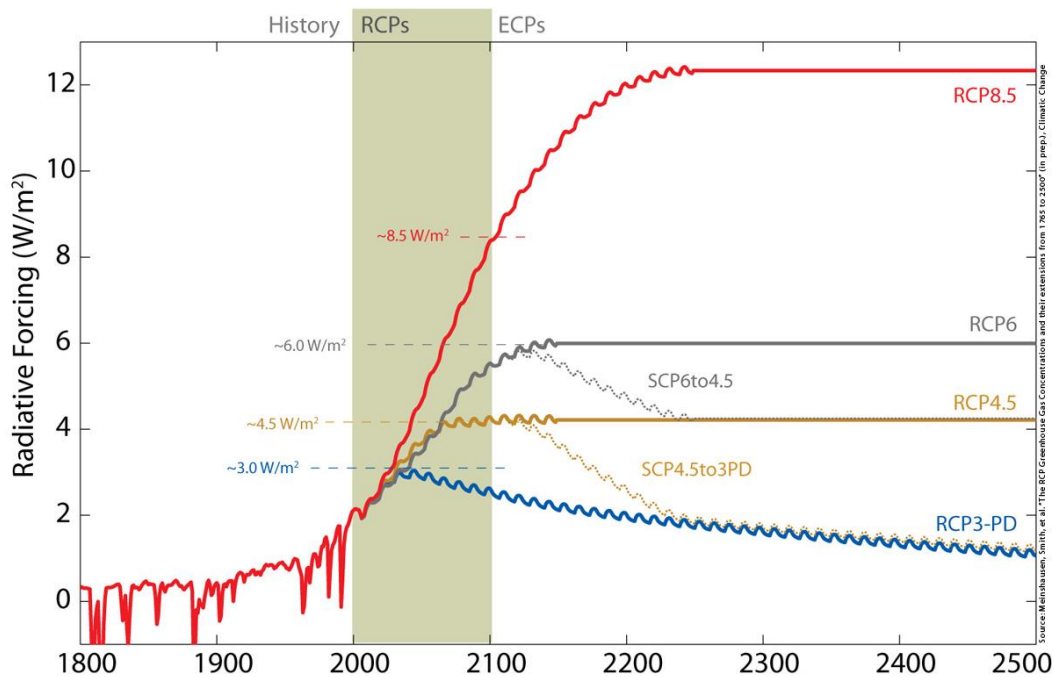


Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100² (RCP3-PD ist vergleich-
 bar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissi-
 onen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in
 Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die
 bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell
 drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration*
Pathways). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien ab-
 gelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023).
 Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu

² ECP = *Extended Concentration Pathways* sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300.



integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien³), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten enthalten.

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m^2 , der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abbildung 7):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m^2 . Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 \text{ W/m}^2$ ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das $2 \text{ }^\circ\text{C}$ -Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. $4 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. In den letzten Dekaden befanden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO_2 -Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Für die Einschätzung zukünftiger Klimarisiken wird das RCP 8.5 als geeignetes Szenario angesehen (Schwalm et al. 2020). Aus diesem Grund und im Sinne des Vorsorgegedankens werden im vorliegenden Bericht vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert.

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z.B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{\text{max}} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ für Sommertage (schwollenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; siehe ReKliEs-De 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg wurden schwollenwertbasierte Kenntage verwendet.

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, daher keinen Einfluss auf die Aussage.

Bei der schwollenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten Werten führen. „Ist ein Modell z.B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise auch besonders viele warme und/oder besonders wenige kalte Kenntage identifiziert“ (ReKliEs-De 2017). Aus diesem Grund wurden für jede Modellsimulation die Schwellenwerte mit der Methode des Quantile-Mappings adjustiert (Piani et al. 2010, Themeßl et al. 2011). Für jeden Kenntag wurde dementsprechend aus den Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt. Die

³ CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (World Climate Research Programme)



Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (Tabelle A2 im Anhang).

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 – 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet. Für die „Mitte des Jahrhunderts“ wurden zwei verschiedene Zukunftsperioden ausgewertet, wobei sich die Ergebnisse vorrangig auf die Periode 2031-2060 beziehen, die etwa in den Klimawirkungsanalysen des Umweltbundesamts betrachtet wird (UBA 2021).

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2031 – 2060
- 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. Linke et al. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abbildung 8).

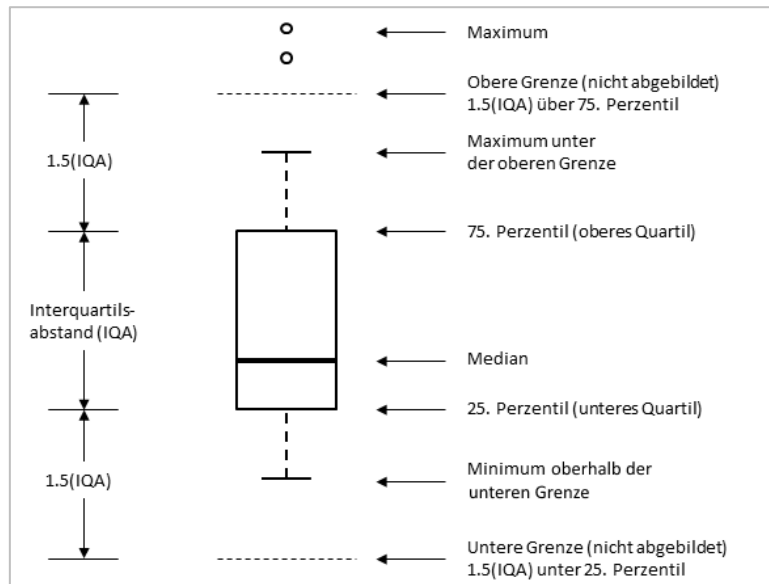


Abbildung 8: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

3.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg liegen jeweils am Westrand des Odenwaldes, im Übergang zwischen dem Vorderen Odenwald und der Oberrheinischen Tiefebene. Die beiden Ortskerne liegen in Hanglage des Melibokus (517 m ü- NHN), jeweils westlich schließen sich Gemeindeteile Rodau (Zwingenberg), Sandwiese und Hähnlein (beide Alsbach-Hähnlein) in Richtung der angrenzenden Tiefebene an. Diese wurde durch einen ehemaligen Verlauf des Neckars geformt. Die Jahres-Niederschlagssumme von rund 717 mm/Jahr⁴ ist im Vergleich deutlich unterdurchschnittlich gegenüber dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (1991 – 2020) (UBA 2022a). Zudem kennzeichnet sich die Region durch einen tendenziell geringen Wolkenbedeckungsgrad und eine hohe Anzahl an Sonnenstunden. Die langjährige jährliche Mitteltemperatur im Gebiet von Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg beträgt 10,8 °C (DWD 2023b), mit Durchschnittswerten von rund 19 °C in den Sommermonaten (Abbildung 9). Damit ist die Stadt um 1,5 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (1991 – 2020) (UBA 2022a).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,3 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind vier der letzten fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 10).

Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) und insbesondere heißen Tagen ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 48 auf 59 pro Jahr und die Anzahl an heißen Tagen von 11 auf 16 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 11).

⁴ Die Daten zum aktuellen Klima in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf die Gebietsmittelwerte der DWD Grids und umfassen den Zeitraum 1991– 2020

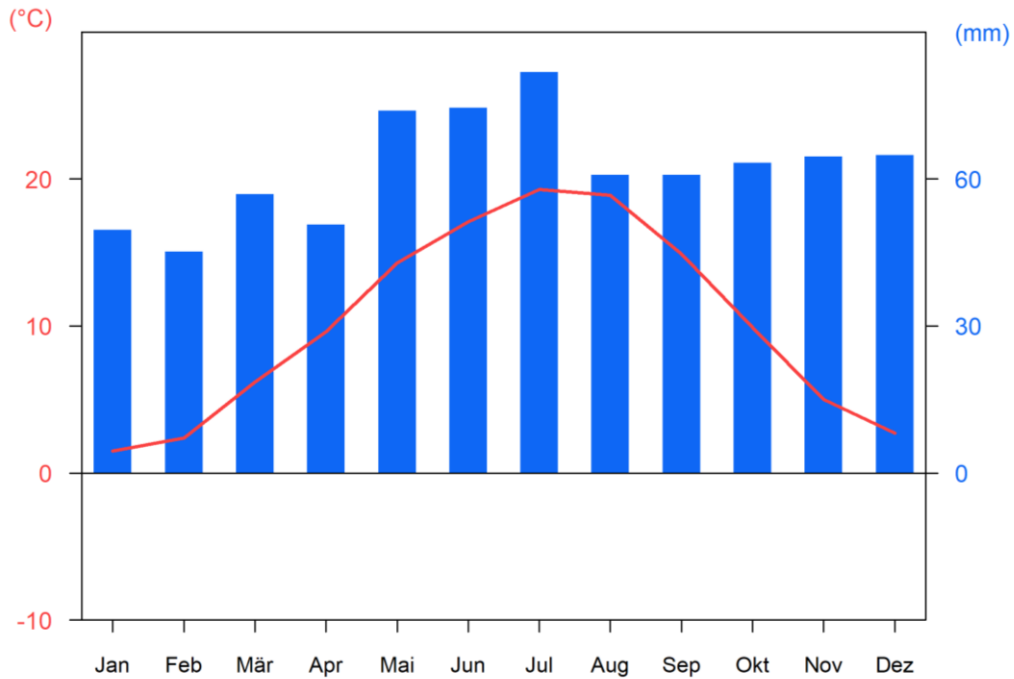


Abbildung 9: Klimadiagramm für Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2023b)

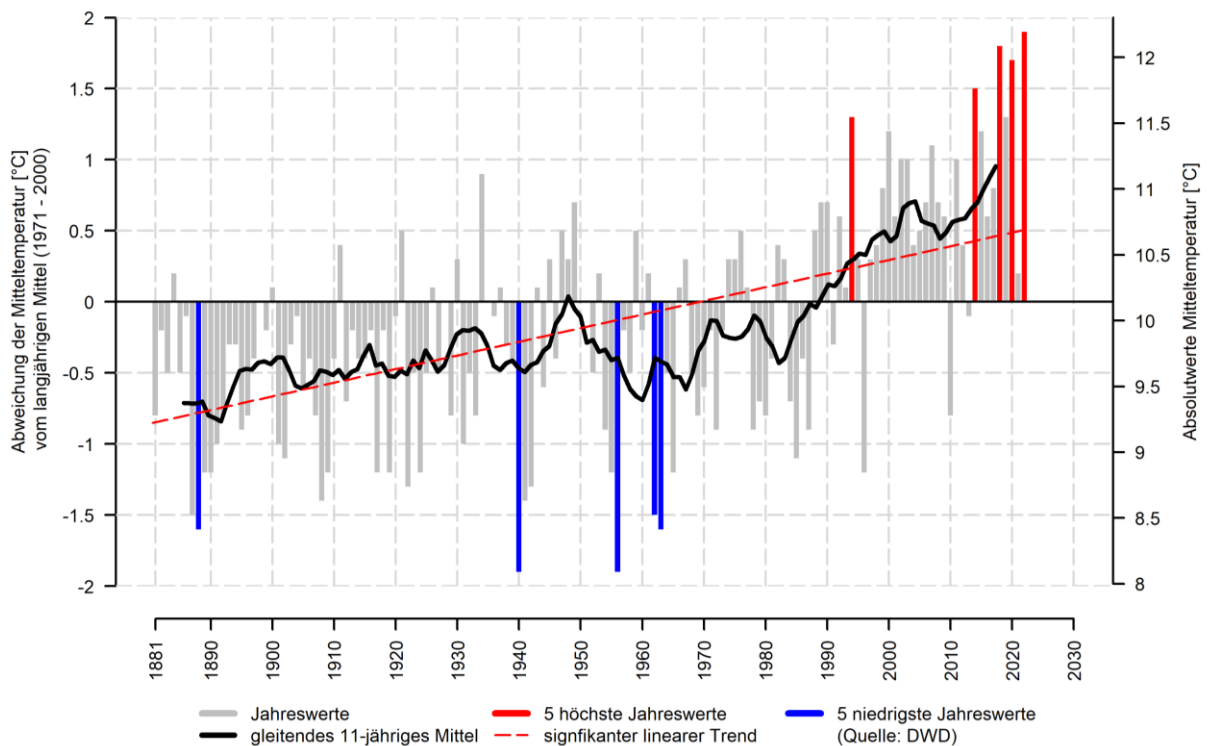


Abbildung 10: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg im Zeitraum von 1881 bis 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2023b)

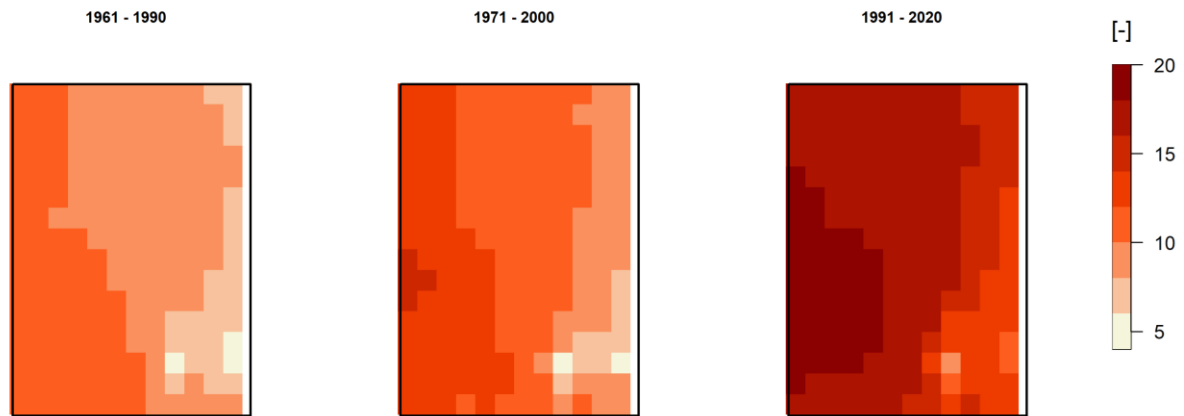


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in verschiedenen Perioden im Raum Alsbach-Hähnlein/Zwingenberg (eigene Berechnung nach DWD 2023b)

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt im Raum Alsbach-Hähnlein/Zwingenberg deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1991 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (Abbildung 12). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Periode 1991 bis 2022 schwankt die Bodenfeuchte um Werte von plus 25 % bis minus 30 % (im Extremfall bis minus 42 %) im Vergleich zum Mittelwert desselben Zeitraums. Im Sommer sind häufigere negative Abweichungen erkennbar als in den anderen Jahreszeiten. Es ist davon auszugehen, dass es im Siedlungsgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

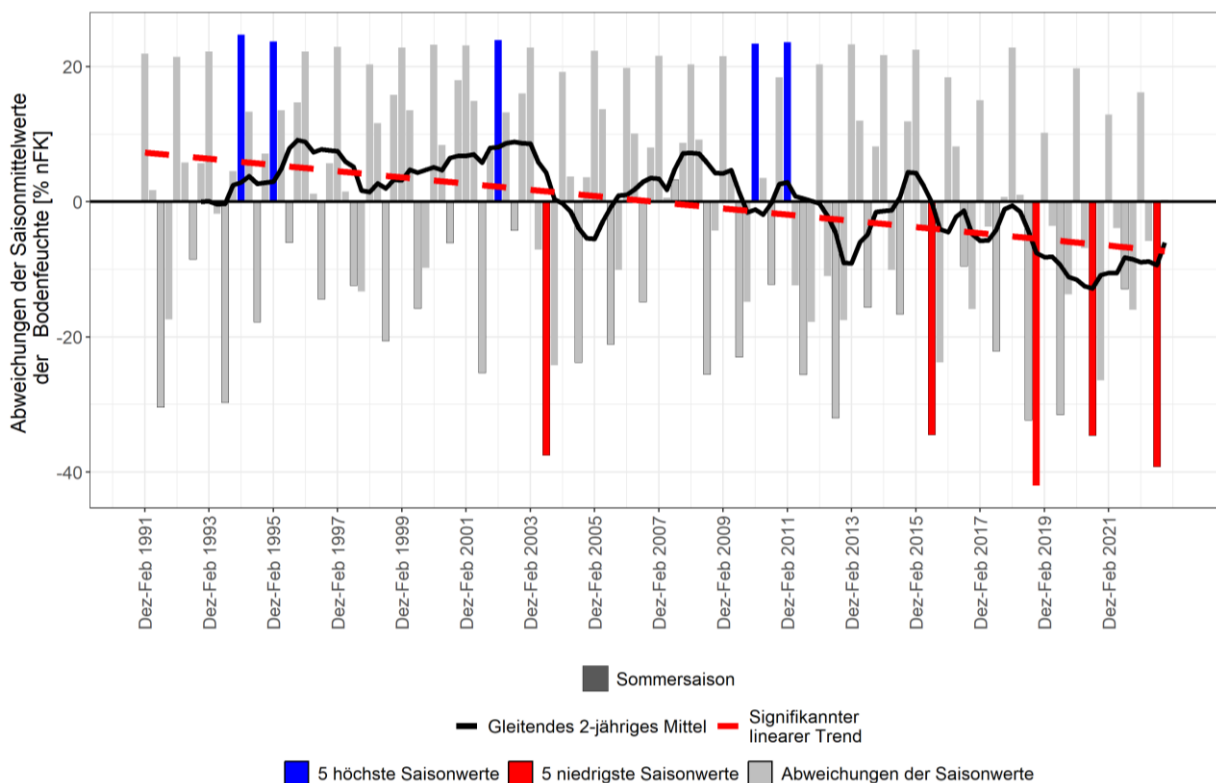


Abbildung 12: Saisonale Abweichungen vom Mittelwert der Bodenfeuchte in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg im Zeitraum 1991 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2023b)



3.3 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 13 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁵ (Tabelle 3).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 2.6 wird ein moderater Temperaturanstieg und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts eine Stagnation erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,2	1,5	0,9	1,2	1,6	0,9	1,1	1,7
	RCP 4.5	0,9	1,4	1,8	1	1,7	2,3	1,5	2,1	2,7
	RCP 8.5	1,4	2,0	2,4	1,8	2,5	3,0	3,0	3,9	4,8
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,0	2,8	3,8	1,5	2,2	3,4	1,7	2,8	3,9
	RCP 4.5	2,1	4,0	5,2	2,4	4,4	6,2	3,2	5,4	6,2
	RCP 8.5	3,2	5,1	5,7	3,4	5,2	6,4	5,9	8,2	10,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,4	2,5	0,6	1,6	2,6	0,8	1,7	2,6
	RCP 4.5	1,0	1,9	3,0	1,2	2,0	3,4	1,7	2,5	4,0
	RCP 8.5	1,6	3,0	3,6	2,4	3,3	4,6	4,2	5,4	8,0

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der in Abbildung 13 enthaltene Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles.

⁵ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

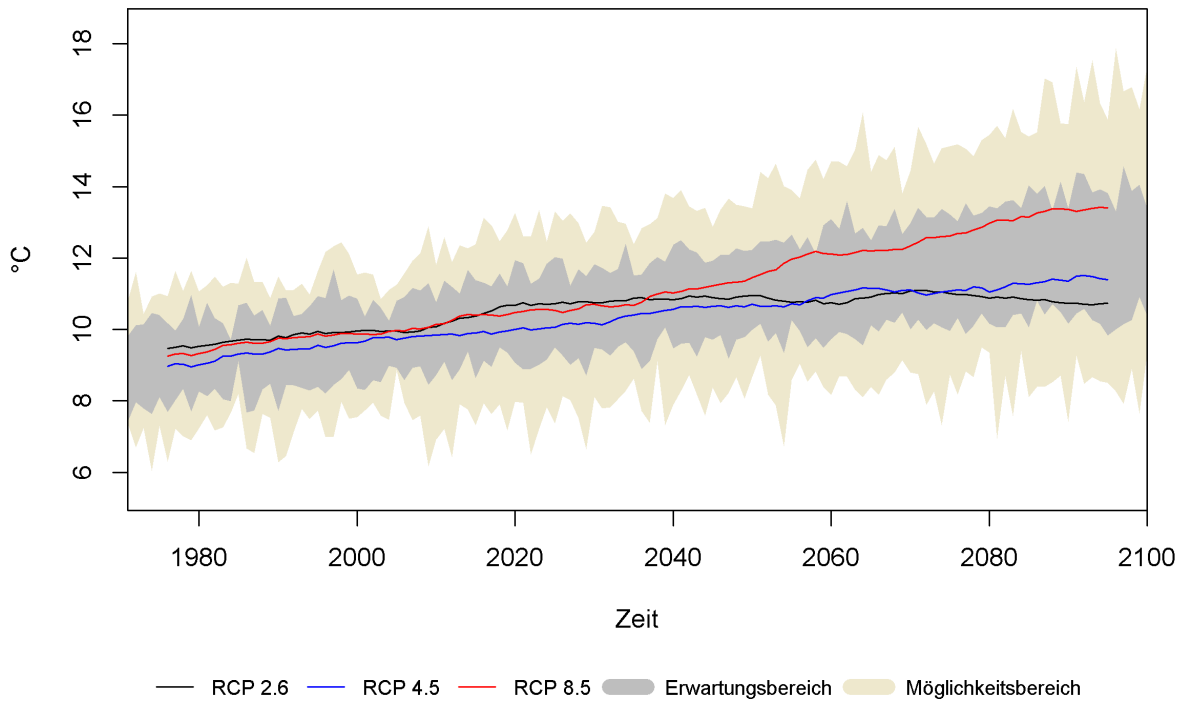


Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (alle RCP-Szenarien)⁶

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer die größten und im Frühjahr die geringsten Temperaturänderungen auf (Abbildung 14). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien, wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen).

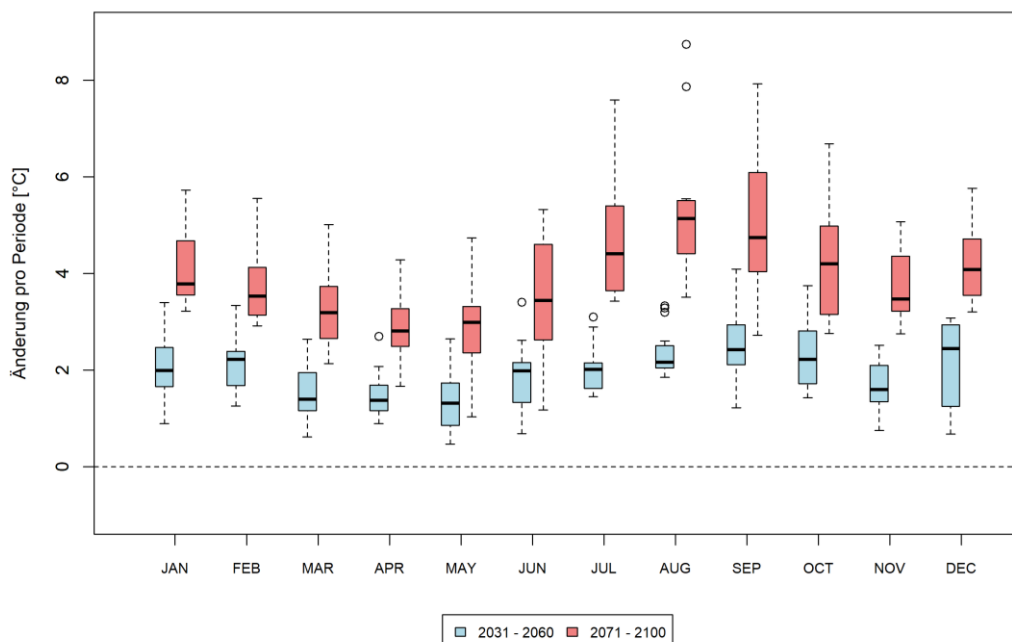


Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000

⁶ Die Werte der einzelnen Kurven beziehen sich jeweils komplett auf modellierte Daten (nicht nur für die Zukunft, sondern auch die den bereits vergangenen Zeitraum ab 1971)



Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jähr-liche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen zukünftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit 48 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenz-periode (1971 – 2000) nur gut 13-mal jährlich auftraten.

Tropennächte (Nächte mit Temperaturen über 20 °C) treten in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg derzeit sehr selten auf (im Mittel < 1 Tropennacht pro Jahr). In der mittelfristigen Zukunft (2031 – 2060) bereits ca. 2 – 6 Tropennächte pro Jahr erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens ein-geschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Sze-nario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prog-nostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode ca. 2 - 26 Tropen-nächte pro Jahr in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg möglich. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klimamo-delle den Wärmeineffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropen-nächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttempera-tur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert min-destens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden im Raum Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um ca. 1 bis 12 Tage (Tabelle 4).

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Alsbach-Hähnlein und Zwin-gerberg (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	11,0	15,5	19,6	12,3	14,4	22,2	10,6	13,2	21,8
	RCP 4.5	10,9	17,4	24,3	11,4	22,3	32,0	17,4	24,3	30,0
	RCP 8.5	17,8	20,9	26,8	23,6	30,4	36,6	42,0	49,8	60,2
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	4,5	6,9	12,2	4,7	6,6	13,5	6	7,8	13,1
	RCP 4.5	6,3	9,4	13,4	7,9	13,2	17,5	11,2	13,2	18
	RCP 8.5	10,3	13,5	23	13,8	16,8	28,6	28,5	34,6	50
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	2,1	3,3	0,9	2,4	3,8	2	2,6	4,5
	RCP 4.5	2,2	3,3	4,3	3,2	4,3	5,1	4,2	6,5	7,5
	RCP 8.5	4	5,7	7	5,6	8,3	10,4	14,5	20,8	25,6
Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	0,7	1,6	3,7	0,7	1,6	4,3	1,3	2,4	3,8
	RCP 4.5	1,2	2,2	3,4	2,1	3	4,2	2,8	3,9	5,8
	RCP 8.5	2,2	3	5,8	2,8	4	6,4	5,7	8,3	12,2



In Bezug auf die zukünftige Entwicklung von **Trockenperioden** sind nur bedingt Aussagen aus den EURO-CORDEX-Daten möglich, da der Parameter Bodenfeuchte nicht im Datensatz enthalten ist. Zudem wird zwar die Auftrittshäufigkeit von mittleren, langen oder extremen Trockenperioden untersucht (15-21, 22-28 oder mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag), doch treten diese so selten auf, dass die Änderungen sehr gering ausfallen und statistisch nicht signifikant sind.

