

Stadtklimaanalyse für den Gemeindeverband Mittleres Schussental

Anhang A: Technischer Bericht zur Stadtklimaanalyse
im Projekt „Klimaanpassungskonzept GMS“



August 2023

GEO-NET Umweltconsulting
www.geo-net.de



im Auftrag des Gemeindeverbandes
Mittleres Schussental



Gemeindeverband
Mittleres
Schussental

Das Projekt „Klimaanalyse und Verwundbarkeitsuntersuchung auf Ebene der vorbereitenden Bauleitplanung des Gemeindeverbands Mittleres Schussental“ zielt darauf ab, den Gemeindeverband Mittleres Schussental und seine Kommunen bestmöglich an die Auswirkungen des Klimawandels in verschiedenen Handlungsfeldern anzupassen.

Als fachliche Grundlage wurden u.a. vorangehend detaillierte Untersuchungen zum Stadtklima¹ (modellbasierte Klimaanalyse) durchgeführt.

Der Hauptbericht dient dabei als allgemeinverständliche Synthese der Fachberichte und stellt die Maßnahmen zur Klimaanpassung im GMS vor.

Das vorliegende Dokument beschreibt ausführlich die für die Stadtklimaanalyse verwendeten Methodiken und erläutert die entstandenen Produkte. Es stellt somit einen Anhang zum Hauptbericht dar.

Auftraggeber

Gemeinde Verband Mittleres Schussental (GMS)

Stadt Ravensburg
Salamanderweg 22
88212 Ravensburg



Gemeindeverband
Mittleres
Schussental

Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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



HHP Raumentwicklung

Lena Riedl GbR
raumplaner | landschafts-
architekten

Gartenstr. 88
D-72108 Rottenburg a.N.
+49 7472 9622 0
www.hhp-raumentwicklung.de



¹ Im vorliegenden Bericht wird einheitlich der Begriff „Stadtklimaanalyse“ verwendet. Der Begriff leitet sich vom Fachausdruck „Stadtklima“ ab, der beschreibt, dass vom Menschen erschaffene Siedlungen jeder Art das Klima der bodennahen Atmosphäre beeinflussen. Die beschriebenen Phänomene beziehen sich also auf das gesamte Siedlungsgebiet innerhalb der GMS Kommunen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Glossar	VI
1. Anlass und Hintergrund	1
2. Fachliche Grundlagen	3
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	3
2.2 Wärmeineffekt und Kaltluftprozesse	7
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	9
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	13
4. Klima und Klimawandel im Raum Mittleres Schussental.....	16
4.1 Ergänzende Daten zum Gegenwärtigen Klima	16
4.2 Autochthone Wetterlagen	17
5. Analysemethoden	18
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	18
5.2 Szenarien-Entwicklung	22
5.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	24
5.4 Rahmen- und Randbedingungen der Modellierung.....	29
5.5 ModellausgabeGrößen	31
5.6 Qualitätssicherung	32
5.7 Unsicherheiten und Herausforderungen	33
6. Analyseergebnisse	37
6.1 Modellierungen.....	37
6.2 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	40
6.3 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht.....	45
6.4 Wärmebelastung am Tag (PET).....	50
7. Zwischenprodukte	53
7.1 Klimaanalysekarten	53
8. Endprodukte	59
8.1 Grundlagen	59
8.2 Geometrische Basis.....	60
8.3 Bewertungskarten.....	61

8.4	Planungshinweiskarte	76
8.5	Ergänzende Endprodukte.....	83
8.6	Stadtklimamanagementsystem.....	86
	Quellenverzeichnis.....	88
	Anhang.....	91

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	3
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2022).....	4
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)	5
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	6
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	7
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	8
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18)	11
ABBILDUNG 8: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE.....	13
ABBILDUNG 9 KLIMADIAGRAMM FÜR DEN GMS FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF RASTERDATEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023D).....	16
ABBILDUNG 10: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) AN DER DWD-STATION WEINGARTEN FÜR DEN ZEITRAUM 1998 – 2020 (DWD 2023C)	17
ABBILDUNG 11: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D (EIGENE ABBILDUNG).....	21
ABBILDUNG 12: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES (EIGENE ABBILDUNG).....	22
ABBILDUNG 13. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE)	23
ABBILDUNG 14: MODELLGEBIET DER SKA, ZUR ORIENTIERUNG SIND DIE GEBÄUDE UND GEWÄSSER, SOWIE DIE GEMEINDEGRENZEN DARGESTELLT.	25
ABBILDUNG 15: DIGITALES GELÄNDEMOMENT FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET.	26
ABBILDUNG 16: MODELLEINGANGSDATEN „LANDNUTZUNGSKLASSEN“ FÜR DEN STATUS QUO IN EINEM AUSSCHNITT DER STADT RAVENSBURG (LINKS) UND FÜR DIE ZUKUNFTS-SZENARIEN IN EINEM AUSSCHNITT MIT MÖGLICHEN ENTWICKLUNGEN IM SÜDEN VON RAVENSBURG (MITTE).....	26
ABBILDUNG 17: BEISPIELBILD ZUR IDENTIFIZIERUNG VON FLÄCHENZWILLINGEN ZUR RANDOMISIERTEN BEFÜLLUNG VON MISCHPIXELFLÄCHEN.....	27
ABBILDUNG 18: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION.....	28
ABBILDUNG 19: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992).	29
ABBILDUNG 20: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION (BLAUE LINIE) SOWIE EXEMPLARISCH FÜR DAS SZENARIO „STARKER“ KLIMAWANDEL (ORANGE).....	30
ABBILDUNG 21: KARTE AB 1: BODENNAHE NÄCHTL. LUFTTEMPERATUR IM STATUS QUO IM GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	41
ABBILDUNG 22: KARTE AB 13: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM STATUS QUO IM GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	43
ABBILDUNG 23: KARTEN AB 2 & 3: BODENNAHE NÄCHTL. LUFTTEMPERATUR IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	44
ABBILDUNG 24: KARTE AB 10: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IM GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	46

ABBILDUNG 25: KARTE AB 4: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IM GMS, WINDPFEILE AGGREGIERT AUF 200M AUFLÖSUNG (VERKÜRZTE LEGENDE).	47
ABBILDUNG 26: AUSSCHNITT: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IN RAVENSBURG RUND UM DIE SCHUSSENSTRASSE (WINDPFEILE AGGREGIERT AUF 50M AUFLÖSUNG).....	48
ABBILDUNG 27: KARTE AB 12: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL IM GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).....	49
ABBILDUNG 28: KARTE AB 7: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IM STATUS QUO IM GMS (VERKÜRZTE LEGENDE)....	51
ABBILDUNG 29: KARTEN AB 8 & 9: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	52
ABBILDUNG 30: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN	54
ABBILDUNG 31: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTABFLÜSSEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG)	56
ABBILDUNG 32: KARTE AB 16: KLIMAANALYSEKARTE (STATUS QUO) IN EINEM AUSSCHNITT DES MITTLEREN SCHUSSENTALES (VERKÜRZTE LEGENDE).....	57
ABBILDUNG 33: KARTE AB 17: KLIMAANALYSEKARTE (SZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL) IN EINEM AUSSCHNITT DES MITTLEREN SCHUSSENTALES (VERKÜRZTE LEGENDE).	57
ABBILDUNG 34: KARTE AB 18: KLIMAANALYSEKARTE (SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL) IN EINEM AUSSCHNITT DES MITTLEREN SCHUSSENTALES (VERKÜRZTE LEGENDE).	58
ABBILDUNG 35: DARSTELLUNG DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUREN: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE.	60
ABBILDUNG 36: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008).	61
ABBILDUNG 37: 5-STUFIGE BEWERTUNGSSKALA FÜR DEN AUSGLEICHSPUNKT IN DER BEWERTUNGSKARTE NACHT 64	
ABBILDUNG 38: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	65
ABBILDUNG 39: KARTE AB 19: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	68
ABBILDUNG 40: KARTE AB 20: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM SZENARIO P1 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	69
ABBILDUNG 41: KARTE AB 21: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM SZENARIO P2 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	70
ABBILDUNG 42: KARTE AB 22: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).....	73
ABBILDUNG 43: KARTE AB 23: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM SZENARIO P1 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).....	74
ABBILDUNG 44: KARTE AB 24: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM SZENARIO P2 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).....	75
ABBILDUNG 45: LEGENDENELEMENTE DER PLANUNGSHINWEISKARTE.....	79
ABBILDUNG 46: KARTE AB 25: PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DAS MITTLERE SCHUSSENTAL (VERKÜRZTE LEGENDE). 80	
ABBILDUNG 47: KARTE AB 25: DETAILAUSSCHNITT AUS DER PHK FÜR DEN GMS (VERKÜRZTE LEGENDE).	83
ABBILDUNG 48: KARTE AB 26: AUS DER SKA ABGELEITETE STADTKLIMATISCHE HOTSPOTS FÜR DAS MITTLERE SCHUSSENTAL	84
ABBILDUNG 49: KARTE AB 27: STADTKLIMATISCH WERTVOLLE ÖFFENTLICH ZUGÄNGLICHE GRÜNFLÄCHEN IM GMS. ..	85
ABBILDUNG 50: KARTE AB 28: BESONDERS WICHTIGE KALTLUFTPROZESSE IM GMS.	86
ABBILDUNG 48: BEISPIELBILD EINER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB EINES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	87

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN ...	12
TABELLE 2: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M.....	19
TABELLE 3: ENTWICKELTE SZENARIEN FÜR DAS MITTLERE SCHUSSENTAL UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	24
TABELLE 4: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS IM GMS ALS BASIS FÜR DIE REFERENZSITUATION SOWIE DIE ZUKUNFTSSZENARIOS	28
TABELLE 5: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER	31
TABELLE 6: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	32
TABELLE 7: IM PROJEKT ERZEUGTE KARTEN.....	37
TABELLE 8: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	55
TABELLE 9: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.	62
TABELLE 10: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND UND IM ZUKUNFTSSZENARIO.....	67
TABELLE 11: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHN- UND GEWERBERAUM.....	76
TABELLE 12: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE BELASTUNGEN FÜR DEN WIRKRAUM.....	77
TABELLE 13: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM.	77
TABELLE 14: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE BEDEUTUNGEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM.	78
TABELLE 15: FLÄCHENANTEILE DER STADTKLIMATISCHEN BELASTUNG IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	81
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER STADTKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSPAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.....	82

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.

Ausgleichsraum: Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkraum 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.

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 Innender oder Derteilzentrum).

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).

Kaltluftabflüsse: Kaltluftabflüsse treten flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf und spielen im hügeligen GMSer Stadtgebiet eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese Beschleunigung weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als → *Flurwinde*, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen.

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* $> 44,9 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder einer bodennahe Windgeschwindigkeit $\geq 0,2 \text{ m/s}$ durchflossen werden.

Kaltluftleitbahnen: Vorwiegend lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander verbinden und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, sollten als Faustregel jedoch mindestens 50 m breit sein (Mayer et al. 1994).

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit $m^3/(s \cdot m)$). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

PET (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 Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien: 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 sozioökonomischen 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 (*Representative Concentration Pathway*).

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 → *Autochthone Wetterlage*

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

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

z-Transformation: Die z-Transformation ist ein mathematisches Verfahren zur Standardisierung. Über die z-Transformation werden (vereinfacht gesagt) Werten mit verschiedenen Einheiten eine neue gemeinsame „Standardabweichungs-Einheit“ zugewiesen. Das Ergebnis der z-Transformation sind sogenannte "z-Werte", die die Standardabweichungen vom Mittelwert darstellen. Ein z-Wert von 0 entspricht genau dem Mittelwert, ein z-Wert von 1 bedeutet, dass dieser Wert eine Standardabweichung oberhalb des Mittelwerts liegt. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, sodass beispielsweise die relativen Unterschiede der thermischen Belastung in einem Stadtgebiet miteinander verglichen werden können.

1. Anlass und Hintergrund

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und städtebaulicher Entwicklungen haben die Themen Stadtklima bzw. Klimawandelanpassung in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen – sowohl hinsichtlich der Gesetzgebung (bspw. Novellierung des BauGB 2011 und des UVPG 2017) als auch im Bewusstsein der Bevölkerung. Nicht zuletzt aufgrund der Lage im Schussental spielt das Thema Stadtklima eine wichtige Rolle für das Leben im Gemeindeverband Mittleres Schussental (GMS). Dabei bezieht sich dieser Begriff nicht nur auf das Klima in Städten, sondern auf die klimatischen Veränderungen, die durch vom Menschen geschaffene Siedlungsstrukturen allgemein hervorgerufen werden. Weiterhin bezieht der Begriff sich auch darauf, welche Ausgleichsströmungen zwischen der umliegenden Landschaft und diesen anthropogen überprägten Strukturen entstehen. Mit der regionalen Klimaanalyse Bodensee Oberschwaben (REKLIBO 2008-2009) und/sowie der regionalen Klimaanalyse Mittleres Schussenbecken (REKLISCHUB 2009 - 2011) wurde bereits eine fachliche Grundlage der stadtklimatischen Situation für das Mittlere Schussental erarbeitet (Schwab & Zachenbacher 2009). Die Ergebnisse beruhen auf einer Untersuchung der Wärmebelastung durch Thermalkartierungen und die Modellierung nächtlicher Kaltluftbewegungen mit einem Kaltluftabflussmodell (Klam_21), ergänzt durch eine Überprüfung der Modellergebnisse durch umfangreiche Messprogramme (u.a. Messstationen, Messfahrten, Handmessungen). Die Analyseergebnisse liefern u. a. wichtige Informationen über die zeitliche Entwicklung der Kaltluftprozesse im Mittleren Schussental. Ausgehend von den Betrachtungen für das gesamte Schussenbecken gab es in der Folge Einzelgutachten zu den stadtklimatischen Auswirkungen von B-Plan-Verfahren in verschiedenen Teilgebieten des GMS (z. B. Wohnbaugebiet „Oberer Büchelweg“, IMA Richter & Röckle 2012).

Um den Belangen des Stadtklimas planerisch adäquat begegnen zu können, sind aktuelle Informationen in geeigneter räumlicher Auflösung erforderlich. Außerdem sind solche Daten für das parallel erarbeitete Klimaanpassungskonzept (KLAK), sowie für die Aktualisierung des Flächennutzungsplanes, sowie des Landschaftsplanes von Relevanz (Details zur Verzahnung siehe Hauptteil des Berichts zum KLAK). Aus diesem Grund hat sich der GMS für eine Aktualisierung der Stadtklimaanalyse entschieden, die dem Stand der Technik gemäß auf einer hochauflösenden Klimamodellierung beruht. Es wurde das Stadtklimamodell FITNAH-3D mit einer horizontalen Auflösung von 10 m verwendet². Mit den Ergebnissen kann neben der Nachtsituation (Lufttemperatur, Kaltluftströmungen) auch die Wärmebelastung am Tage flächendeckend für das gesamte mittlere Schussental bewertet werden. Zur Validierung der aktuellen modellgestützten Stadtklimaanalyse wurde im Rahmen eines Fachaustausches ein Vergleich zu bestehenden Erkenntnissen für den GMS vorgenommen. Dieser Prozess und seine Auswirkungen werden im Kapitel 5.6 genauer beschrieben.

² Eine horizontale Auflösung von 10 m bedeutet, dass das Verbandsgebiet des GMS in Rasterzellen von 10 m x 10 m-Größe unterteilt wird. Im Vergleich zur 2009 in KLAM_21 verwendeten Auflösung (90 m x 90 m-Rasterzellen) erhöht sich die Genauigkeit um den Faktor 90, wodurch die für die Modellierung relevanten Eingangsdaten genauer erfasst (Gebäude und großkronige Bäume können berücksichtigt werden) und in der Folge die Modellergebnisse differenzierter dargestellt werden können.

Mit der Stadtklimaanalyse möchte der GMS nicht nur den Bestand abbilden, sondern darüber hinaus auf die Folgen des Klimawandels eingehen. Dazu wurden im Projekt zwei Szenarien eines zukünftigen Klimas für das mittlere Schussental im Jahr 2030 - 2040 entwickelt. Die Szenarien enthalten neben den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels (zunehmende Temperaturen und sommerliche Trockenheit) auch eine Kulisse möglicher Siedlungsentwicklung im GMS, deren stadtklimatische Bewertung einen hilfreichen Abwägungsbeleg bei der tatsächlichen Siedlungsentwicklung in GMS darstellen soll. Zum anderen wird die Stadtklimaanalyse in das oben erwähnte **Projekt „Klimaanalyse und Verwundbarkeitsuntersuchung auf Ebene der vorbereitenden Bauleitplanung des Gemeindeverbands Mittleres Schussental“** eingebettet. Auf Basis einer Betroffenheitsanalyse für verschiedene Handlungsfelder wird dabei ein **Handlungskonzept zur Klimaanpassung** im GMS erstellt, das Möglichkeiten aufzeigen soll, wie die Klimaanpassung zukünftig bei der Gestaltung von Quartieren, Freiräumen und Gebäuden in GMS umgesetzt werden kann (siehe Hauptteil des Berichtes zum KLAK). Darin werden Wege zur Umsetzung und Verstetigung der Klimaanpassung aufgezeigt, die eine weitere Integration des Themenfeldes in die Verwaltungspraxis erleichtern und fördern sollen. So sollen die Anpassungsstrategie für den GMS und die Handlungsempfehlungen auf den unterschiedlichen Handlungsebenen FNP, LP und Kommunen die bedeutende Querschnittsaufgabe Klimaanpassung im GMS weiter etablieren und effektivieren.

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. 4 & Kap. 2 im Haupttext) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu Einblicken in den aktuellen Stand der Technik (Kap. 2.3). 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 subsummieren:

- 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).

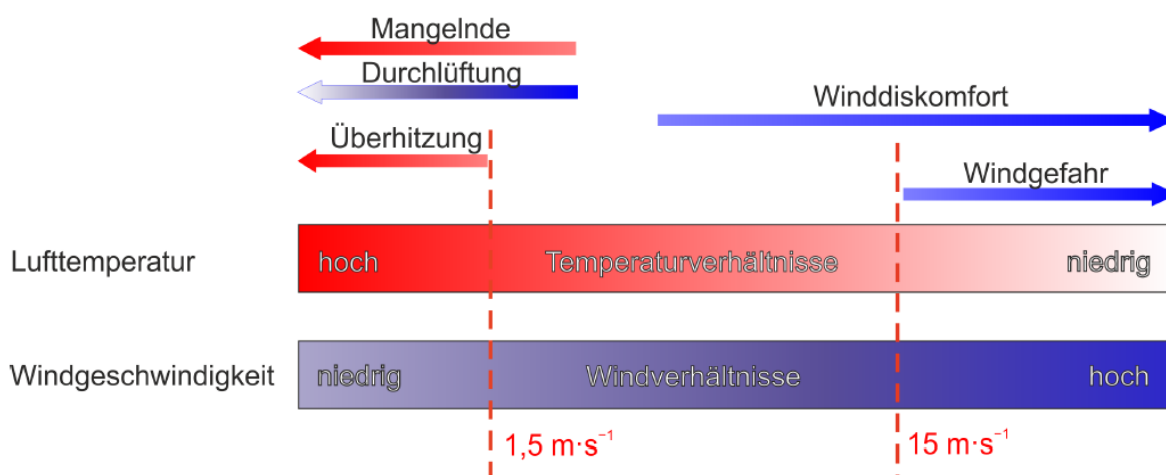


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

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 wird darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) verwendet (Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute weniger 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 letztlich 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.

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 2022, 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.

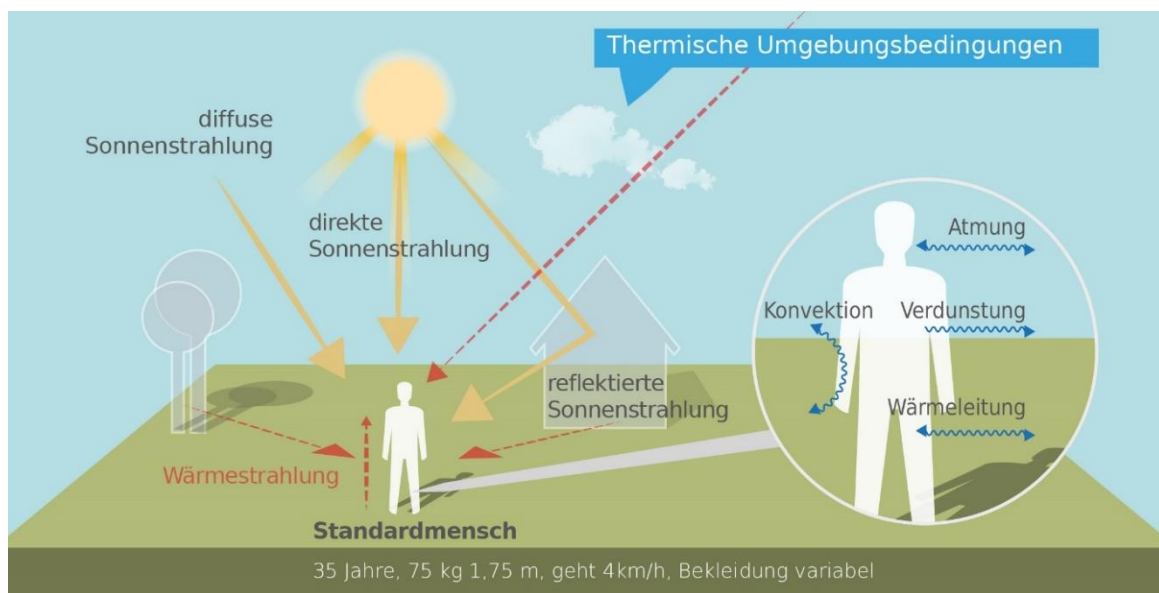


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2022)

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 2022, 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 Bürger:innen 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).

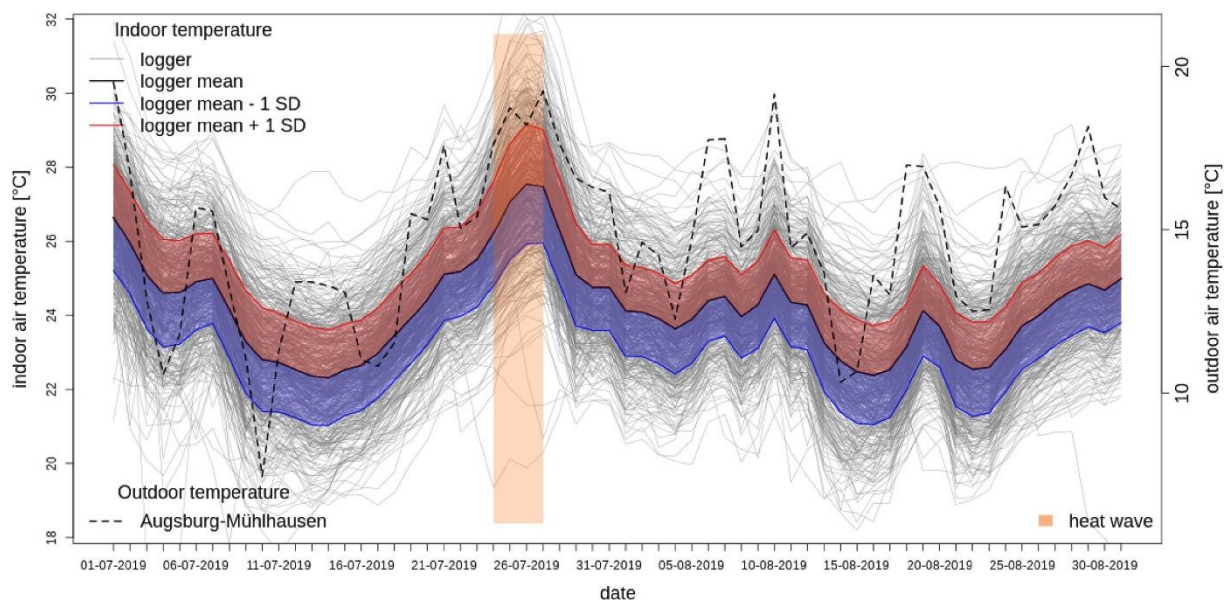


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Außerhalb des thermischen Komfortbereichs 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 bis 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).

Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

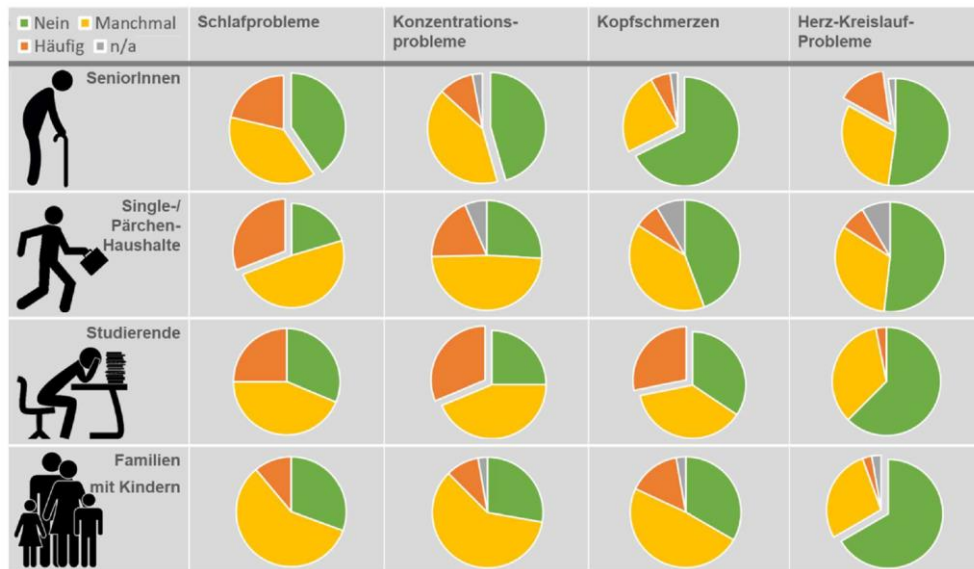


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

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).

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).

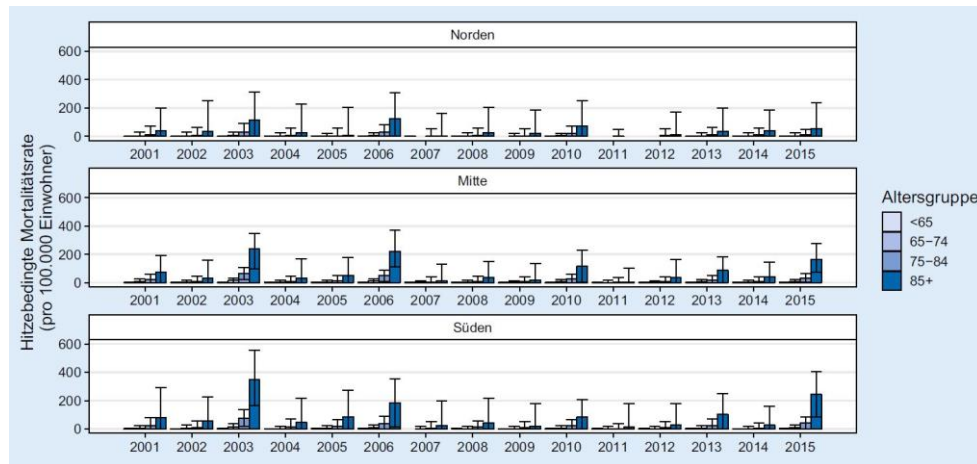


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün- und Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt 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 (siehe Groß 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (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 abnehmenden 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 (siehe 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 tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirkt in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit Inversionen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.

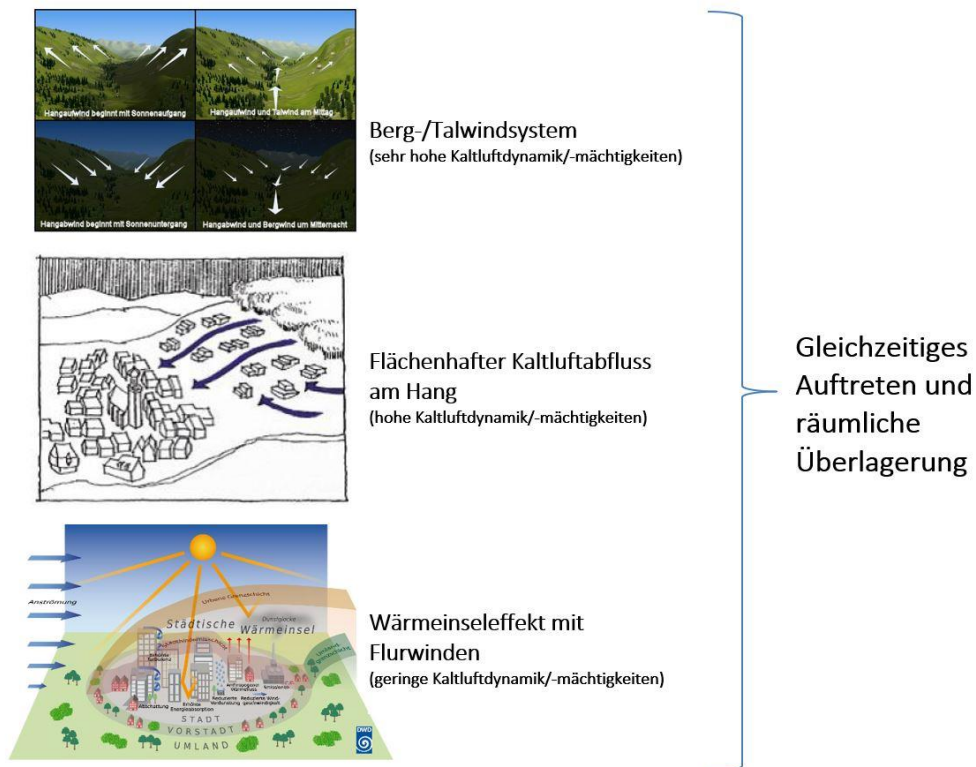


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die anthropogen geschaffenen Oberflächen wie Asphalt und Beton speichern dabei über Tag vermehrt Strahlungswärme ein, die über Nacht in Form von Wärmestrahlung abgegeben wird. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärme- flux) 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 Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet 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 stadtnahen und innerstädtischen 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 (10-) 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-/Talwindssystem 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 wahrscheinlich unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden) (siehe Wiesner et al. 2014, Krämer & Kabisch 2022). 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 Kaltfluthaushalt 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, Stadt-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 (2022): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- 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

Die in VDI 3787 Bl. 1 beschriebene Klimaanalysekarte (Zusammenfassung der wesentlichen Analyseergebnisse für die Nachtsituation) wird als Zwischenprodukt und die Planungshinweiskarte (klimaökologische Bewertung von Flächen) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse verstanden. Auf die Methodik und Inhalte der Karten wird in den entsprechenden Kapiteln näher eingegangen (Kap. 7 und 8).

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.

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System³, das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert (DGNB 2020). Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

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“ (Abbildung 7). 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).

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.

³ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: <https://www.dgnb-system.de>)

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 Analysenverfahren 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.

	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"> • Klimateigenschaften 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 oder andere • 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 Bauungsart 	<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, Bauungsart, Rasterdaten zur Bauungsstruktur • 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

Abbildung 7: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 1). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch dem 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 über 1. zu 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 1: 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. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus Analyse, Synthese und planerischer Bewertung (Abbildung 8). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Sommer 2021 und Sommer 2023. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse (Kap. 6) und insbesondere die Klimaanalysekarten (Kap. 7).

Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit dem Gemeindeverband Mittleres Schussental (Auftraggeber), dem Projektpartner HHP sowie Vertretern der einzelnen Kommunen & Schlüsselakteuren im GMS im Rahmen verschiedener Austauschformate gelöst.

Auf den Prozess zur Entwicklung der Planungshinweiskarte (Kap. 8) wird in den folgenden Absätzen näher eingegangen. Zusammen mit den Betroffenheitsanalysen der weiteren Handlungsfelder bildet die Planungshinweiskarte eine analytische Grundlage für die Anpassungsstrategie und Handlungsempfehlungen zur Klimaanpassung im GMS, die mögliche Anpassungsmaßnahmen und Wege zu deren Umsetzung enthält.

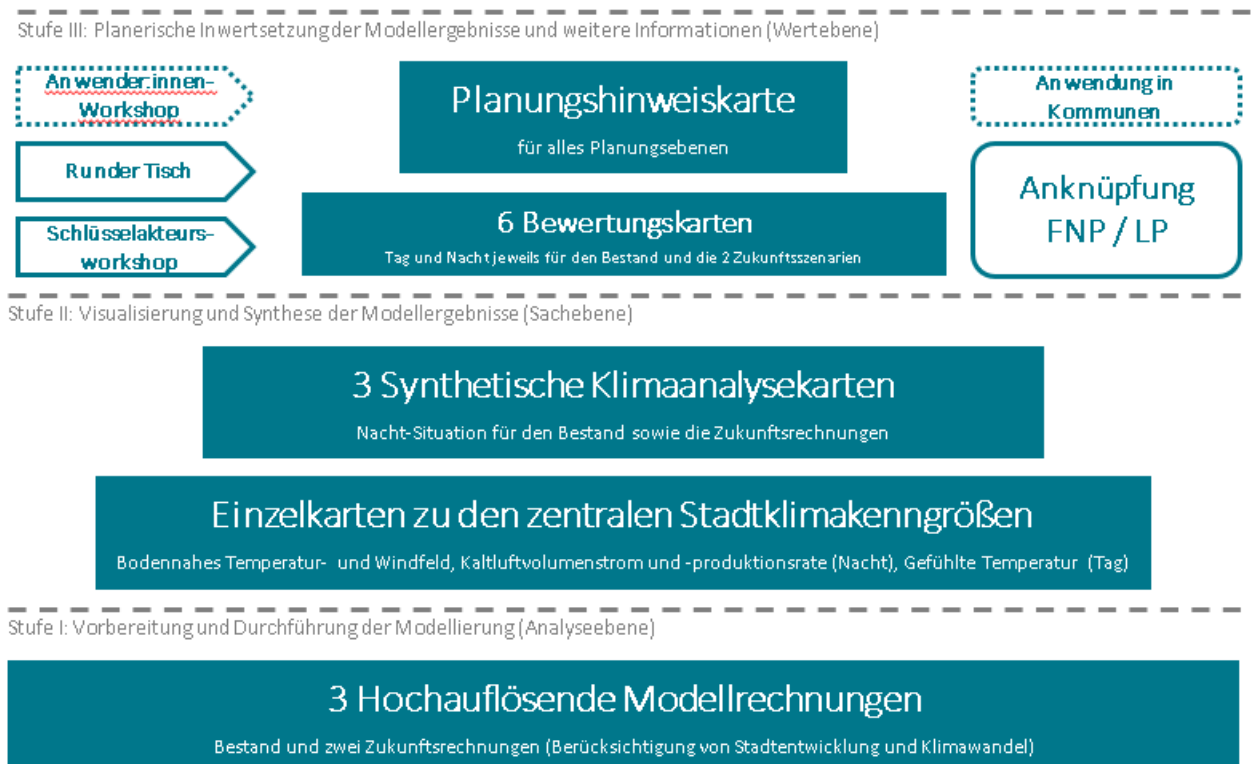


Abbildung 8: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst und Scholles 2008). Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

Für die beiden zentralen stadtklimatischen Wirkungskomplexe des Thermischen Komforts und der Luftqualität ergeben sich in diesem Zusammenhang diametral unterschiedliche Ausgangsbedingungen. So existieren für die Lufthygiene spätestens seit der Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/50/EG; EU 2008) Ziele in Form von Grenz- oder Richtwerten. Die Vorgaben dieser EU-Richtlinie wurden in Deutschland im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in nationales Recht umgesetzt und in der 39. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, Bundesregierung 2010), konkretisiert. Dieser Umstand macht die vorzunehmenden Bewertungen im Sinne einer Nominalskala „Grenzwert überschritten – Maßnahmen notwendig“ bzw. „Grenzwert unterschritten – keine Maßnahmen notwendig“ eindeutig und abschließend.

Ein rechtlich vergleichbares Äquivalent zum BImSchG mit seinen konkretisierenden Verordnungen und technischen Anleitungen inklusive den aus ihnen ableitbaren Rechtsfolgen existiert für den thermischen Wirkungskomplex nicht. Auch entsprechende Gesetzesinitiativen sind gegenwärtig nicht ergriffen oder geplant. Allenfalls übergeordnete Leitbilder wie der Schutz der menschlichen Gesundheit nach Art. 2 GG oder das Gebot der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse gemäß § 34 Abs. 1 Satz 2 BauGB haben als grundsätzliche Begründungszusammenhänge eine gewisse Relevanz. Für den konkreten Einzelfall helfen sie aber aufgrund ihrer nicht oder nur unzureichend vorhandenen Operationalisierung nicht abschließend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/Zielfindungsprozessen unter Berücksichtigung fachlicher Expertisen immer wieder aufs Neue erfolgen.

Aus diesen Prämissen wurde für das vorliegende Projekt ein Legitimierungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäß den Ansprüchen und Wertmaßstäben der projektbegleitenden Arbeitsgruppe andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.

Vertreter folgender Institutionen waren regelmäßiges Mitglied der begleitenden Arbeitsgruppen zur Planungshinweiskarte Stadtklima:

- Steuerungsgruppe (SG):
 - Bürgermeister der Gemeinden Baienfurt, Baidt, Berg und der Städte Ravensburg, Weingarten
 - Gemeindeverband Mittleres Schussental

- Projektgruppe (PG):
 - Gemeindeverband Mittleres Schussental
 - Verwaltungen der Gemeinden Baienfurt, Baidt, Berg und der Städte Ravensburg, Weingarten
 - Landkreis Ravensburg
 - Pädagogische Hochschule Weingarten
 - BUND Ravensburg
 - NABU
 - Landratsamt Ravensburg

Insgesamt fanden 3 Sitzungen der SG und 4 Sitzungen der PG statt. Ergänzend fanden eine Bürgerinformationsveranstaltung, ein Schlüsselakteursworkshop und mehrere Termine im Rahmen eines Fachaustausches zur SKA statt. Außerdem gab es eine Reihe kleinerer Termine zum bilateralen Austausch über einzelne Aspekte des KLAK, sowie einen regelmäßigen Jour Fixe ab Januar 2023. Die Ergebnisse des Fachaustausches werden näher im Kapitel 5.6 beschrieben.

4. Klima und Klimawandel im Raum Mittleres Schussental

Die Analysen zum gegenwärtigen Klima, sowie zum beobachteten und erwarteten Klimawandel befinden sich in Kapitel 2 des Hauptberichtes. Hier werden noch einige wenige ergänzende Auswertungen dokumentiert, die ausschließlich in der Stadtklimaanalyse Verwendung fanden.

4.1 ERGÄNZENDE DATEN ZUM GEGENWÄRTIGEN KLIMA

Das Mittlere Schussental ist für die neueste Klimanormalperiode (1991-2020) gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,2 °C (DWD 2020) und eine mittlere Niederschlagssumme von 981 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Sommermonaten auftreten (Abbildung 9). Damit ist das Gebiet als Ganzes 0,1 °C kühler als der deutschlandweite Durchschnitt von 9,3 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt deutlich über dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr.

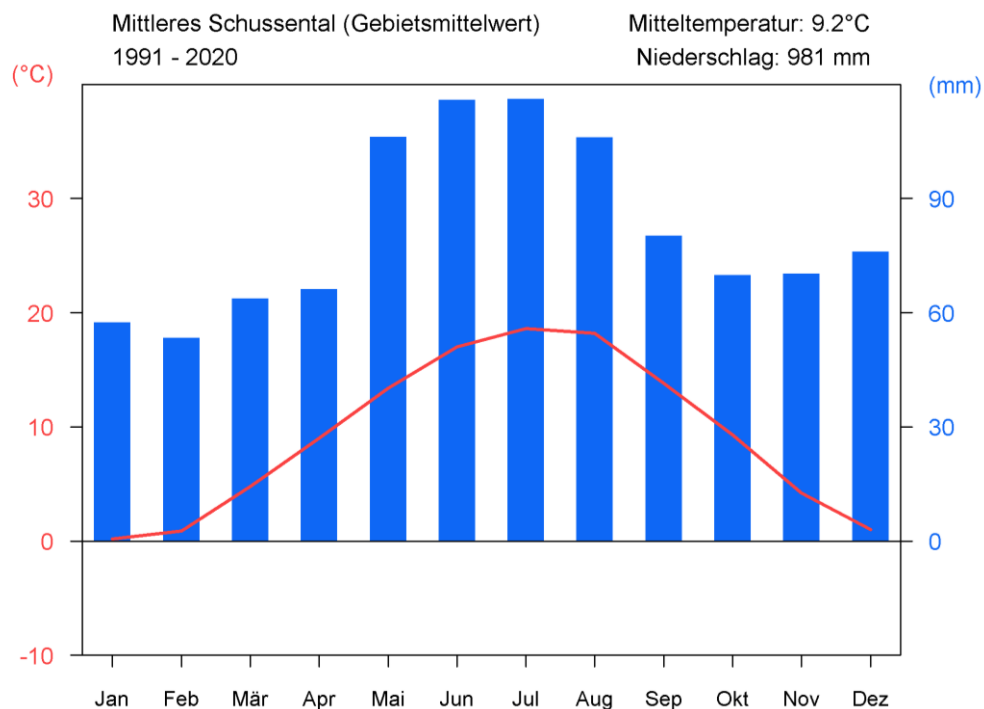


Abbildung 9 Klimadiagramm für den GMS für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (eigene Berechnung nach DWD 2023d).

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Weingarten dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in GMS, auch wenn auf den Servern des DWD erst ab 1997 durchgängige Zeitreihen für diese vorliegen. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 2,2 m/s, wobei Werte zwischen 0,3 – 1,5 m/s und zwischen 1,6 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leiser Zug bis leichte Brise, siehe Abbildung A⁴). In den Nachtstunden treten überwiegend Nordwinde auf gefolgt von sekundären Maxima aus südwestlichen Richtungen. Tagsüber dreht sich dieses Verhältnis (Abbildung

⁴ Abbildung mit einem A vor der Nummer befinden sich im Anhang dieses Dokumentes.

10). Die ortsspezifischen Lokalströmungen aufgrund des Schussentals (Regionalwindsystem Schussentäler) und dessen Seitentäler spielen eine wichtige Rolle für das gesamte Verbandsgebiet (Schwab & Zachenbacher 2009).

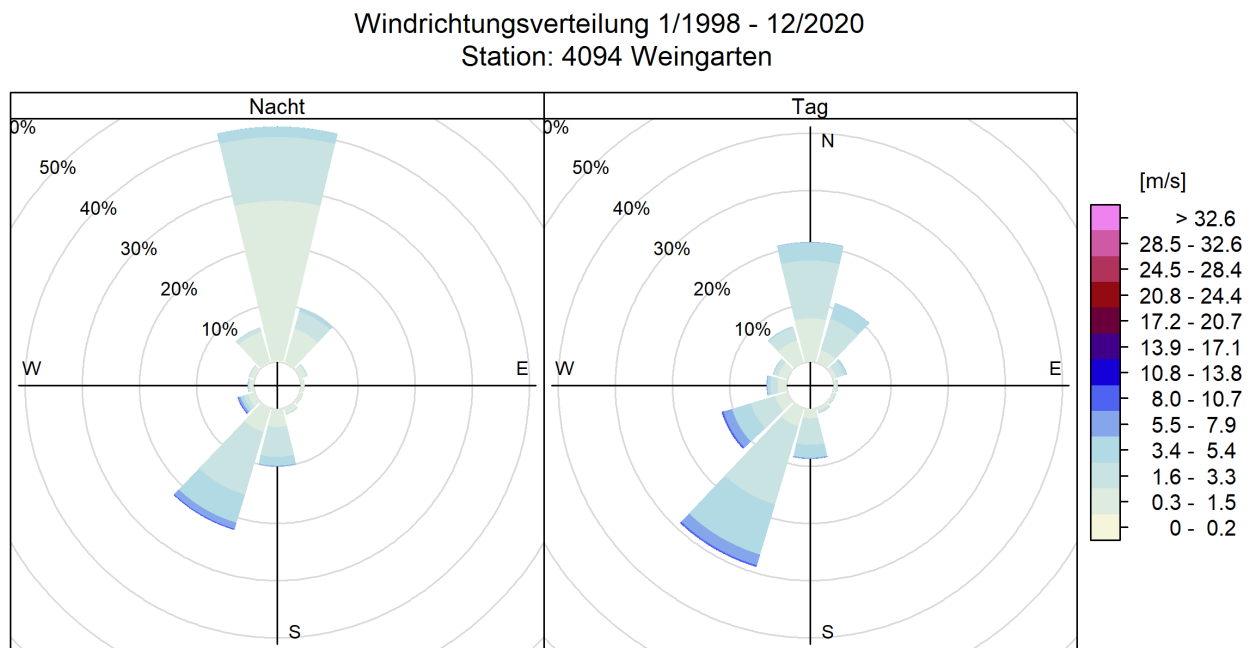


Abbildung 10: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) an der DWD-Station Weingarten für den Zeitraum 1998 – 2020 (DWD 2023c)

4.2 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Siedlungsgebiet erzeugt.

In GMS traten im langjährigen Mittel der letzten 30 Jahre rund 80 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf⁵, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung A im Anhang). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel jeweils knapp 10 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von ca. 33 % entspricht – etwa jede dritte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

⁵ Da im GMS-Gebiet keine DWD Station qualitativ ausreichende Daten zur Ermittlung von autochthonen Nächten bereitstellt, handelt es sich bei der Angabe um einen Mittelwert aus den Ergebnissen für die Stationen in Kempten, Laupheim & Konstanz (DWD 2023c)

5. Analysemethoden

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalyse 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 spezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (siehe 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 2017) 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/kantonale 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 10 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet GMS und angrenzendes Umland ca. 4 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.

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 100 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 2 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.

Tabelle 2: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 10 m.

Landnutzungsklasse	Strukturhöhe
Gebäude	Individuell
Unbebaut versiegelt / Straße	0 m
Gewässer	0 m
Gleisflächen	0 m
Freiland / Rasen / niedrige Vegetation	0,5 m
Niedrige Vegetation auf naturfernem Boden ⁶	0,5 m
Baum über Rasen	Individuell
Baum über naturfernem Boden	Individuell
Baum über Versiegelung	individuell

⁶ Naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

Zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses zeigt Abbildung 11 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, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen 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 unbebaut 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 Uhr 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. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Grad 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 deutlich träger 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 12 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 °C 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 °C) 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 °C 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 kurzwelligen 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.

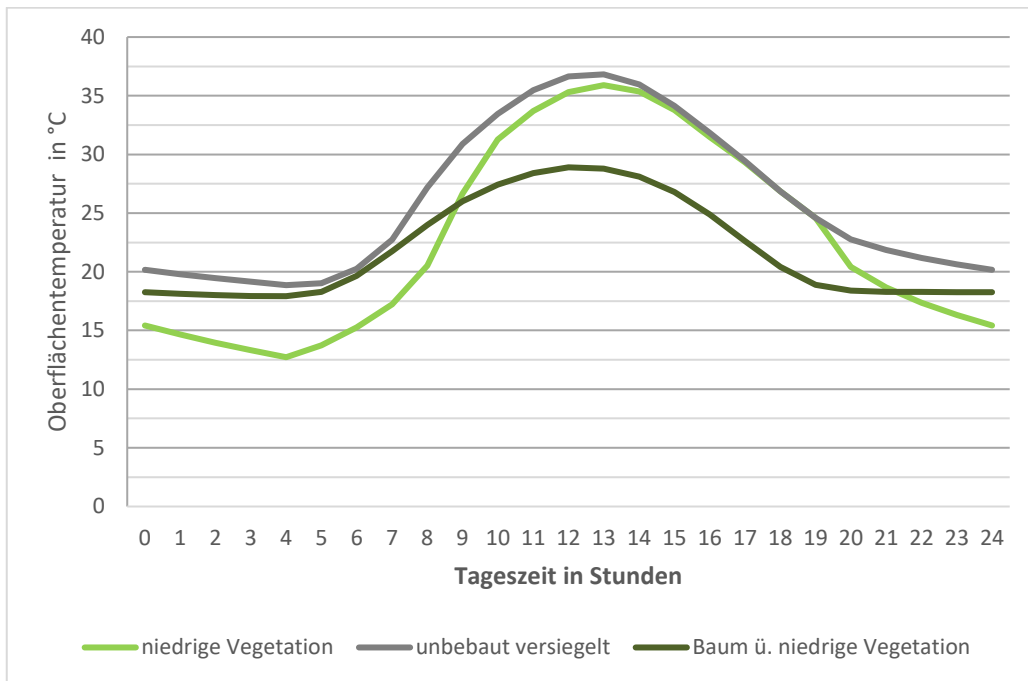


Abbildung 11: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D (eigene Abbildung)

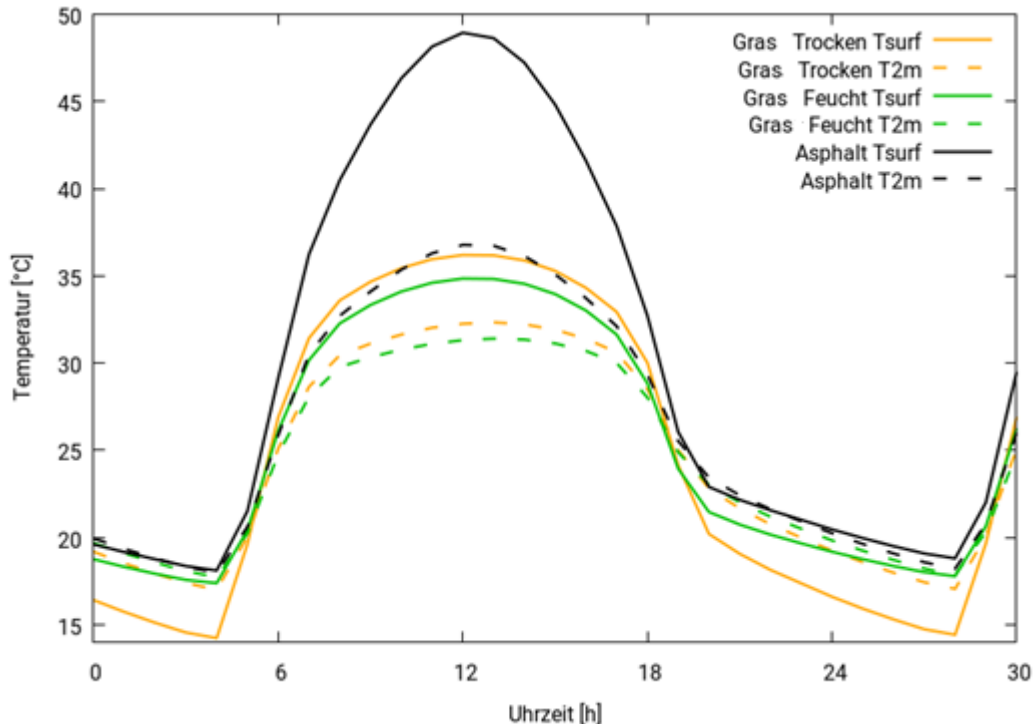


Abbildung 12: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages (eigene Abbildung)

5.2 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit den numerischen Modellen FITNAH-3D und ASMUS_green. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge / urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/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 auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (siehe LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (siehe Stadt Karlsruhe 2014, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen - Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (siehe Fürst und Scholles 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (z.B. VDI 2008, VDI 2015).