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 8.5 einen Rückgang in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 15). Für den Herbst werden ebenfalls (leichte) Abnahmen der klimatischen Wasserbilanz projiziert, während für den Frühling und Winter Zunahmen erwartet werden, sodass im Jahresmittel kein eindeutiger Trend besteht.

In Bezug auf den Sommer zeichnet sich damit eine verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass sie sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird. Für die RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 gilt dieselbe Tendenz einer zunehmenden sommerlichen Trockenheit, wobei die Änderungssignale (insbesondere zum Ende des Jahrhunderts) weniger deutlich ausfallen (ohne Abbildung).

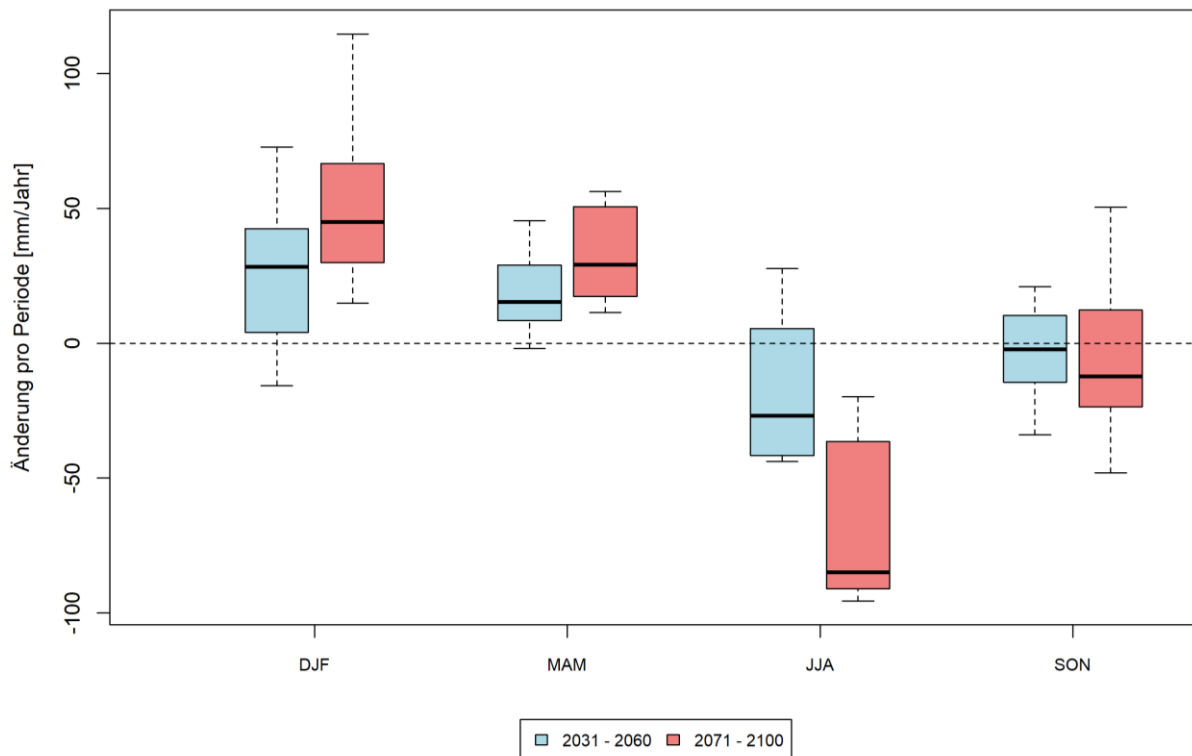


Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den zwei Zukunftsperioden in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (RCP 8.5)



4. Analysemethoden

4.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Groß 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (u.a. Groß 2002, Groß et al. 2002, Groß 2012a, Groß 2012b, Groß 2013, Groß 2017).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird.

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1987).

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendes Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrom-Bilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2015) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m



über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Größe des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet von Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg inkl. des angrenzenden Umlandes rd. 3,3 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Tabelle 5: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
1	Gebäude	individuell
2	unbebaut versiegelt	0
3	Gewässer	0
4	Gleisfläche	0
5	Freiland, niedrige Vegetation	0,5
6	Sand, Geröll	0
7	Baum über Versiegelung	individuell
8	Baum über Freiland	individuell
9	naturferner Boden*	0,5
10	Baum auf naturfernem Boden	individuell

* naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen



Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Abbildung 16 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, ungebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an ungebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.

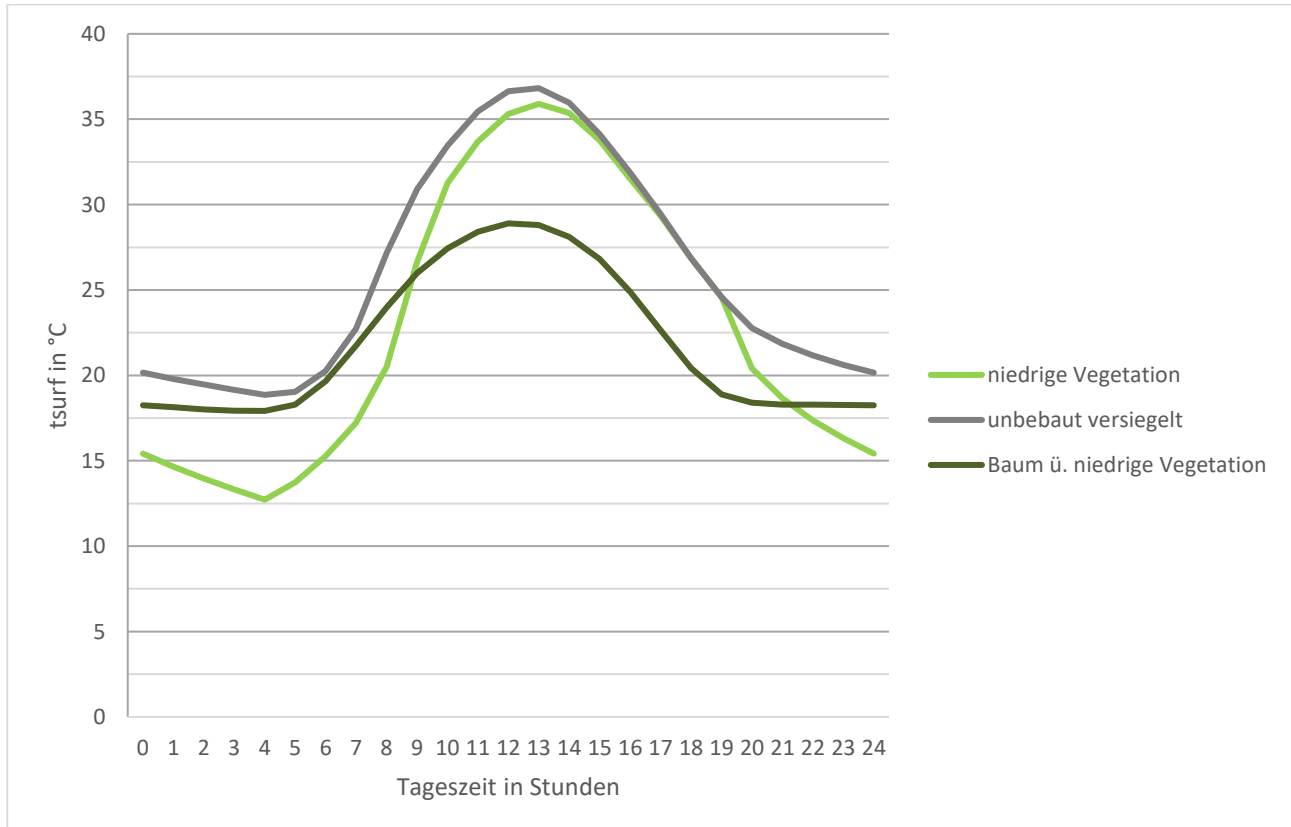


Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen (‘Tsurf’) für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D



Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius (°C) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige °C unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher langsamer auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 17 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass dessen Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarien-Betrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll.

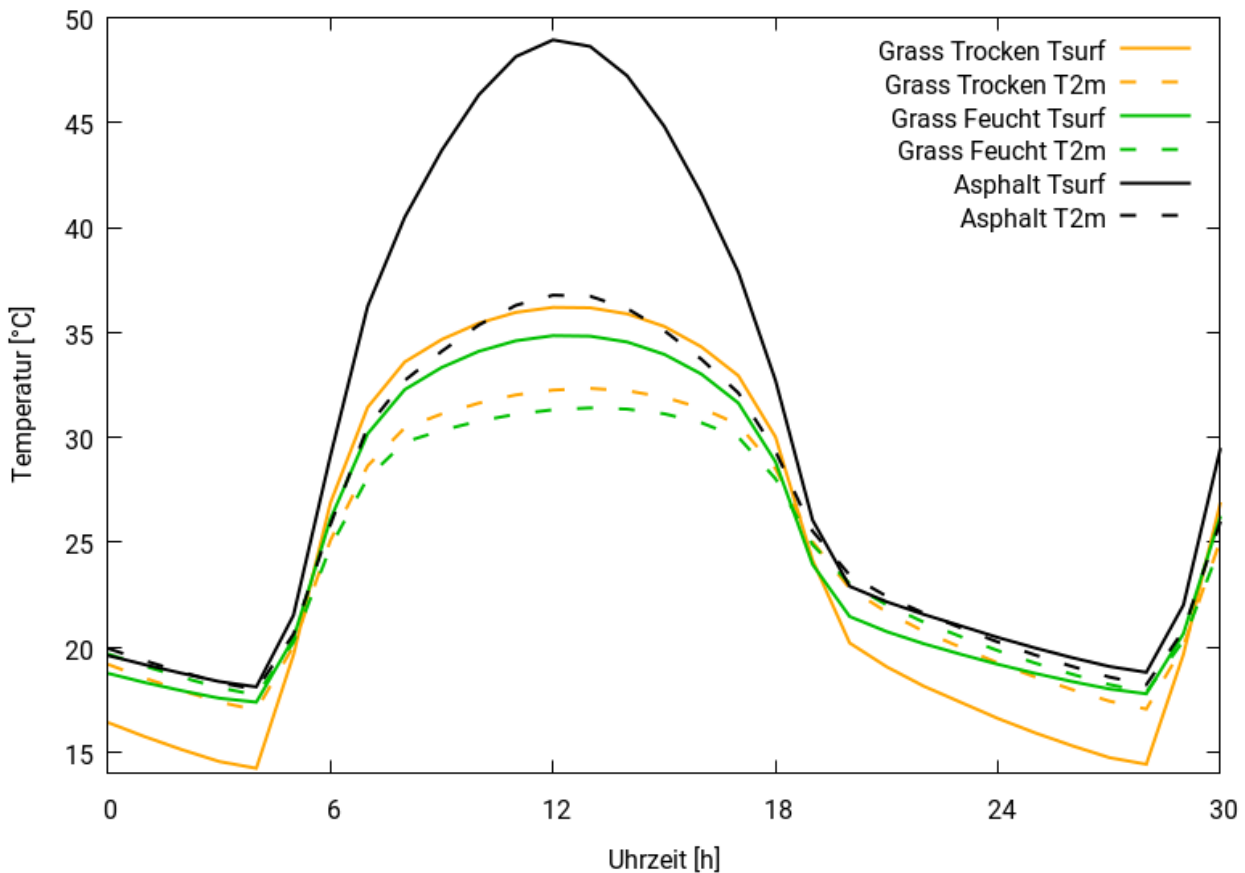


Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

4.1.1 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Untersuchung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen. Der Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung in den Handlungsfeldern urbane Hitzevorsorge und urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes- und Regionalebene sowie bei gesamt- und teilstädtischer Betrachtung.

Im Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt- bzw. regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sogenannten Wirkmodellen – hat sich die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

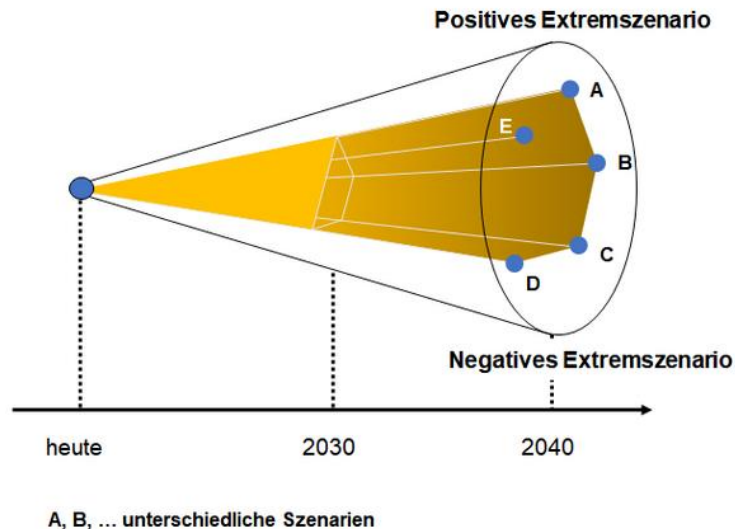


Abbildung 18: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Das Szenario „schwacher Klimawandel“, basiert auf dem 15. Perzentil des RCP-Szenarios 2.6, während das Szenario „starker Klimawandel“ auf Basis des RCP-Szenarios 8.5 (85. Perzentil) erstellt wurde. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum aktuellen Referenzzeitraum 1991 – 2020 wurde auf die Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+0,7 K bzw. +1,7 K). Die Werte weichen damit von jenen in Tabelle 3 ab, da für einen realitätsnäheren „Ist-Zustand“ als Referenzszenario, der bereits beobachtete Klimawandel zwischen den Perioden 1971-2000 und 1991 bis 2020 herausgerechnet wurde.

Für das Szenario „starker Klimawandel“ wurden zusätzlich die Auswirkungen einer zunehmenden abnehmenden Bodenfeuchte berücksichtigt (vgl. Kap 3.2). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde im Szenario „starker Klimawandel“ auf 30 % gesetzt. Im Szenario „schwacher Klimawandel“ wurde die Bodenfeuchte konstant gehalten, entspricht also derjenigen im Referenzszenario / Ist-Situation, von 60 % nFK.

Für die Zukunftsszenarien wurden jeweils städtebauliche Entwicklungen, welche sicher oder zumindest sehr wahrscheinlich in Zukunft umgesetzt werden, mitberücksichtigt. Damit zeigen die Modellergebnisse der untersuchten Szenarien sowohl die Auswirkungen der Klimawandelszenarien als auch die Auswirkungen der angenommenen städtebaulichen Entwicklung. Da die Temperatur- bzw. Klimaveränderungen durch den Klimawandel allerdings sehr homogen im gesamten Untersuchungsraum zu erwarten sind, lassen sich diese gut von jenen unterscheiden, welche auf eine Neubebauung zurückzuführen sind.

Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress / Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher nicht abgebildet werden. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.



Tabelle 6: entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Referenzsituation, „Ist“	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von 2021 und 2022, zusätzlich wurden 2 B-Pläne bzw. Bauprojekte eingepflegt, die zeitnah umgesetzt werden (vgl. Tabelle 8).
Szenario 1 „Schwacher Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines Temperatursignals von 0,7 K im Vergleich zur Referenzperiode „heute“ 1991-2020 (RCP 2.6), ■ zusätzlich wurden 7 B-Pläne bzw. Bauprojekte eingepflegt, die zeitnah oder potenziell in Zukunft umgesetzt werden (vgl. Tabelle 8).
Szenario 2 „Starker Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines Temperatursignals von 1,7 K im Vergleich zur Referenzperiode „heute“ 1991-2020 (RCP 8.5) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte des Modells von 60 % auf 30 % nFK (nutzbare Feldkapazität) ■ zusätzlich wurden 7 B-Pläne bzw. Bauprojekte eingepflegt, die zeitnah oder potenziell in Zukunft umgesetzt werden (vgl. Tabelle 8).

4.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Das Modell benötigt flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe (Bäume und Baustruktur)

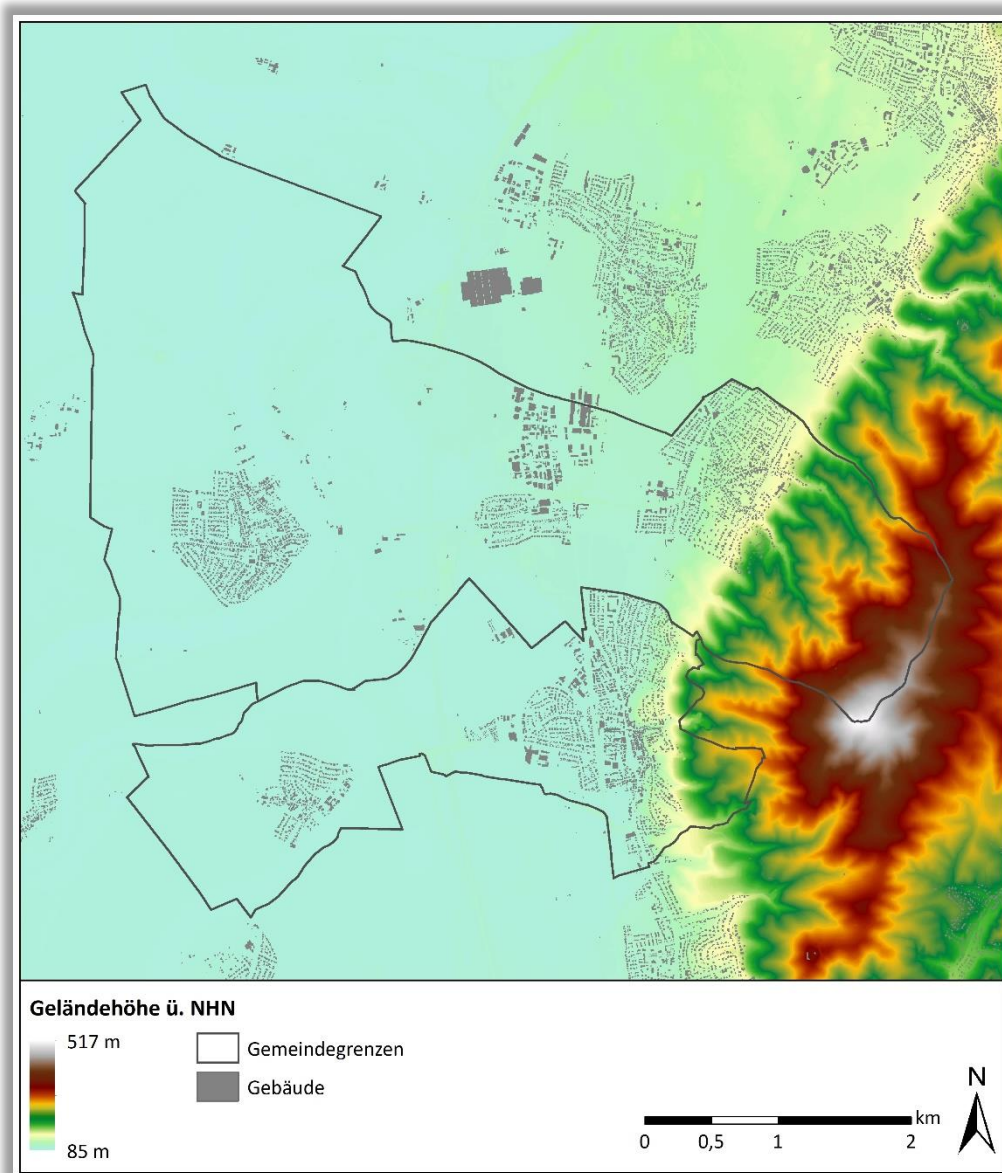


Abbildung 19: Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet, mit Gebäudekulisse

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadt- bzw. Gemeindegebiet sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 69 km² (Abbildung 19), weist also einen mehr als dreifach so großen



Flächeninhalt auf wie die zusammengenommenen Gemeindegebiete selbst (21,4 km²). Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor.

Abbildung 19 zeigt im Osten die Ausläufer des Odenwaldes, mit Höhenlagen von bis zu 517 m ü. NHN in Form des Melibokus. Das Kaltluftgeschehen im Siedlungsgebiet von Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg ist maßgeblich durch die Lage am Odenwald geprägt, dessen Hänge hinsichtlich eines potenziell hohen Kaltluftabflusses eine wichtige Funktion innehaben. An die Weinhänge und – Berge am Rande der Siedlungsflächen schließt sich die flache Landschaft der zur Oberrheinebene gehörenden südhessischen Bergstraße an. Die Geländehöhe fällt hier sanft von ca. 200 m ü. NHN am Fuße der Weinhänge bis zu ca. 85 m ü. NHN im Osten des Untersuchungsgebietes. Siedlungstechnisch liegen der Ortsteil Alsbach sowie die Kernstadt Zwingenbergs in unmittelbarer Hanglage, wohingegen die Ortsteile Sandwiese, Hähnlein (beide Alsbach-Hähnlein) sowie Rodau (Stadt Zwingenberg) im flachen Bereich der Bergstraße liegen.

Tabelle 6 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen sowie der Geländehöhe und Strukturhöhen zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor. Dennoch kommt es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtischen Modellanwendungen sehr hohen Auflösung zu Generalisierungseffekten. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 7: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters

Datenquelle	Aktualität	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhenmodell	2016	ASCII-Punkt-wolke „XYZ“	1 m	direkt Verwendung
ALKIS-Nutzung	2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs-klassen
CIR/RBGI-Luftbilder	2019/2021	TIFF	20 cm	Berechnung NDVI für Vegetations-maske und versiegelte Flächen
Oberflächenmodell	2016	ASCII-Punkt-wolke „XYZ“	1 m	Berechnung eines normalisierten Oberflächenmodells (DOM minus DGM), Verschneidung mit NDVI für Vegetationshöhen und mit Gebäu-deumrissen für Gebäudehöhen
Baumkataster	2021	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung zu den Vegetationshö-hen

Hinsichtlich der Vegetationsbestimmung lagen neben einem Baumkataster (öffentlicher Raum Alsbach-Hähn-leins) hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2019 und 2021 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von „0“ war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe aus dem normalisierten Oberflächenmodell konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Abbildung 20). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisier-ten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Ras-terauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.



Abbildung 20: Ermittlung von Baumstandorten mittels Vegetationsindex und Strukturhöhe (Musterdarstellung)

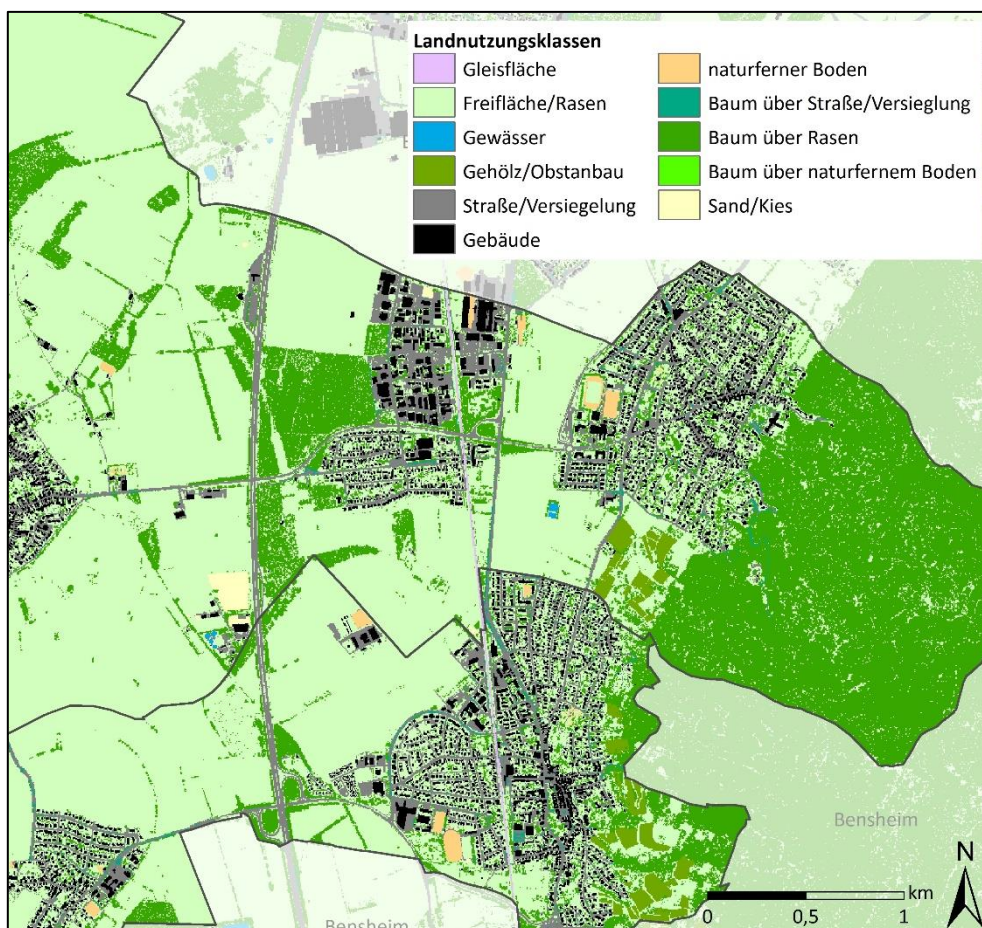


Abbildung 21: Ausschnitt klassifizierte Landnutzung im 5 m Modell-Raster.