Gegenwärtig können mithilfe des Methodenpakets folgende für die urbane Hitzevorsorge zentrale Themenkomplexe ebenen-/maßstabsunabhängig modelltechnisch abgebildet werden:

- Modul 1: Auswirkungen des Klimawandels (allmähliche Temperaturzunahme sowie reduzierte Bodenfeuchten aufgrund zunehmender Trockenheit)
- Modul 2: Auswirkungen von Flächennutzungsänderungen (Stadtentwicklung, Stadtsanierung, Verkehrs-/Grünflächenplanung, Waldumbau)
- Modul 3: Auswirkungen von gebäude- und boden-/flächenbezogenen Anpassungsmaßnahmen

Die Module können je nach spezifischer Fragestellung und zur Verfügung stehender Grundlagen für die Modellierungen individuell zusammengestellt werden. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Ausgangspunkt der Deltamethode ist stets die Szenarientwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu prognostizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Gegenwart und Zukunft aufmerksam zu machen. Neben der Darstellung, wie eine hypothetische Situation in der Zukunft zustande kommen kann, werden Varianten und Alternativen dargestellt (Abb. 3, Wilms 2006).

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem gemeinsamen Szenariotrichter. In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern lediglich eine den Analysezielen entsprechende Auswahl zumeist besonders herausfordernder Szenarien.

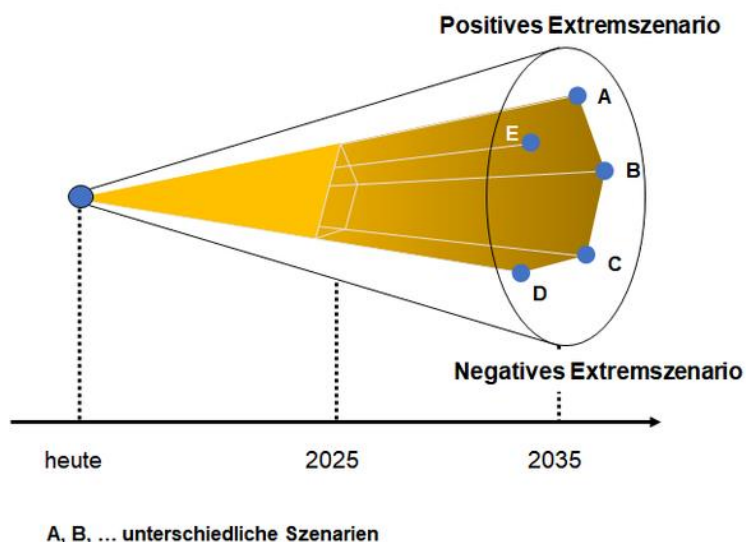


Abbildung 13. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Im vorliegenden Fall fiel die Wahl auf die Analyse der Szenarien „schwacher Klimawandel“ (Synonym: P1 Szenario) und „starker Klimawandel“ (Synonym: P2 Szenario) für die Zieljahre 2030 - 2040. Verglichen werden sollten die Ergebnisse der beiden Szenarien untereinander sowie mit einer Referenzsituation (Synonym: Ist-Zustand), als Repräsentation einer gegenwärtigen Situation.

In beiden Szenarien wurde eine mögliche zukünftige Stadtentwicklung berücksichtigt, in dem auf Basis des aktuell noch gültigen FNP (Flächennutzungsplan, GMS 2021) unbebaute Entwicklungsflächen mit den einzelnen Kommunen ausgewählt und teilweise ergänzt wurden. Im Szenario „schwacher Klimawandel“ wurde darüber hinaus die Antriebstemperatur der Modellrechnung gegenüber der Referenzsituation um ein Klimasignal von 0,8 K erhöht. Dieses Signal wurde aus einer Reanalyse regionaler Klimamodelle für das Emissionsszenario RCP 2.6 spezifisch für den GMS abgeleitet und stellt nach dem heutigen Wissenstand ein positives Extremszenario dar.

Für das Szenario „starker Klimawandel“ wurde eine Orientierung am RCP 8.5 gewählt. Daraus ergibt sich ein Klimasignal von 2,2 K. Außerdem ergab sich aus den Analysen, dass in diesem Szenario mit einer zunehmenden Sommertrockenheit und damit mit einer verringerten Bodenfeuchte zu rechnen ist. Im Modell wurde diese daher von 60% auf 30% abgesenkt.

Tabelle 3 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 3: Entwickelte Szenarien für das mittlere Schussental und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Referenzsituation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eingangsdaten repräsentieren das Gebiet des GMS zum Stand 2021 ■ Einzelne Gebiete mit B-Plänen in Umsetzung u. Ä. wurden ergänzt
Szenario P1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zusätzlicher Temperaturantrieb von 0,8 K ■ Idealisierte Betrachtung einer möglichen zukünftigen Stadtentwicklung auf ausgewählten Flächen
Szenario P2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zusätzlicher Temperaturantrieb von 2,2 K und eine verringerte Bodenfeuchte von 30 % ■ Stadtentwicklung wie im Szenario P1

5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen. Wie oben beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe

Das Modellgebiet ist dabei für alle durchgeführten Modellläufe identisch. Es beinhaltet das gesamte Gebiet des Gemeindeverbandes Mittleres Schussental sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte

zunächst nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Um den Rechenaufwand bzw. die Modellierungszeit zu optimieren, wurde das Gebiet im weiteren Projektverlauf verkleinert und die Modellrechnung wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus einer übergeordneten Modellrechnung in 250m Auflösung angetrieben (Offline-Nesting, siehe Seite 12). Das finale Untersuchungsgebiet hat eine Größe von ca. 404 km² (Abbildung 14).

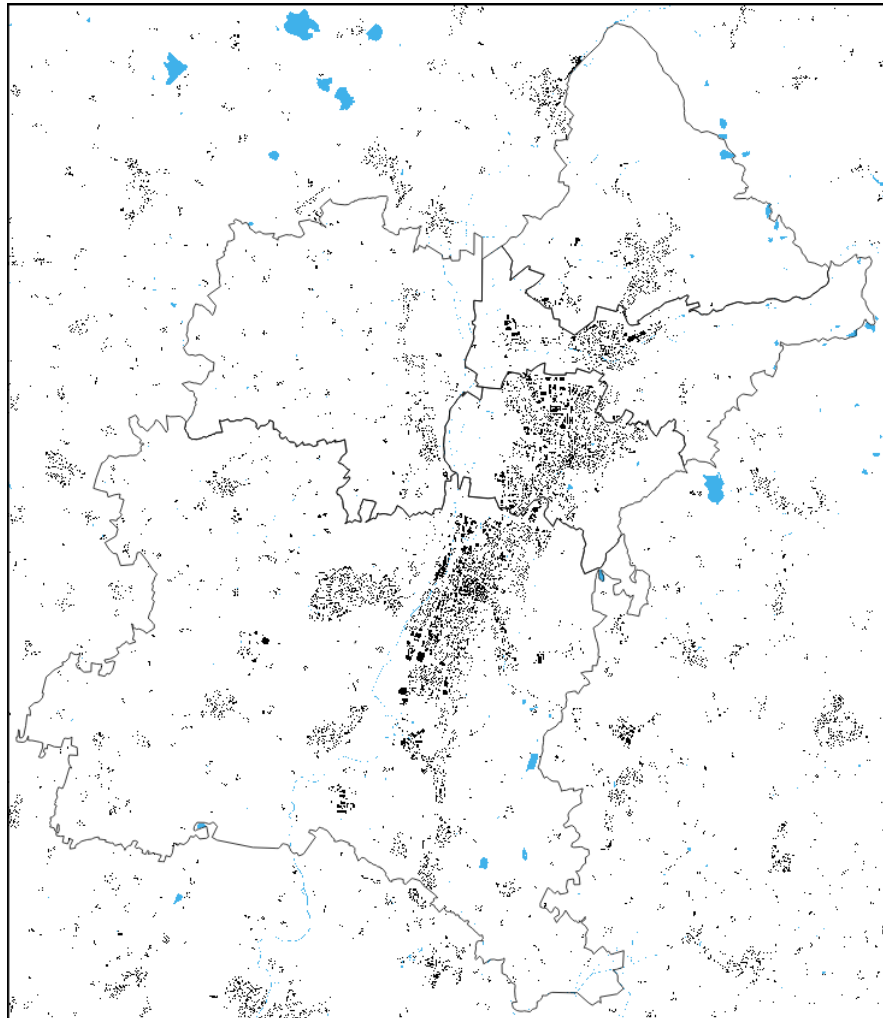


Abbildung 14: Modellgebiet der SKA, zur Orientierung sind die Gebäude und Gewässer, sowie die Gemeindegrenzen dargestellt.

Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert und dabei auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Referenzsituation und den beiden Zukunftsszenarien eingegangen.

Da sich relevante Hebungen und Senkungen der Landmassen in geologischen Zeitskalen und nicht in Jahrzehnten abspielen, konnte für alle Modellrechnungen dasselbe Geländemodell zugrunde gelegt werden. Dieses stammt aus einer flugzeuggestützten Lasermessung und liegt in 1m Auflösung vor. Die Abbildung 15 zeigt das stark geneigte Relief des GMS in einer grafischen Überhöhung.

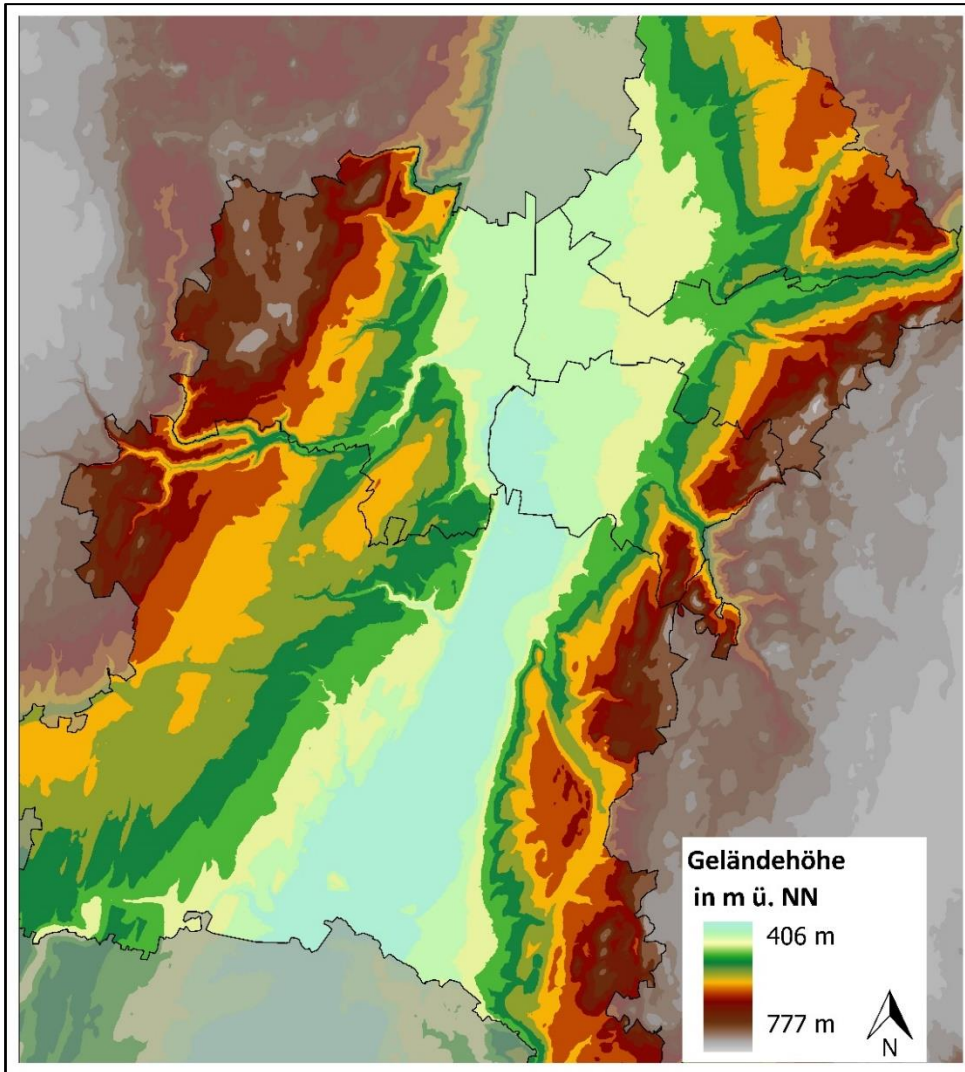


Abbildung 15: Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet.

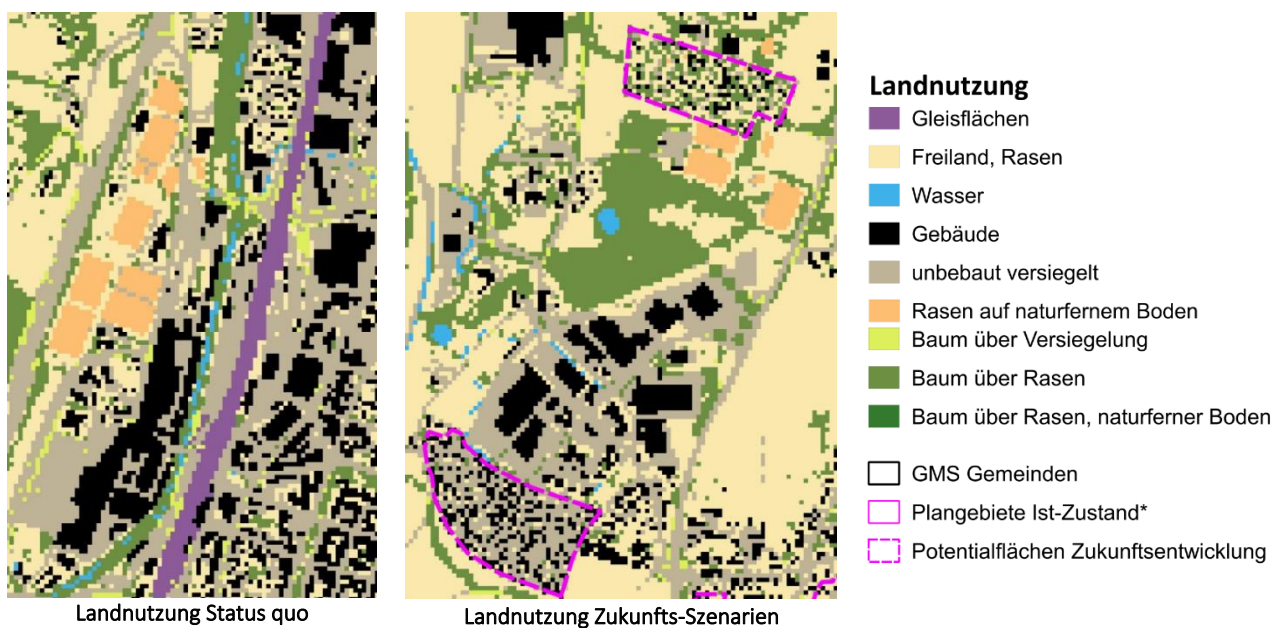


Abbildung 16: Modelleingangsdaten „Landnutzungsklassen“ für den Status quo in einem Ausschnitt der Stadt Ravensburg (links) und für die Zukunfts-Szenarien in einem Ausschnitt mit möglichen Entwicklungen im Süden von Ravensburg (Mitte).

Ausgangspunkt für die Erstellung der Landnutzungsraster waren ALKIS Daten aus Anfang 2021. Im Unterschied zu den Geländehöhen unterscheidet sich der Eingangsdatensatz zur Landnutzung bzw. zur Stadtstruktur in zwei der drei Modellrechnungen voneinander (Abbildung 16). Hintergrund ist die Berücksichtigung einer zukünftigen Stadtentwicklung in Form von Mischpixeln.

Bei den in Kapitel 5.2 beschriebenen möglichen Entwicklungsflächen auf Basis des alten FNP kam der **Mischpixelansatz** zum Einsatz. Zur Schaffung einer Annäherung an die Landnutzung dieser Flächen für den Zielhorizont 2023 - 2040 wurden Bestandsflächen im Untersuchungsgebiet definiert, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu diesen Flächen liegen und deren siedlungstypologische Ausprägung jener der zukünftig entwickelten Reserveflächen näherungsweise entsprechen könnte. Für diese sog. „Flächenzwillinge“ fand anschließend eine GIS-gestützte Analyse der prozentualen Anteile der vom jeweiligen Flächenzwillings überlagerten Nutzungsinformationen des Ist-Zustandes statt. Für jede der 80 Blockflächen der Siedlungsreserve ergaben sich somit eine spezifische Mischpixelklasse, die als eigene Nutzungsklassen 1000 bis 1080 in das Modell eingegangen und eng mit der Verteilungsinformation der üblichen FITNAH-Nutzungsinformation verknüpft sind. Gleichzeitig werden für alle Nutzungsklassen, die eine individuelle Höhenangabe benötigen, bspw. Gebäude oder Bäume, für jede Klasse einheitliche Strukturhöhen vorgegeben, die ebenfalls aus den Mittelwerten der Analyse der Flächenzwillinge erhoben wurden.

Im Zukunftsmodelllauf greift das FITNAH-Modul „Randomisator“ bei Aufkommen der Nutzungsklassen 1000 bis 1080 auf die Nutzungsverteilungen zu und füllt diese rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften herkömmlichen FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen aus einer Lookup-Tabelle auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Das Schaubild in Abbildung 17 zeigt exemplarisch die randomisierte Flächenzuweisung für eine Wohn-/Mischbebauung und eine Gewerbeentwicklung.

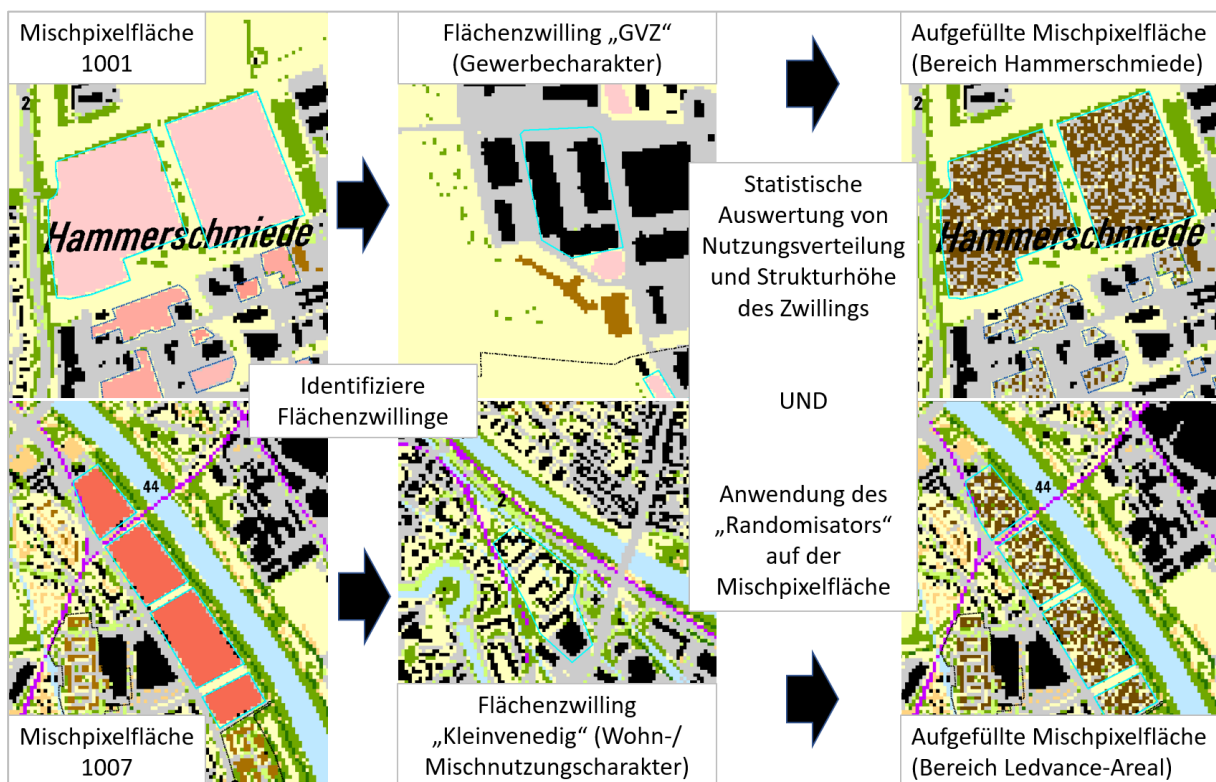


Abbildung 17: Beispielbild zur Identifizierung von Flächenzwillingen zur randomisierten Befüllung von Mischpixelflächen.

Tabelle 4 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen in der Referenzsituation sowie für die Modifikation in den Zukunftsszenarien zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor, so dass es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtische Modellanwendungen sehr hohen Auflösung des Modells zu Generalisierungseffekten kommt. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 4: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters im GMS als Basis für die Referenzsituation sowie die Zukunftsszenarios

Datenquelle	Erfassungsjahr	Datentyp	Auflösung
Geländehöhe	2020	Raster	1 m
Gebäude/-höhen	2021	ALKIS / 3D-Shapes	LOD 1/2
Vegetation	2019	Infrarotluftbilder / Raster	0,2 m
Versiegelung	2020/2021	ALKIS / Rasterdaten	-
Strukturhöhen	2020	Raster	0,2 m

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 17). Aus diesen punkthaften Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (Stand 2021), die auf Basis von digitalen Orthophotos (Stand 2019) und aktuellen freiverfügbaren Karten (z. B. OpenStreetMap) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 6), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in den Bewertungskarten in Kap. 8.3).

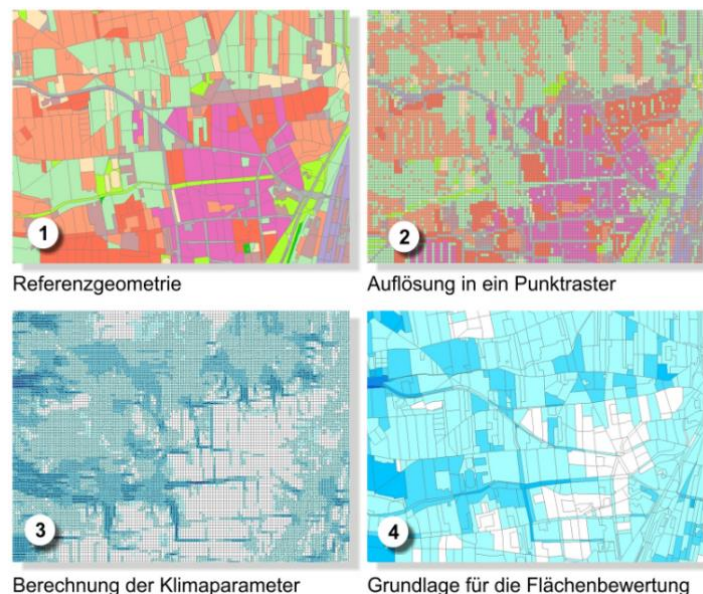


Abbildung 18: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN DER MODELLIERUNG

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. 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 Siedlungen die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage im GMS regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (ca. 33 % der Nächte im Juni, Juli, August, basierend auf einer Auswertung der DWD-Stationen in Konstanz, Laupheim und Kempten). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis um 14:00 des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes. Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten im GMS besonders gut ausprägen.

In Abbildung 19 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.

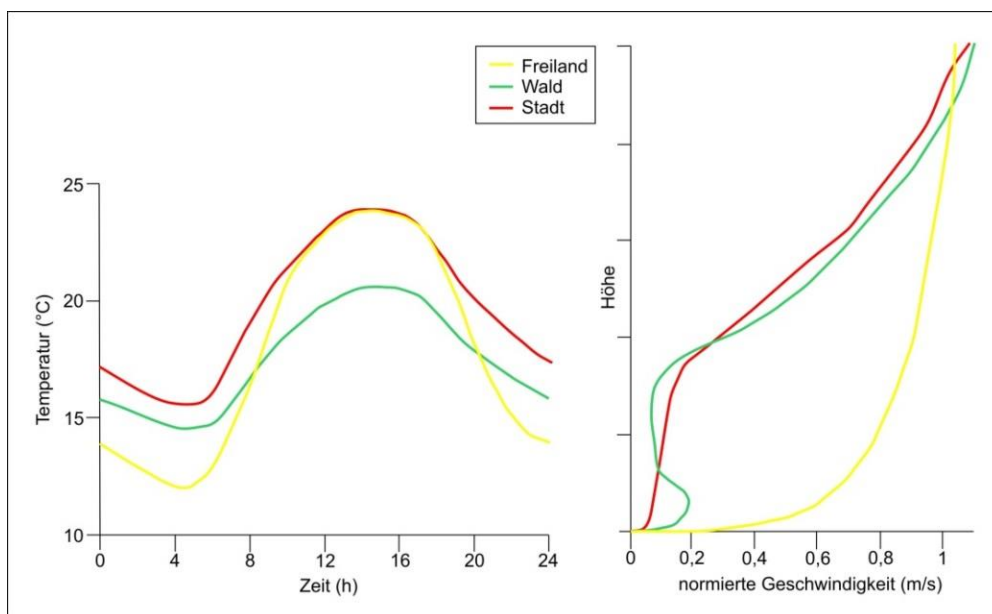


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992).