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg im Jahre 2023 repräsentieren. Schon im Bau befindliche Baustrukturen wurden größtenteils in die Modelleingangsdaten eingearbeitet (Tabelle 8). Gemeinsam mit einer Reihe bereits beschlossener Bebauungspläne wurden im Ist-Zustand nicht berücksichtigte Baustrukturen (z.B. Wohngebiet am



Vogelsbergring) in den Zukunftsszenarien berücksichtigt. Abbildung 21 zeigt für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes die in das Modell eingeflossenen Nutzungsklassen (Ist-Zustand).

Tabelle 8: In die Modelleingangsdaten eingeflossene B-Pläne und aktuelle Bauvorhaben

Nr.	B-Plan	Standort	Einarbeitung
1	Gewerbegebiet „Westlich der Platanenallee II. BA“	Westlich der Platanenallee, Höhe Gernsheimer Str., Stadt Zwingenberg	Ist-Zustand, „Mischpixelansatz“
2	„Pass, Wiesenstraße, Melibokustraße“ 1.Änderung	Östlich Melibokusstraße, Stadt Zwingenberg	Ist-Zustand, Einarbeitung Detailplan
3	„Nördlich der Spießgasse II mit KiTa“	Vogelsbergring, Ortsteil Hähnlein	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
4	"Nördlich der Hauptstraße" In Zwingenberg Rodau	Zwischen Gartenstraße und Hauptstraße, Zwingenberg Rodau	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
5	„Östlich auf der Heide und nördlich der Orbisstraße“ (Orbishöhe)	Auf der Heide, Stadt Zwingenberg	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
6	2. Änderung des Bebauungsplans „Lange Schneise“	Die Lange Schneise, Stadt Zwingenberg	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
7	„Hauptstraße 12“ im Stadtteil Rodau	Südlich Hauptstraße, nördlich Auf dem Brunnen, Zwingenberg Rodau	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
8	„Westlich der Bahnlinie, zw. Wiesenpromenade West, Platanenallee und Ahornstraße sowie Bleichstraße“	Westlich Bahnlinie bzw. Gartenfeld Stadt Zwingenberg	Zukunfts-Szenarien, Einarbeitung Detailplan
9	„Quartier 22“	Südlich L3112, westlich Bahnhof Alsbach-Hähnlein	Zukunfts-Szenarien, „Mischpixelansatz“

Da für zwei Entwicklungsflächen (Nr. 1 und 9) noch keine konkreten Bebauungsentwürfe existieren, wird für die Modellierung der sogenannte **Mischpixelansatz** als Approximationsmethode verwendet. Hierbei werden für die entsprechenden Flächen geeignete Bestandsflächen als Referenz definiert und deren anteilige Nutzungsstruktur ermittelt. Gemäß dem statistischen Anteil der zu erwartenden Nutzungen werden die zugehörigen Modellparameter in ihrer pixelhaften Ausprägung zufällig auf der Fläche verteilt. Hierdurch entstehen gegenüber einer sich später ergebenden tatsächlichen Umsetzung zwar Abweichungen der räumlichen Verteilung, nicht aber der bilanzierten planbedingten Beeinflussung der Klimafaktoren. Der Mischpixelansatz wird in diesem Sinne als geeignetes Näherungsverfahren zur Abbildung von Entwicklungsvorhaben in einem sehr frühen Planungsstadium aufgefasst. Die Abbildung 22 zeigt das Prinzip des Mischpixelansatzes.

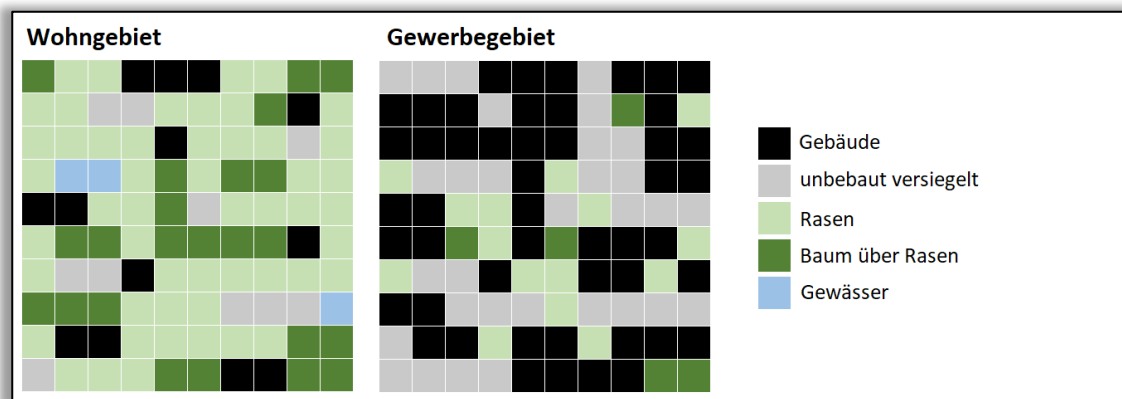


Abbildung 22: Prinzipskizze des Mischpixelansatzes. Verteilungsbeispiel für eine als Wohngebiet (links) und als Gewerbegebiet (rechts) umgesetzte Entwicklungsfläche.

4.2.1 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Alsbach-Hähnlein, Zwingenberg und Umgebung besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

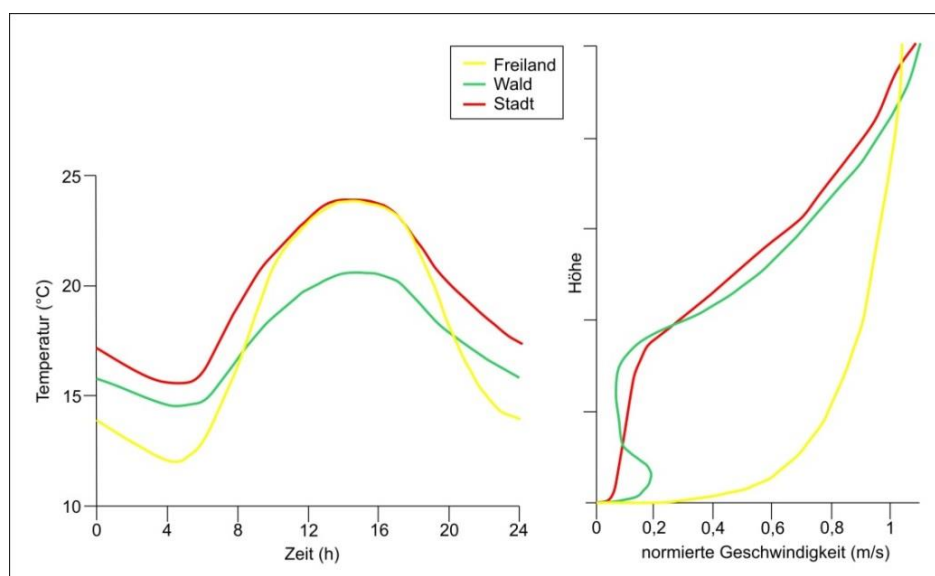


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

In Abbildung 23 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte



Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

Die Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al. 1996). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21,0 °C in der Ist-Situation bzw. 21,7 °C (Szenario „schwacher Klimawandel“) sowie 22,7 °C (Szenario „starker Klimawandel“).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch im Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wurde die Bodenfeuchte im Szenario „starker Klimawandel“ entsprechend auf 30 % nFK gesetzt, welches dem Welkepunkt entspricht. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt.

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um alleine auf der Basis der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden zu können.



4.2.2 MODELLAUSGABEGRÖSSEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 9). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 9: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potenzielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und von Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 10).

In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesgangs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.



Tabelle 10: abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s* m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr



4.2.3 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, das bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für den Auftraggeber zu bereinigen.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung durch dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.

4.2.4 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozessgeschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH-3D erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2015) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder



Maßnahmenszenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich dabei ergeben aus

- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz), und
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse anhand von Gebäudeumringen eingegangen – also mit ihrer exakten Lage im Raum. Die durchschnittliche Gebäudehöhe wurde dagegen aus der Differenz des digitalen Gelände- und Oberflächenmodells abgeleitet. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Da ein städtischer Geodatenatz i.d.R. und auch hinsichtlich dieser Analyse nicht verfügbar ist, können diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen



Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2016). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und modelltechnisch abgebildet werden können.

Kapitel 4.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Aus dem Jahre 2016 stammen das Geländehöhenmodell und das Oberflächenmodell. Während sich die Geländehöhe seitdem nicht (oder zumindest nicht in relevanter Größenordnung) verändert hat, bestimmt das Oberflächenmodell die Vegetations- und teilweise Gebäudehöhen. Die Vegetationshöhen der öffentlichen Baumbestände in Alsbach-Hähnlein wurden allerdings mit Informationen aus 2021 ergänzt. Die Infrarot-Luftbilder (RGBI/CIR), welche (neben der Festlegung der versiegelten Flächen) die Verortung von Vegetation definiert, sind aus 2019 (Zwingenberg) bzw. 2021 (Alsbach-Hähnlein) und damit relativ aktuell. Die Datensätze zu Gebäuden, deren Höhen sowie der ALKIS-Nutzung stammen aus 2022 und entsprechen somit nahezu dem Maximum an Aktualität.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der Angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 4.2.1). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse werden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (*.tif)) an die Auftraggeber übergeben.

5.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen **Lufttemperatur** ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche (sogenannte städtische Wärmeinseln) zu identifizieren, und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Unterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts, kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 13-15 °C über siedlungsfernen Freiflächen und Waldlichtungen bis über 20 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg damit eine Spannweite von mehr als 7 °C (Abbildung 24).

Die höchsten nächtlichen Belastungen (um 20 °C in der Ist-Situation, und bis über 22 °C im Szenario „starker Klimawandel“) treten vorwiegend in der Zwingenberger Kernstadt, im Ortskern von Alsbach sowie in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (z.B. nördlich Ortsteil Sandwiese, Am Falltor), aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen in den umliegenden Gemeindeteile auf (z.B. Gernsheimer Str., Rodauer Str., Georg-Fröba-Str., Carlo-Mierendorff-Str. in Hähnlein). Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den ansonsten überwiegend aufgelockerten Siedlungsbereichen als auch in den dörflichen Gemeindeteilen angrenzend an landwirtschaftliche Flächen (ca. 15 – 16 °C bzw. 17 bis 18 °C im Szenario „starker Klimawandel“) zu finden. Als nachts besonders kühle Siedlungsbereiche sind beispielsweise das Wohngebiet östlich bzw. südlich der Platanenallee in Zwingenberg und das Wohngebiet südlich der Melibokustraße in Alsbach zu nennen. Beide Quartiere zeichnen sich durch derzeit noch relativ viele Baulücken, welche den ohnehin schon hohen Grünflächenanteil nochmal deutlich erhöhen.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland - vor allem die landwirtschaftlichen Flächen um die Stadtteile außerhalb der Kernstadt – kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 13 - 15 °C (bzw. 16 – 17 °C im Szenario „starker Klimawandel“) auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen in den Waldgebieten des Odenwaldes liegen bei etwa 15,5 – 18 °C (bzw. im Szenario „starker Klimawandel“ bis zu 20 °C) in der Nacht, wobei die Werte hangabwärts deutlich zunehmen. Im orographisch tiefer gelegenen Waldgebiet zwischen der A5 und dem Ortsteil Sandwiese sind die Werte mit ca.



17,5 °C (bzw. entsprechend ca. 19,5 °C) abseits der Lichtungen weitestgehend konstant. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsräumen zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden.

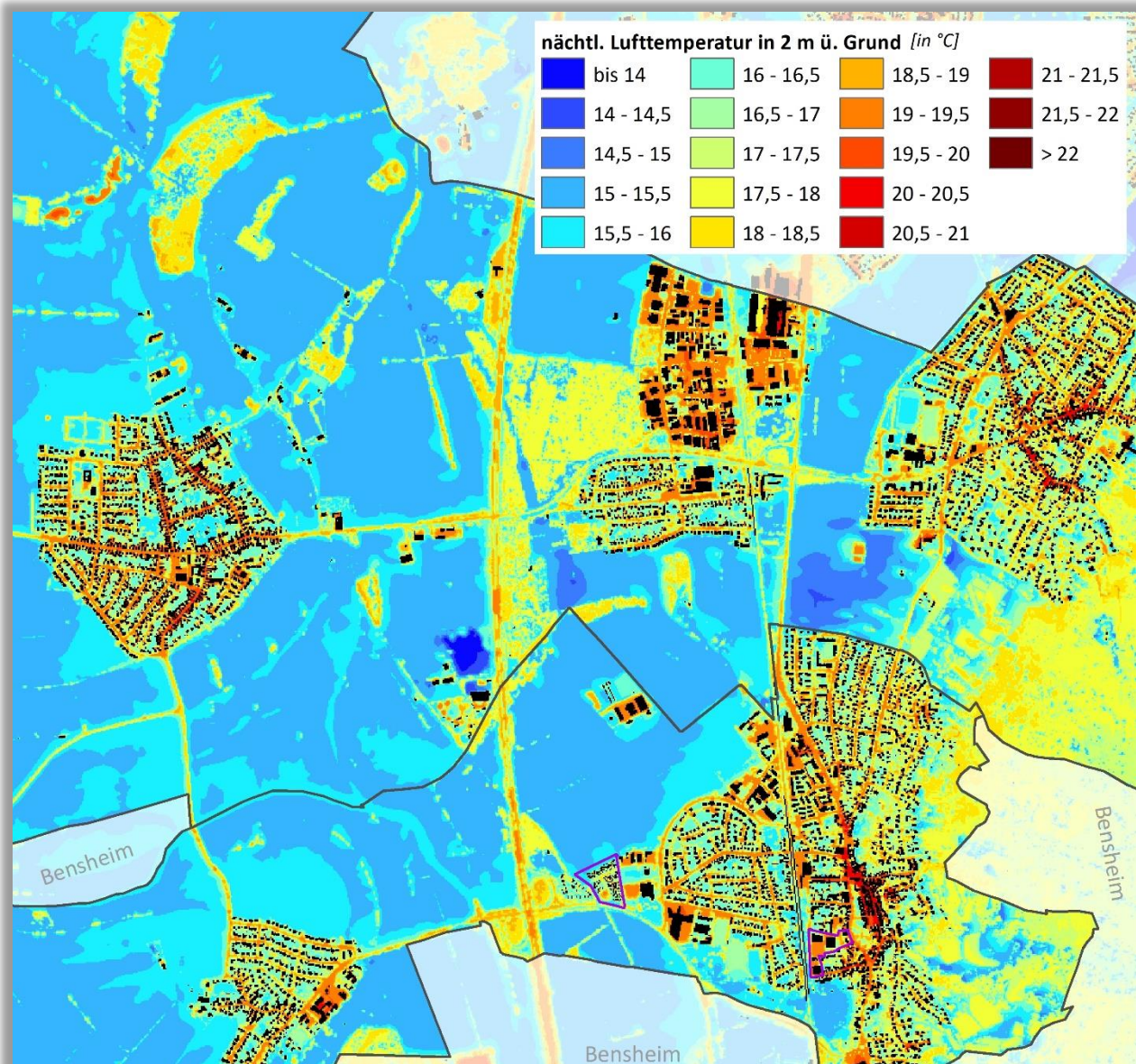


Abbildung 24: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ist-Zustand in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können. Dies trifft auch auf die wenigen Gewässerflächen im Untersuchungsgebiet, wie z. B. die Schächerlache und „Auffangbecken“ zu. Beide Stehgewässer besitzen aufgrund ihrer Lage und geringen Größe allerdings keine wesentliche siedlungsklimatische Bedeutung.

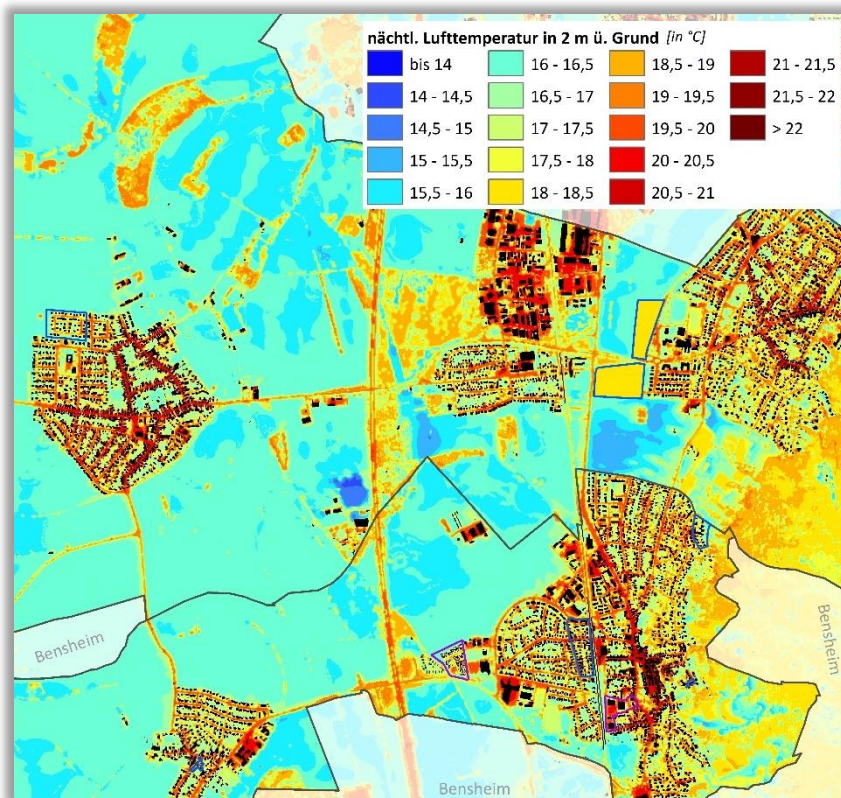


Abbildung 25: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Szenario „moderater Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

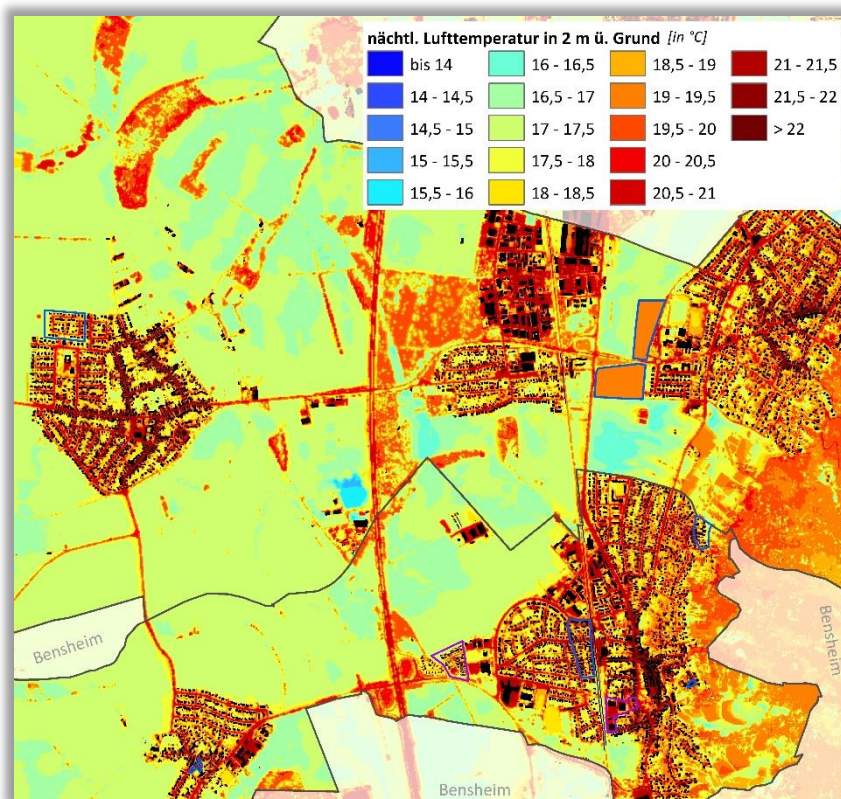


Abbildung 26: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).



Die Modellergebnisse der beiden Zukunftsszenarien zeigen entsprechend ihres Temperatursignals von 0,7 K bzw. 1,7 K ein entsprechend erhöhtes Temperaturniveau. Die Temperaturzunahmen finden dabei weitestgehend gleichmäßig über alle Landnutzungsklassen hinweg statt. Größere Unterschiede sind lediglich im Bereich der Entwicklungsflächen zu beobachten, was auf das zusätzliche Bauvolumen und die erhöhte Oberflächenversiegelung zurückzuführen ist. Insgesamt führen die verschiedenen angenommenen Entwicklungsvorhaben zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung benachbarter Siedlungsflächen und auch das Temperaturniveau fügt sich grundsätzlich in jenes der bestehenden Wohn- bzw. Gewerbeflächen ein. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.3.3 statt.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m^3 pro m^2 pro Stunde. In Abbildung 27 bis Abbildung 29: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende). wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für den Großteil der Siedlungsflächen und ihr direktes Umfeld dargestellt. Über versiegelten Flächen findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über den landwirtschaftlichen Freiflächen produziert, aber auch an den Hängen entlang des Odenwaldes. Innerhalb der Siedlungsquartiere ist zudem eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen. Mit Bäumen bestandene Flächen sowie auch die Waldflächen wie z.B. westlich vom Ortsteil Sandwiese zeigen oft eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate. Die Waldflächen des Odenwaldes stellen in diesem Zusammenhang eine Ausnahme dar, da die Hanglage aufgrund des hier erhöhten Kaltluftabflusses fördernd auf die Kaltluftproduktion wirkt. Dies kompensiert die durch die Baumkronen eingeschränkte vertikale Ausstrahlung.



Abbildung 27: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Ist-Zustand in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

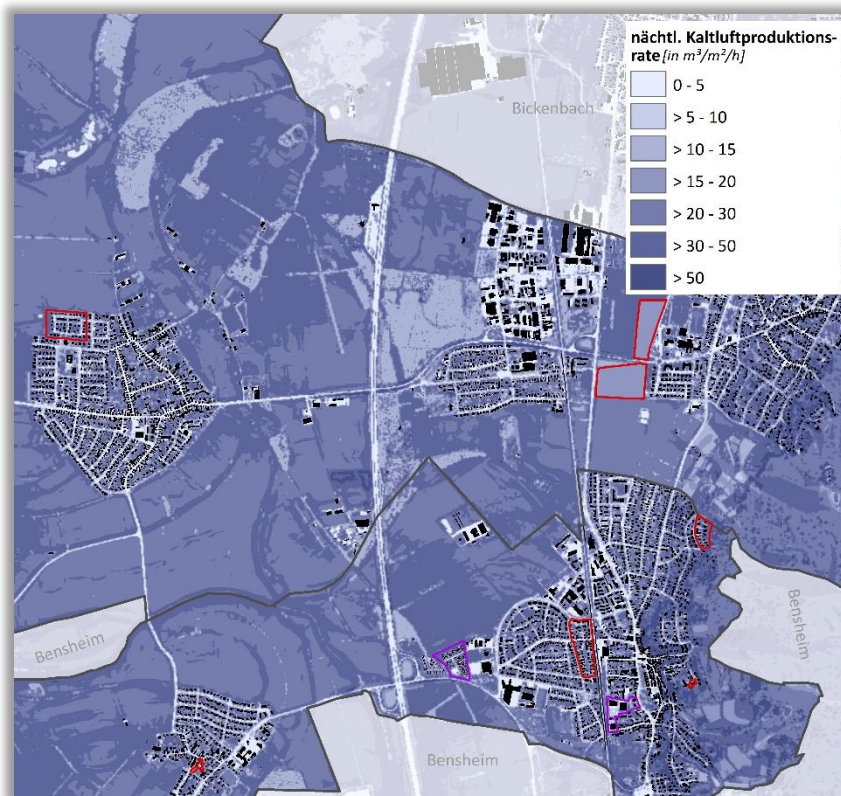


Abbildung 28: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario „moderater Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

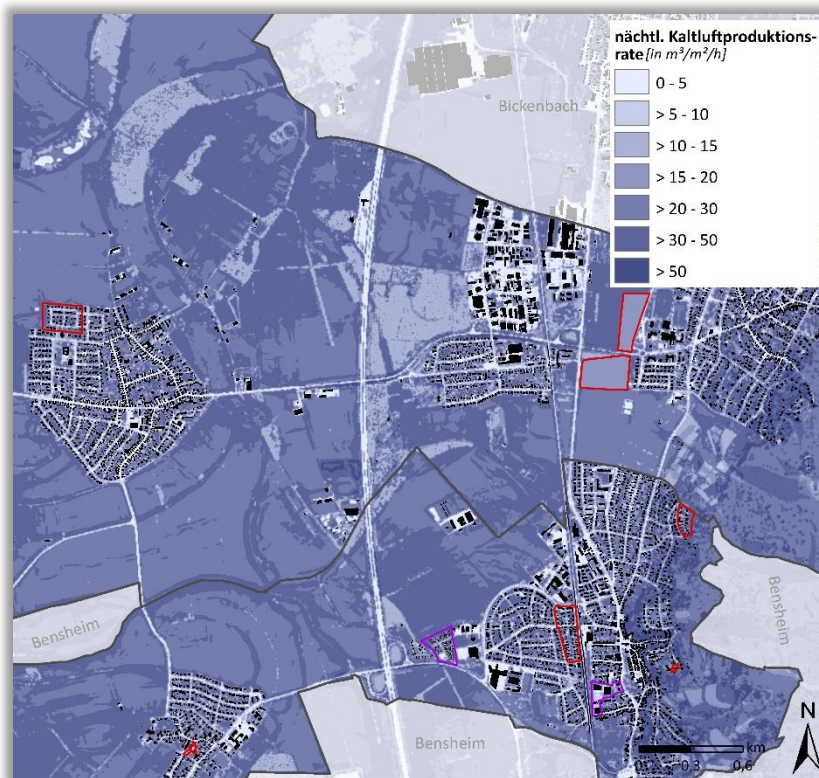


Abbildung 29: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).