Die Berücksichtigung der im Haupttext beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Ausprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen erfolgte auf der Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes (Schär et al. 1996). Demnach wurden die beiden

Modellsimulationen mit einem unterschiedlichen Delta von +0,8K bzw. +2,2K angetrieben (entspricht dem 15. Perzentil des verwendeten Ensembles zum RCP 2.6 bzw. dem 85. Perzentil des verwendeten Ensembles zum RCP 8.5). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus adaptiert (Abbildung 20). 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 °C bzw. 21,8 oder 23,2 °C.

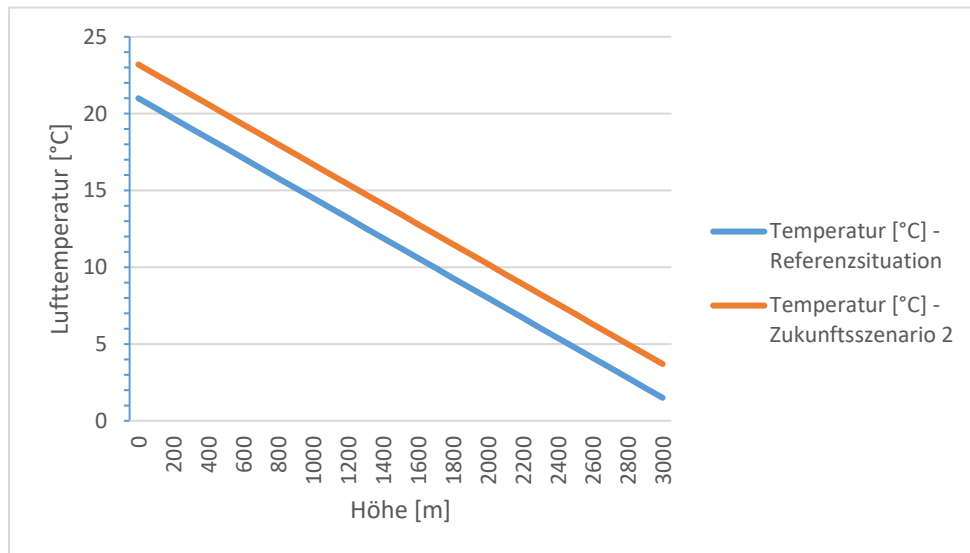


Abbildung 20: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation (blaue Linie) sowie exemplarisch für das Szenario „starker“ Klimawandel (orange)

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich aber auch in den Erdboden fort und daraus resultieren auch höhere Erdbodentemperaturen. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen durch die Vorgabe einer auf 30% verringerten Bodenfeuchte im Szenario starker Klimawandel berücksichtigt. Sie wurde dadurch unter den Welkepunkt gesenkt. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, so dass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte in der Referenzsituation und dem Szenario schwacher Klimawandel bei 60 % und damit deutlich über dem Welkepunkt.

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren vor allem im Szenario starker Klimawandel ganz bewusst 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 allein auf Grundlage, der in klassischen Stadtklimaanalysen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden, zu können.

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten für stündliche – bei Bedarf auch für noch kürzere - Zeitschnitte aus (Tabelle 5). 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 (GB). Zu den wesentlichen Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussenden Größen, wie etwa der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 5: 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
Potentielle 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 zugrundeliegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sog. post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden können. 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 6).

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

Tabelle 6: abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension	Im Projekt ausgewertet
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr	ja
Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum	[m]	10 m ü.Gr.	21:00 bis 04:00 Uhr	nein
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s*m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftmächtigkeit	[m]	Individuell ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Abkühlungsrate	K/h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Strahlungstemperatur	K	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja
Universal Thermal Climate Index (UTCI)	keine	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Gefühlte Temperatur (GT)	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein

5.6 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 5-10 ausgewählten und ca. 1x1 km großen 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. Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung der Stadtstruktur im Wirkgefüge mit dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde.

Durch Gespräche im Rahmen des Schlüsselakteurworkshops vom 10.11.2022 zeigte sich der Bedarf einer erneuten Qualitätskontrolle. Daraufhin wurden die Modellergebnisse noch einmal genauer mit bestehenden Erkenntnissen aus den Projekten REKLIBO, REKLISCHUB und ausgewählten Einzelgutachten zu Planungsvorhaben vergangener Jahre verglichen. Durch einen Fachaustausch zwischen dem Büro Geo-Net & Herrn Prof. Schwab, einem der Hauptautoren der Studien, konnten die Ergebnisse abschließend eingeordnet und eine Übereinkunft mit den Auftraggebern zum weiteren Vorgehen erzielt werden.

Zentrale Ergebnisse der Qualitätskontrolle

Die Ergebnisse der Thermalkartierungen und der FITNAH Modellierung zeigen eine gute Übereinstimmung. Leichte Abweichungen bestehen, da die Entwicklung der Temperatur im Modell stärker an die Landnutzung gekoppelt ist. In Messungen konnte für den Siedlungsbereich teilweise eine etwas stärkere Abkühlung durch die vorhandenen Kaltluftprozesse nachgewiesen werden. Es konnte allerdings festgestellt werden, dass es auf der Ebene der Planungshinweise (also auf der Wertebene) in der vorliegenden SKA nicht zu einer Überschätzung der bioklimatischen Belastung kommt. Weiterhin wird in den etwas zu warm model-

lierten Gebieten der Einfluss der Kaltluft über die Signaturen zum Kaltlufteinwirkungsbereich und zu den Kaltluftprozessen ausreichend beschrieben. Es wurde abgestimmt, dass bzgl. dieser Thematik keine Anpassungen an der vorliegenden Stadtklimaanalyse notwendig sind.

Die Ergebnisse bzgl. des Kaltluftprozessgeschehens (Produktion, Fließrichtung und Volumen der Kaltluft) sind in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes mit den bestehenden Erkenntnissen vergleichbar. Allerdings wurde festgestellt, dass die aktuelle Modellierung die Auswirkungen mancher Talabwinde unterschätzt und das Phänomen des Regionalwindes Schussentäler nicht adäquat abbildet. Die Gründe hierfür können nicht abschließend ermittelt werden. Ein zentraler Aspekt besteht allerdings darin, dass die Größe des Untersuchungsgebietes und die Stärke des Antriebs beim Nesting (siehe Seite 12) nicht ausreichen, um die tatsächliche Dynamik der in den Messungen entdeckten Prozesse abzubilden. Im Fachaustausch zeigte sich, dass eine erneute Modellrechnung zur Behebung dieser Differenz nicht zielführend ist und dass das vorrangige Ziel die hohe Qualität der Planungshinweise ist. Um diesem Ziel gerecht zu werden, wurden vom Büro Geo-Net die gutachterlich zu vergebenden Kaltluftabflusssignaturen ergänzt. Neu aufgenommen wurde eine Signatur für das Regionalwindensystem Schussentäler, um dessen besondere Bedeutung für das Schussental zu betonen. Alle diese zusätzlichen Signaturen wurden den entsprechenden betroffenen Flächen zugeordnet und die Bewertung dieser Flächen neu abgeleitet. Sämtlichen Kaltluftprozessen wurde dabei im Entscheidungsbaum für die Bewertung dieselbe hohe Bedeutung zugeordnet (siehe Kap. 8).

Gewisse Unterschiede zwischen der Klimaanalysekarte aus REKLIBO und der neuen Modellierung werden immer bestehen, da die Analysen mit unterschiedlichen Stadtklimamodellen berechnet wurden, und beide Studien unterschiedliche Zielsetzungen und Schwerpunktlegungen bezüglich der durchgeführten Analysen verfolgen. Für die Ableitung von Planungshinweisen ist in Zukunft die vorliegende Studie vorrangig, da sie eine höhere räumliche Auflösung hat und die fortgeschrittene (Stadt-)Entwicklung im GMS berücksichtigt. Die vorliegende Studie bezieht sich in Übereinstimmung mit der VDI auf den Zeitpunkt 4 Uhr nachts. Zu dieser Zeit hat sich die bodennahe Atmosphäre am stärksten ausgekühlt, die Unterschiede zwischen Siedlung und Grünflächen sind am stärksten ausgebildet und man kann analysieren welche Hitzehotspots lokal verbleiben und wie diese von Strömungsprozessen beeinflusst werden. Wenn es um Fragestellungen zur großräumigen Durchlüftung des gesamten Schussentals und zur zeitlichen Abfolge von Kaltluftprozessen und damit in Zusammenhang stehenden Windsystemen geht, sind weiterhin die Ergebnisse von REKLIBO/REKILSCHUB sehr hilfreich, da mit den vorgestellten Methoden im Zuge der vorliegenden Studie keine Aussagen zu Kaltluftprozessen in der ersten Nachthälfte und zum zeitlichen Verlauf der Prozesse getroffen werden können.

5.7 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 2017) 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 im sogenannten RANS-Modus betrieben (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende LES-Modus (*Large Eddy Simulation*), der im Zusammenhang mit Stadtklima-Anwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus 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 Stadtentwicklungs- bzw. Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 °C 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. Insgesamt zeigt sich, dass modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- 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 100 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um eine der höchsten Auflösungen, die gegenwärtig für Städte modelliert werden können. 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 10 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 als Klötzchen-Modell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. 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. Da zum heutigen Stand keine gesamtstädtischen Geodaten in der benötigten Differenzierung vorliegen, wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C führen kann, was wiederum kleinräumige Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen bedingen kann (Groß 2014). 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.

Mit Blick auf die beiden Szenarien in Verbindung mit den dort integrierten Entwicklungsflächen kommt die Unsicherheitsquelle des sogenannten Mischpixel-Ansatzes hinzu. Dieser repräsentiert aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Planungen auf den entsprechenden Flächen notwendigerweise einen vereinfachten Ansatz, der zwar realistische Nutzungsanteile innerhalb der Fläche annimmt, diese aber zufällig auf der Fläche verteilt. Das in der Realität – also nach Vorhabenrealisierung – entstehende Nutzungsmosaik (Gebäude, ebenerdige Versiegelungen, ebenerdiges Grün, Bäume) wird damit nur (oder: immerhin) näherungsweise getroffen. Die Unsicherheiten nehmen dabei mit abnehmendem Verhältnis überbauter Grundstücksfläche zu unbebautem Freiraum zu. Das bedeutet, dass die Unsicherheiten bei Vorhaben wie beispielsweise einem einzelstehenden Hochhaus auf einem großen Grundstück mit viel Freiraum am größten ausfallen (weil es innerhalb der Fläche große Variationsmöglichkeiten gibt), während sie bei Vorhaben wie beispielsweise einem Gewerbegebiet mit einer GRZ von 0,8 sehr gering ausfallen (weil es innerhalb der Fläche geringe Variationsmöglichkeiten gibt). In aller Regel ähneln die Mischpixelflächen eher dem letzten Typ mit kleinem Variationspotential, sodass kleinräumige Unsicherheiten bestehen, diese im gesamtstädtischen Kontext aber valide Ergebnisse liefern.

Die Szenarien enthalten zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten 10-20 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher. Darüber hinaus existiert keine groß-

oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die Berücksichtigung hätten finden können. Eine gewisse Unsicherheit gilt, in vermutlich deutlich ausgeprägterem Maße, auch für die den Szenarien zugrunde liegende Annahme, dass keine Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden. Die skizzierten Umstände sind der Arbeit mit Szenarien jedoch immanent, die per Definition die Entscheidung unter Unsicherheit nicht vollends auflösen, sondern diese „nur“ evidenzbasiert unterstützen wollen. Hier muss also mit – gut hergeleiteten und vor allem gut abgestimmten – Annahmen gearbeitet werden, was im Projekt über den intensiven Kommunikationsprozess sichergestellt wurde.

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.

6. Analyseergebnisse

Ergebnisauswertung und Produkterstellung

6.1 MODELLIERUNGEN

Für die projektrelevanten Modellausgabegrößen (siehe Kap. 5.5) wurden folgende gelayoutete Karten als hochauflösende .pdf und .jpg. Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format (Raumbezug: ETRS 1989 UTM Zone 32N).

Tabelle 7: im Projekt erzeugte Karten

Lf. Nr.	Kurzbeschreibung
Karte AB 1	<p>Status Quo - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für die Referenzsituation.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte AB 2	<p>Szenario schwacher Klimawandel 2035 - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Zukunftsszenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte AB 3	<p>Szenario starker Klimawandel 2035 - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Zukunftsszenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte AB 4	<p>Status Quo – Bodennahes Strömungsfeld</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für die Referenzsituation. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 200m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

<p>Karte AB 5</p>	<p><i>Szenario schwacher Klimawandel 2035 - Bodennahes Strömungsfeld</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario schwacher Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 200m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 6</p>	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 - Bodennahes Strömungsfeld</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario starker Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 200m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 7</p>	<p><i>Status Quo – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber in 1,1 m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für die Referenzsituation.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 8</p>	<p><i>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber im Stadtaußenraum in 1,1 m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Zukunftsszenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 9</p>	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber im Stadtaußenraum in 1,1m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Zukunftsszenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

<p>Karte AB 10</p>	<p>Status Quo – Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für die Referenzsituation. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 11</p>	<p>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario schwacher Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 12</p>	<p>Szenario starker Klimawandel 2035 – Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario starker Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 13</p>	<p>Status Quo – Kaltluftproduktionsrate</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für die Referenzsituation.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
<p>Karte AB 14</p>	<p>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Kaltluftproduktionsrate</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt. Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

Karte AB 15	<p>Szenario starker Klimawandel 2035 – Kaltluftproduktionsrate</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage im GMS für das Szenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert) Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
-----------------------------	---

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo und die beiden Zukunfts-Szenarien beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 5.4). 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.

6.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche zu identifizieren (sogenannte städtische Wärmeinseln) 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 Status quo von ca. 11°C über siedlungsfernen Freiflächen bis ca. 19 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in GMS damit eine Spannweite von mehr als 8 °C (Abbildung 21). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 13,6 °C.

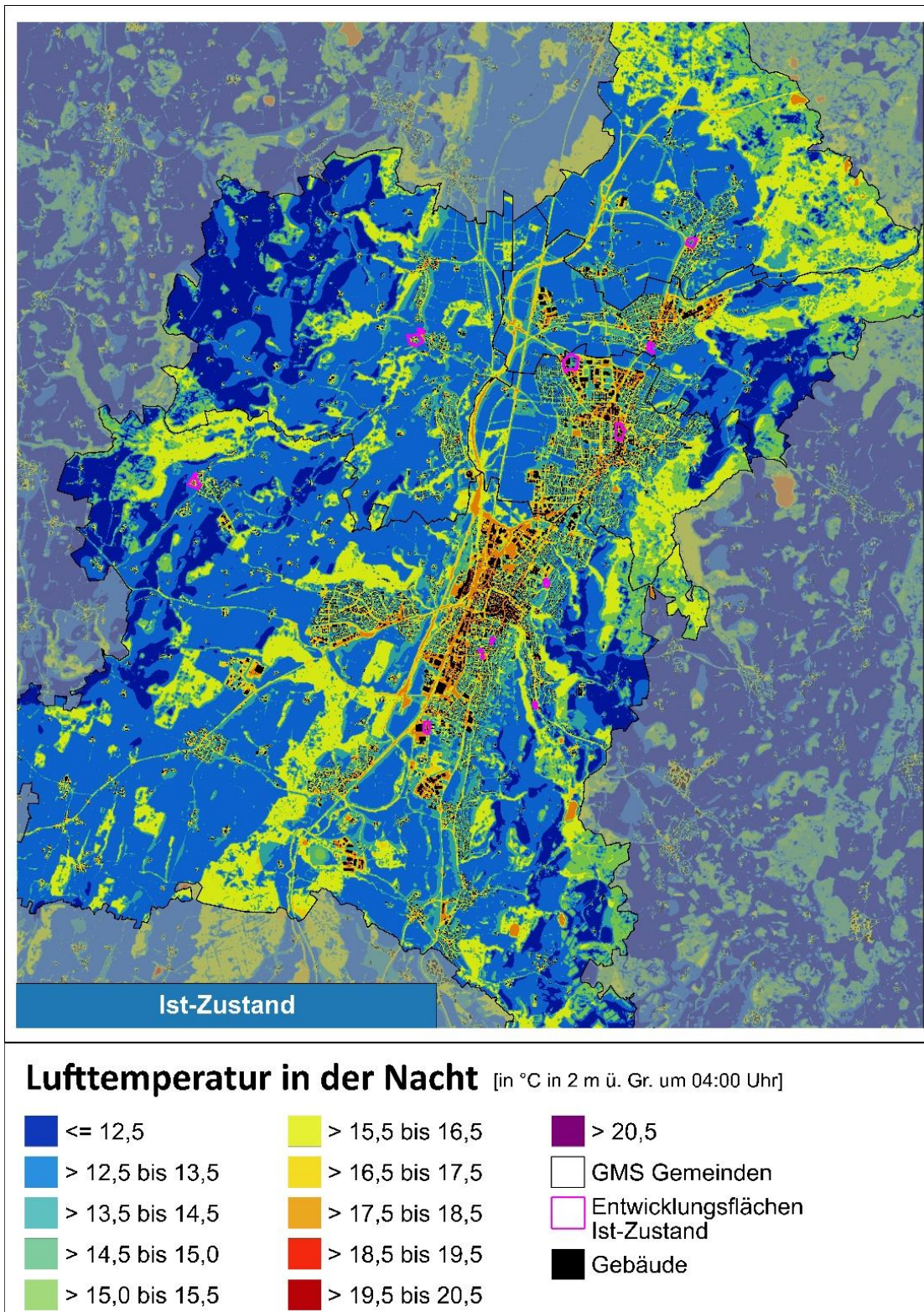


Abbildung 21: Karte AB 1: Bodennahe nächtl. Lufttemperatur im Status quo im GMS (verkürzte Legende).

Die höchsten nächtlichen Belastungen (von über 18 °C) treten vorwiegend in der Innenstadt von Weingarten, der Altstadt von Ravensburg und in Teilen der Gewerbegebiete (z.B. in Ravensburg) auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum mit Werten bis 14°C finden sich in den aufgelockerten Wohnbebauungen an den Hanglagen der Orte Baienfurt, Baidt, Berg, Weingarten und Ravensburg sowie in vielen Bereichen der höher gelegenen kleinere Orte (geringe Bebauungsdichte).

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 12 und 13°C auf. In Wäldern bzw. dicht mit Bäumen bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte um 15 °C erreicht werden (z.B. im Altdorfer Wald). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsraum bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden. Zudem sind Waldgebiete am Tage wichtige Ausgleichsräume (siehe Kap. 6.4).

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbarem Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können, was bei der Schussen stellenweise der Fall ist (im Bereich südwestlich der Stadt Ravensburg teilweise Lufttemperaturen um 17,5°C über dem Wasser).

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 (Abbildung 22). Entsprechend der genannten Ergebnisse findet über versiegelten Flächen und über Gewässern (nahezu) keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über Freiflächen produziert, doch auch mit Bäumen bestandene Grünflächen sowie Parks und Gärten im Wohnumfeld können als Kaltluftentstehungsgebiete dienen.

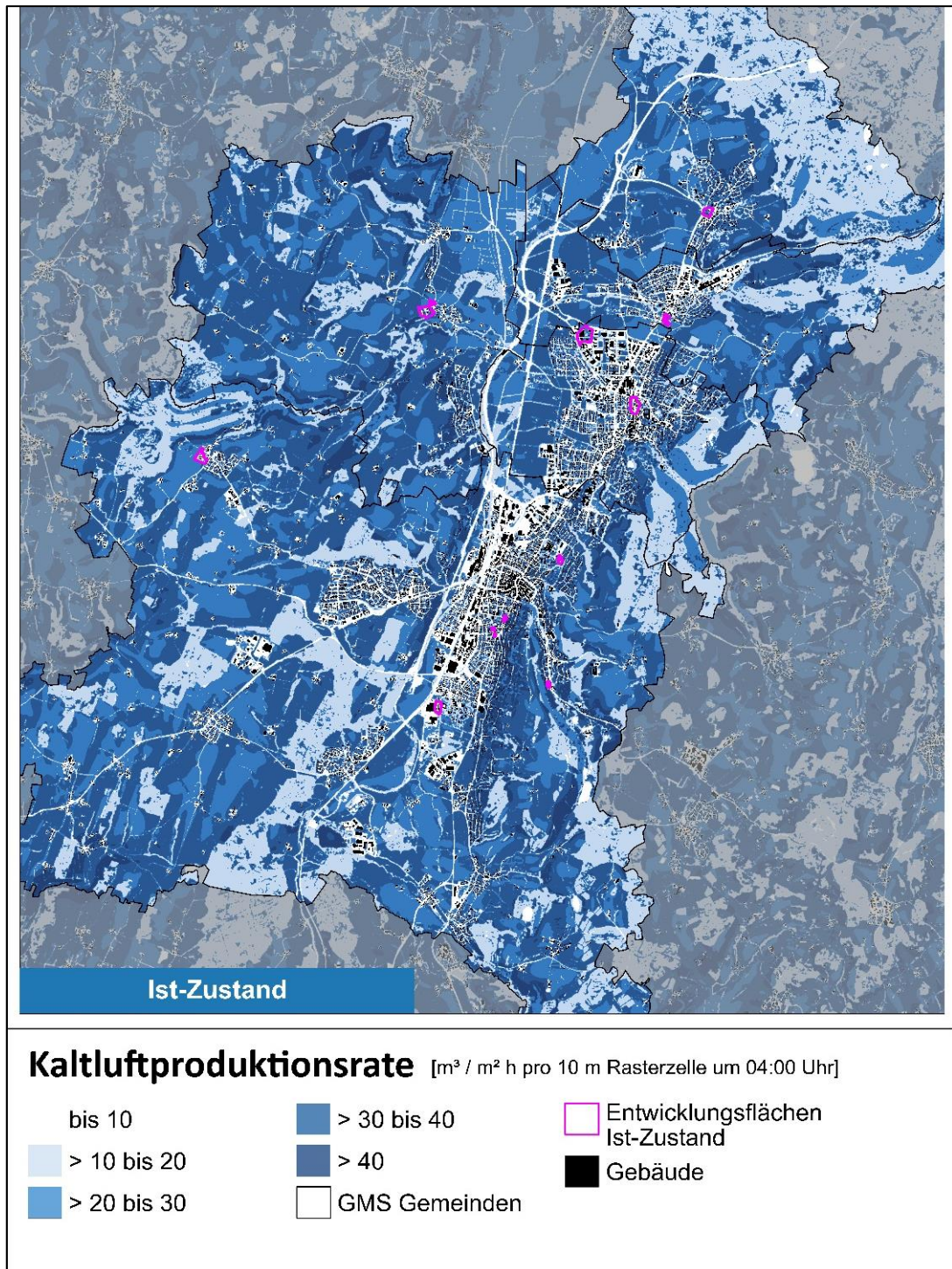


Abbildung 22: Karte AB 13: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Status quo im GMS (verkürzte Legende).

In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung des Mittleren SchusSENTals (Abbildung 23). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Die Siedlungskerne sind nach wie vor die am stärksten überwärmten Bereiche und im Szenario Starker Klimawandel werden nächtliche Temperaturen über 20 °C erreicht. Begrünte Innenhöfe sowie die aufgelockert bebauten Hanglagen stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus. Die Kaltluftproduktionsrate wird nach dem derzeitigen Stand des Wissens nicht signifikant durch den Klimawandel beeinflusst, sondern nur durch Landnutzungswandel, weshalb auf eine ausführliche Beschreibung der Modellergebnisse an dieser Stelle verzichtet wird (siehe Abbildung A & Abbildung A im Anhang).

Gesondert müssen die möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen betrachtet werden (pink gestrichelte umrandete Flächen in Abbildung 23, siehe auch Karten AB2 & AB3). Durch die Entwicklung einer bisherigen Freifläche nimmt die Lufttemperatur zusätzlich zum Klimawandelsignal infolge der Überbauung zu, wie bspw. auf den möglichen Entwicklungsflächen südlich des Gewerbegebietes Mariatal zu erkennen ist. In der Regel fällt dabei die Temperaturzunahme durch die Bautätigkeit stärker aus als durch den Klimawandel, wobei erstgenanntes durch die Ausgestaltung der Bebauung (Dichte, Versiegelungsgrad, Grünanteil) gesteuert werden kann. Im Zuge von städtebaulichen Sanierungen ist auch der umgekehrte Fall möglich: Die Umwandlung einer Gewerbebebauung in ein urbanes Wohngebiet würde die thermische Belastung in diesem Areal senken – und mit einiger Wahrscheinlichkeit sogar das Klimawandelsignal kompensieren. Auf die stadtklimatische Bewertung der Entwicklungsflächen wird bei der Beschreibung der Bewertungskarten eingegangen, auch wenn die Zukunftsszenarien nicht in die Planungshinweiskarte eingeflossen sind.

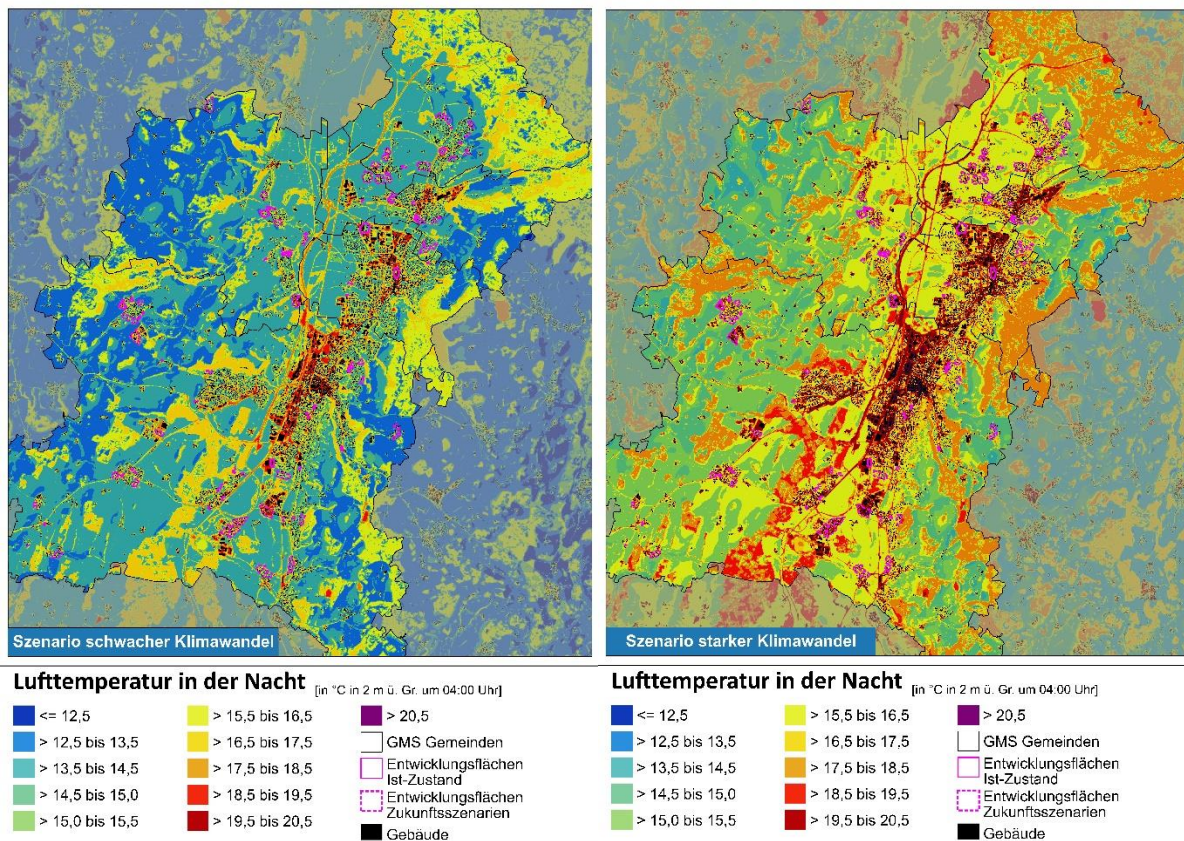


Abbildung 23: Karten AB 2 & 3: Bodennahe nächtl. Lufttemperatur in den Szenarien Schwacher Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

6.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird im mittleren Schussental wesentlich durch das Relief bestimmt, zeigt eine große Variabilität und reicht von sehr geringen bis zu maximalen Werten über $60 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$.

Durch die Lage im Schussental werden große Teile des Siedlungsraumes im GMS vergleichsweise gut von Kaltluft durchströmt. In den Modellergebnissen zeigen sich hohe Kaltluftabflüsse insbesondere aus den verschiedenen Tobeln, die für hohe Kaltluftvolumenströme bspw. östlich von Baienfurt, östlich von Ravensburg Burach oder nördlich von Ettishofen sorgen (Abbildung 24). Auch vom Tal der Wolfegger Ach und entlang der südlichen Stadtteile von Ravensburg sind relevante Kaltluftströmungen in den Siedlungsraum auszumachen. Wie im Kap. 5.6 beschrieben sind dies nicht die einzigen für das mittlere Schussental relevanten Prozesse und teilweise sind die in dieser Studie modellierten Abflüsse geringer als in Messkampagnen ermittelt. Die für den GMS-Siedlungsraum besonders relevant befundenen Kaltluftprozesse, inklusive der durch den Fachaustausch ermittelten Kaltluftprozesse hoher Relevanz, die im Modell nicht in der Form abgebildet sind, werden in der Klimaanalysekarte in Form von Kaltluftleitbahnen, flächenhaften Kaltluftabflüssen und Kaltluftentstehungsgebieten hervorgehoben (Kap. 7).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Hangbereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 25 ist die Strömungsrichtung der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 200 m aggregiert wurden. Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme (Abbildung 26). So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können (bspw. ausgehend von den Grünflächen am Wilhelm-Schieß-Weg nördlich über die Schussenstraße).

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

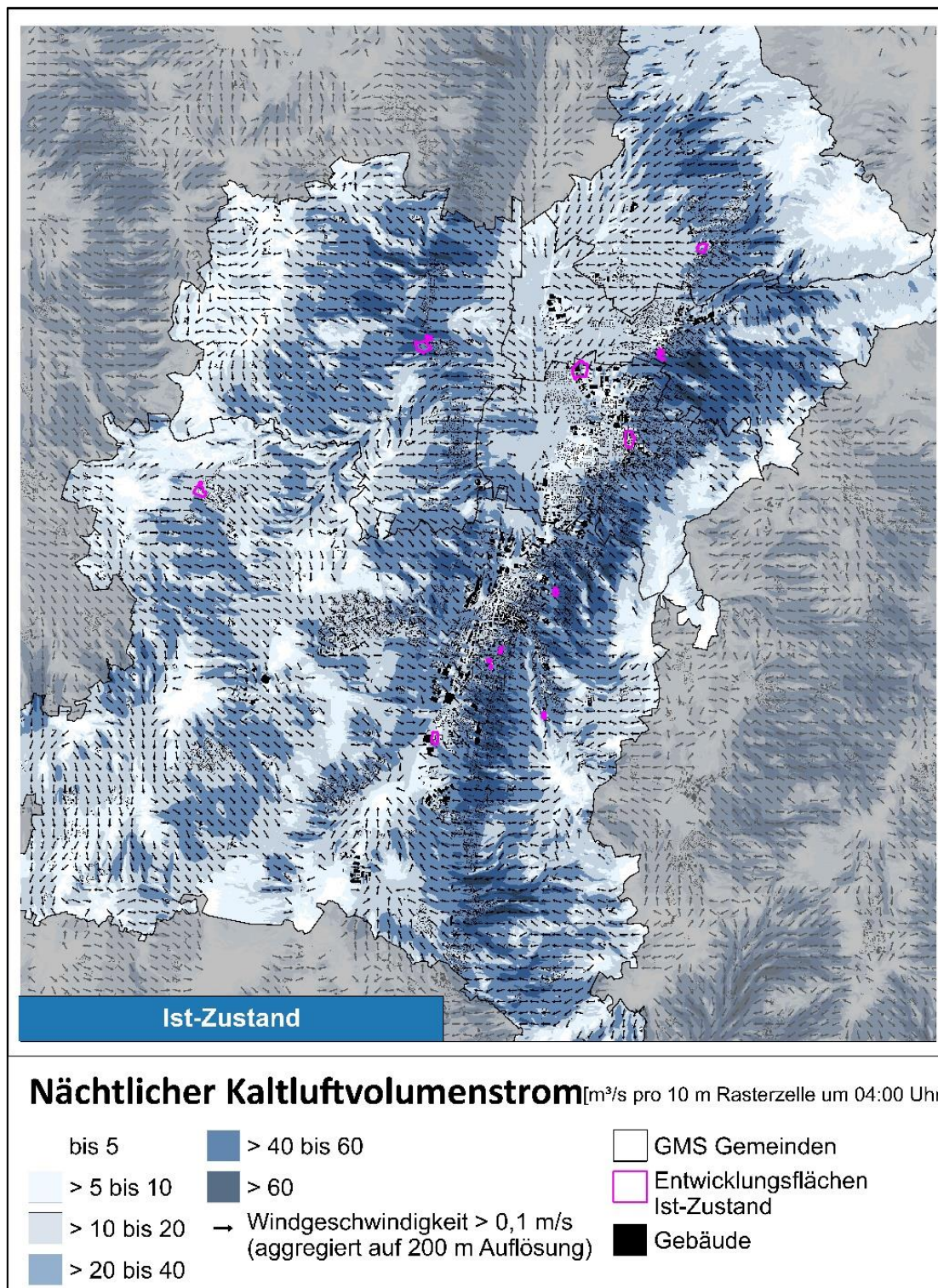
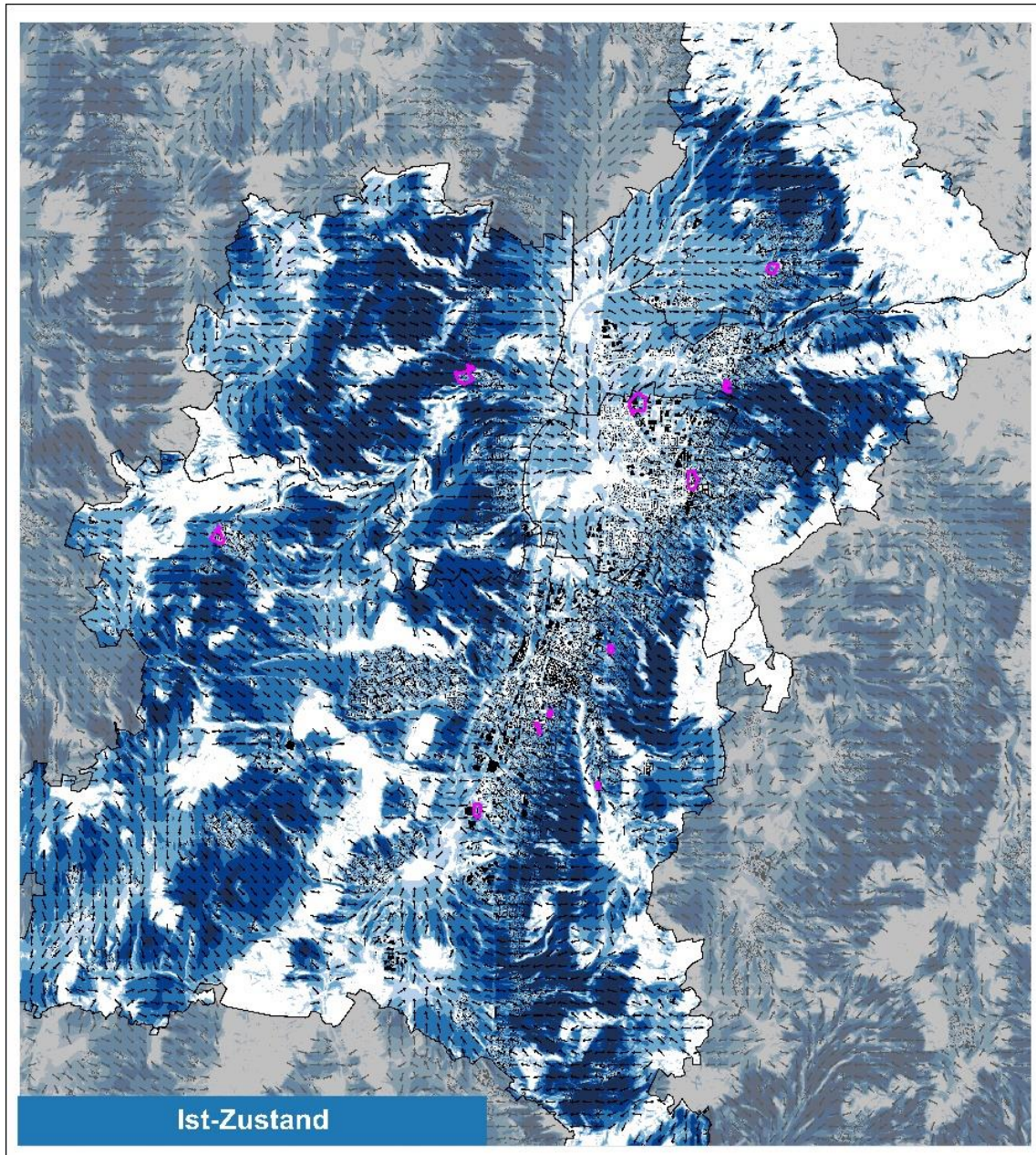


Abbildung 24: Karte AB 10: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo im GMS (verkürzte Legende).



Bodennahes Strömungsfeld [Windgeschw. in m/s in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

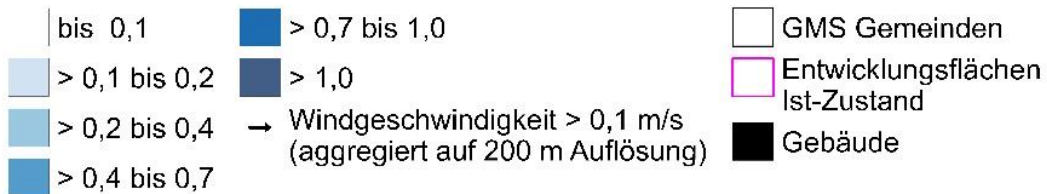


Abbildung 25: Karte AB 4: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status quo im GMS, Windpfeile aggregiert auf 200m Auflösung (verkürzte Legende).

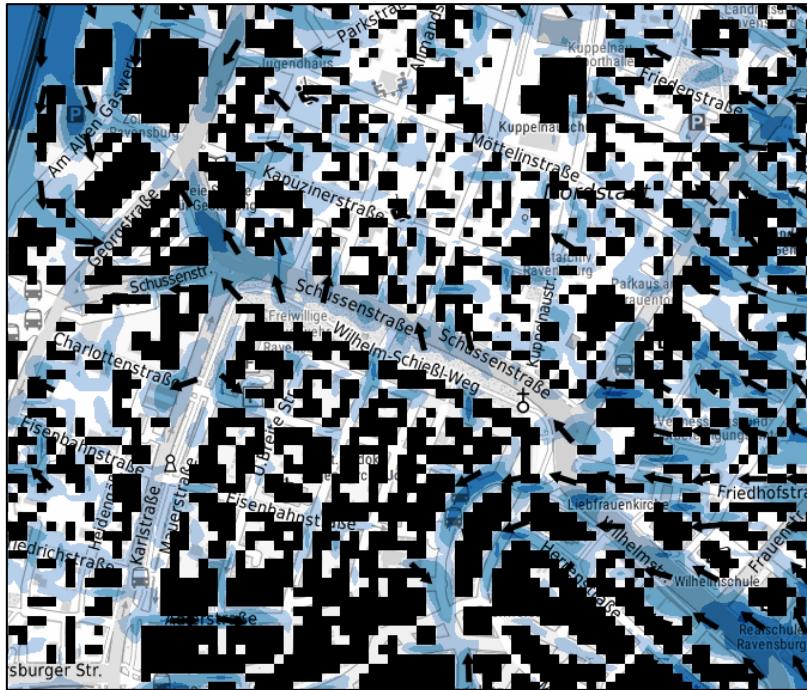
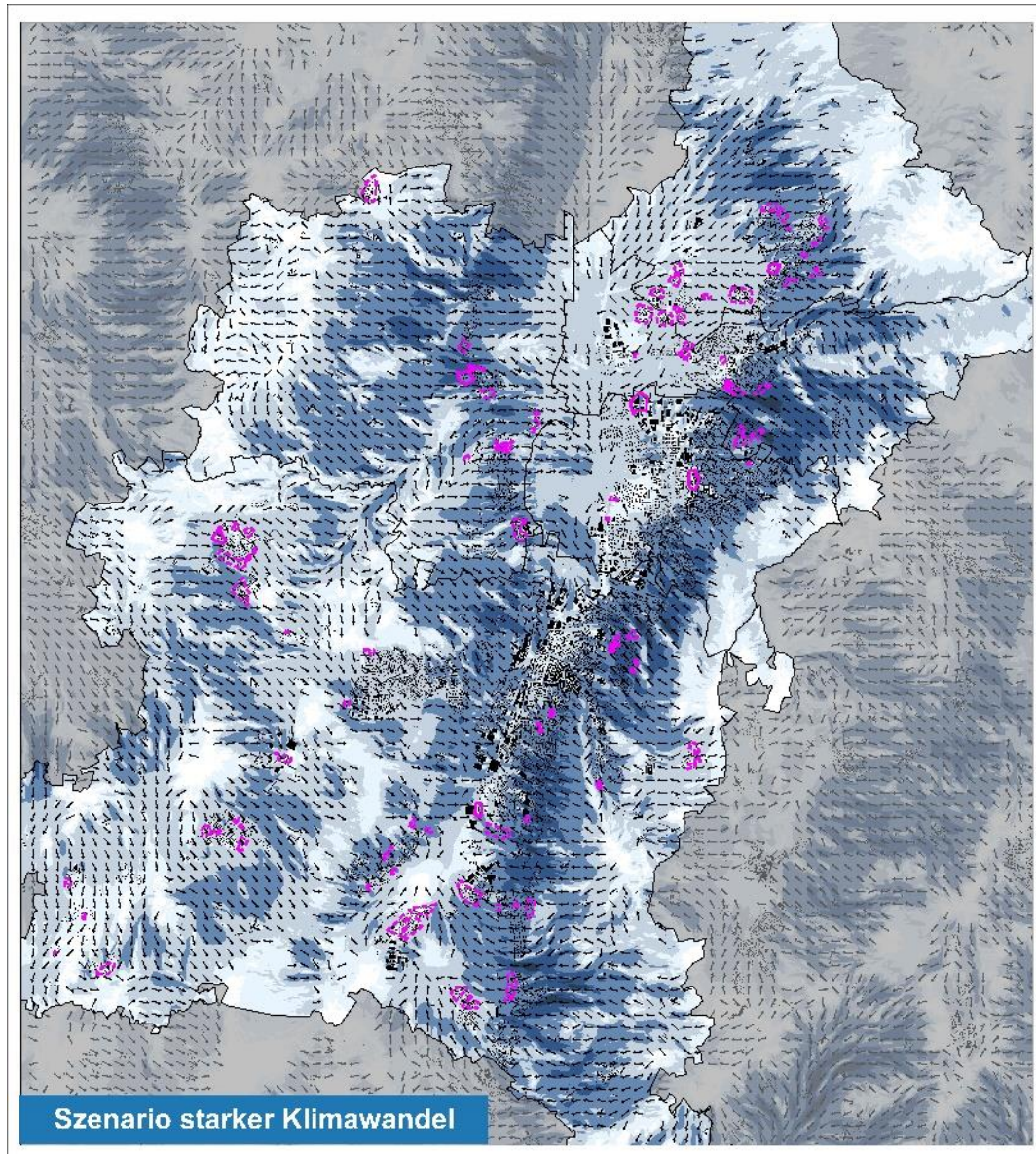


Abbildung 26: Ausschnitt: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status quo in Ravensburg rund um die Schussenstraße (Windpfeile aggregiert auf 50m Auflösung).



Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom [m³/s pro 10 m Rasterzelle um 04:00 Uhr]

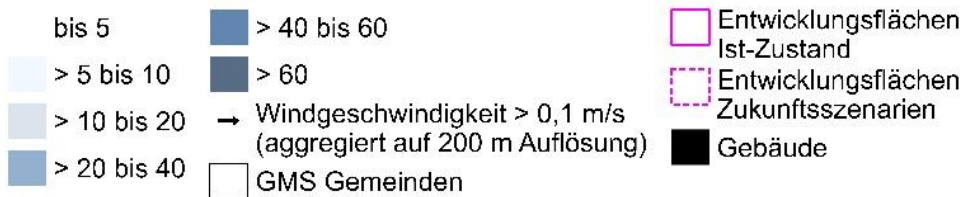


Abbildung 27: Karte AB 12: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario Starker Klimawandel im GMS (verkürzte Legende).

Infolge des Klimawandels ergeben sich keine nennenswerten Änderungen des Kaltluftprozessgeschehens, da das Relief als wesentlicher Antrieb unverändert ist und die Temperatur flächendeckend in einem ähnlichen Ausmaß steigt, sodass sich keine neuen temperaturinduzierten Flurwinde ausbilden. Eine Bebauung in den möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen kann sich dagegen auf das Kaltluftströmungsfeld auswirken.

Bestehende Kaltluftströmungen werden durch die Überbauung der Flächen in der Regel gemindert wie bspw. im Bereich östlich der Kläranlage Langwiese bei Ravensburg zu erkennen ist (siehe Abbildung 27 bzw. Karten AB10 – AB12), wobei sich das Ausmaß der Minderung über eine an das Strömungsfeld angepasste Bebauung steuern lässt. Kleinräumig können sich zudem neue Ausgleichsströmungen im Umfeld der Entwicklungsflächen ergeben, insbesondere wenn es sich um großflächige Vorhaben mit einer starken zu erwartenden Überwärmung handelt.

Die beschriebenen Muster sind repräsentativ für den Auswertungszeitpunkt 4 Uhr nachts. Für Ergebnisse zur ersten Nachhälfte und zum zeitlichen Verlauf siehe Dokumentationen REKLIBO/REKLISCHUB (Schwab & Zachenbacher 2009).

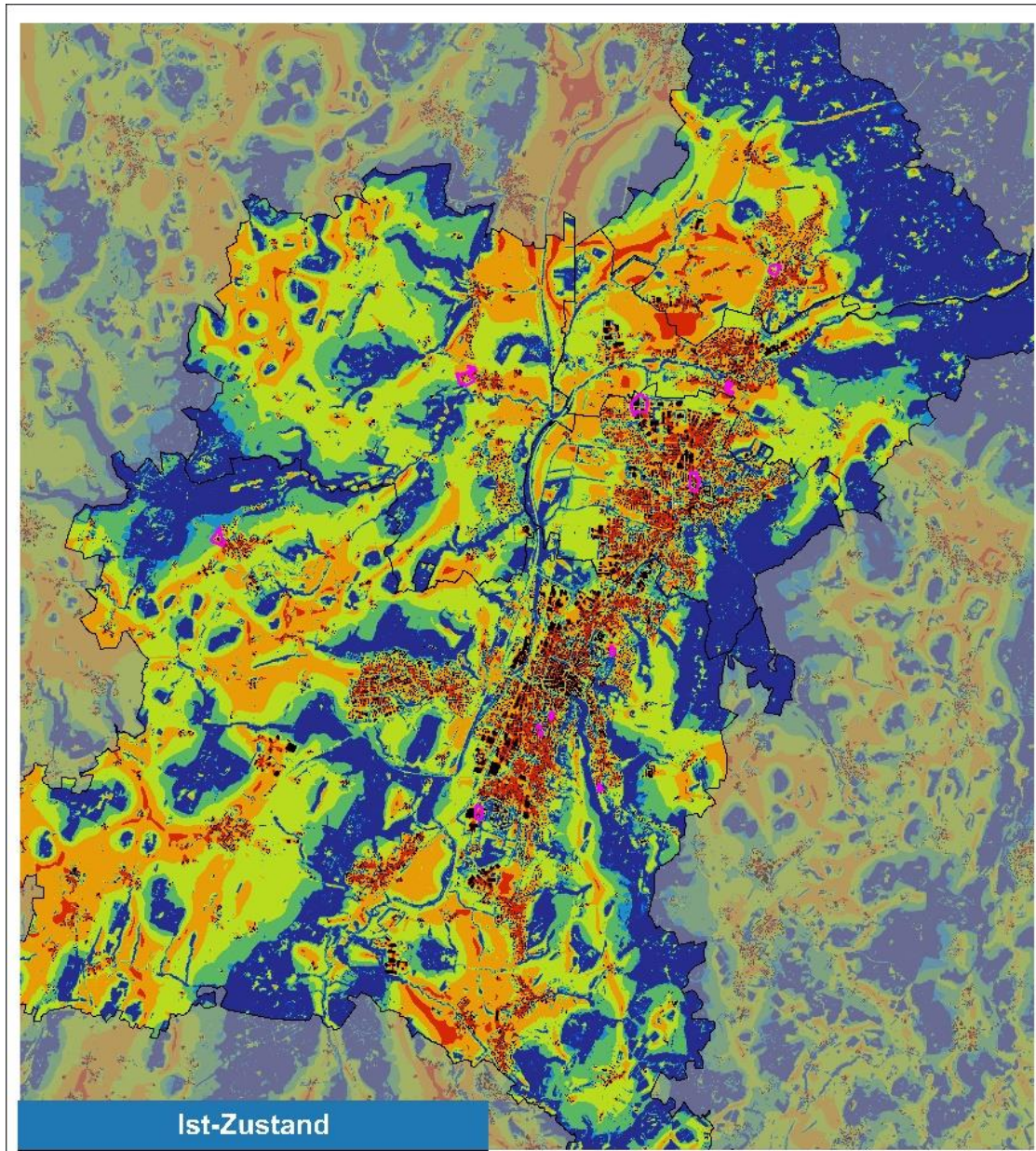
6.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 23 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; siehe Tabelle im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (z.B. im Höllwald; Abbildung 28). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass z. B. die Grünflächen rund um den Kreuzbergweiher und entlang der Schussen überwiegend eine schwache Wärmebelastung aufweisen.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten nur sehr kleinräumig über versiegelten Plätzen mit geringer Verschattung auf, wie sie z.B. auf dem Münsterplatz in Weigarten und vielen Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist, dass eine Wärmebelastung von über 39° C in einigen Wohnsiedlungsgebieten aller 5 Kommunen festgestellt werden konnte (z.B. in Ravensburg Weißenau). Die Wohngebiete bieten zwar einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume als z. B. in Wohngebieten südöstlich der PH Weigarten, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 10 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend sein kann, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Innerhalb der innerstädtischen Bereiche stellen mit Bäumen bestandene Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge, sowie begrünte Innenhöfe aufgrund ihrer geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar (z.B. der Schwanenweiher, entlang der Wolfegger Ach & der Hauptfriedhof Ravensburg).