In den beiden Zukunfts-Szenarien kommt es gegenüber dem Ist-Zustand abgesehen von den Entwicklungsflächen zu keinen wesentlichen Veränderungen der Kaltluftproduktion. Innerhalb der Entwicklungsflächen ist dagegen entsprechend der angenommenen Neubebauung eine Reduktion der Kaltluftproduktion zu erwarten, wobei die insgesamt moderaten Abnahmen jeweils nicht dazu führen, dass benachbarte Siedlungsflächen negativ beeinflusst werden. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.3.3 statt.



5.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt je nach Standort eine große Variabilität. An den Hängen des Odenwaldes mit starkem Gefälle werden trotz des meist dichten Baumbestands lokal Werte von bis zu ca. 50 m^3 pro Meter und Sekunde erreicht – so zum Beispiel nord- und südöstlich der Asklepios Klinik sowie im Umfeld des Schlosses Alsbach. Die höchsten Werte für den Kaltluftvolumenstrom im Untersuchungsgebiet treten am Übergang vom Odenwald-Relief ins freie (baumlose) Flachland zwischen Alsbach und der Kernstadt Zwingenbergs sowie im Bereich der verhältnismäßig rauigkeitsarmen Weinbauchflächen auf. So fließen am Fuße des Weinbergs im Schöntal lokal über $70 \text{ m}^3/\text{m/s}$, während auf den Weinflächen östlich bzw. südöstlich von Zwingenberg mit rund $90 \text{ m}^3/\text{m/s}$ lokal noch höhere Werte erreicht werden. Treffen die Kaltluftmassen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei. Die Kernstadt Zwingenbergs wird in den östlichen Bereichen sowie den äußeren, locker bebauten Siedlungsgebieten gut mit Kaltluft versorgt. Am Marktplatz fließen ca. $35 \text{ m}^3/\text{m/s}$, was deutlich über dem Mittelwert des gesamten Untersuchungsgebiet entspricht ($23,3 \text{ m}^3/\text{m/s}$). Nach Westen hin schwächt sich der Kaltluftvolumenstrom im Umfeld der Rodauer Straße auf Werte um die $20 \text{ m}^3/\text{m/s}$ ab, was aber dennoch grundsätzlich ein guter Wert für die eine Siedlungsfläche darstellt. Auch der Ortslage von Rodau wird mit ca. 20 bis $25 \text{ m}^3/\text{m/s}$ noch gut mit Kaltluft versorgt. Hier wirkt sich die entsprechend der Anstromrichtung ausgerichtete Bebauung positiv auf das Kaltluftprozessgeschehen aus.

Ähnlich wie in Zwingenberg wird auch der Ortsteil Alsbach aufgrund der unmittelbaren Hanglage mit Werten zwischen 30 und $50 \text{ m}^3/\text{m/s}$ sehr gut mit Kaltluft versorgt. Dabei nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung sowie des abflachenden Gefälles nach Westen hin ab, allerdings werden auch im Umfeld der Zwingenberger Straße sowie Alten Bergstraße noch meist überdurchschnittliche Werte um $25 \text{ m}^3/\text{m/s}$ erreicht.

Der Hangverlauf des Odenwaldes zeigt sehr gut wie sich Siedlungskörper auf den Kaltluftabfluss auswirken können. Zwar ist auch innerhalb der Siedlungslagen im Hangbereich grundsätzlich ein erhöhtes Wertenniveau zu beobachten, im Vergleich zur unbebauten Hanglage zwischen Alsbach und Zwingenberg zeigt sich der Unterschied der Kaltluftdynamik allerdings sehr deutlich. Der Ortsteil Sandwiese profitiert in diesem Fall von dem unbebauten Hangabschnitt, da dadurch die Kaltluftabflüsse besser bis in die Wohnbebauung wirken können. Die entsprechend der Anströmung aus Osten ausgerichtete Bebauung fördert die Durchlüftung des Ortsteils zusätzlich. Lediglich die Wohnbebauung im Nordwesten (Rheinstraße, Schlesierstraße) weist mit rund $15 \text{ m}^3/\text{m/s}$ einen unterdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstrom auf.

Auch der rund $1,3 \text{ km}$ westlich von Sandwiese gelegene Ortsteil Hähnlein profitiert teilweise noch von der unbebauten Hanglage, da zwischen den einzelnen Siedlungslagen eine weitestgehend rauigkeitsarme räumliche Verbindung besteht. Zwar nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund des weitestgehend flachen Geländes nach Westen hin deutlich ab, dennoch trifft die Kaltluft noch mit 20 bis $25 \text{ m}^3/\text{m/s}$ auf den Ortsrand von Hähnlein. Aufgrund der durch die Bebauung gebildeten Strömungshindernisse und der insgesamt entgegen der Strömungsrichtung ausgerichteten Gebäudeanordnung dringt die Kaltluft aber nur sehr eingeschränkt in den Siedlungskörper ein. So beträgt die das Niveau des Kaltluftvolumenstroms in Hähnlein lediglich 10 bis $15 \text{ m}^3/\text{m/s}$, wobei im Westen teilweise sogar einstellige Werte um $8 \text{ m}^3/\text{m/s}$ zu beobachten sind.

Die für den Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von flächenhaften Kaltluftabflüssen und Kaltluftleitbahnen hervorgehoben (Kapitel 5.3).

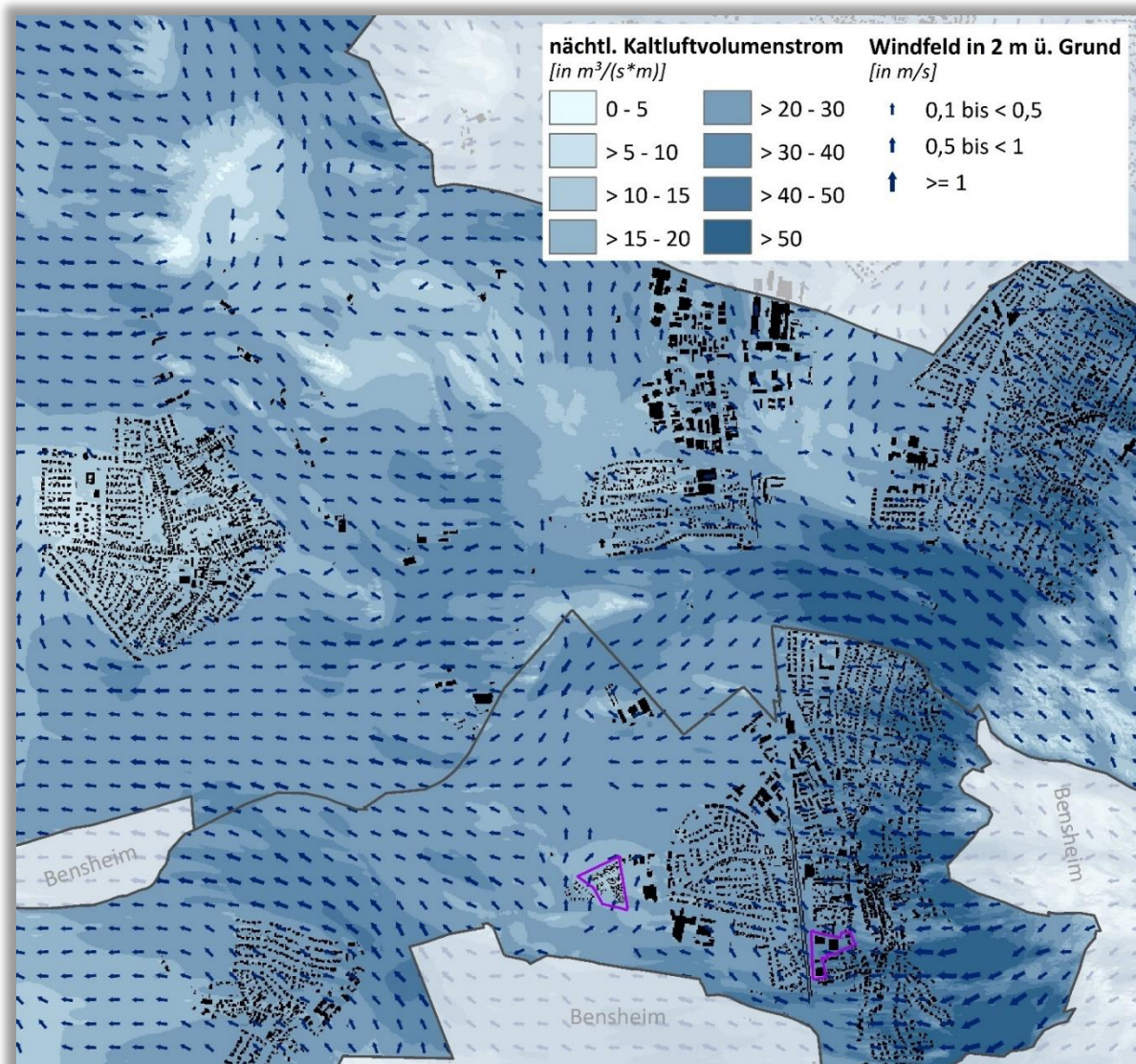


Abbildung 30: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Ist-Zustand in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

Im westlichen, topografisch flachen Teil des Untersuchungsgebietes, bleibt wie beschrieben die grundsätzliche Strömungsrichtung entsprechend dem (sehr leichten) Gefälle in Richtung Westen erhalten. Im direkten Umfeld der Siedlungsgebiete wird der Kaltluftvolumenstrom dagegen teilweise durch Differenzen in der Lufttemperatur angetrieben. Durch den städtischen Wärmeineffekt (erwärmte Luft steigt über den Siedlungskörpern auf und zieht kühle Ausgleichsströmungen aus dem Umland an, vgl. Kapitel 2.2) zeigt dort die Richtung der Ausgleichsströmung zu den erwärmten Siedlungsbereichen (z.B. zwischen Alsbach und Gewerbegebiet Sandwiese).

In den beiden Zukunfts-Szenarien bleibt aufgrund der gleichbleibenden Reliefsituation und Temperaturgegensätze zwischen dem Siedlungsraum und dem landwirtschaftlich geprägten Umland das Kaltluftprozessgeschehen grundsätzlich unverändert. Lediglich die angenommene Bebauung der Entwicklungsflächen führt lokal zu einer Modifikation der Kaltluftströmung. Die Auswirkungen auf die jeweils umliegenden Siedlungsflächen sind dabei insgesamt als gering einzustufen. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.4.3 statt.

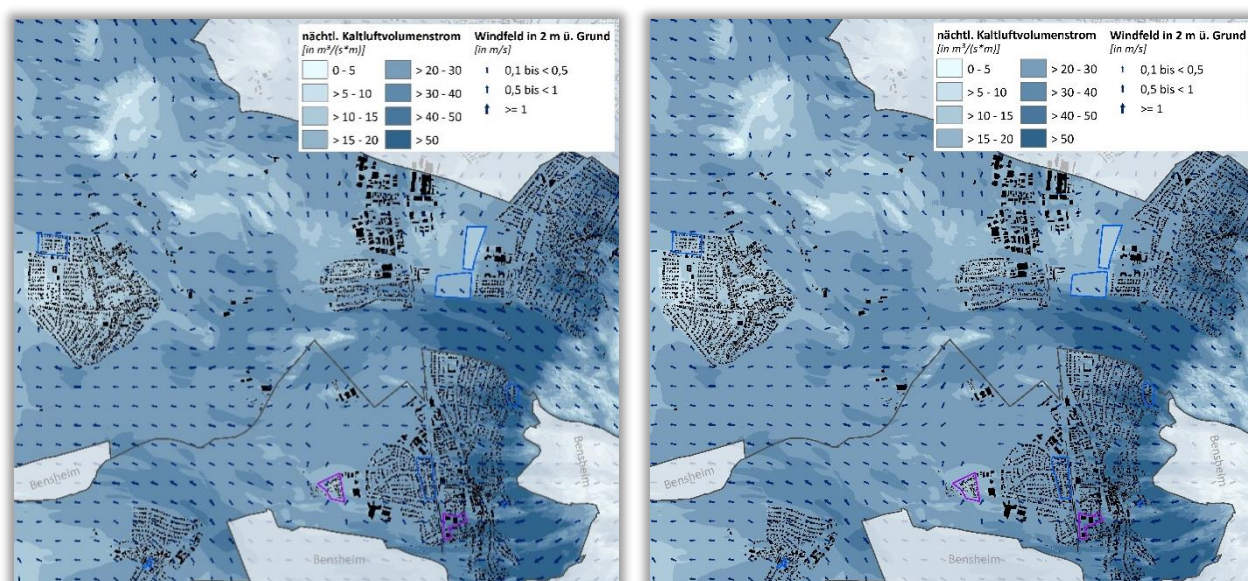


Abbildung 31: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in den Szenarien moderater und starker Klimawandel in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter Strömungsgeschwindigkeit herangezogen. In den Abbildung 32 bis 33 ist für einen Ausschnitt des Siedlungsgebietes die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt, in Original-Auflösung von 5 m.

Es wird deutlich, dass die Kaltluft bodennah je nach Bebauungsdichte unterschiedlich stark gebremst wird. So zeigt sich im Windschatten des Zwingenberger Stadtkerns im Bereich des Stadtparks eine vergleichsweise geringe bodennahe Windgeschwindigkeit, wohingegen nördlich und südlich des Stadtkerns die Kaltluft deutlich besser durch den Gebäudebestand strömen kann. Straßen und Plätze sowie Parks können in diesem Zusammenhang als wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein (z.B. Friedhof Zwingenberg). In Alsbach zeigt sich eine insgesamt noch homogenere bodennahe Durchlüftung des Siedlungsgebietes, was auf die entsprechend homogenere Bebauungsstruktur zurückzuführen ist. So ist insbesondere der Ortskern deutlich lockerer bebaut als die Zwingenberger Kernstadt. Neben der Gebäudebebauung wirkt sich in Zwingenberg auch die 4 m hohe Lärmschutzwand entlang der Gleisanlagen abschwächend auf die bodennahe Durchlüftung im westlichen Stadtgebiet aus. Da die Hangabwinde in ihrer vertikalen Ausprägung allerdings vergleichsweise mächtig sind, wird die Lärmschutzwand von diesen überströmt, wodurch die bodennahe Kaltluftströmung nicht gänzlich zum Erliegen kommt.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können (hier bspw. südlich der Entwicklungsfläche „Westlich der Platanenallee II. BA“, unten links in der Abbildung).

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in Wäldern sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt. Auch der Kaltluftvolumenstrom ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern.

In Zukunft wird sich zwar das Temperaturfeld verändern, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen werden aber im Allgemeinen keine signifikanten Veränderungen erfahren. Das

Strömungsfeld der Austauschprozesse und die Menge der strömenden Kaltluft unterscheidet sich daher im Vergleich zwischen Ausgangssituation und Zukunftsszenarien nicht signifikant. Wie bei den zuvor beschriebenen Klimaparametern sind lediglich innerhalb und im direkten Umfeld der städtebaulichen Entwicklungsflächen Modifikationen der bodennahen Kaltluftströmung zu erwarten. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.4.3 statt.

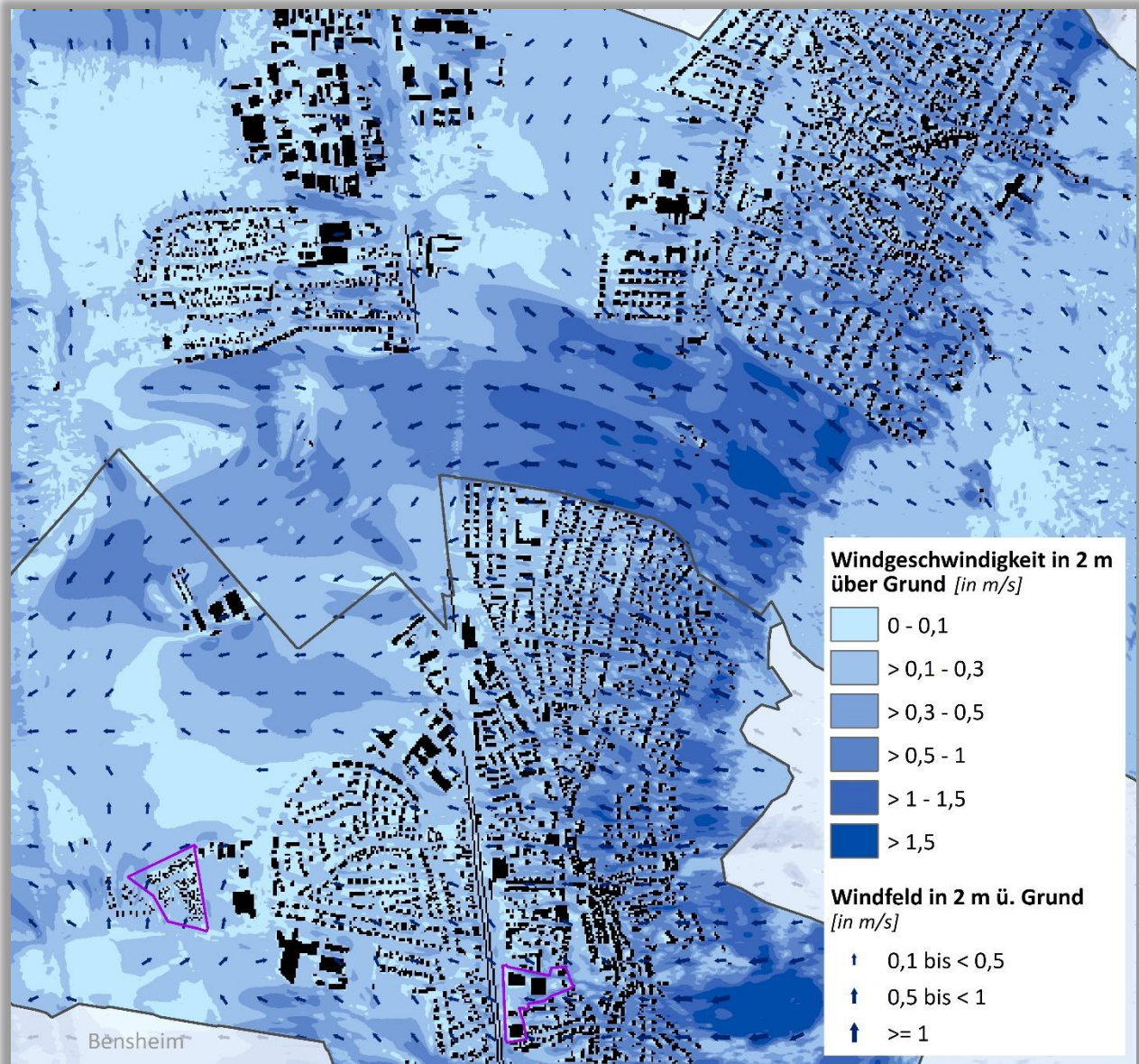


Abbildung 32: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Ist-Zustand in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

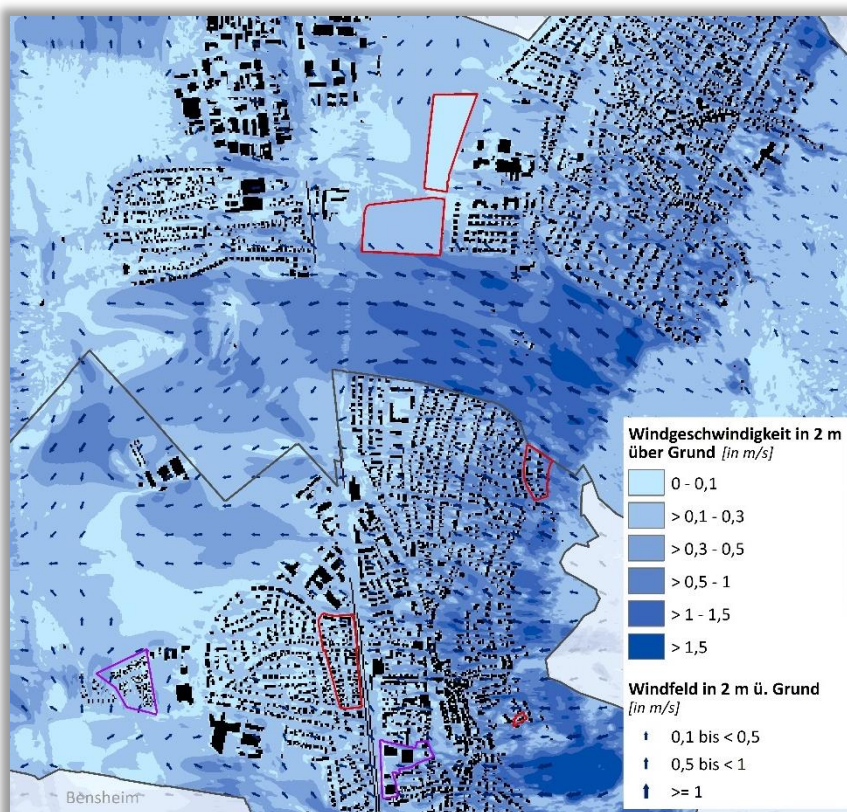


Abbildung 33: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Szenario „moderater Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

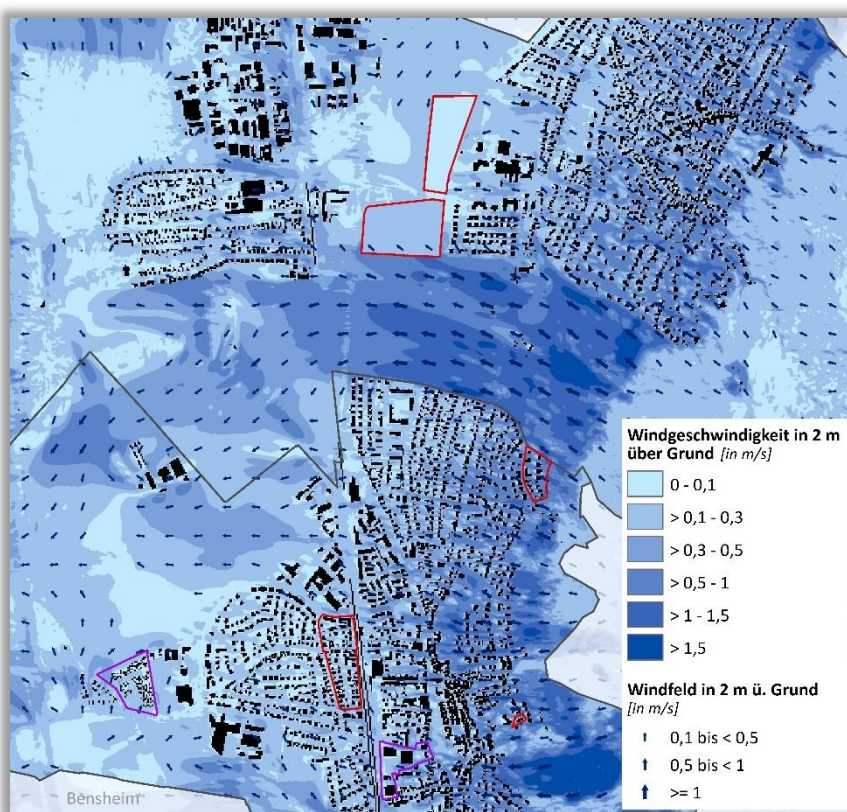


Abbildung 34: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

5.3 KLIMAANALYSEKARTEN

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap.6). Mit diesem Verständnis wurden für Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg folgende Klimaanalysekarten erstellt (Abbildungen 35 bis 37):

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „moderater Klimawandel (2045)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2045)“

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der drei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 35). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁷ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist der sogenannte Wärmeinseleffekt für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf dem ATKIS-Basis DLM. Die Entwicklungsflächen wurden wie bei den Darstellungen der Einzelparameter überwiegend wie die übrigen Siedlungsflächen rasterbasiert dargestellt. Eine Ausnahme stellt das „Quartier 21“ am westlichen Ortsrand von Alsbach dar, da hier die mögliche zukünftige Bebauung noch zu unkonkret hinsichtlich der Gebäudestellungen ist. Aus diesem Grund wurde für beide Teilflächen jeweils flächenhaft der modellierte Mittelwert des Wärmeinseleffektes dargestellt.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 11). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der

⁷ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegendsten Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte.



Karte lediglich anhand der definierten Kaltlufteinwirkbereiche dargestellt. Hierbei handelt es sich um Bereiche, welche hinsichtlich des Kaltluftvolumenstroms ein überdurchschnittliches Niveau und/oder eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mindestens 0,2 m/s aufweisen. Ist mindestens eines der beiden Kriterien erfüllt kann von einer effektiven Kaltluftversorgung der jeweiligen Fläche ausgegangen werden.

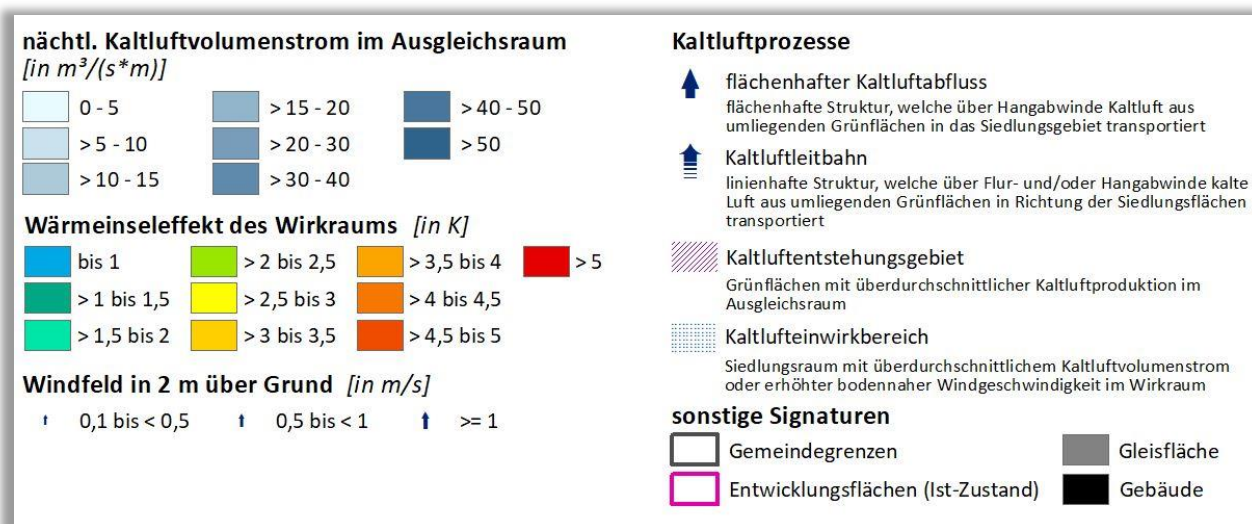


Abbildung 35: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten

Die als Kaltluftproduktionsflächen gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen $> 1000 m^2$ mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 28,9 m^3/m^2h$. Zu beachten ist, dass grundsätzlich alle Grünflächen eine im Vergleich zum Siedlungsraum erhöhte Kaltluftproduktion aufweisen. Die hervorgehobenen Flächen stellen in diesem Zusammenhang lediglich die besonders wertvollen Flächen dar.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften Kaltluftleitbahnen. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al. 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können. Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Die für Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg festgestellten Kaltluftabflüsse treten überwiegend an Hängen auf und reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist.

Tabelle 11: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 28,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ab 1000 m^2
Kaltluftleitbahn (linear) in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

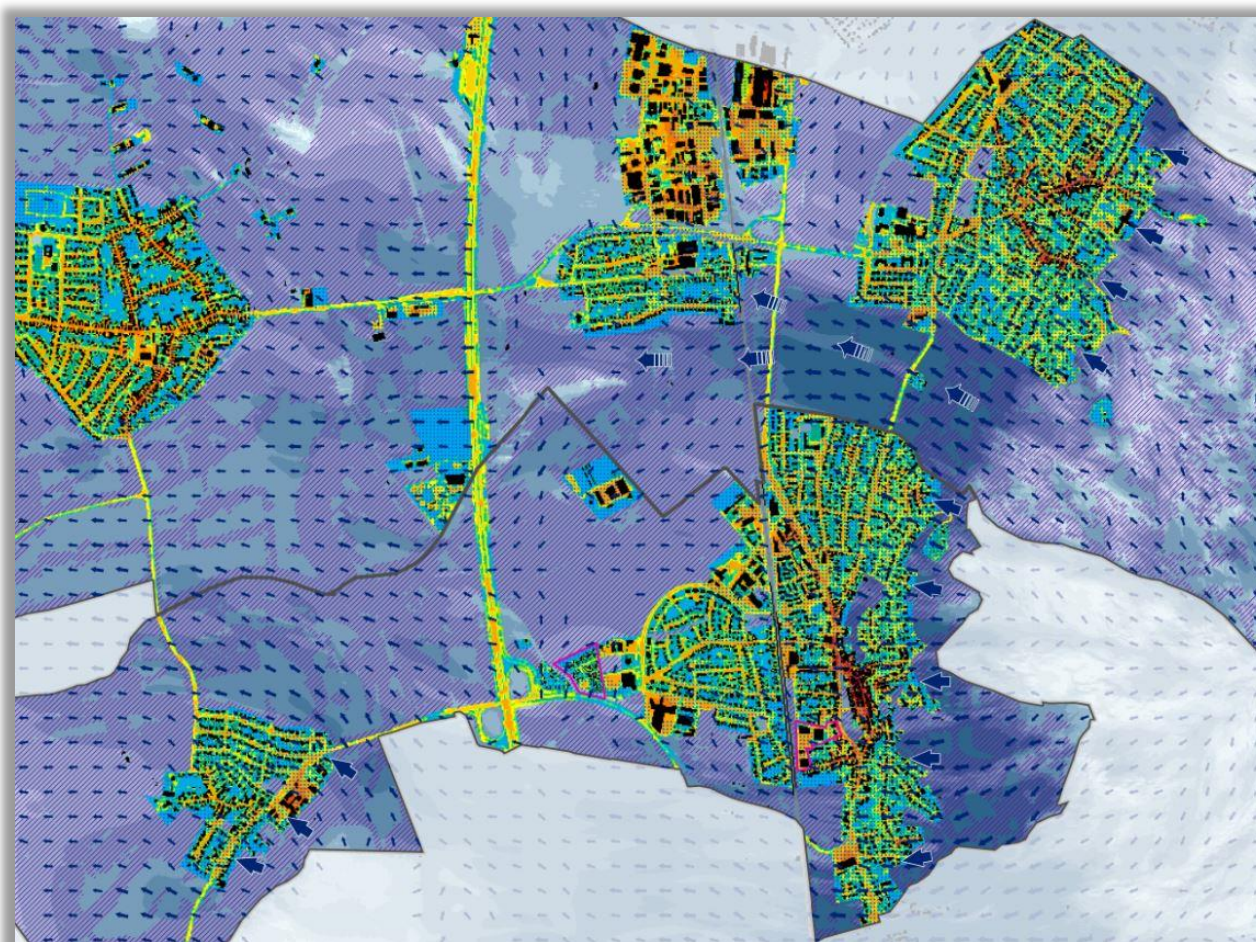


Abbildung 36: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 35)

Die Ausweisung der Leitbahnen und Kaltluftabflüsse erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und flächenhafte

Kaltluftabflüsse angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

Für den gesamten Untersuchungsraum ist ein weiträumiger Kaltluftleitbahn-Bereich identifiziert, welcher seinen Anfang im unbebauten Hangbereich zwischen Alsbach und Zwingenberg hat. Abweichend zu klassischen Kaltluftleitbahnen handelt es sich in diesem Fall um ein Kaltlufttransportsystem, welches die Kaltluftversorgung von Siedlungsflächen abseits der direkten Hanglage fördert. So kann die Kaltluft über die raugkeitsarmen Landwirtschaftsflächen vor allem die Wohnbebauung des Ortsteils Sandwiese erreichen, wobei sich die dortige Gebäudeausrichtung zusätzlich positiv auf die Kaltluftversorgung auswirkt. Auch der Ortsteil Hähnlein profitiert im geringen Maße noch von der als Kaltluftleitbahn definierten Freilandstruktur, wobei spätestens westlich von Sandwiese aufgrund der Weitläufigkeit des Freiraumgefüges nicht mehr von einer (linearen) Kaltluftleitbahn gesprochen werden kann.

Zusätzlich sind bedeutende flächenhafte Kaltluftabflüsse entlang nahezu der gesamten Hanglage des Odenwald lokalisiert, welche Alsbach und Zwingenberg sehr ausgiebig mit Kaltluft versorgen. Auch der Ortsteil Rodau wird ausgehend vom Niederwald relativ dynamisch in Form von flächenhaften Kaltluftabflüssen aus südöstlicher Richtung versorgt.

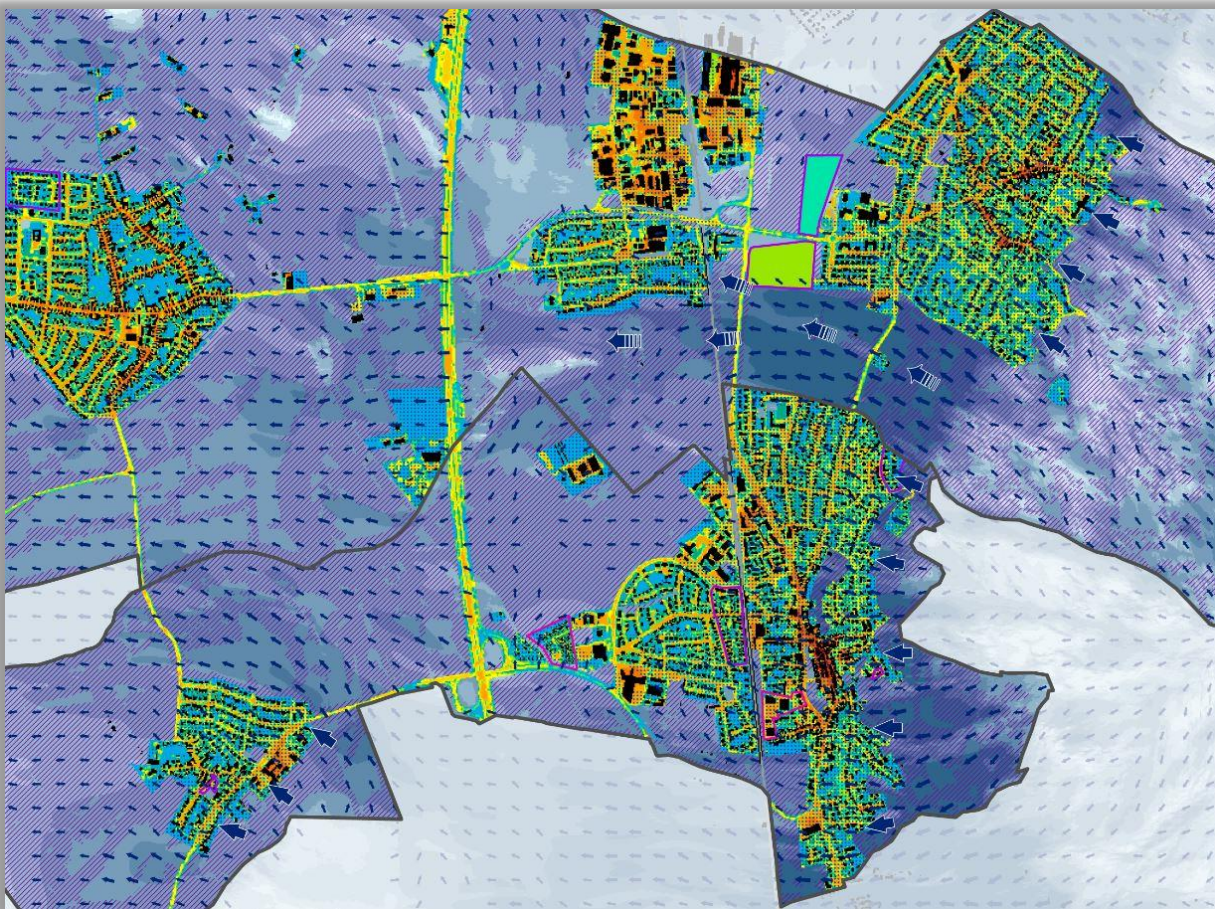


Abbildung 37: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Szenario moderater Klimawandel (Legende: siehe Abbildung 35)

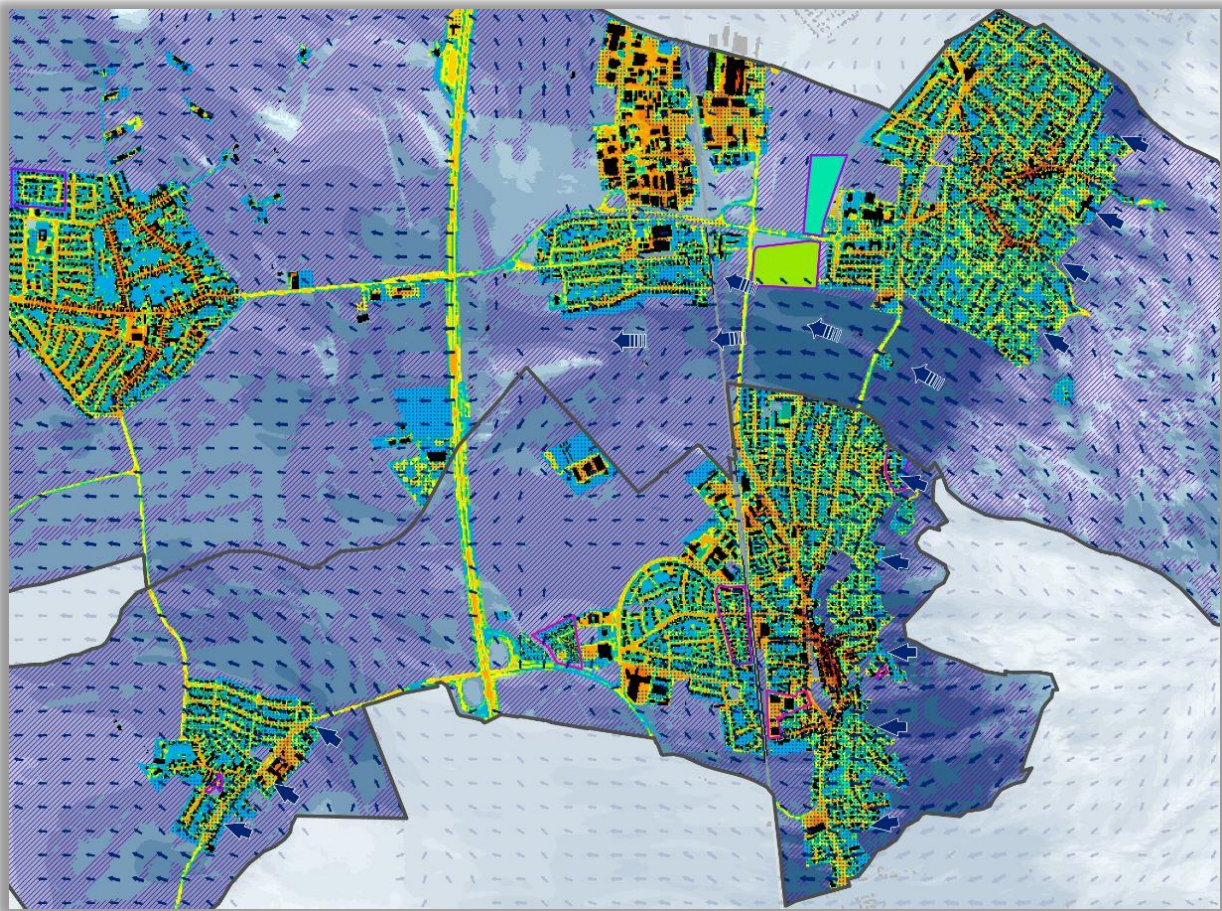


Abbildung 38: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Szenario starker Klimawandel (Legende: siehe Abbildung 35)

Die Klimaanalysekarten zu den beiden Zukunfts-Szenarien zeigen ein weitestgehend identisches Bild im Vergleich zum Ist-Zustand. Dies liegt daran, dass wie bereits zuvor beschrieben die Temperaturgegensätze in ihrer Ausprägung grundsätzlich konstant bleiben, wodurch es zu keiner wesentlichen Modifikation des Wärmeinseleffektes sowie der Kaltluftströmungen kommt. Lediglich in den Bereichen der Entwicklungsflächen sind lokale Veränderungen der klimaökologischen Situation zu erwarten. Kaltluftleitbahnen und flächenhafte Kaltluftabflüsse werden durch die Entwicklungsflächen ebenfalls kaum beeinflusst. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben, welche insbesondere eine etwaige Beeinflussung der ausgewiesenen Kaltluftfunktionen berücksichtigt, findet in Kapitel 6.3.3 statt.

5.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von meist unter 26 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Legende in Abb. 38). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass die Wälder des Odenwaldes aber auch der Niederwald und andere kleinere Waldgebiete als Rückzugsorte dienen können. Auch die wenigen Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen z.B. des „Auffangbeckens“, besonders in Kombination mit Vegetation entsprechender Höhe überwiegend eine schwache bis mäßige Wärmebelastung aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.

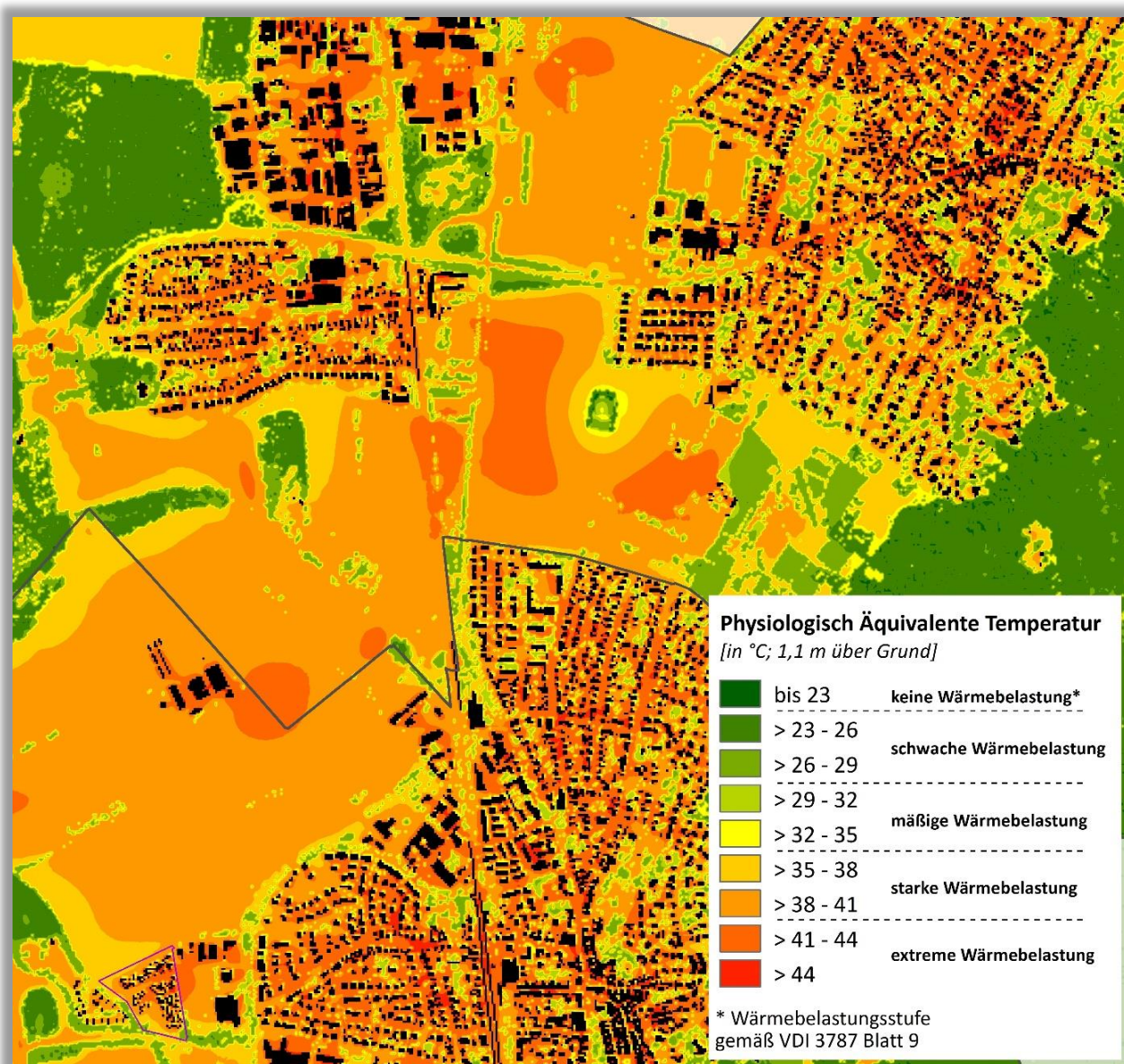


Abbildung 39: Wärmebelastung am Tag (PET) im Ist-Zustand in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, verkürzte Legende).

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen und Straßen ohne Verschattung auf (ca. 41 bis 44 °C PET in der Ist-Situation,



bzw. > 44 °C PET im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Auf der Nord- bis Nordost-Seite von hohen Gebäuden ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr entsprechend der PET Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. Die Straße Wetzbach sowie die Ober- und Untergasse in der Zwingenberger Altstadt beispielsweise, mit Gebäudehöhen um 17 Meter, weisen bis zu 10 °C kühlere PET-Werte auf als benachbarte Straßen ohne Verschattung. Auch in übrigen Siedlungsgebieten gestaltet sich die Verteilung PET-Wert mosaikartig je nach Baumasse, Versiegelung sowie Schatten durch Bäume oder Gebäude, wobei vergleichsweise geringe PET-Werte vorwiegend im östlichen Randbereich von Zwingenberg und Alsbach aufgrund des dort erhöhten Baumbestandes zu beobachten sind. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Ortsbezirken. Die Wohngebiete bieten zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten häufig einen geringen Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnern von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Außenraum zeigen zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um 41 °C (Ist-Situation) bzw. um 44 °C (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Aufgrund der modellierten reduzierten Bodenfeuchte ist auf Grün- und Freiflächen für die Zukunft die höchste Zunahme der Hitzebelastung am Tage dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung nicht vorrangig die absolute Zunahme der Temperatur, sondern vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 3.3) entscheidend ist.

Als Bereiche relativ hoher Aufenthaltsqualität (um 29 °C in der Ist-Situation, bzw. rund 2-3 °C wärmer im Szenario „starker Klimawandel“) stellen zum Beispiel der Stadtpark Zwingenbergs, der Erpelpark in Alsbach sowie die von Bäumen bestandenen Flächen im Bereich der Friedhöfe in Alsbach und Zwingenberg dar. Auch der Zwingenberger Marktplatz zeigt durch den zentralen Baumbestand Bereiche mit einer vergleichsweise geringen Wärmebelastung.

Durch die im Modell berücksichtigten Entwicklungsflächen kommt es zu lokalen Erhöhungen und Reduktionen der PET. Die Art der Modifikationen hängt dabei im Wesentlichen davon ab, ob durch die Planvorhaben der Baumbestand reduziert wird oder nicht. Das zusätzliche Bauvolumen kann sich bei weitestgehend gleichbleibendem Baumbestand aufgrund des zusätzlichen Gebäudeschattens sogar positiv auf die PET auswirken. Gut sichtbar wird dies in Abb. 38, wo die dargestellte mittlere PET der nördlichen Teilfläche des Quartiers 21 geringer ausfällt als jene der umliegenden Freiflächen. Bei zusätzlicher Planung neuer Baumstandorte können sich Entwicklungsflächen auch noch deutlicher von unverschatteten Freiflächen abheben und zu einer Verbesserung der bioklimatischen Situation am Tage beitragen. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.4.3 statt.

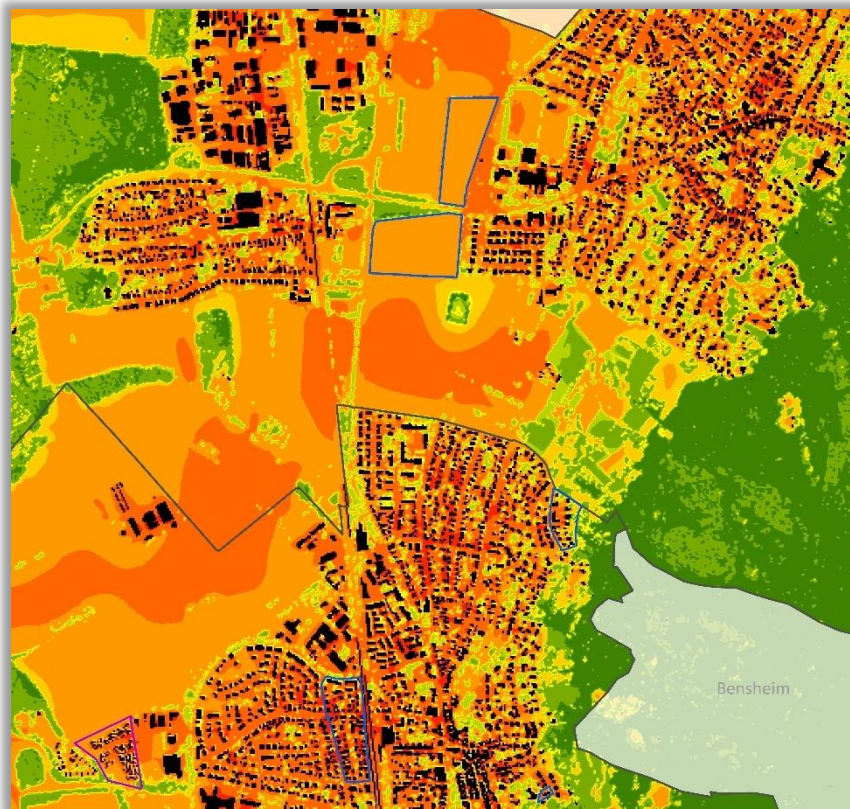


Abbildung 40: Wärmebelastung am Tag (PET) im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, Legende in Abb. 38).



Abbildung 41: Wärmebelastung am Tag (PET) im Szenario „starker Klimawandel“ in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg (gezoomte Ansicht, Legende in Abb. 38).