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend in GMS, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario Starker Klimawandel gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen (siehe Abbildung 29 & Karten AB8 - AB9).



Wärmebelastung am Tage [PET* in 1,1 m ü. Gr. um 14:00 Uhr in °C]

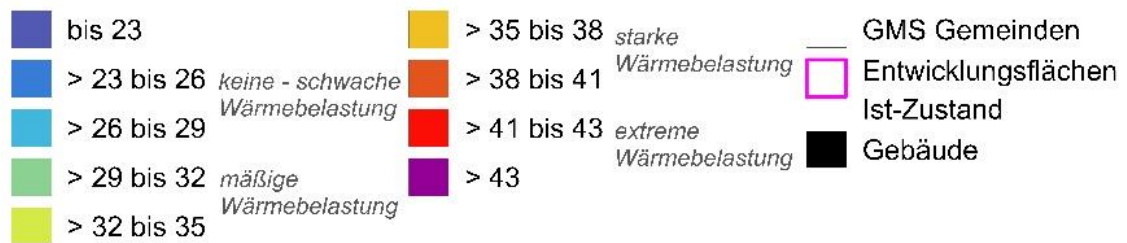


Abbildung 28: Karte AB 7: Wärmebelastung am Tag (PET) im Status quo im GMS (verkürzte Legende).

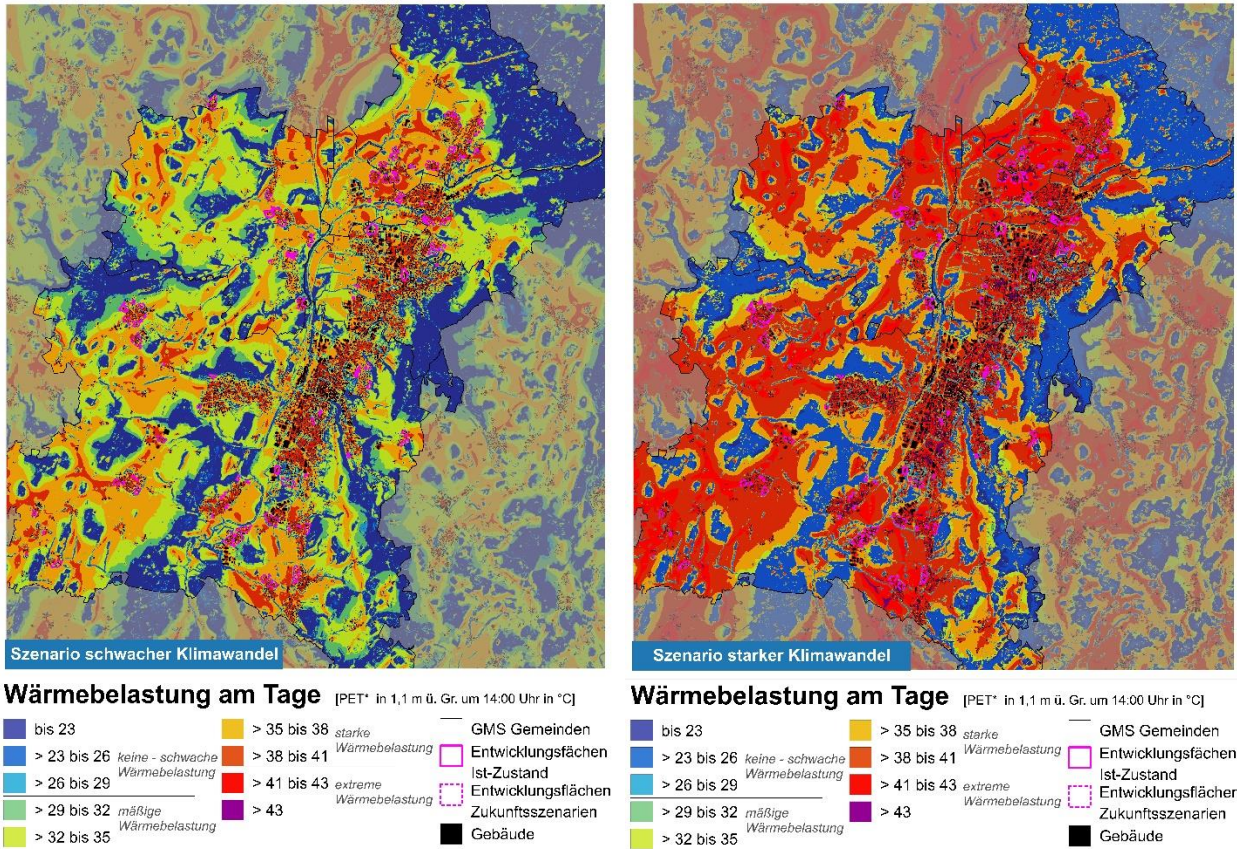


Abbildung 29: Karten AB 8 & 9: Wärmebelastung am Tag (PET) in den Szenarien Schwacher Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

7. Zwischenprodukte

7.1 KLIMAANALYSEKARTEN

Die Klimaanalysekarte (KAK) bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Kaltluftaustausches im gesamten Untersuchungsraum auf der Sachebene ab (d.h. ohne Wertungsaussagen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar („Wärmeinseleffekt“), basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Auf den Freiflächen wird das Kaltluftprozessgeschehen dargestellt (vorrangig durch den Kaltluftvolumenstrom auf diesen Flächen). Außerhalb des GMS-Gebietes wird dieses Prozessgeschehen ebenfalls dargestellt, aber i. d. R. nicht tiefergehend bewertet und beschrieben.

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 – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – 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 [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (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, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Projekt über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap. 8). Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation (Status Quo)
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2030-2040)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2030-2040)“

Eine planerische Inwertsetzung erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten & der Planungshinweiskarte.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der drei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 30). 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 (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁷ (10 m x 10 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

⁷ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilinare 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.

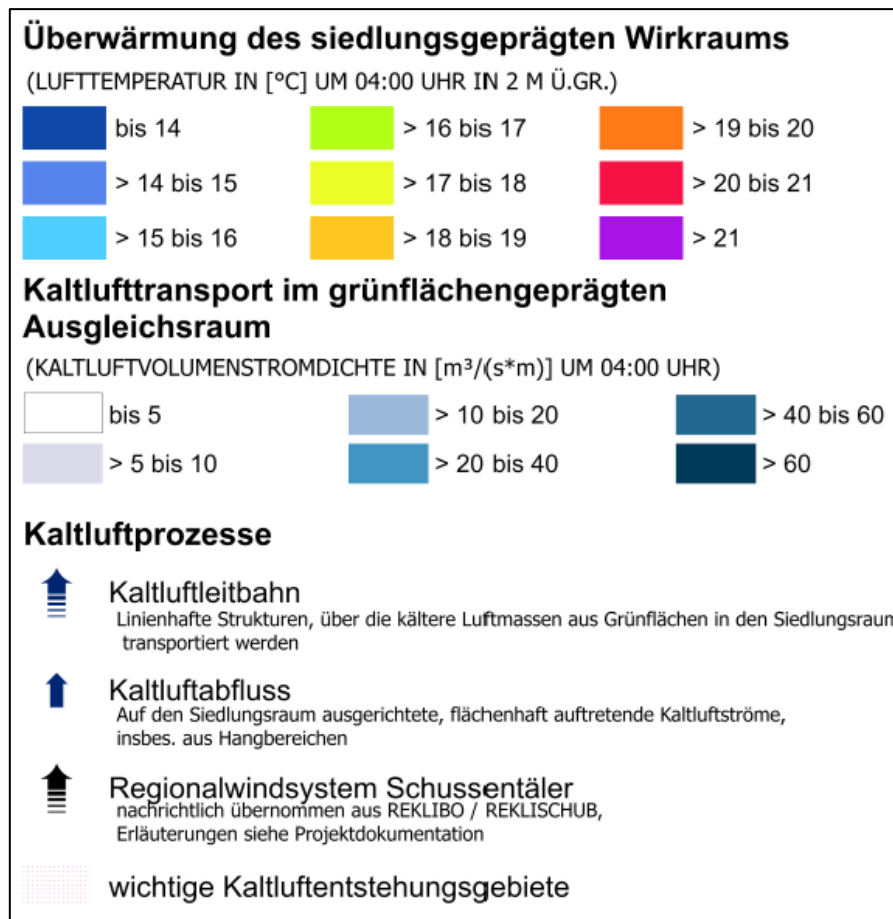


Abbildung 30: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 8). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert (siehe Karten AB16 - AB18). Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als wichtige Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen von mindestens 1 ha und einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 31,5 m³/m²h. Die Flächengröße von 1 ha repräsentiert einen in der numerischen Klimamodellierung gebräuchlichen Wert. Die entsprechende Konvention legt fest, dass für bestimmte Auswertungen nicht einzelne Gitterpunkte des Modells, sondern auch die jeweils umgebenden mitberücksichtigt werden sollten („moving window Ansatz“).

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die im mittleren Schussental 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, siehe 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 Kaltluftaustauschbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse 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 8: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,10 m/s
Kaltluftproduktionsfläche	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 31,5 m ³ /m ² h
Kaltluftleitbahn (linear)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes, der Nutzungsklassen sowie zusätzlicher Erkenntnisse aus vorherigen Studien
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes, der Nutzungsklassen sowie zusätzlicher Erkenntnisse aus vorherigen Studien
Regionalwindssystem Schussentäler	gutachterlich auf der Basis der Erkenntnisse vorheriger Studien (z. B. REKLIBO)

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Außerdem wurden im Verlauf des Qualitätssicherungsprozesses (siehe Kap. 5.6) weitere Signaturen wie z. B. der Schussentäler auf Grundlage der Erkenntnisse vorheriger Studien ergänzt (siehe Abbildung 32). Abbildung 31 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Ravensburg Burach / Eckerscher Tobel einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

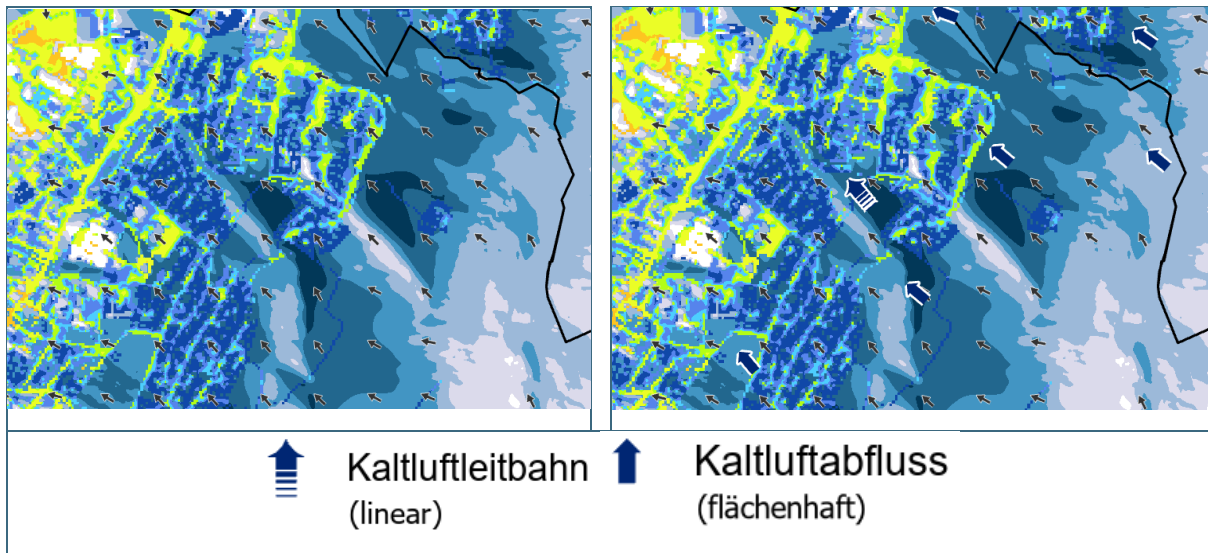


Abbildung 31: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftabflüssen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung)

Es ist für die Ausweisungen der Kaltluftprozesse in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere thermische Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können Flächen vergleichsweise wenig thermisch belastet sein, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen. Andere Flächen mit höherer thermischer Belastung sind dagegen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen und eine Zunahme der thermischen Belastung bei Wegfall der Kaltluftprozesse ist sehr wahrscheinlich. Darüber hinaus erfolgt die Ausweisung der Kaltluftprozesse unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung (z. B. Wohnen, Gewerbe, Verkehr) 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 Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte. In den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien wurde darüber hinaus gekennzeichnet, wenn ein im Ist-Zustand gekennzeichneteter Kaltluftprozess durch eine der modellierten möglichen zukünftigen Bebauungen negativ beeinträchtigt wurde (lilafarbener Pfeil in Abbildung 33 & Abbildung 34). Wie bereits im Kap. 6.3 beschrieben, werden die Kaltluftprozesse durch die zu erwartende Erwärmung eines voranschreitenden Klimawandels nicht signifikant modifiziert. Daher sind die Kaltluftsignaturen in den Klimaanalysekarten zum Ist-Zustand und zu den beiden Zukunftsszenarien, bis auf die lilafarbene Kennzeichnung einiger Pfeile, deckungsgleich in Anzahl, Lage und Ausrichtung.

Die beschriebenen Muster sind repräsentativ für den Auswertungszeitpunkt 4 Uhr nachts. Für Ergebnisse zur ersten Nachhälfte und zum zeitlichen Verlauf siehe Dokumentationen REKLIBO/REKLISCHUB (Schwab & Zachenbacher 2009).

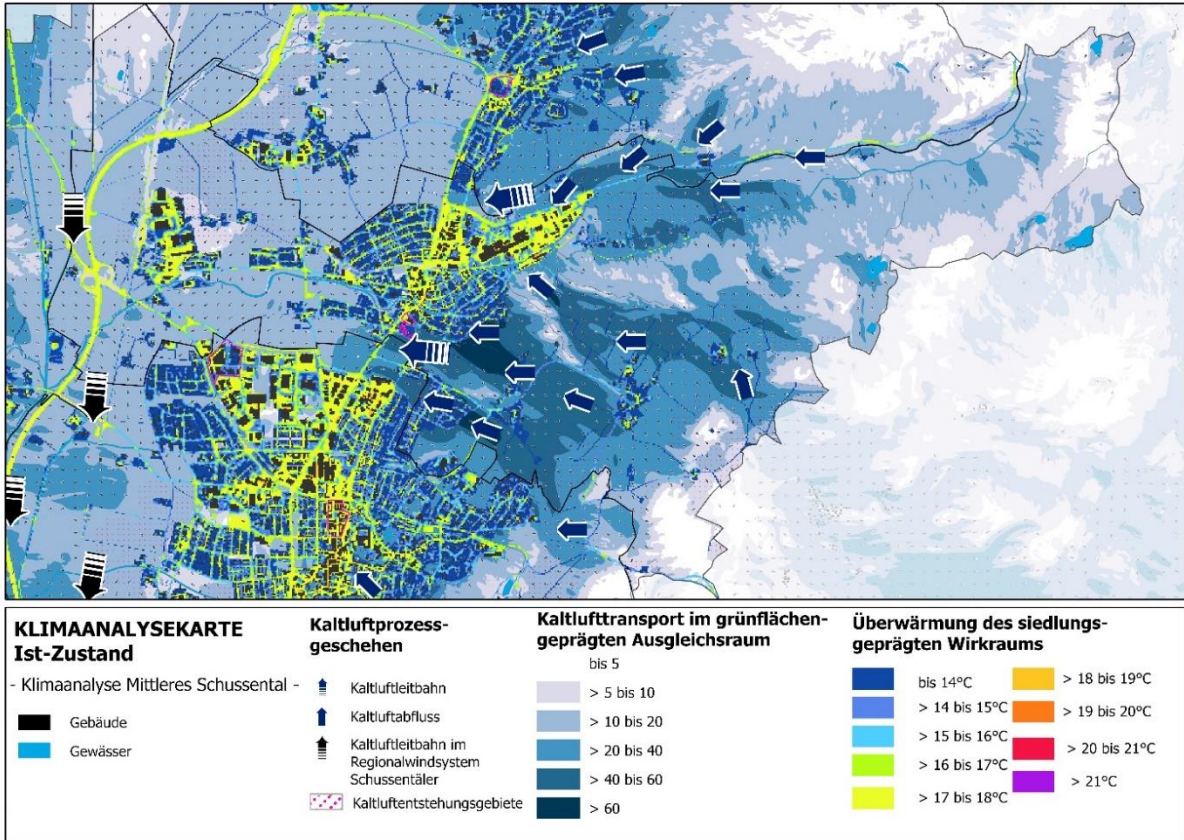


Abbildung 32: Karte AB 16: Klimaanalysekarte (Status quo) in einem Ausschnitt des Mittleren SchusSENTALES (verkürzte Legende).

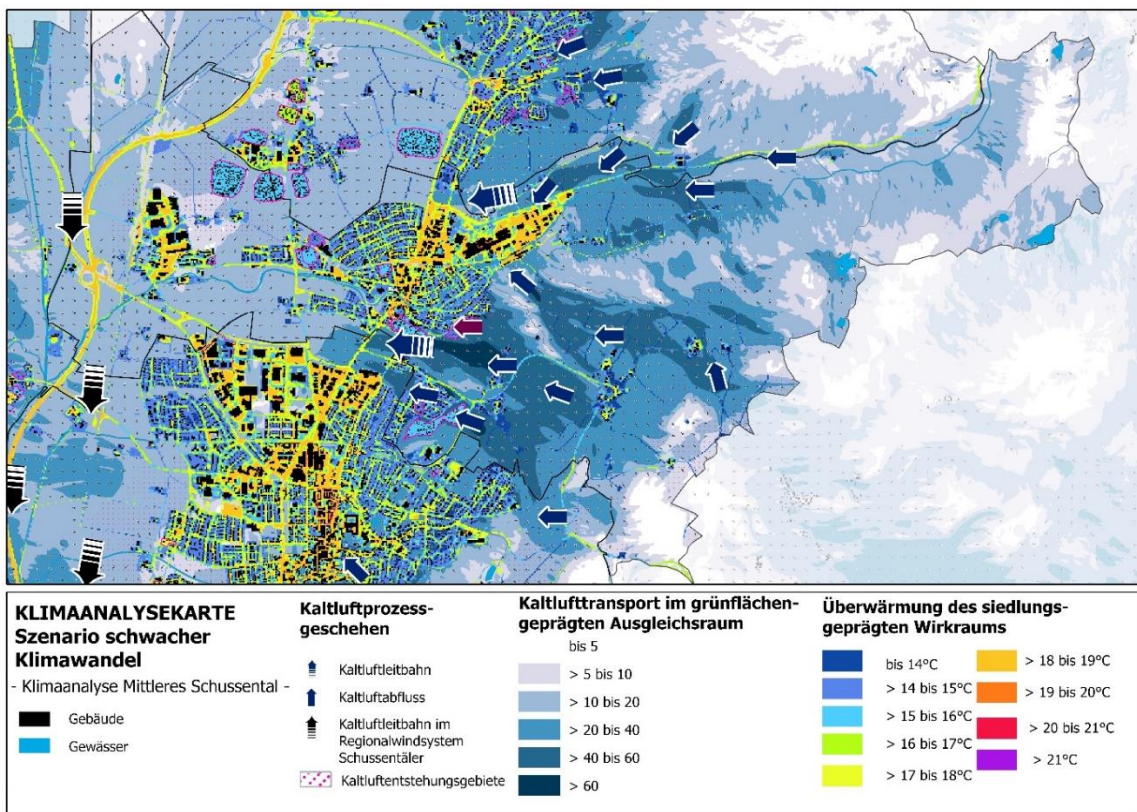


Abbildung 33: Karte AB 17: Klimaanalysekarte (Szenario Schwacher Klimawandel) in einem Ausschnitt des Mittleren SchusSENTALES (verkürzte Legende).

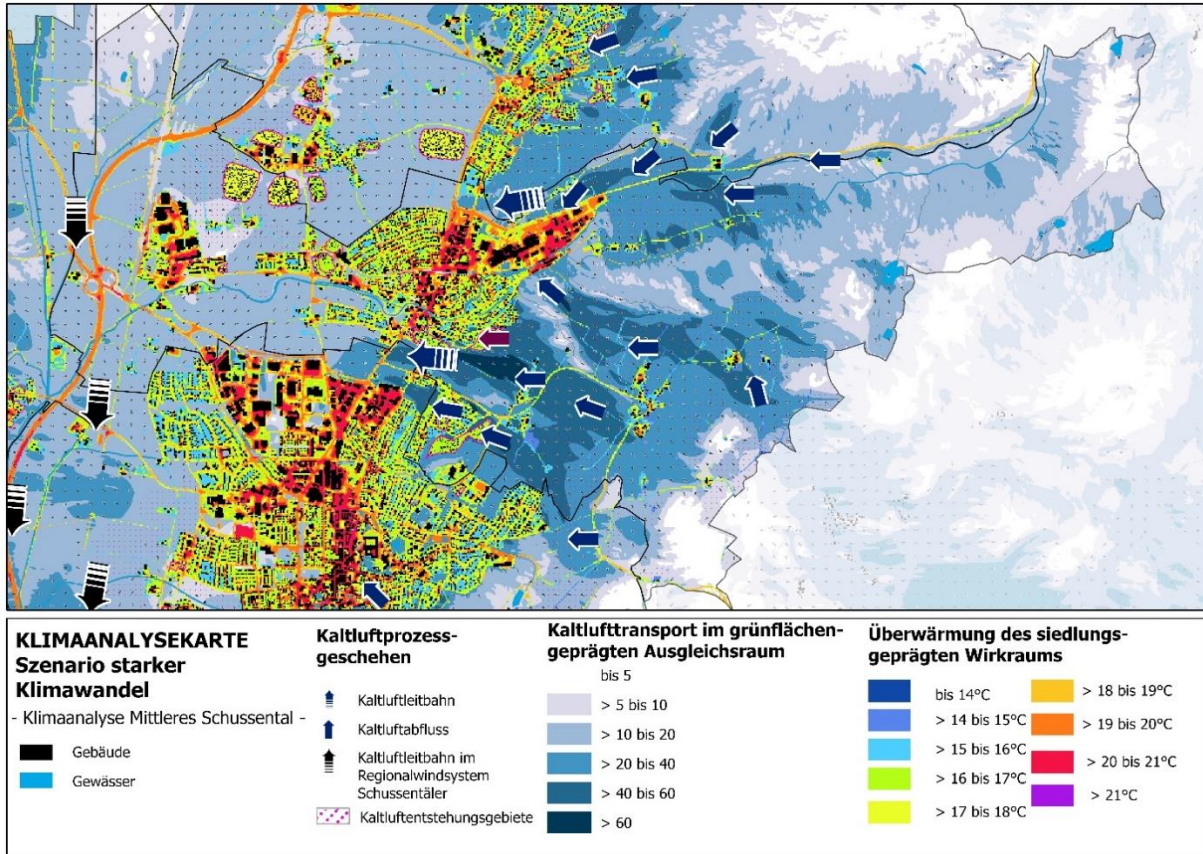


Abbildung 34: Karte AB 18: Klimaanalysekarte (Szenario Starker Klimawandel) in einem Ausschnitt des Mittleren Schusstales (verkürzte Legende).

8. Endprodukte

8.1 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 mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Lastraum (mit potentiellen 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 Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert, begründet werden kann.

Die Erstellung der Planungshinweiskarte erfolgte schrittweise und in enger Abstimmung mit den verschiedenen betroffenen Akteuren (siehe Kap. 3). Zunächst wurden sechs „Bewertungskarten“ erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien Status quo, Schwacher Klimawandel und Starker Klimawandel vorgenommen wurde. Die Bewertungskarten bauen auf den zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarten bzw. PET-Karten des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Für die Ableitung der PHK wurden am Ende des Abstimmungsprozesses nur die Bewertungskarten Tag und Nacht des Ist-Zustandes verwendet, da die Detailtiefe und Aktualität der modellierten Entwicklungsflächen für eine vergleichende Betrachtung auf GMS-Ebene als zu unterschiedlich eingestuft wurden.

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (siehe Kap. 6.1) 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 der humanbioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Siedlungsraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das GMS-Gebiet 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 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).

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen), der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten 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 100 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 35).

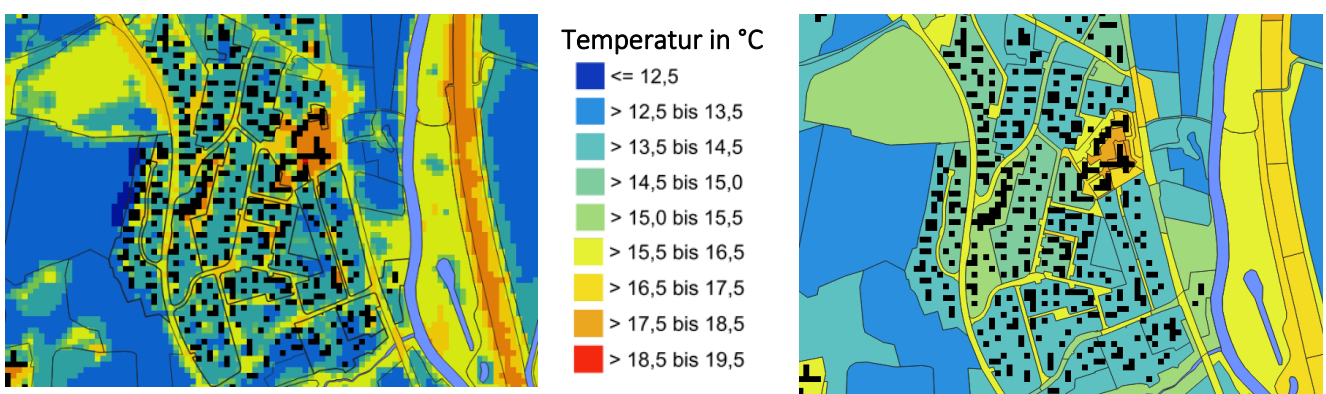


Abbildung 35: Darstellung der nächtlichen Lufttemperaturen: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie.

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

Die Modellergebnisse und die Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Beurteilung in den Bewertungskarten (und später auch der Planungshinweiskarte „PHK“) fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation sowie für Ist-Zustand und Zukunftsszenarien erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Wirkraum sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008, VDI 2015). Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die beiden Rechen-szenarien und Tageszeiten geschildert.

8.3.1 WIRKRAUM – METHODIK

Wertgebend sind die PET um 14:00 für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (siehe die Ausführungen in Kap. 5.5). Die Flächenbewertung muss den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit der auftretenden thermischen Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sog. 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 sowie negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 36).

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

Dabei ist

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

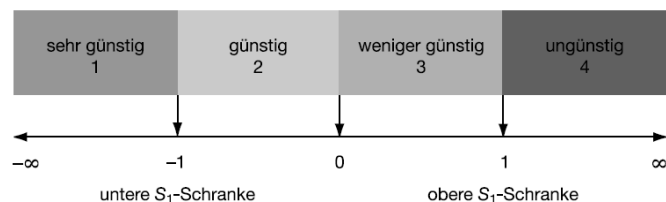


Abbildung 36: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008).

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 Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (siehe hierzu Kap. 4 sowie Kap. 2 des Hauptberichtes zum KLAK). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch

sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei zu betrachtenden Situationen (Referenzsituation, schwacher Klimawandel, starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken der beiden Extremsituationen der Referenzsituation (als kälteste Situation) und P2 Szenarios (als im Flächenmittel wärmste Situation) miteinander verknüpft und aus dieser neuen Grundgesamtheit einheitlich zu verwendende Variablenausprägungen zur Berechnung der z-Werte abgeleitet. Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen, da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieses Möglichkeitskorridors auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist das Szenario schwacher Klimawandel (P1), das keinen Einfluss auf die Berechnung der z-Statistik hatte, dessen Temperaturfelder dank der skizzierten Vorgehensweise aber dennoch mit derselben Methode bewertet werden können wie die Bestandssituation und das Szenario starker Klimawandel (P2). Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten, Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für alle drei betrachteten Situationen mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Die ursprünglich 4-stufige wurde in eine 5-stufige Skala überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen (Tabelle 9).

Für die Bewertungskarten ergeben sich sowohl für die Referenzsituation als auch für die beiden Szenarien tageszeitabhängige Wirkraumkulissen. Die Ableitung erfolgte auf der Ebene von Basisgeometrieklassen. Demnach wurden für die Nachtsituation Wohn- und Mischgebiete (Basisgeoklasse 6 „Wohnfläche“) sowie reine Gewerbe-/Industriegebiete und Gemeinbedarfsflächen (Basisgeoklasse 5 „Industrie/Gewerbe“) herangezogen. Für die Tagsituation wurden zusätzlich Öffentliche Straßen, Wege und Plätze berücksichtigt (Basisgeoklasse 10 „Verkehrsfläche“).

Tabelle 9: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Methode	Relevant für
Tagsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und ≤ -0,33 z-Wert > -0,33 und ≤ 0,33 z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Wirkraum 1 („Industrie/Gewerbe“ & „Wohnflächen“) Wirkraum 2 („Verkehrsfläche“)
Tagsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering	PET 14:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und ≤ -0,33 z-Wert > -0,33 und ≤ 0,33 z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Ausgleichsraum („Wald“ & „Freifläche“)
Nachtsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = mittel	Luft-Temp. 04:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und ≤ -0,33 z-Wert > -0,33 und ≤ 0,33	Wirkraum 1 („Industrie/Gewerbe“ & „Wohnflächen“)

	4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	
Nachtsituation	Eigene Einteilung 5 = Sehr hoch 4 = Hoch 3 = Mittel 2 = Gering 1 = Sehr gering	Ableitung anhand eines Bewertungsbaumes Abhängig von: Rolle der Grünfläche im Kaltlufthaushalt; Lage der Grünfläche; Art der Grünfläche (Wald / kein Wald)	Ausgleichsraum („Wald“ & „Freifläche“)

8.3.2 AUSGLEICHSRAUM – METHODIK

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet, die vornehmlich in der Nacht durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen dazu in der Lage sind, lufthygienische oder humanbioklimatische Belastungen in Wirkräumen zu vermindern oder abzubauen oder durch ihre Schattenwirkung am Tage als wertvolle Naherholungsräume dienen können. Durch diese unterschiedlichen Kerneigenschaften der Ausgleichsräume zu unterschiedlichen Tageszeiten war es notwendig, die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt zu bewerten und wie bereits im Wirkraum in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen. Sowohl für den Ist-Zustand als auch die Zukunftsszenarien wurden hierbei jeweils dieselben Methodiken angewandt.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen bzw. dem Regionalwindssystem Schusstäler stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung, wenn sich in deren direktem Luv befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet) (Abbildung 37). Auch bei den weiteren Grünflächen spielen der Siedlungsbezug und die Funktion des Kaltlufthaushalts eine wichtige Rolle. Eine Grünfläche, die eine angrenzende Siedlungsfläche mit hoher thermischer Belastung mit Kaltluft versorgt, bekommt beispielsweise die höchste bioklimatische Bedeutung zugewiesen.

Die folgende Abbildung 37 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- **Klimafunktion:**
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 18,39 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})^8$ oder
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,42 \text{ m/s}$ oder
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 33,66 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- **Angrenzend an Wohngebiete:** Entfernung max. 30 m Luftlinie
- **Siedlungsbezug:** Entfernung bis 500 m Luftlinie
- **Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen⁹**

⁸ Angegeben sind die jeweiligen Mittelwert (MW) des Ist-Zustandes, da dieser Zustand auch in Zukunft zu schützen ist, wurde dieser MW auch als Grenzwert für die Beurteilung der Zukunftsszenarien angesetzt.

⁹ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

Als Lesehilfe des Bewertungsschlüssels kann folgendes Beispiel dienen: Für eine Grünfläche, die nicht Teil einer Kaltluftleitbahn bzw. eines Kaltluftabflusses ist und an Wohngebiete mit (sehr) ungünstiger humanbioklimatischer Situation angrenzt, gilt folgende Zuordnung:

- Die Fläche weist eine Klimafunktion auf → Sie besitzt eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung.
- Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf → Sie besitzt eine mittlere bioklimatische Bedeutung.

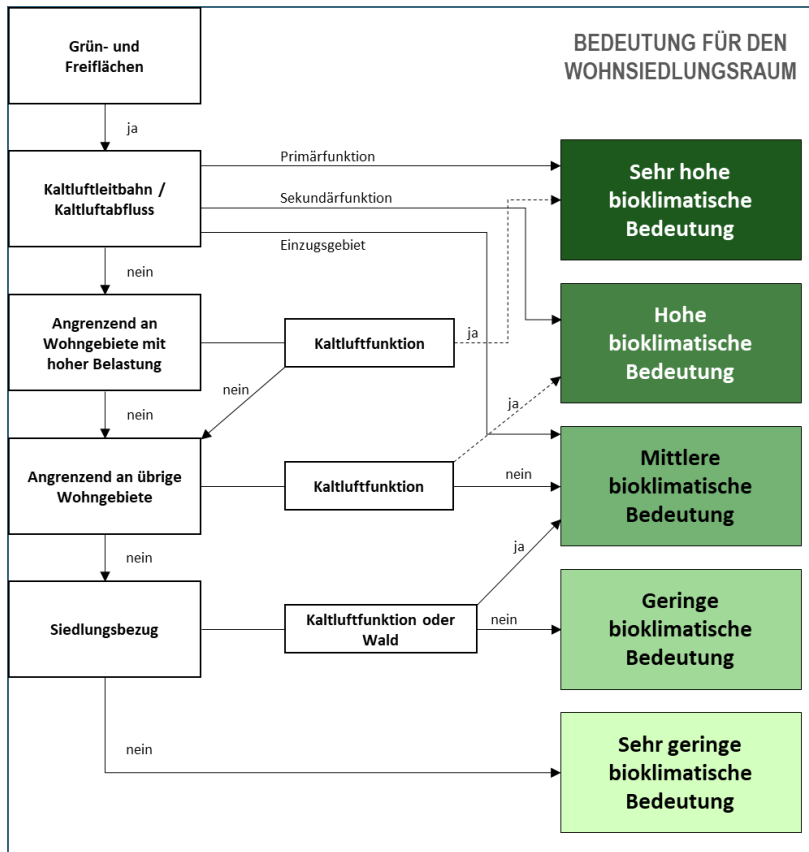


Abbildung 37:
 5-stufige Bewertungsskala für
 den Ausgleichsraum in der Be-
 wertungskarte Nacht

Analog zur Wirkraumbewertung am Tage ist auch für die Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung der Flächen im Ausgleichsraum die modellierte Wärmebelastung (PET) bzw. deren z-Transformation maßgeblich. Neben einer möglichst hohen Aufenthaltsqualität im bewohnten Siedlungsraum ist zusätzlich jene im Umfeld von Industrie- und Gewerbeflächen von übergeordneter Relevanz, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten (siehe Tabelle 9).

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 32, Abbildung 33 & Abbildung 34) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und das Regionalwindssystem SchusSENTÄLER aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine pinke Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (siehe Kapitel 7.1).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen werden in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum weitere Informationen zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkungsbereich in blauer, rasterbasierter Schraffur zeigt an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von $21,92 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von $0,32 \text{ m/s}$ erreichen oder überschreiten. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.

8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON IST-ZUSTAND UND ZUKUNFTSSZENARIO

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt der Bewertungskarte der Nachtsituation für das mittlere Schussental im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 23 % der Wohn- und Gewerbeflächen des GMS sind durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen an den Siedlungsrändern, insbesondere jene am östlichen Rand von Baidt, Weingarten (Neubriach), der Ravensburger Nord- & Oststadt oder im Nordwesten von Weingarten dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt.

Gleichmäßig über alle Kommunen und alle Ortschaften verteilt zählen aktuell fast die Hälfte der Flächen (47,6 %) zu den Wirkungsräumen mit einer günstigen thermischen Situation. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen. Zum überwiegenden Teil handelt es sich bei diesen Flächen um Wohngebiete, auch wenn vereinzelt nicht bewohnte Flächen (z.B. Humpis-Schule Ravensburg) dazu kommen. Bei manchen der Flächen sorgen der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte bereits am Tage dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann.

17,7 % der Wohn- und Gewerbeflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um nicht bewohnte Gebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad oder Gebiete im Übergangsbereich von Innenstadt und weiter außen gelegenen Stadtteilen. Beispielhaft sind hierfür das Gewerbegebiet östlich von Baienfurt oder Flächen südlich des Marienplatzes in Ravensburg zu nennen.

Knapp 11% der Wohn- und Gewerbeflächen des mittleren Schussentales gehören der Klasse der Flächen mit ungünstiger thermischer Situation an. Darunter entfällt neben wenigen kleinen innerstädtischen Siedlungsräumen in Ravensburg der Großteil dieser Flächenkategorie auf die Industrie- und Gewerbegebiete des GMS. Exemplarisch sind hier das Karrer-Gebiet, die Flächen entlang der Bahnstrecke in Ravensburg und in Weingarten rundum die Waldseerstraße zu nennen. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt.

Mit ca. 0,3 % der Wohn- und Gewerbeflächen ist derzeit nur ein verschwindend geringer Teil der Flächen durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Bewertungskarte Nacht zeigt im Status Quo, dass die Innenstadtbereiche von Ravensburg in einem ca. 200 m großen Radius um den Marienplatz in einer autochthonen sommerlichen Wetterlage von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen sind. Von den betroffenen Flächen ist nur ein geringer Teil überwiegend wohnlich genutzt.

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand für den Ist-Zustand eine Ausweisung von 5,1 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche (Primärfunktion) der Kaltluftleitbahnen, der Kaltluftabflüsse und des Schussentälers.

Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 17,0 % innerhalb des Gemeindeverbands Mittleres Schussental wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse (Sekundärfunktion). Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze (z.B. Tennisclub Ravensburg e. V.) oder an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen (z.B. rund um Gornhofen). Zusätzlich gehören ein paar innerstädtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, z.B. der Spielplatz & Badmintonpark in der Ravensburger Südstadt.

Mit 24,5 % entfällt ca. ein Viertel aller Ausgleichflächen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der siedlungsnahen Agrarflächen rund um die einzelnen Ortschaften in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit geringer humanbioklimatischer Bedeutung in der Nacht nimmt mit 41,4 % den größten Teil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Ackerflächen z. B. am westlichen Hang des Schussenbeckens sowie Waldbereiche (z.B. Altdorfer Wald und Teile des Schmalegger und Rinkenburger Tobels), die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen.

Den letzten Anteil der Ausgleichsflächen bilden mit 12 % all jene Grün- und Freiflächen, die keinen nennenswerten Beitrag zum heutigen Kaltluftprozessgeschehen leisten. Hierzu zählen Freiflächen nördlich des Schmalegger Tobels, rundum Schachen und östlich von Oberzell.

Im Wirkraum ändert sich die Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen, die bereits im Ist-Zustand existierten, in Abhängigkeit zur Stärke des Klimawandelsignals. Die deutlichsten Veränderungen sind bei den beiden Randklassen (also „sehr günstig“ und „sehr ungünstig“) erkennbar. Im Szenario schwacher Klimawandel sinkt der Anteil der Wirkraumflächen mit sehr günstigen Bedingungen (Kategorien "hohe" und "sehr hohe ...") von etwas über 20 auf ca 2 % ab, für das Szenario des starken Klimawandels konnten keine Flächen mehr

als „sehr günstig“ eingestuft werden. Für die Klasse „sehr ungünstig“ zeigt sich ein diametral entgegengesetztes Bild: waren solche Flächen im Ist-Zustand quasi nicht vertreten steigt der Anteil im Szenario P1 auf 6 % und im Szenario P2 sogar auf mehr als ein Viertel (26,2 %). Durch die angenommene Flächenentwicklung bis 2040 erhöht sich zusätzlich die Größe des bebauten Areals im Gebiet des GMS von ca. 2.130 ha auf 2.280 ha und damit um rund 7%. Diese neuen Wirkraumflächen erhielten im Rahmen der nächtlichen Bewertungskarten für die Zukunftssituation nun ebenfalls eine Beurteilung, wobei sich locker und weitgehend versiegelungsarme und ggf. am Stadtrand befindliche Siedlungsbereiche eher in den günstigeren bis mittleren Bewertungsklassen wiederfanden, großflächig versiegelte Flächen, vorrangig Gewerbegebiete, hingegen eher in den ungünstigeren. Aber auch hier ist der Einfluss des Klimawandelsignals erkennbar, so gut wie jede Entwicklungsfläche ist im Szenario P2 eine Klasse schlechter bewertet als im Szenario P1.

Anders als im Wirkraum haben sich in den Zukunftsszenarien im Ausgleichsraum nur wenige Bestandsflächen im Vergleich zum Ist-Zustand verändert, da deren Funktionen eng mit der Nähe zum (belasteten) Siedlungsraum verwoben sind. Auch im Bereich vieler Kaltluftabflüsse, die direkt auf Siedlungsagglomerationen hindeuten und künftig vom Ausgleichs- zum Wirkraum transformiert werden, geschieht eine Bedeutungsaufwertung der luvwärts vorgelagerten Grün- und Freiflächen infolge der Abflussverschiebungen. Im Vergleich des Status Quo mit dem P1 Szenario ändern sich die Klassenverteilungen nur minimal. Nur im Szenario starker Klimawandel zeigt sich eine Zunahme der Ausgleichsräume mit sehr hoher Bedeutung von 5 auf 10 %.

Tabelle 10: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand und im Zukunftsszenario.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen in Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1	Flächenanteil im Ist-Zustand [%]	Flächenanteil im P1 Szenario [%]	Flächenanteil im P2 Szenario [%]
Nachtsituation	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	23,0	2,3	0
		2= günstig	47,6	44,8	1,0
		3= mittel	17,7	31,2	32,0
		4= ungünstig	11,3	15,6	40,8
		5= sehr ungünstig	0,3	6,0	26,2
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	5,1	5,6	10,0
		4= hoch	17,0	16,3	11,8
		3= mittel	24,5	25,7	25,7
		2= gering	41,4	40,8	40,3
		1= sehr gering	12,0	11,5	12,2
Tagsituation	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	11,3	7,1	1,0
		2= günstig	35,7	25,9	6,5
		3= mittel	46,9	51,9	28,3
		4= ungünstig	6,1	15,1	56,9
		5= sehr ungünstig	0	0,1	7,4
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	16,8	12,3	4,9
		2= günstig	29,4	22,8	9,0
		3= mittel	39,9	41,5	23,4
		4= ungünstig	13,8	22,5	46,5
		5= sehr ungünstig	0,1	0,9	16,2
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	31,7	30,3	16,3
		4= hoch	5,6	5,5	17,1
		3= mittel	32,7	24,9	4,7
		2= gering	29,5	37,7	31,9
		1= sehr gering	0,4	1,6	30,0

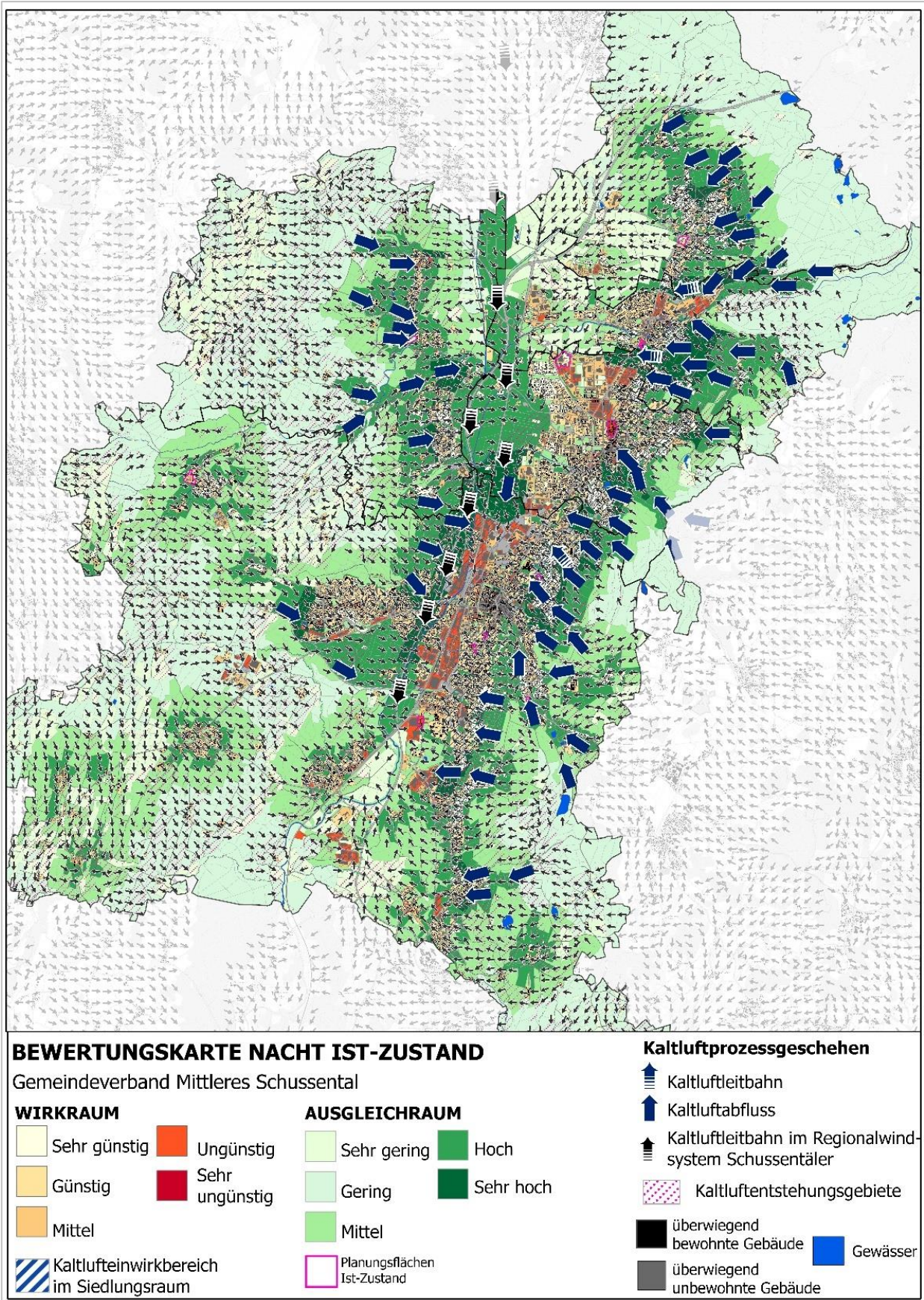
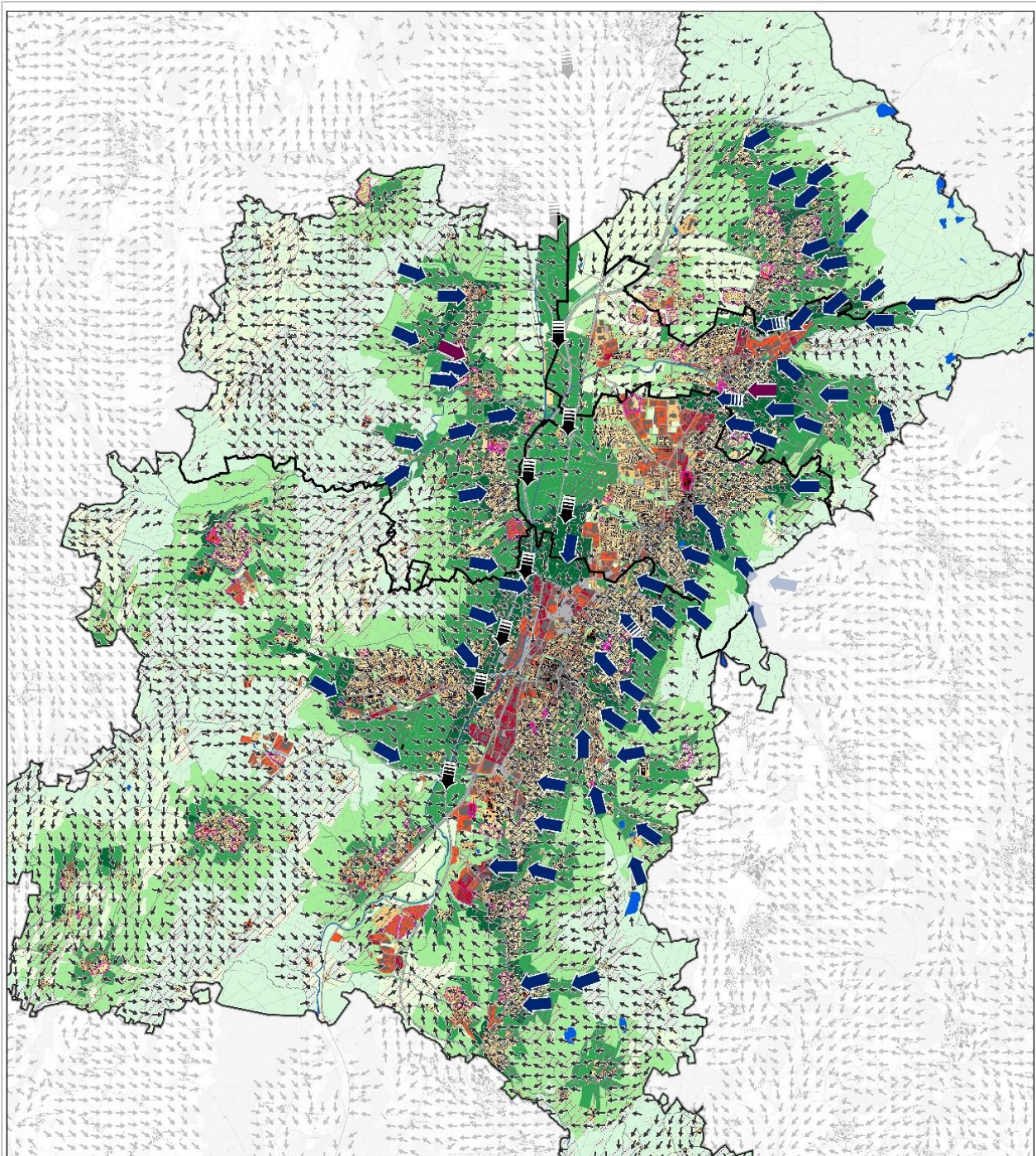


Abbildung 39: Karte AB 19: Bewertungskarte der Nachtsituation im Ist-Zustand für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).