6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

6.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 2015, 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als „*Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben*“ (VDI 2015, 5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern sie nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke übernommen werden (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan). Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zu Ist- und Zukunftsszenarien in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelegt sog. Bewertungskarten zu erstellen. In den sechs Bewertungskarten wurde getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien Status quo, Moderater Klimawandel und Starker Klimawandel vorgenommen. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse dieser sechs Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.



6.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap.5) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt- raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyseansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum). Es kann unter Umständen vorkommen, dass kleinere Freiflächen in der Karte nicht als solche ausgewiesen sind, oder Überbauungen mit einem hohen Grünanteil nicht als Siedlungsflächen ausgewiesen sind. Im Falle zusätzlicher Bebauung auf Grün- und Freiflächen kann sich deren Funktion ändern und muss gegebenenfalls neu bewertet werden.

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor; Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 42).

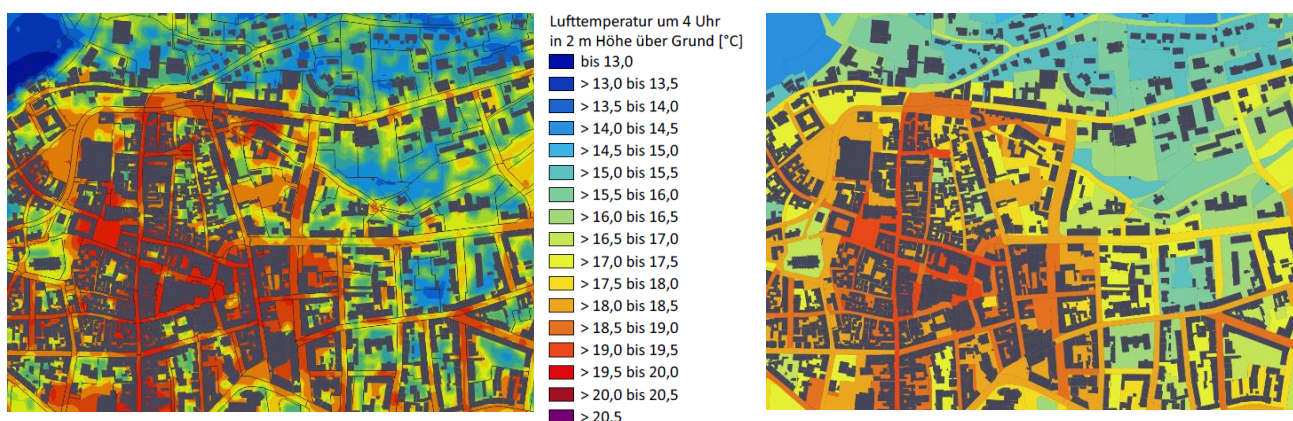


Abbildung 42: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (Musterdarstellung).



6.3 BEWERTUNGSKARTEN

6.3.1 WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation dargestellt. Wertgebend dabei ist in der Nacht die bodennahe Lufttemperatur als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden sowie am Tag die Wärmebelastung im Außenraum (Physiologisch Äquivalente Temperatur, PET). Bei der Temperatur und der PET, die auf die Flächen der Basisgeometrie gemittelt wurden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb „sommerliche autochthone Wetterlage“ gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 43).

$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma}$$

Dabei ist

- z standardisierter Wert der Variablen x
- χ Ausgangswert der Variablen x
- μ arithmetisches Mittel
- σ Standardabweichung

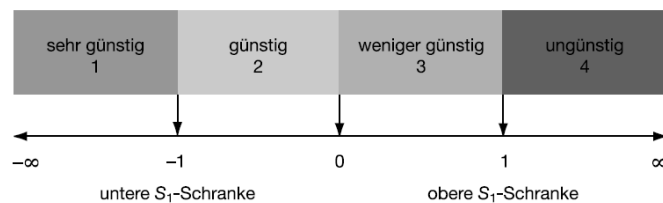


Abbildung 43: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein. Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Status quo und die Szenarien Moderater sowie Starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo (als kühlste Situation) und des Szenarios Starker Klimawandel (als wärmste Situation) als Bandbreiten des



„Szenario-Trichters miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁸:

- Nächtliche Temperatur, Siedlung:
Mittelwert = 17,65 °C Standardabweichung = 1,22 °C
- Wärmebelastung am Tag (alle Flächen):
Mittelwert = 35,03 °C PET Standardabweichung = 7,58 °C PET

Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen.

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 43) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeres Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr geringe – geringe – mittlere – hohe – sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 12). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

Tabelle 12: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.






Bioklimatische Belastung am Tag	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr gering	$z \leq -1,0$	$PET \leq 27,45$
Gering	$-1,0 < z \leq -0,33$	$27,45 < PET \leq 32,51$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$32,51 < PET \leq 37,55$
Hoch	$0,33 < z \leq 1,0$	$37,55 < PET \leq 42,61$
Sehr hoch	$z > 1,0$	$PET > 42,61$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Sie wird dennoch zusätzlich beleuchtet, da sich die Durchlüftung einer Fläche positiv auf angrenzende Flächen auswirken kann. Dazu wurden zunächst Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte ($\geq 25,3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) oder erhöhten bodennahen Windgeschwindigkeit ($\geq 0,2 \text{ m/s}$) als sogenannter Kaltlufteinwirkungsbereich definiert. Liegt eine Fläche wertetechnisch hinsichtlich mindestens eines Parameters im definierten Bereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell eine Gunstwirkung für angrenzenden Flächen haben kann. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, sie sind über eine Punktur in der Bewertungskarte (Nacht) sichtbar und fließen als Kriterium für die stadtklimatische Handlungspriorität in die Planungshinweiskarte ein.

⁸ Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.



Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht

Bioklimatische Belastung in der Nacht		Grenzen der z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C] Siedlung
	Sehr gering	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 16,43$
	Gering	$-1,0 < z \leq -0,33$	$16,43 < T04 \leq 17,24$
	Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$17,24 < T04 \leq 18,06$
	Hoch	$0,33 < z \leq 1,0$	$18,06 < T04 \leq 18,87$
	Sehr hoch	$z > 1,0$	$T04 > 18,87$

6.3.2 AUSGLEICHSRAUM

Während in den Klimaanalysekarten die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wälder vornehmlich siedlungsunabhängig anhand ihres Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in den Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt.

Zur stadtklimatischen Bewertung des Ausgleichsraums in der Nacht rückt dessen Funktion für den Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit den besonderen Kaltluftprozessen (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse) stehende Fläche eine *sehr hohe Bedeutung*, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion) und eine *hohe Bedeutung*, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse unmittelbar speisen (Sekundärfunktion, direktes Einzugsgebiet).

Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die folgende Abbildung 44 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- *„Hohe Kaltluftfunktion“*: mindestens zwei der drei Werte: Kaltluftvolumenstrom / Kaltluftproduktion / Windgeschwindigkeit sind größer als der jeweilige Mittelwert/Schwellenwert ($25,3 \text{ m}^3/(\text{s m})$ bzw. $\geq 28,9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ bzw. $\geq 0,2 \text{ m/s}$)
- *„Angrenzend an Wohngebiete“*: Entfernung bis 30 m Luftlinie
- *„Agglomeration“*: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
- *„Siedlungsbezug“*: Entfernung bis 500 m Luftlinie

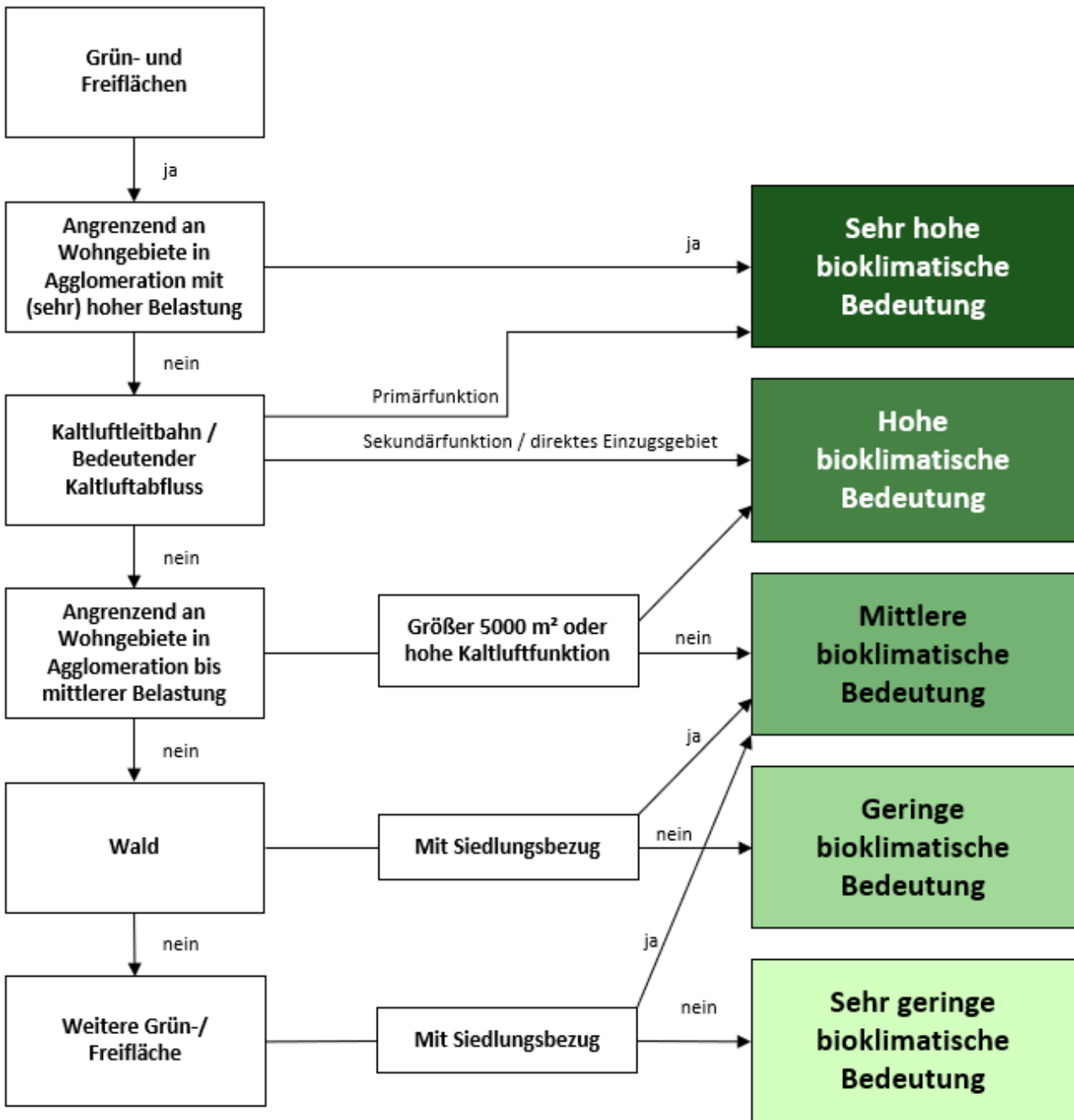


Abbildung 44: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht

Für die Tag-Situation wird die bioklimatische Bedeutung (Aufenthaltsqualität) auf den Flächen im Ausgleichsraum ebenfalls in der fünfstufigen Skala von *sehr hoch* bis *sehr gering* bewertet (Tabelle 12).

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend im Stadtgebiet, sodass die Aufenthaltsqualität auf den Flächen im Ausgleichsraum sinken kann. Damit nimmt die Anzahl ungünstig bewerteter Flächen zu, was jedoch nicht meint, dass deren Bedeutung für das Stadtklima abnimmt. Vielmehr ist es ein Hinweis, dass die Wärmebelastung auf den Flächen ohne Aufwertung und angepasste Pflege zunehmen wird. Sie behalten jedoch eine wichtige stadtklimatische Ausgleichsfunktion für den stärker belasteten Siedlungsraum.



6.3.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Abbildung 45 zeigt Ausschnitte aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation. Während in der Ist-Situation die Flächen mit hoher bis sehr hoher Belastung nur vereinzelt und vorrangig in den hoch verdichteten Siedlungskernen und nur sehr vereinzelt in den weiteren Stadtteilen und Ortsbezirken zu lokalisieren sind, zeigt sich im Szenario „moderater Klimawandel“ bereits ein deutlicher anteiliger Anstieg derselben Kategorien. Im Szenario „starker Klimawandel“ ist ein Großteil der Siedlungsfläche mind. in die Kategorie hoher Belastung eingestuft. Tabelle 14 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien.

Grundsätzlich unterliegen die Siedlungsgebiete am Rand von größeren Grünflächen den günstigsten bioklimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet. Dies zeigt sich u.a. in den östlichen Hangbereichen von Alsbach und Zwingenberg, im Süden vom Ortsteil Sandwiese, am nördlichen Siedlungsrand von Hähnlein sowie an den Ortsrändern von Rodau. Auffällig ist der sehr hohe Anteil an Flächen in der Belastungsstufe 2 (Ist-Zustand) bzw. 3 und 4 in den beiden Zukunfts-Szenarien. Dies ist auf die insgesamt sehr homogene und vergleichsweise lockere Bebauungsstruktur zurückzuführen. So sind dicht bebaute bzw. stark versiegelte Siedlungsflächen nur in den relativ kleinflächigen Ortskernen sowie Gewerbegebieten zu finden.

Selbst im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ überwiegen am Siedlungsrand vielerorts noch die Flächen mit einer „nur“ mittleren Belastung. Darüber hinaus sind allerdings bis auf relativ wenige Ausnahmen der Großteil der Siedlungsflächen den beiden höchsten Belastungsstufen zugeordnet (siehe Tabelle 14).

Die Grün- und Freiflächen variieren in den drei Szenarien weniger in ihrer Bedeutung in der Nacht. Das Bewertungsschema basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden Wohnsiedlungsflächen (vgl. Abbildung 44). Folglich liegen die Flächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen, direkt angrenzend an die Wohnsiedlungsflächen.

Obwohl in der Modellierung der Zukunftsszenarien durch die Entwicklungsflächen Modifikationen der städtebaulichen Struktur eingeflossen ist, bleiben das Strömungsfeld und die Kaltluftaustauschprozesse nahezu unverändert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Entwicklungsflächen zum einen in Bezug auf die Kaltluftaustauschprozesse in relativ unkritischen Bereichen verortet sind und es sich zudem überwiegend um relativ kleinteilige Nachverdichtungsprojekte handelt. Lediglich die südliche Teilfläche des Quartiers 21 sowie das B°-Plan-Gebiet „Östlich auf der Heide und nördlich der Orbisstraße“ befinden sich im Nah- bzw. Randbereich einer der beiden primären Kaltluftfunktionen. Der Einfluss beider Entwicklungsvorhaben auf die jeweilige Kaltluft ist dabei aber vergleichsweise gering und kann durch eine angepasste Planung auf ein Minimum reduziert werden (siehe Kap. 6.4.3).

Lediglich der Anteil von Flächen mit hoher bzw. sehr hoher Bedeutung ändert sich aufgrund der Zunahme von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen (Tabelle 15). Bei den Freiflächen mit geringer oder sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima in den Wohnsiedlungen handelt es sich um die (meist) großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche (ausgenommen Einzelhöfe als Siedlungssplitterflächen) von mindestens einigen Hundert Metern.

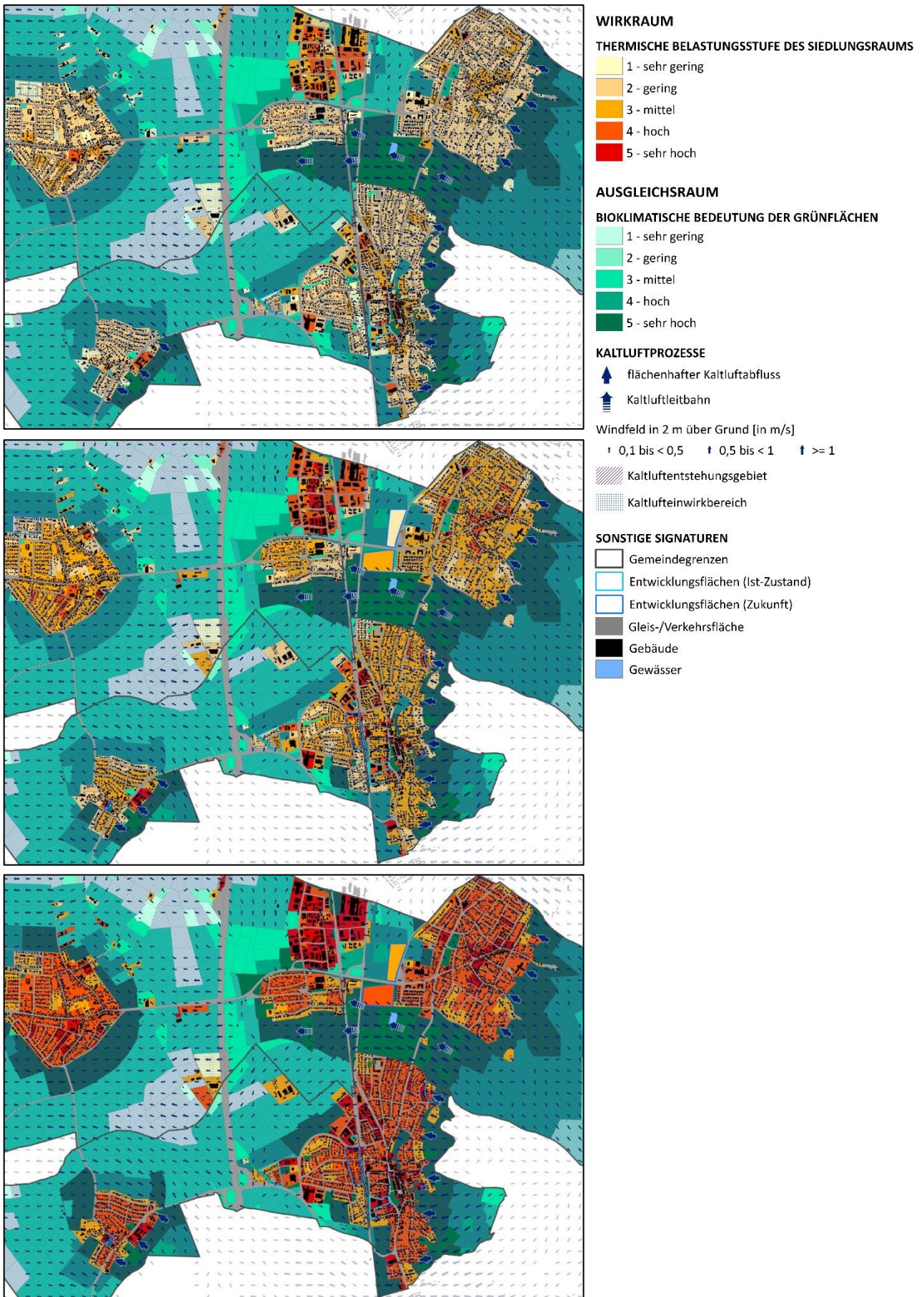


Abbildung 45: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben Ist-Situation, mitte Zukunftsszenario „moderater Klimawandel“, unten Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende



Tabelle 14: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

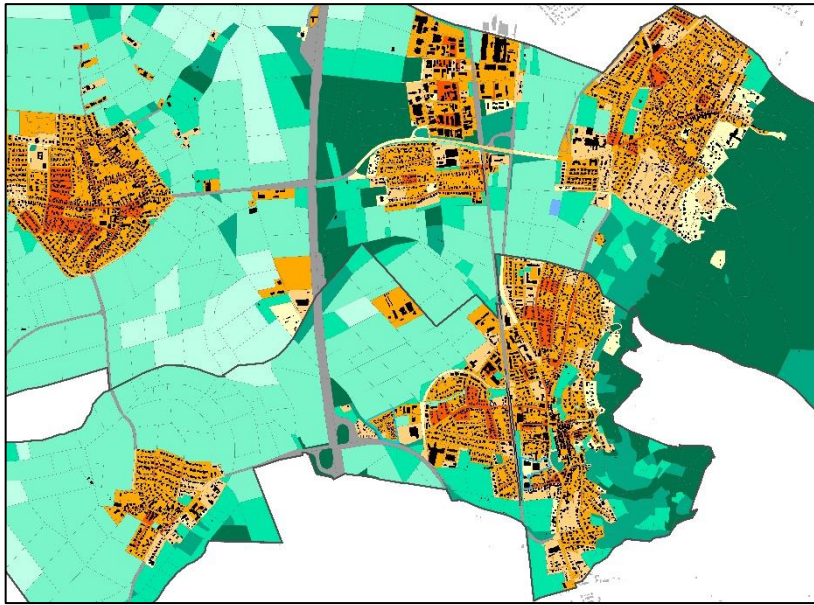
Bioklimatische Belastung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „moderater Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	10,2 %	1,6 %	1,1 %
Gering	67,2 %	20,9 %	0,5 %
Mittel	16,1 %	60,5 %	20,6 %
Hoch	6,2 %	12,3 %	61,7 %
Sehr hoch	0,3 %	3,7 %	16,1 %

Tabelle 15: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Bedeutung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	20,9 %	20,9 %	20,9 %
Gering	33,6 %	33,6 %	33,6 %
Mittel	27,3 %	27,2 %	27,2 %
Hoch	13,4 %	9,4 %	5,9 %
Sehr hoch	4,9 %	8,9 %	12,4 %

Auch die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten gezoomt auf die fünf Stadt- bzw. Ortsteile in Abbildung 46 dargestellt. Grundsätzlich verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, meist abhängig von Verschattungsgrad von Bäumen und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Ebenso wie in der Nacht sind die Wohngebiete von Alsbach vor allem im Osten im Übergang zum Odenwald sowie südlich der Melibokustraße mit der geringsten Hitzebelastung belegt. Auch in Zwingenberg ist es vorrangig der Wirkraum im Nahbereich des Odenwaldes bzw. in Rodau der Nahbereich zum Niederwald, welcher eine geringe bis sehr geringe Wärmebelastung aufweist. Dagegen sind nahezu ganz Hähnlein sowie weite Teile der übrigen Siedlungsflächen, die in der Nacht noch relativ niedrig belastet sind, am Tage aufgrund geringer oder fehlender Verschattung bereits in der Ist-Situation mittel oder hoch belastet. Eine mittlere bis hohe Hitzebelastung findet sich auch im Großteil der Gewerbegebiete.

Tabelle 16 zeigt, dass sich in der Ist-Situation 9,2 % der Siedlungsflächen in der Belastungsklasse „hoch“ befinden. Im Szenario „moderater Klimawandel“ sind es bereits 22,2 %, und im Szenario „starker Klimawandel“ deutlich über die Hälfte der Flächen (59,3 %). Die Klasse „sehr hohe bioklimatische Belastung“ wird erst im Szenario „starker Klimawandel“ nennenswert gefüllt, hier aber lediglich von 1,3 % der Flächen. Dabei handelt es sich vor allem um eine Reihe von Straßenzügen in Hähnlein sowie einzelne Siedlungs- und Verkehrsflächen in Alsbach, Zwingenberg und Hähnlein.



WIRKRAUM

THERMISCHE BELASTUNGSSTUFE DES SIEDLUNGS- & VERKEHRSRAUMS AM TAG

- 1 - sehr gering
- 2 - gering
- 3 - mittel
- 4 - hoch
- 5 - sehr hoch

AUSGLEICHSRAUM

AUFENTHALTSQUALITÄT DER GRÜNFLÄCHEN AM TAG

- 1 - sehr gering
- 2 - gering
- 3 - mittel
- 4 - hoch
- 5 - sehr hoch

SONSTIGE SIGNATUREN

- Gemeindegrenzen
- Entwicklungsflächen (Ist-Zustand)
- Entwicklungsflächen (Zukunft)
- Gleis-/Verkehrsfläche (unbew.)
- Gebäude
- Gewässer

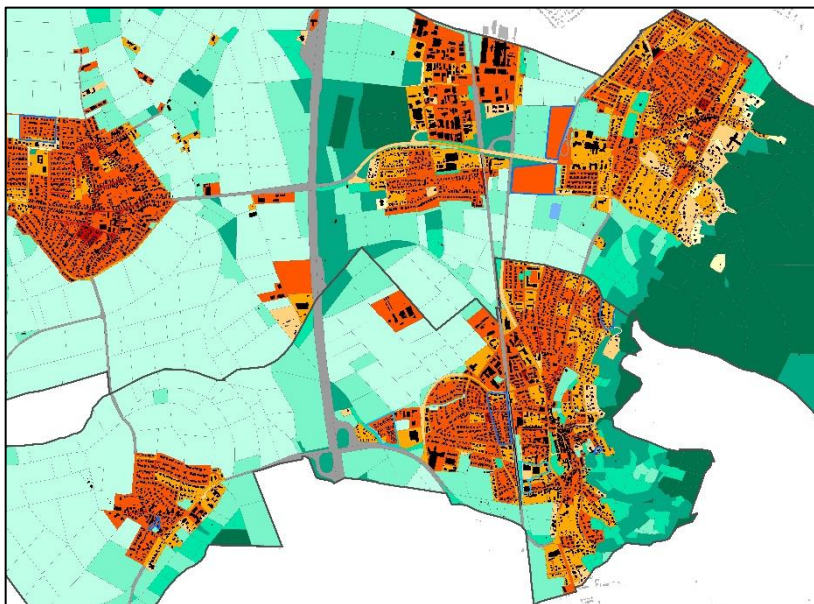
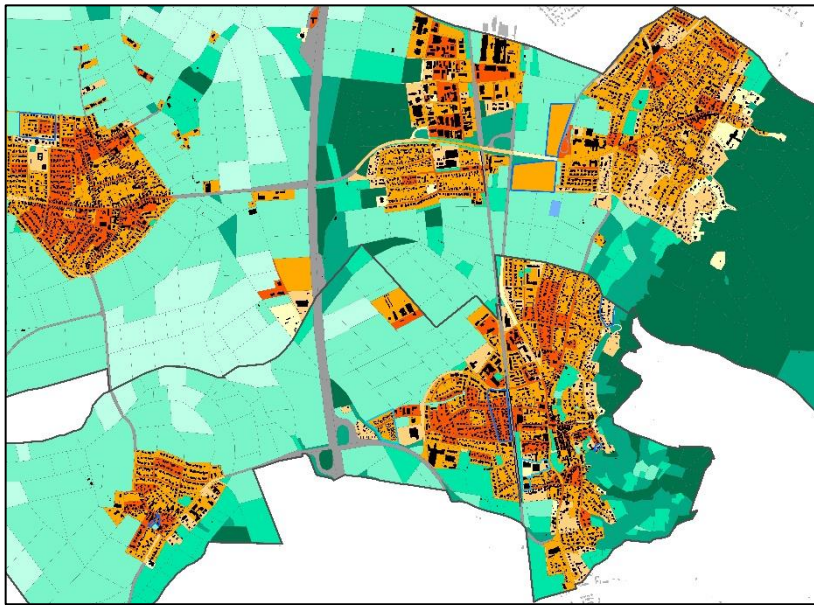


Abbildung 46: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben Ist-Situation, mitte Zukunftsszenario „moderater Klimawandel“, unten Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende



Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte in den Zukunftsszenarien an Erholungsfunktion für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation wird über ein Viertel der Grünflächen mit einer hohen oder sehr hohen bioklimatischer Bedeutung eingestuft – hierbei handelt es sich ausnahmslos um Wald bzw. Flächen mit erhöhtem Baumbestand. Im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ belegen nur noch rund 20 % eine der beiden höchsten Einstufungen. Die baumlosen Freiflächen mit niedriger Vegetation verlieren aufgrund der im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ modellierten reduzierten Bodenfeuchte am deutlichsten an Erholungsfunktion, da sie der stärksten Zunahme von PET-Werten unterliegen. Ca. 58,3 % der Grün- und Freiflächen wird im Szenario „starker Klimawandel“ nur noch eine sehr geringe bioklimatische Bedeutung zugeordnet (Ist-Situation: 29,5 %).

Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tag	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „moderater Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	7,6 %	3,9 %	1,2 %
Gering	22,1 %	15,8 %	7,7 %
Mittel	61,1 %	58,1 %	30,5 %
Hoch	9,2 %	22,2 %	59,3 %
Sehr hoch	< 0,1 %	<0,1 %	1,3 %

Tabelle 17: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung am Tage in Bezug auf den Siedlungsraum, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	29,5 %	29,2 %	58,3 %
Gering	42,2 %	40,6 %	16,4 %
Mittel	14,2 %	7,6 %	5,1 %
Hoch	12,0 %	9,7 %	9,3 %
Sehr hoch	15,8 %	12,9 %	10,9 %



6.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der sechs PHK-Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar.

Als Ziele der Planungshinweiskarte wurden definiert:

- Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebiete in ihrem Bestand sichern und vor negativen Entwicklungen schützen.
- Durchlüftung dicht bebauter Bereiche sichern und fördern.
- Flächen mit bereits deutlicher klimatischer und/oder lufthygienischer Belastung in zukünftiger baulicher Entwicklung einschränken und zusätzlich auch hinsichtlich einer Klimaanpassung weiterentwickeln

6.4.1 STADTKLIMATISCHE BELASTUNGSSITUATION IM WIRKRAUM

In den Wohn- und Gewerbeflächen sowie im öffentlichen Raum wird die stadtklimatische Belastungssituation dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) und in unbewohnten Gebieten sowie im Straßenraum und auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum; Tabelle 18).

Tabelle 18: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den Bewertungskarten Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.

Wohngebiete						Unbewohnte Gebiete							
Bewertung Nacht						Bewertung Nacht							
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
Bewertung Tag	1	1	2	3	3	4	Bewertung Tag	1	1	2	2	3	
	2	1	2	3	4	4		2	2	2	3	3	
	3	2	2	3	4	5		3	3	3	3	4	
	4	2	3	3	4	5		4	3	4	4	4	5
	5	3	3	4	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe Wärmebelastung, ..., 5 = höchste Wärmebelastung

Beispielsweise wird einem Wohngebiet, welches in der Nacht sehr hoch belastet ist (5), in Kombination mit mittlerer Belastung (3) am Tage eine Gesamt-Wärmebelastung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 18, linke Seite). Ein Gewerbegebiet mit sehr geringer Belastung (1) in der Nacht und sehr hoher Belastung (5) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Wärmebelastung bewertet (vgl. Tabelle 18, rechte Seite).

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder dem als *best case* anzusehendem Szenario Moderater Klimawandel mindestens hohe bioklimatische



Belastung aufweisen. Übernehmen die am höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die zweite Handlungspriorität. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss des Szenarios Starker Klimawandel die höchste Belastung verzeichnen und heute bereits mindestens eine mittlere Wärmebelastung aufweisen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 19 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist. Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen mit der geringsten Handlungspriorität 4 behalten auch unter der Annahme eines „starken Klimawandels“ eine höchstens mittlere Wärmebelastung. Sie können als sehr robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der dreidimensionalen Matrix aus Bestandssituation, „moderater Klimawandel“ und „starker Klimawandel“ eindeutig einer der Belastungsstufen zugeordnet werden.

Tabelle 19: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum		Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
	Handlungspriorität 1	Flächen, die bereits heute oder im Szenario „moderater Klimawandel“ eine hohe oder sehr hohe Wärmebelastung aufweisen.	10,9 %
	Handlungspriorität 2	Flächen, die heute mindestens eine mittlere Wärmebelastung und im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	18,5 %
	Handlungspriorität 3	Flächen, die im Szenario moderater Klimawandel eine mittlere und im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	48,7 %
	Handlungspriorität 4	Flächen, die im Szenario „starker Klimawandel“ höchstens eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	21,9 %

Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 18

Ein Großteil der Siedlungsflächen in der Zwingenberger Altstadt sowie dem Alsbacher Ortskern sind mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt, ebenso wie ein Großteil der Gewerbeflächen. Zusätzlich befinden sich Flächen der obersten zwei Handlungsprioritäten auch innerhalb jedes weiteren Ortsteils von Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg, wobei vor allem der Süden von Hähnlein vergleichsweise viele Flächen mit einer erhöhten Handlungspriorität aufweist.

Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 20 mit allgemeinen stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der Handlungsprioritäten 1 bis 3, die in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg ca. 78 % (vgl. Tabelle 19) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höchsten Handlungspriorität (ca. 11 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv



Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden können. In über einem Fünftel (22 %) des Siedlungsraums besteht eine geringe oder keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologischer Standards bei Entwicklungen empfohlen wird.

Hinsichtlich einer ersten Bewertung der Entwicklungsflächen (Zukunfts-Szenarien) wurde in der Planungshinweiskarte zunächst eine grobe Einteilung in die beiden Kategorien „ohne weitere Maßnahmen stadtklimaverträglich möglich“ und „mit optimierenden Maßnahmen stadtklimaverträglich möglich“. Die Entwicklungsflächen mit detaillierter Planungsgrundlage wurden durch die entsprechende Farbe der Kategorie eingerahmt, wohingegen die sehr unkonkrete Planung des Quartiers 21 mit einer flächenhaften Bewertungssignatur versehen wurden. Eine Erläuterung zu den einzelnen Entwicklungsflächen findet in Kapitel 6.4.3 statt.

Tabelle 20: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
<p>Handlungspriorität 1</p>	<p>Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen zu prüfen. Bei allen baulichen Vorhaben und Sanierungen, für die ein Bauantrag oder ein die baurechtliche Prüfung umfassender Antrag gestellt wird, oder eine Vorlage der Genehmigungsfreistellungsunterlagen erfolgt, sind Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation umzusetzen.</p>
<p>Handlungspriorität 2 und 3</p>	<p>Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind zu prüfen und auf Ihre Wirksamkeit hin zu bewerten. Bei allen Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Sanierungen, für die ein Bauantrag oder ein die baurechtliche Prüfung umfassender Antrag gestellt wird, oder eine Vorlage der Genehmigungsfreistellungsunterlagen erfolgt, sollen Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation umgesetzt werden.</p>
<p>Handlungspriorität 4 bzw. keine vorrangige Handlungspriorität</p>	<p>Die günstige bioklimatische Situation ist auch bei allen baulichen Entwicklungen möglichst zu erhalten oder zu verbessern.</p>

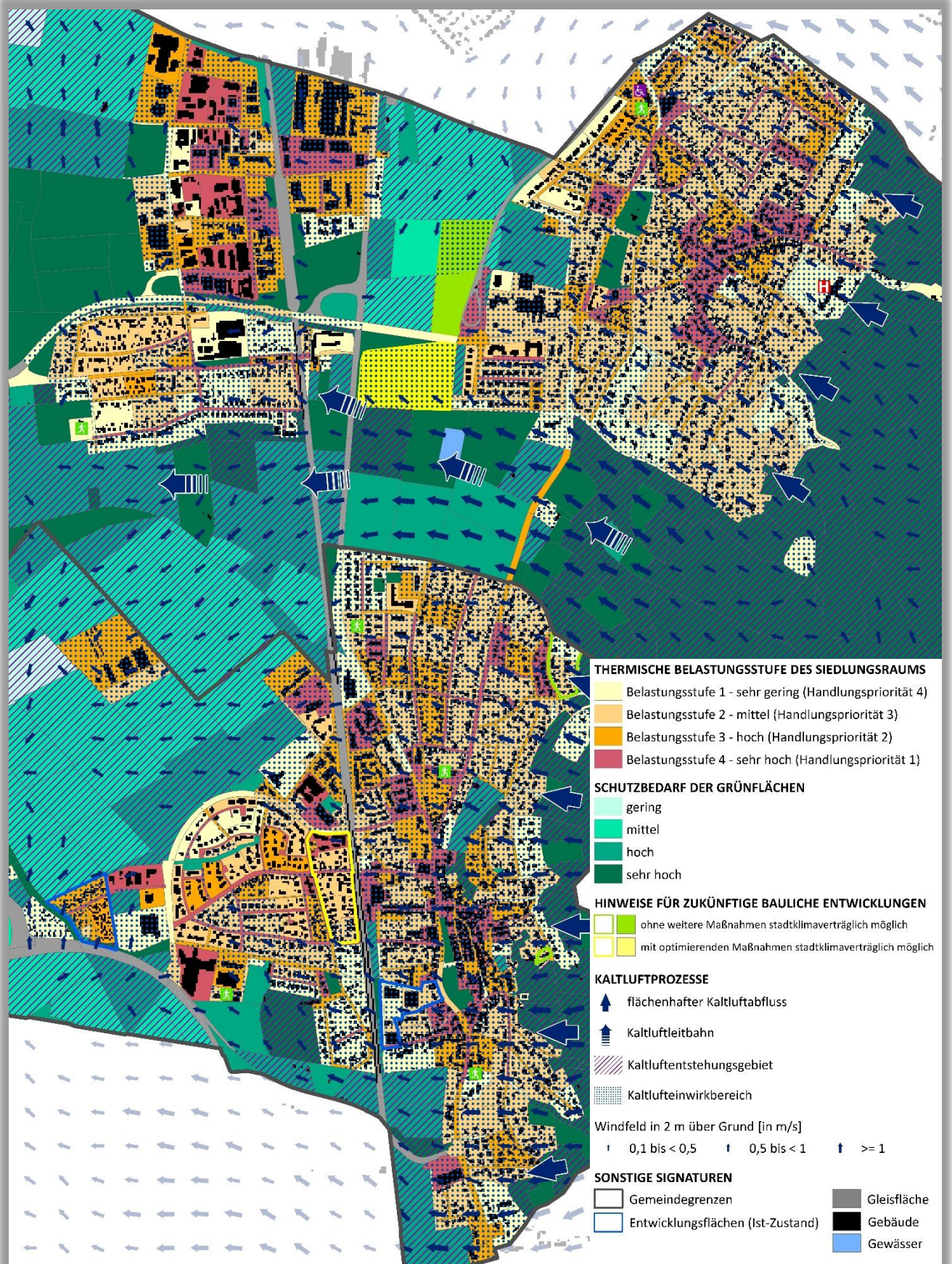


Abbildung 47: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima (gekürzte Legende).



6.4.2 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRaum

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert (Tabelle 21). Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass eine Fläche, die am Tag oder in der Nacht die höchste Bedeutung aufweist, auch einen mindestens hohen Schutzbedarf zugeschrieben bekommt.

Tabelle 21: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den Bewertungskarten Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum.

		Ausgleichsraum				
		Bewertung Nacht				
		5	4	3	2	1
Bewertung Tag	5	5	5	4	3	2
	4	5	4	3	3	2
	3	4	3	2	2	1
	2	3	3	2	1	1
	1	2	2	1	1	1

1 = höchste bioklimatische Bedeutung, ..., 5 = sehr geringe

Beispielsweise wird einer Grünfläche, welche am Tage eine sehr hohe Bedeutung (1) aufweist, in Kombination mit sehr geringer Bedeutung (5) in der Nacht eine Gesamt-Bedeutung von 2 = hoch zugeordnet (vgl. Tabelle 21). Eine im Umland liegende Freifläche mit hoher Bedeutung (2) in der Nacht und geringer Bedeutung (4) am Tage wird insgesamt mit einer mittleren (3) Bedeutung bewertet (vgl. Tabelle 21).



Tabelle 22: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Ausgleichsraum
sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	19,4 %
hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	14,4 %
mittlerer Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	36,6 %
geringer Schutzbedarf	Übrige Flächen	29,6 %

Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung. Flächen, die in mindestens einer der drei Szenarien (Ist, Zukunftsszenario „moderater Klimawandel“, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 22). Der hohe Anteil von Flächen mit hohem oder sehr hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (33,7 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Waldflächen insbesondere in Alsbach-Hähnlein zurück, die am Tag eine (sehr) hohe Bedeutung aufweisen. Aber auch einige landwirtschaftliche Flächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit hohem oder sehr hohem Schutzbedarf.

In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen. Bei einem *sehr hohen Schutzbedarf* wird eine Entwicklung beispielsweise nur dann als stadtklimamaverträglich gewertet, wenn ein Nachweis über die Erhaltung der jeweiligen Funktion erfolgt (z.B. die Funktion als Kaltluftleitbahn oder ihre Wirkung als öffentliche Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei der weiteren Abstufung ist die Funktion der jeweiligen Flächen zu beachten, wobei die Art und Größe des Vorhabens im Einzelfall bestimmen, welche Vorgaben zur stadtklimatischen Prüfung einzuhalten sind (Detailgutachten oder qualitative Stellungnahme). Dabei kann die klimafachliche Begleitung einer Planung sowohl von städtischer Seite aus als auch durch externe Gutachter erfolgen.



Tabelle 23: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
<p>sehr hoher Schutzbedarf</p>	<p>Der Erhalt oder die Verbesserung der stadtklimatischen Funktion ist notwendig und prioritär. Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) nachzuweisen. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.</p>
<p>hoher Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.</p>
<p>mittlerer Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.</p>
<p>Kein besonderer Schutzbedarf</p>	<p>Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.</p>



6.4.3 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen sind in der Planungshinweiskarte mit einer farblichen Umrandung versehen. Bei den Flächen handelt es sich um die 9 in **Tabelle 8** aufgelisteten Entwicklungsvorhaben, welche entweder bereits im Ist-Zustand (3 Flächen) oder aber erst in den beiden Zukunftsszenarien (6 Flächen) berücksichtigt wurden. Bei den Entwicklungsflächen des Ist-Zustandes handelt es sich um die B-Plan-Vorhaben, welchen bereits eine konkrete Planung unterliegt und bauplanungsrechtlich bereits zugelassen sind. So ist bei diesen davon auszugehen, dass sie bereits zeitnah umgesetzt werden. Die übrigen 6 Entwicklungsflächen haben je nach Fläche einen unterschiedlichen Konkretisierungsstand. So ist das Bauvorhaben im Bereich des Bebauungsplans „Nördlich der Spießgasse II mit KiTa“ im Ortsteil Hähnlein mittlerweile bereits in Umsetzung, wohingegen das Quartier 22 am westlichen Ortsrand vom Ortsteil Alsbach lediglich eine Potenzialfläche darstellt, für welche noch keine konkreten Planungen vorliegen. Bei den weiteren Flächen sind konkrete Planungsgrundlagen zwar bereits vorhanden, allerdings war zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht absehbar, wann von einer Umsetzung auszugehen ist.

Im Folgenden werden die Entwicklungsflächen der beiden Zukunfts-Szenarien hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Stadtklimaverträglichkeit analysiert. Dabei ist zu beachten, dass trotz teilweise relativ konkreter Planungsgrundlage die Modellierungsergebnisse aufgrund fehlender Detailplanung nur eine Annäherung an die tatsächlich zu erwartende Flächenkulisse darstellen. Dies gilt insbesondere für das Quartier 22, für welches lediglich die Flächenabgrenzung sowie die mögliche Art der Nutzung bekannt ist. So fehlen Informationen zur Lage der Verkehrswege, Gebäudestellungen sowie weiteren Elementen, weshalb der in Kapitel 4.2 beschriebene Mischpixelansatz verwendet wurde. Dieser ist als eine Art Stellvertreter für eine mögliche zukünftige Bebauung zu verstehen, wodurch sich erste Aussagen zur grundsätzlichen Umsetzbarkeit ableiten lassen.



Entwicklungsfläche Bebauungsplan „Östlich auf der Heide und nördlich der Orbisstraße“ (Zwingenberg)

Im Nordosten von Zwingenberg befindet sich die Fläche des Bebauungsplans „Östlich auf der Heide und nördlich der Orbisstraße“, für welchen entsprechend dem Bebauungsplan-Entwurf von Februar 2023 eine städtebauliche Nachverdichtung „in zweiter Reihe“ angenommen wurde. Die Fläche liegt am nordöstlichen Stadtrand in direkter Hanglage zum angrenzenden Odenwald. Dementsprechend wird das Gebiet durch die ausgewiesenen Kaltluftabflüsse (große Pfeilsignatur) sehr intensiv mit Kaltluft versorgt bzw. durchströmt (kleine Pfeile u. blaue Punktsignatur). In Verbindung mit dem auch im Nachgang der Nachverdichtung hohen Grünflächenanteil dieses Wohngebietes führt dies zu einer insgesamt günstigen klimaökologischen Situation. Diese wird durch die beiden vom Klimawandel geprägten Zukunfts-Szenarien nicht übermäßig beeinträchtigt (Handlungspriorität 3 und 4) und auch die bodennahe Durchströmbarkeit wird durch das zusätzliche Bauvolumen nicht wesentlich eingeschränkt. Hinsichtlich des Vorsorgeprinzips sollten bei der Planung die Gebäudeabstandsflächen entsprechend der Strömungsrichtung möglichst offen (Carports anstatt Garagen) sowie niedrig gehalten werden. Grundsätzlich ist eine Umsetzung bei Einhaltung der klimaökologischen Standards als vertretbar einzustufen.



Abbildung 48: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche BP „Östlich auf der Heide und nördlich der Orbisstraße“ (Orbishöhe) in Zwingenberg (grün umrandet).



Entwicklungsfläche 2. Änderung des Bebauungsplans „Lange Schneise“ (Zwingenberg)

Westlich der Zwingenberger Innenstadt befindet sich im Hangbereich des Odenwaldes die Fläche der 2. Änderung des Bebauungsplanes ZW 10 „Lange Schneise“. Innerhalb dieses Wohngebietes ist eine Nachverdichtung durch ein einzelnes neues Wohngebäude vorgesehen, welches ein Bestandsgebäude ersetzen soll. Zudem sind zusätzliche Stellplätze nördlich des geplanten Wohngebäudes geplant. Aufgrund der Hanglage am östlichen Stadtrand wird die Entwicklungsfläche ausgehend von den benachbarten Weinanbaugebieten sehr intensiv mit Kaltluft versorgt bzw. durchströmt (blaue Punktsignatur und Pfeilsignaturen). Dies sowie der sehr hohe Grünflächenanteil im direkten Umfeld der Entwicklungsfläche führen zu einer klimaökologisch günstigen Situation, welche durch den zusätzlichen Baukörper nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Dies zeigt auch die Einstufung in die relativ geringe stadtklimatische Handlungspriorität 3. Einen kleineren Optimierungsbedarf, welcher im Sinne des Vorsorgeprinzips zu nennen ist, stellen die oberirdischen Parkierungsflächen dar. Diese machen im direkten Umfeld der Bebauung einen vergleichsweise großen Flächenanteil aus und könnten z.B. in Form von Rasengitter oder vergleichbaren Teilversiegelungen gestaltet werden. Grundsätzlich ist eine Umsetzung, insbesondere bei Einhaltung der genannten Punkte, als vertretbar einzustufen.

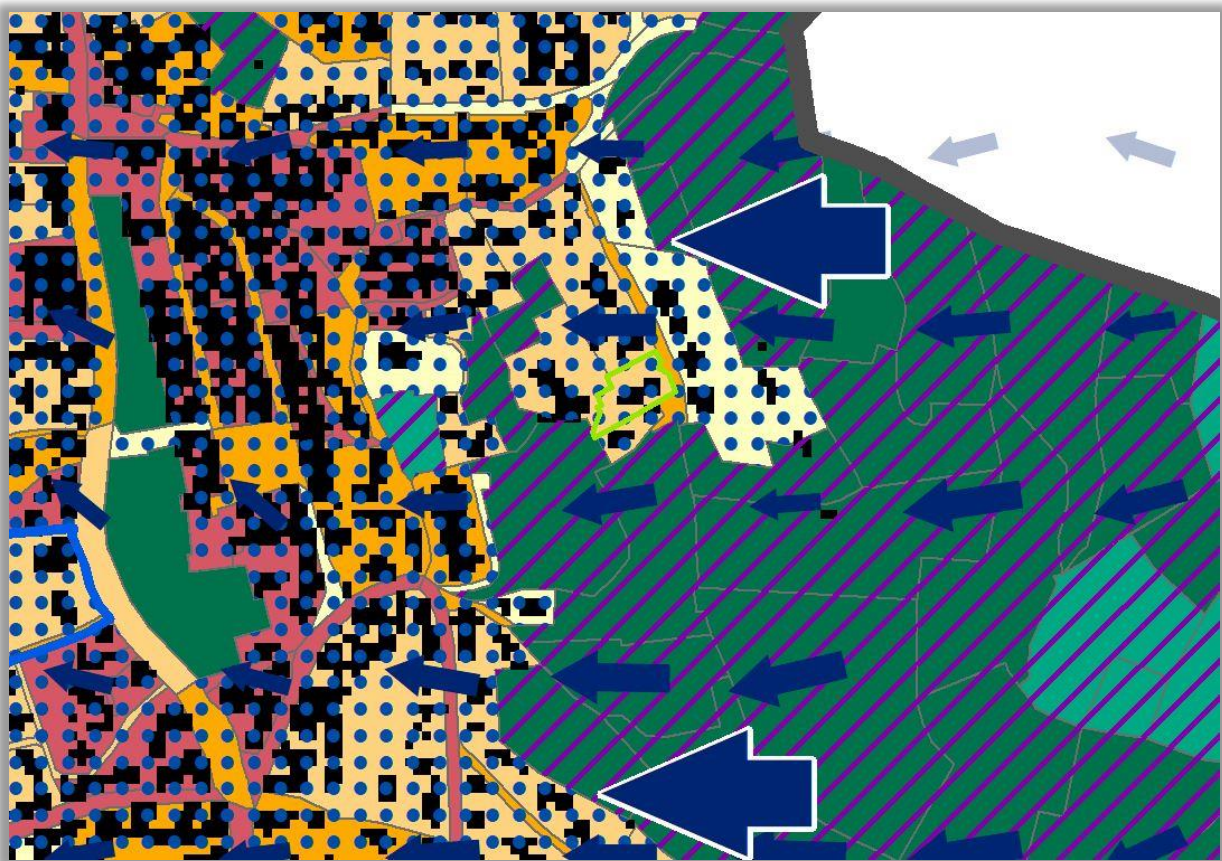


Abbildung 49: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche 2. Änderung des Bebauungsplans „Lange Schneise“ in Zwingenberg (grün umrandet).



Entwicklungsfläche Bebauungsplan „Westlich der Bahnlinie, zw. Wiesenpromenade West, Platanenallee und Ahornstraße sowie Bleichstraße“ (Zwingenberg)

Relativ zentral in Zwingenberg befindet sich die Entwicklungsfläche des Bebauungsplans „Westlich der Bahnlinie, zw. Wiesenpromenade West, Platanenallee und Ahornstraße sowie Bleichstraße“. Der städtebauliche Entwurf vom 20.1.2023 sieht dabei zum einen eine Nachverdichtung durch 27 Einzel- und Doppelhäuser im Bereich der Bestandsbebauung, sowie die Umsetzung von zwei 3-geschossigen Mehrfamilienhäusern und zwei 3 bis 4-geschossigen Gebäuden (Mischnutzung/Hotel) im Bereich einer parkartigen un bebauten Grünfläche im Norden des Geltungsbereiches vor.

Während die Bestandssituation durch den sehr hohen Grünflächenanteil eine vor allem in der Nacht sehr günstige bioklimatische Situation besitzt, wird diese durch das zusätzliche Bauvolumen in den Zukunftsszenarien zumindest teilweise deutlich beeinträchtigt. So ist insbesondere im Bereich der größeren Baukörper entlang der Platanenallee eine erhöhte thermische Belastung am Tag und in der Nacht zu erwarten (Handlungspriorität 1), wohingegen das Wohngebiet mit der Einzel- und Doppelhausbebauung aufgrund des weiterhin hohen Grünflächenanteils eine relativ günstige klimaökologische Situation beibehält (Handlungspriorität 3). Insbesondere da die Fläche durch die angrenzende Bahnlinie und die begleitende Lärmschutzwand deutlich weniger mit externer Kaltluftluft versorgt wird als vor allem das Stadtgebiet östlich der Bahnlinie, ist sie deutlich stärker auf eine gebietsinterne Kaltluftproduktion angewiesen. Durch die Planungen bleibt dieser Status größtenteils erhalten, lediglich die besagte nördliche Teilfläche sollte durch geeignete Maßnahmen optimiert werden. So sollten z.B. keine Flächen unnötig versiegelt und geprüft werden ob Teilversiegelungen eine mögliche Alternative Darstellungen. Auch zusätzliche Begrünungsmaßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen können durch zusätzliche Verdunstungskühlung eine zunehmende thermische Belastung mindern. Im Bereich des Straßenraums (überwiegend höchste thermische Belastung) innerhalb und am Rand des Geltungsbereiches sind zudem zusätzliche Straßenbäume zur Reduktion der thermischen Belastung am Tage zu empfehlen. Entsprechend der Ausführungen ist eine bauliche Entwicklung nur in Verbindung mit den beschriebenen optimierenden Maßnahmen als vertretbar einzustufen (gelbe Einstufung).



Abbildung 50: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche BP „Westlich der Bahnlinie, zw. Wiesenpromenade West, Platanenallee und Ahornstraße sowie Bleichstraße“ in Zwingenberg (gelb umrandet).



Entwicklungsfläche Bebauungsplan „Hauptstraße 12“ (Rodau)

Die Entwicklungsfläche des Bebauungsplans „Hauptstraße 12“ im Stadtteil Rodau sieht die Entwicklung dreier Wohngebäude auf aktuell unbebauten Grundstücksteilbereichen vor. Zudem soll ein Verbindungsweg für Fußgänger zwischen Hauptstraße und Auf dem Brunnen entstehen. Hinsichtlich der klimaökologischen Situation ist derzeit aufgrund des hohen Grünflächenanteils sowie der guten Kaltluftversorgung (blaue Punktsignatur und blaue Pfeile) von grundsätzlich guten Bedingungen auszugehen. Auch die zusätzliche Bebauung führt im direkten Umfeld der geplanten Gebäude zu keiner wesentlichen Verschlechterung der bioklimatischen Situation, allerdings ist im Bereich der Bestandsbebauung im Norden des Geltungsbereiches sowie im Bereich des Parkplatzes im Süden eine lokal sehr hohe thermische Belastung zu erwarten, welcher im Sinne des Vorsorgeprinzips im Zuge einer Flächenentwicklung entgegengewirkt werden sollte. So bieten sich für die Parkierungsflächen sowie den Verbindungsweg verschiedene Arten von Teilversiegelungen wie Rasengittersteine, Porenpflaster und ähnliches an. Zudem kann durch eine Erhöhung des aktuell sehr geringen Baumbestandes eine deutliche Reduktion der Wärmebelastung am Tage erzielt werden.

Entsprechend der Ausführungen ist eine bauliche Entwicklung nur in Verbindung mit den beschriebenen optimierenden Maßnahmen als vertretbar einzustufen (gelbe Einstufung).

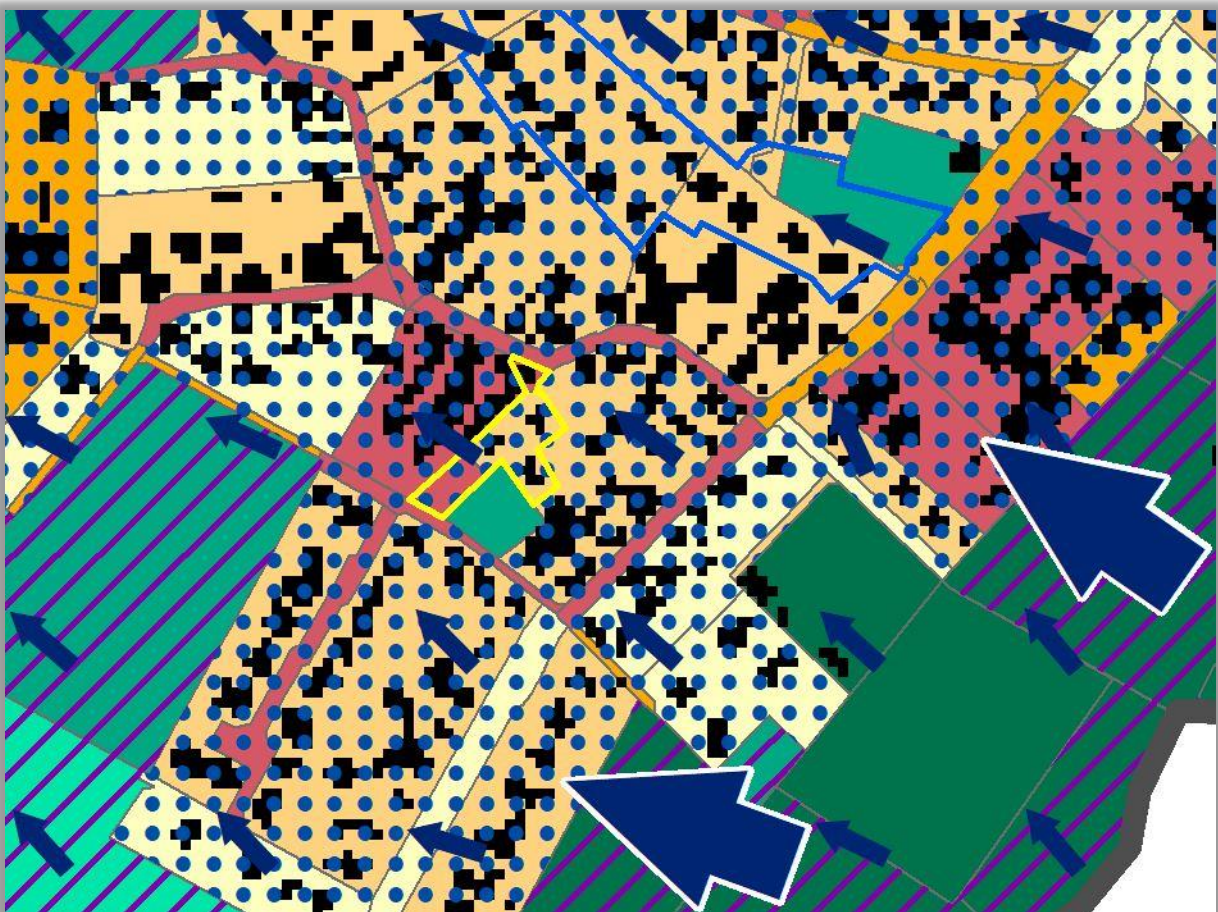


Abbildung 51: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche BP „Hauptstraße 12“ im Stadtteil Rodau (gelb umrandet).



Entwicklungsfläche „Quartier 22“ (Alsbach)

Am Westen Ortsrand von Alsbach befinden sich nördlich und südlich der L3112 die zwei Teilflächen der Entwicklungsfläche „Quartier 22“. Wie eingangs beschrieben handelt es sich hierbei um zwei Potenzialflächen hinsichtlich einer Entwicklung zweier Wohnquartiere, für welche allerdings abgesehen von der groben Flächenabgrenzung und der Nutzungsart Wohnen noch keine konkreten Planungsgrundlagen vorhanden sind. Um mögliche Auswirkungen auf die klimaökologische Situation dennoch beurteilen zu können, wurde als Platzhalter eine Wohnbebauung mit Hilfe des Mischpixelansatzes (siehe Kap. 4.2) in den Zukunfts-Szenarien berücksichtigt. Dabei wurde das benachbarte Wohngebiet südöstlich des Kreisverkehrs als Referenz hinsichtlich der Nutzungsverteilung herangezogen. Aufgrund der sehr unkonkreten Planungsgrundlagen sind die Ergebnisse dieser Analyse nur als eine Annäherung an tatsächlich zu erwartende Auswirkungen auf die klimaökologische Situation zu verstehen. Dennoch eignen sich die Modellergebnisse hinsichtlich einer Einschätzung, ob eine bauliche Entwicklung grundsätzlich stadtklimaverträglich umsetzbar ist.

Aufgrund ihrer jeweiligen Lage sind beide Teilflächen unterschiedlich zu bewerten. So befindet sich die nördliche Teilfläche vollständig im von Ortsteil Alsbach ausgelösten Windschatten und gehört im Ist-Zustand keinem besonderen Kaltluftströmungssystem an. Als Landwirtschaftliche Freifläche weist sie im aktuellen Zustand allerdings eine hohe Kaltluftproduktivität auf, wobei die klimaökologische Wertigkeit insgesamt als mittel einzustufen ist. Durch die angenommene Bebauung in den Zukunfts-Szenarien konnten keine wesentlichen Auswirkungen auf benachbarte Siedlungsflächen ausgemacht werden und auch die bioklimatische Situation innerhalb der Fläche ist in Anbetracht der angenommenen Nutzungsstruktur tendenziell günstig. Grundsätzlich ist eine Umsetzung also als stadtklimatisch vertretbar einzustufen.



Abbildung 52: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche „Quartier 22“ am westlichen Ortsrand von Alsbach (grün/gelb eingefärbt).



Für die südliche Teilfläche gelten teilweise die gleichen Punkte wie für die nördliche. So liegt auch diese teilweise im Windschatten vom Ortsteil Alsbach, allerdings befindet sich der Südteil im Randbereich der ausgewiesenen Kaltluftleitbahn (große Pfeilsignatur), welche insbesondere den Ortsteil Sandwiese mit Kaltluft versorgt. Aus diesem Grund sollte hinsichtlich einer zukünftigen Umsetzung entlang der südlichen Gebietsgrenze ein ca. 30 m breiter Pufferstreifen entstehen, um die Kaltluftströmung nicht zu stark zu beeinflussen. Zusätzliche Optimierungsmaßnahmen können zudem eine reduzierte Gebäudehöhe (z.B. max. 2 Vollgeschosse) sowie eine möglichst offene Bauweise im Süd- bzw. Südwestteil der Fläche sein.

Entsprechend den Ausführungen ist eine bauliche Entwicklung der südlichen Teilfläche des Quartiers 22 nur in Verbindung mit den beschriebenen optimierenden Maßnahmen als vertretbar einzustufen (gelbe Einstufung).



Entwicklungsfläche Bebauungsplan „Nördlich der Spießgasse II mit KiTa“ (Hähnlein)

Im Nordwesten vom Ortsteil Hähnlein befindet sich die Entwicklungsfläche des Bebauungsplans „Nördlich der Spießgasse II mit KiTa“, auf welcher ein Allgemeines Wohngebiet bestehend aus Einzel-, Doppel und Reihenhäusern entstehen soll bzw. sich mittlerweile schon in der Entstehung befindet. Durch die Feldrandlage sowie den auch in den Zukunfts-Szenarien noch relativen hohen Grünflächenanteil ist trotz einer angenommenen vollständigen baulichen Erschließung weiterhin eine überwiegend günstige klimaökologische Situation für den Geltungsbereich zu erwarten (Belastungsstufe 1/Handlungspriorität 4). Lediglich die zentral östlichen Baufelder zeigen eine mittlere thermische Belastung (Belastungsstufe 2/Handlungspriorität 3). Optimierungspotenzial zeigt jedoch nahezu der gesamte Verkehrsraum, welcher am Tag aufgrund des geringen Verschattungsgrades eine hohe bis sehr hohe Wärmebelastung aufweist. Hinsichtlich der umliegenden Siedlungsflächen ist durch die Flächenentwicklung von keinen wesentlichen Auswirkungen auszugehen. In Anbetracht der vorherrschenden Fließrichtung der nächtlichen Kaltluft (Pfeilsignatur) wären lediglich Flächen westlich des Geltungsbereiches im Einflussbereich des Entwicklungsvorhabens. Grundsätzlich ist eine Umsetzung also als stadtklimatisch vertretbar einzustufen. Einschränkend gilt, dass hinsichtlich der hohen Wärmebelastungen im Verkehrsraum geeignete Maßnahmen (z.B. zusätzliche Baumpflanzungen) umgesetzt werden sollten.



Abbildung 53: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich um die Entwicklungsfläche BP „Nördlich der Spießgasse II mit KiTa“ im Ortsteil Hähnlein (grün umrandet).



7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert. Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 24 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Außenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Siedlungsgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Bevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Stadtklimas in Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Am Tage sind viele Siedlungsbereiche in den verschiedenen Orts- bzw. Stadtteilen hitzebelastet, was vielerorts an fehlendem Schatten durch (nicht vorhandene oder noch zu niedrige) Bäume sowie relativ niedrige Gebäude liegt. Hier kann mit den Maßnahmen M06 (→Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien), sowie an entsprechenden Stellen Entsiegelung (→ M04: Entsiegelung bzw. Versiegelungsanteil minimieren) langfristig Abkühlung bewirkt werden. Die Wohngebiete im Osten bzw. Süden von Alsbach zeigen am Tage größtenteils eine geringe bis höchstens mittlere bioklimatische Belastung. Hier befinden sich ausladende Grünflächen mit zum Teil hoher, Kühle spendender Vegetation zwischen den Gebäuden, dies es möglichst beizubehalten gilt. Auch vereinzelte Wohngebietsflächen im Osten und Süden Zwingenbergs sowie im Südosten Rodaus genießen durch die Nähe zum Wald und einen hohen Baumanteil gute bioklimatische Bedingungen.

Die hohe Hitzebelastung in den Ortskernen von insbesondere Zwingenberg und Alsbach resultiert aus der hohen Bebauungsdichte sowie dem hohen Versiegelungsgrad. Im Schatten der höheren Gebäude ist es zu den entsprechenden Tageszeiten trotzdem kühl. Es könnte im Einzelfall geprüft werden, inwiefern Entsiegelung, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung möglich ist (→ M04, M17, M18). Als Verkehrsraum sollten Fuß- und Radwege bei starker Frequentierung flächendeckend zumindest teilverschattet gestaltet sein (→ M05 Verkehrsraumgestaltung).



In der Nacht sind die außenliegenden Ortsbezirke zumindest in den Wohngebieten relativ kühl. Hier muss die Kaltluftversorgung durch das Beibehalten von lockerer Bebauungsdichte und geringem Versiegelungsgrad gesichert werden. Vor allem in den Bereichen der bedeutenden Kaltluftleitbahnen und flächenhaften Kaltluftabflüsse ist es für deren Sicherstellung entscheidend, bauliche Strömungshindernisse zu vermeiden (→ M12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, Strömung und Durchlüftung). Nicht zuletzt ist es auch für den Weinbau entscheidend, dass an den Hängen des Odenwaldes im Frühjahr die Kaltluft möglichst ungehindert in Richtung Siedlungsgebiete abfließen kann.

Die Gewerbegebiete weisen am Tage oft eine hohe bis sehr hohe bioklimatische Belastung auf. Als Beispiel sei hier insbesondere das Gewerbegebiet östlich Bahngleise im Ortsteil Sandwiese genannt, mit hohem Besucheraufkommen am Tage. Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Ggfs. kann durch Sonnenschutz an den Gebäuden die thermische Belastung in den Innenräumen reduziert werden (→ M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen).

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je grösser die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Bachläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Strukturreiche, gut wasserversorgte Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die Waldgebiete und Weinhänge am Odenwald stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch Parkanlagen innerhalb der Stadt, wie zum Beispiel der Stadtpark (Zwingenberg) und Erpeltpark (Alsbach) zu bewahren und ggfs. neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als



„Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

Bäume (und Sträucher) übernehmen neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei breiteren Straßenräumen (z.B. Rodauer Str., Alsbacher Str. in Zwingenberg und Bahnhofstraße, Hauptstraße in Alsbach) bieten sich ein oder beidseitige Begrünungen durch Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter weniger verschatten und geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben, was zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Treibhausgasemissionen führen kann. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern oder auch Arbeitszimmern und Büroräumen der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M16, M17, M19, M20).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden, insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung. In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei aus stadtklimatischer Sicht eine weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die



sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Straßenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren (→ M11: (Temporäre) Saisonale klima-angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume).



Tabelle 24: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für Alsbach-Hähnlein und Zwingenberg.

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
<p>01 Innen-/Hinterhofbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Erhöhung der Aufenthaltsqualität Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Innen- und Hinterhöfe, vorrangig im Altstadtkern 	<p>Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: Jan Weber-Ebnet)</p>
<p>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Baulücken, größere Hinterhöfe (?) (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) 	<p>Bild: In der Altstadt, Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption ▪ Baumaterialien, die wenig Wärme speichern

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) ▪ ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Helle Fassade in Ulm (Quelle: J. Förster, GEO-NET)

04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ Anzahl an oberirdischen Stellplätzen verringern zugunsten von Grünflächen

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe



Bild: Rasengittersteine, Parkplatz in Lüneburg (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>05</p> <p>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils entlang von Fuß- und Fahrradwegen (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“ 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsigelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	<p>Bild: Grünzug Böbig in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: www.neustadt.eu)</p>
<p>06</p> <p>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld 	<p>Bild: Am Daniel-Meininger-Platz / Innungsbaum in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	<p>Bild: Hetzelanlage, Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>
08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	<p>Bild: Kriegergarten, Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen 	<p>Bild: Brunnen am Daniel-Meiningner-Platz in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>
<p>10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze 	<p>Bild: Regenwasserteich, Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: M. Lübbecke)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>11 (Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen ▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: „Wanderbaumallee“ in Hannover (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) ▪ Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung ▪ Reduktion des Wärmestaus 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Neubau, Gebäudekomplexe ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

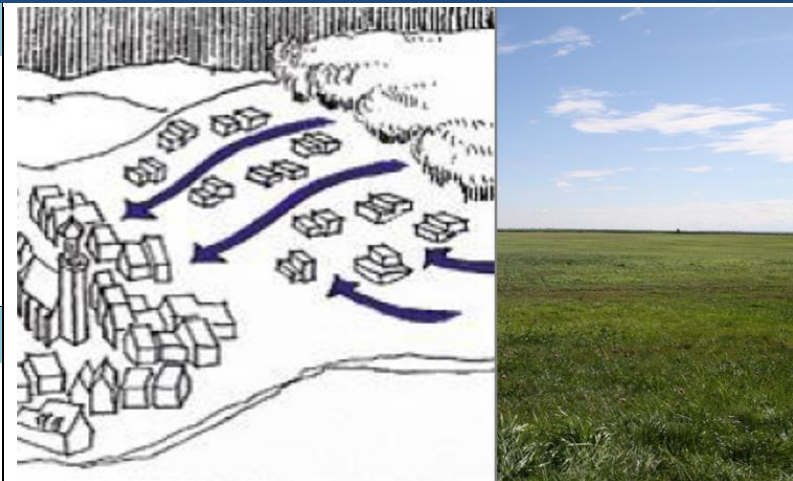


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>13 Optimierung der Gebäudety-pologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anlie-genden Grün- und Parkanlagen Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig über-baute Fläche halten das kleinskalige Strömungsge-schehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaus-tauschsysteme Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks 	
<p>14 Entdichtung (Rückbau)</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungs-dichte und das Bauvolumen 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswasserma-nagement 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen Garagen Lagerhallen ggf. Industrie- und Gewerbebrachen Bahnanlagen 	

Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)

Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: J. Förster, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>15</p> <p>Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben ▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft
	<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung ▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung ▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage
	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen



Bild: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: D. Leßmann, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>16</p> <p>Dachbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)
	<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz ▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich ▪ Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität
	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdächer, ▪ ggf. flach geneigte Dächer ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)



Bild: Symbolbild Dachgrün (Quelle: J. Gerstenberg / pixelio)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17 Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)



Bild: Fassadenbegrünung in der Altstadt von Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)

18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	Kurzerläuterung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen (Quelle: © Janko Löbig, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19 Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Kurzerläuterung

- Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme

Wirkung

- in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs
- Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Bestand)

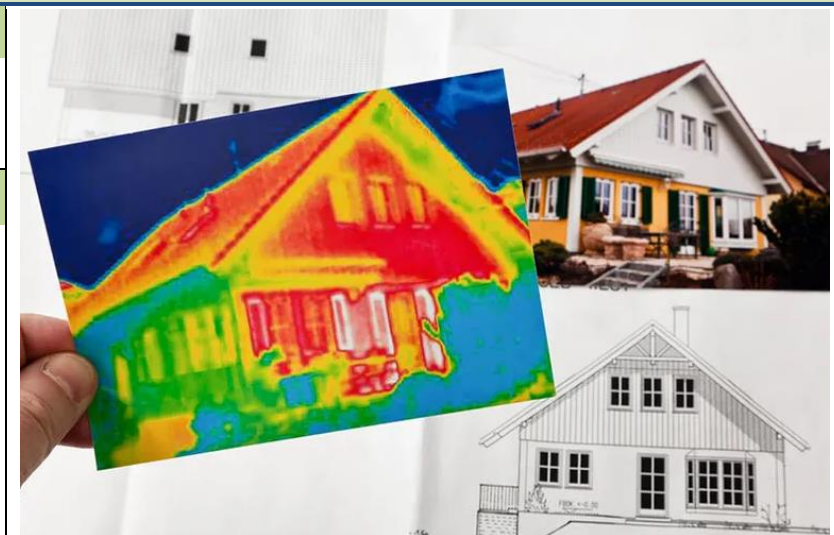


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)

20 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

- Möglichst ressourcenschonende Lösung
- Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird
- Erdkältenutzung
- Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

Räumliche Umsetzung

- Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

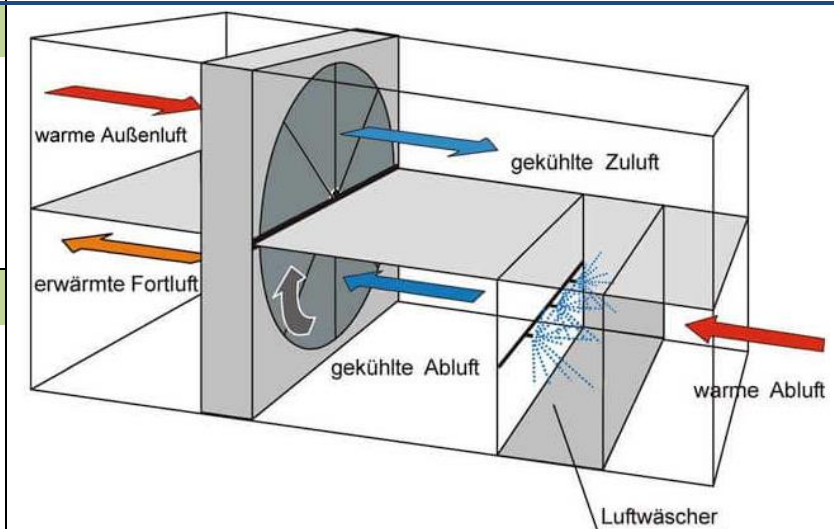


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>21 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum)
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege) vorwiegend im Neubau umsetzbar



Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums.
(Quelle: G. Meusel, GEO-NET)



Quellenverzeichnis

- An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- BFN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BFN-Skripten 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik> (Abruf Januar 2023).
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Cannon A.J.; Sobie S.R.; Murdock T.Q. (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? J. Climate, 28, 6938–6959.
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen.
- DKRZ - Deutsche Klimarechenzentrum (2023): Die SSP-Szenarien. Online: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2023a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2023b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2023c): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023d): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtprojekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regionale level: The CORDEX Framework, WMO BULLETIN, 58(3):175-183.



- Groß, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002)
DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (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 – In Vorbereitung.*
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf



- Kaspar F., Müller-Westermeier G., Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *ADV. SCI. RES.*, 10, 99–106
- Kuttler, W. (2013): *Klimatologie*. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: *PLOS Medicine*.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kai-numa M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change re-search and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4–6.
- Piani C., Haerter J.O., Coppola E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99:187–192
- R Core Team (2019): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REKLIES-DE (2017): *REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND - NUTZERHANDBUCH*.
- SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. *UNU Workingpaper*.
- Schär, Ch., Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- S Jena (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). *Nature* 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>
- Thiemeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31(10):1530–1544.



UBA (2005): Gesünder Wohnen — Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.

UBA (2019): Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr (HBEFA). Umweltbundesamt.

UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.

UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>

UBA – Umweltbundesamt (2022a): Trends der Lufttemperatur. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit>

UBA – Umweltbundesamt (2022b): Trends der Niederschlagshöhe. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Heiße Tage. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>

Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenthaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.

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

VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.

VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008a) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.

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

VDI (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.

VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.

VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.



Anhang

Tabelle A 1: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	✗	✗	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	✗	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	✗	✗
8	MIROC5	REMO2015	✓	✗	✗	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	✗	✗	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	✗	✗
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	✗	✗
15	MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	✗	✗
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

Tabelle A 2: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses.

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
≥ 2,0	sehr stark zunehmend
≥ 1,5 und < 2,0	stark zunehmend
≥ 1,0 und < 1,5	schwach zunehmend
< 1,0 und > -1,0	kein Trend
≤ -1,0 und > -1,5	schwach abnehmend
≤ -1,5 und > -2,0	stark abnehmend
≤ -2,0	sehr stark abnehmend



Tabelle A 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

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