BEWERTUNGSKARTE NACHT

- Szenario schwacher Klimawandel -

Gemeindeverband Mittleres Schusstal

WIRKRAUM

- Sehr günstig
- Günstig
- Mittel
- Ungünstig
- Sehr ungünstig

AUSGLEICHRAUM

- Sehr gering
- Gering
- Mittel
- Hoch
- Sehr hoch
- Planungsflächen Ist-Zustand
- Entwicklungsflächen & Reserven

Kaltlufteinwirkungsbereich im Siedlungsraum

Kaltluftprozessgeschehen

- Kaltluftleitbahn
- Kaltluftabfluss
- Kaltluftleitbahn im Regionalwind-system Schusstäler
- Kaltluftentstehungsgebiete
- überwiegend bewohnte Gebäude
- überwiegend unbewohnte Gebäude
- Gewässer

Abbildung 40: Karte AB 20: Bewertungskarte der Nachtsituation im Szenario P1 für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

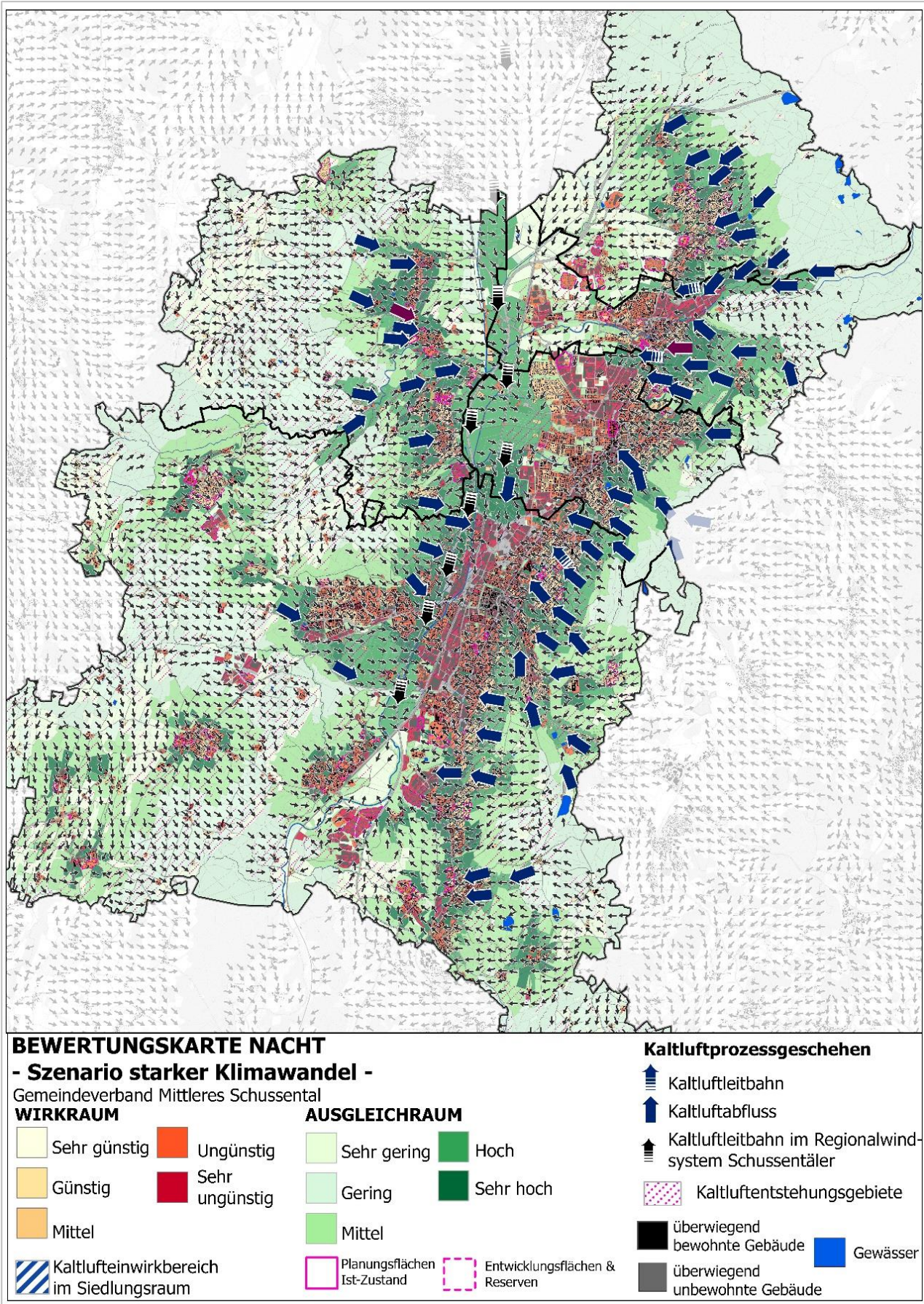


Abbildung 41: Karte AB 21: Bewertungskarte der Nachtsituation im Szenario P2 für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für den GMS, die im Ist-Zustand in Abbildung 42 aufgetragen ist, werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die PET, die vornehmlich durch Verschattung modifiziert wird.

Im Mittleren Schussental sind 11,3 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 16,8 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation am Tage gekennzeichnet. Vor allem die durchgrüneten, zumeist wald- oder gewässernahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- (und insbesondere Baum-)anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum.

35,7 % der Wohn- und Gewerbeflächen des GMS wurden der Kategorie der günstigen human-bioklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Bei den Verkehrsflächen weisen 29,4 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf.

Mit 46,9 % ist fast die Hälfte der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch mehr als ein Drittel der Verkehrsflächen (39,9 %) aktuell mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt sowohl Wohngebiete als auch Gewerbegebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Die Großzahl an Flächen in den Innenstädten und Kernbereichen der Ortschaften sind mit dieser Klassifizierung belegt. Obwohl die Grünausstattung in den teilweise mittelalterlich geprägten Innenstädten oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbebauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen.

Mit gerade einmal 6,1 % der GMS Wohn- und Gewerbeflächen und 13,8 % der Verkehrsflächen sind nur geringe Teile der Wirkraumflächenkulisse im Status Quo am Tage durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Oft fehlen in den betroffenen Wohnflächen großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 10 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten (z. B. Wohngebiet zwischen Talstraße und Kolpingstraße östlich des Marienfriedhof in Weingarten). Die Klasse der Flächen mit sehr ungünstiger thermischer Situation beinhaltet im Istzustand nur einige wenige Flächen, die für Wohnen, Gewerbe und Verkehr jeweils weniger als 0,1 % der Flächen ausmachen.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (31,7 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese höchste Bewertungsklasse fallen für den Ist-Zustand etwa die Waldareale des Altdorfer Waldes, des Schmalegger Tobels, südöstlich des Lauratales oder südlich der Ravensburger Weststadt.

Nur rund 6 % der Ausgleichsflächen sind einer hohen Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den genannten Waldbereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichterem Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch innenstadtnah gibt es hoch bewertete Ausgleichsflächen (z.B. Grünanlagen am Wilhelm-Schieß-Weg in Ravensburg, am Spielplatz Untere Breite West in Weingarten, Uferbereiche der Wolfegger Ach in Baienfurt & am Annaberg in Baidnt), die einen idealen Rückzugsort für die Bewohner darstellen.

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (32,7 % der Grünflächen) sind überall über das Schussenbecken verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit geringer (29,5 %) oder sehr geringer (0,4 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen im mittleren Schussental ausmachen.

Die Bewertungskarte des Tages für das Szenario schwacher Klimawandel ist in Abbildung 43 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal schwache, aber erkennbare eigene Auswirkungen auf die Klassifizierung hat, da er auf allen Flächen (egal ob Wirk- oder Ausgleichsraum) stattfindet. Viele der neu hinzugefügten, durch den Mischpixelansatz approximierten und teils großflächigen Siedlungspotenzialflächen sind zukünftig in der Wirkraumkategorie der ungünstigen Aufenthaltsqualität am Tage eingeordnet. Dies hat im Szenario starker Klimawandel zur Folge, dass diese Klasse künftig mit 56,9 % den größten Anteil stellt (siehe Abbildung 44). Unter den neu hinzugefügten Flächen¹⁰ waren einige Industrie- und Gewerbeflächen mit hohem Versiegelungsgrad, was zum Teil den Anstieg des Flächenanteils mit ungünstiger Aufenthaltsqualität erklärt. Bezüglich der verwendeten Methode ist jedoch auch bekannt, dass die Annäherung über den Mischpixelansatz allgemein eine Temperaturüberschätzung mit sich bringt und somit auch dadurch eine Verschiebung der Flächenverteilung hin zu ungünstigeren Situationen möglich ist.

¹⁰ Aus dem noch gültigen FNP und weiteren Unterlagen abgeleitete mögliche Bauentwicklungsflächen für Wohnen und Gewerbe, siehe Kapitel 5.3

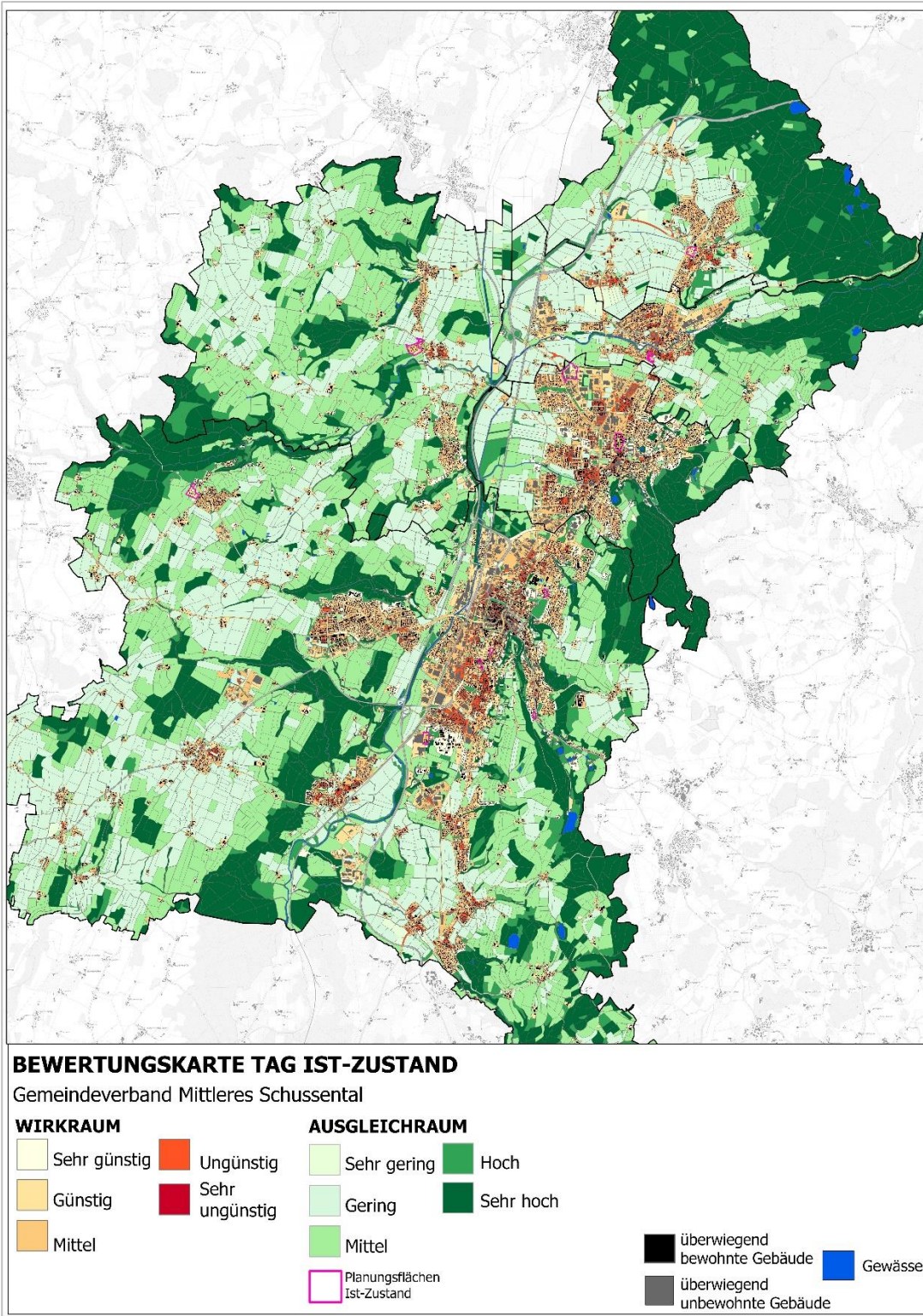


Abbildung 42: Karte AB 22: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustand für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

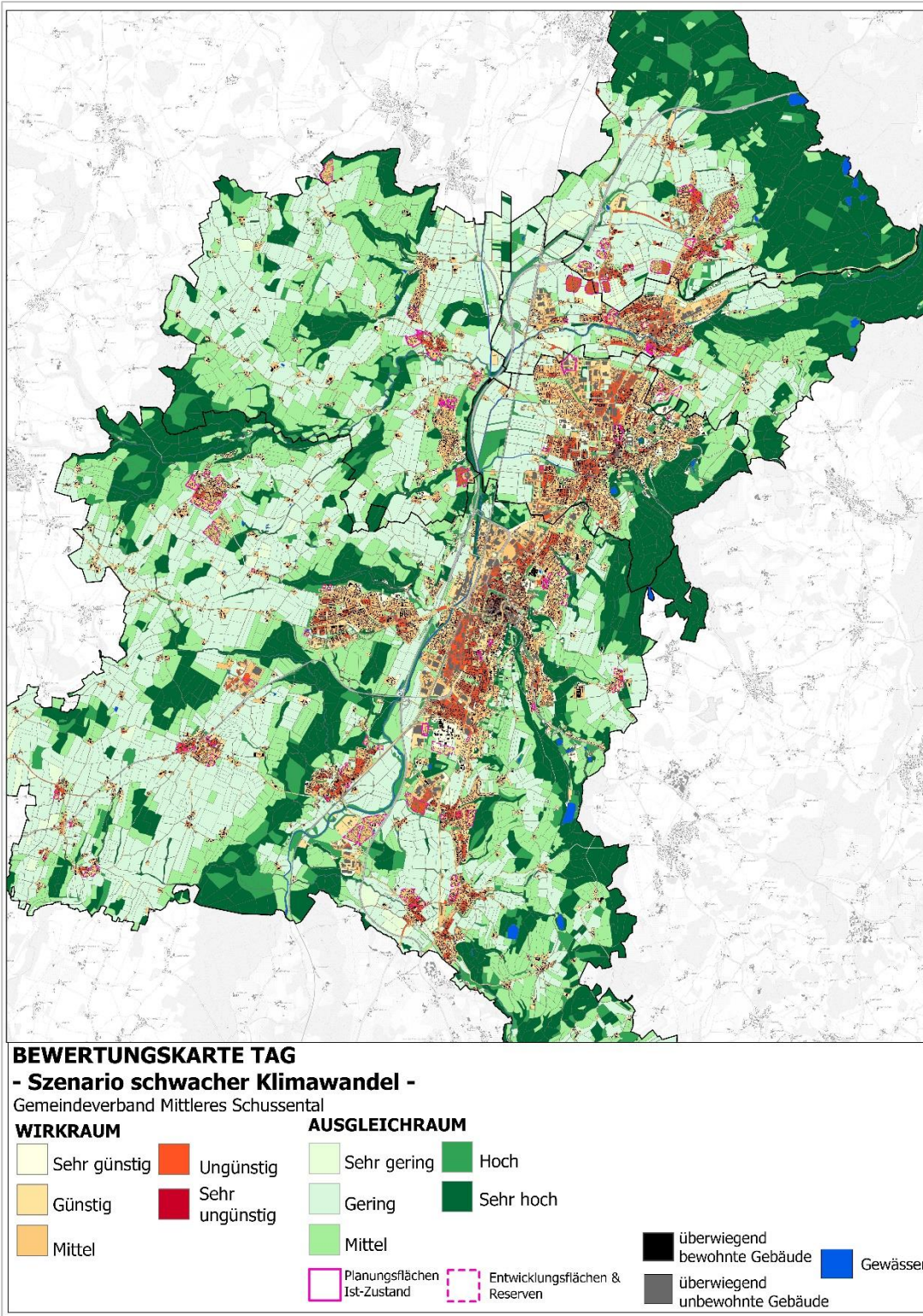


Abbildung 43: Karte AB 23: Bewertungskarte der Tagsituation im Szenario P1 für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

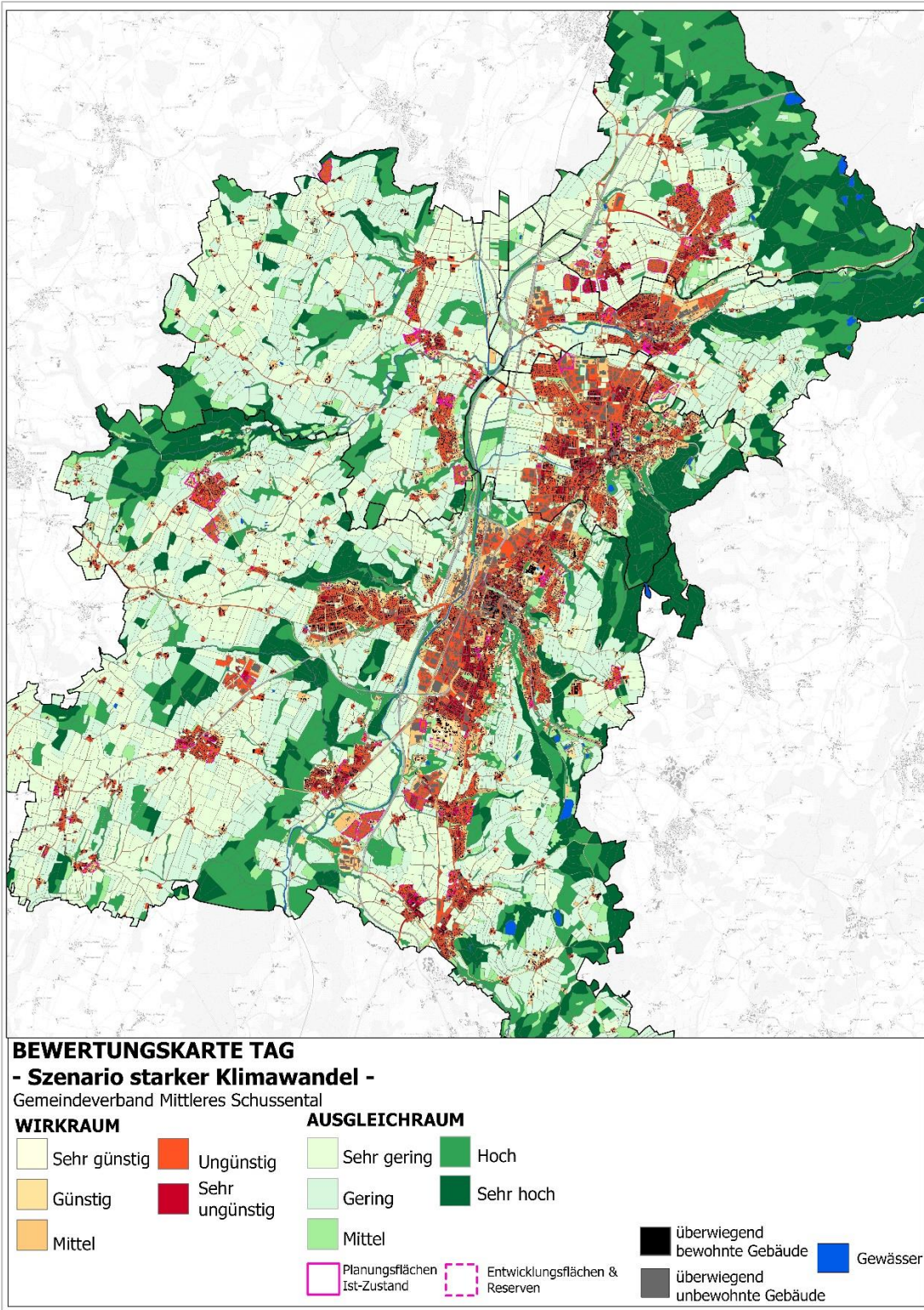


Abbildung 44: Karte AB 24: Bewertungskarte der Tagsituation im Szenario P2 für einen Ausschnitt des GMS (verkürzte Legende).

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten „Ist-Zustand Nacht“ und „Ist-Zustand Tag“ (siehe Kapitel 8.3) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen eine hohe stadtklimatische Bedeutung haben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine stadtklimatische Belastung vorliegt. Die zugrunde gelegte Flächenkulisse ist die des Istzustandes der Bebauung im Gebiet des GMS zum Zeitpunkt der Studie. Neben der abschließenden Bewertung der einzelnen Flächen (inklusive einer Abwägung der Tag- gegen die Nachtsituation) und der Verknüpfung mit einem Planungshinweis, erfüllt die PHK auch die Funktion einer Aufmerksamkeitskarte. Über die Karte sollen erste Einschätzungen bzgl. des Handlungsbedarfes und der -potentiale zum Thema Stadtklima und Anpassung an Hitzebelastungen ermöglicht werden. Für genauere Analysen und als Abwägungshilfe z.B. im Fall der Fragestellung einer möglichen Entwicklung dienen dann die digitale geodatenbasierte Variante der PHK und die weiteren Geodaten zu den Modellergebnissen und abgeleiteten Produkte.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird die **stadtklimatische Belastung** dargestellt. Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Diese Bewertungsgrundlagen wurden aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht extrahiert und jeweils im Rahmen zweier Bewertungsmatrizen für den Wohn- und den Gewerbebereich gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status Quo (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohn- und Gewerbebereich.

Wohnsiedlung: (Nacht stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	2	3	3	4
	2	1	2	3	4	4
	3	2	2	3	4	5
	4	2	3	3	4	5
	5	3	3	4	5	5
Belastung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						
Gewerbe: (Tag stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	1	1	2	2
	2	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	3	4
	4	3	4	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Belastung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						

Je nachdem, wie stark für die Tag-Nacht-Kombination eine Wirkraumbelastung vorherrscht, wurden Handlungsprioritäten vergeben. Da der Verkehrsraum nur für die Tagsituation ausgewertet wurde, konnten die Bewertungskennzahlen hier direkt in Handlungsprioritäten überführt werden (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Aus Bewertungskarten abgeleitete Belastungen für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus den Matrizen Wohnen und Gewerbe (Bewertungskarten)	Wirkraumbewertung des Verkehrsraums (Bewertungskarten)	Stadtklimatische Belastung in der PHK im Wirkraum
5= höchste oder 4= sehr hoch	5= höchste oder 4= sehr hoch	1= hohe
3= hoch	3= hoch	2= erhöhte
2= mittel	2= mittel	3= mäßige
1= gering	1= gering	4= geringe

Grün- und Freiflächen sowie landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt die *stadtklimatische Bedeutung* dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum, wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Grünflächen						
Schritt 1		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Aufenthaltsqualität Tag Entlastungsraum	3	3	3	4	4	5
	4	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	5	5
Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						
Schritt 2		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Aufenthaltsqualität Tag kein Entlastungsraum	1	1	2	3	4	5
	2	1	2	3	4	5
	3	2	2	3	4	5
	4	3	3	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						

Der Durchlauf der Matrix findet in zwei Schritten statt, je nachdem, ob die betrachtete Fläche einen Entlastungsraum darstellt oder nicht. Entlastungsräume sind vom tagsüber belasteten Siedlungsraum (Wirkraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4) fußläufig gut erreichbare (Luftlinie 300 m), öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder von mindestens hoher Bedeutung am Tage (Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4).

Nach der Gegenüberstellung der Bewertung von Entlastungsräumen am Tage und der nächtlichen Bewertung wird letztere in einem zweiten Schritt den restlichen Ausgleichsraumflächenbewertungen des Tages gegenübergestellt. Die daraus resultierenden Bedeutungen und Planungshinweise sind in Tabelle 14 aufgeführt. In Abhängigkeit von der Bedeutung der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.

Tabelle 14: Aus Bewertungskarten abgeleitete Bedeutungen für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsaumbewertung aus der Matrix Grünflächen (Bewertungskarten)	Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum
5= höchste	1 = hohe
4= sehr hoch	2= mittlere
3= hoch	3= niedrige
2= mittel oder 1= gering	4= Keine

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte des Status Quo übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen, -abflüssen und dem Regionalwindssystem Schussentäler sowie GMS Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden, Gleisflächen und Schnellstraßen im Außenraum (nicht bewertet) sowie Hinweise zu Flächenentwicklungen.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Stadtklimaanalyse für das mittlere Schussental, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 46 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Belastungen und Bedeutungen aus.


Die **stadtklimatischen Belastungen des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, auf 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 (siehe Tabelle 15).


STADTKLIMATISCHE BEDEUTUNG DES AUSGLEICHSRAUMS: GRÜN-/FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD


In die Bewertung fließen die Kaltluftentstehung und Kaltluftströmung auf den Flächen als auch deren Funktion als Rückzugsorte an heißen Tagen ein.


- 
Hohe stadtklimatische Bedeutung (16,8% Flächenanteil)
 Bei Eingriffen in die Flächen ist die jeweilige stadtklimatische Funktion zu erhalten (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen).
Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche besonders aufmerksam zu berücksichtigen.
- 
Mittlere stadtklimatische Bedeutung (35,7% Flächenanteil)
 Bei Eingriffen in die Flächen sollte die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion angestrebt werden (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen).
Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche aufmerksam zu berücksichtigen.
- 
Niedrige stadtklimatische Bedeutung (17,3% Flächenanteil)
 Bei Eingriffen in die Flächen sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen in ihren Grundzügen zu berücksichtigen (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen).
Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche zu berücksichtigen.
- 
Keine vorrangige stadtklimatische Bedeutung (30,2% Flächenanteil)

KALTLUFTPROZESSE IM AUSGLEICHSRAUM

- 
Regionalwindsystem SchusSENTäler
 nachrichtlich übernommen aus der regionalen Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO) & der regionale Klimaanalyse für das mittlere SchusSENTal (REKLISCHUB), Erläuterungen siehe Projektdokumentation

- 
Kaltluftleitbahn
 Linienhafte Strukturen, über die kältere Luftmassen aus Grünflächen in den Siedlungsraum transportiert werden

- 
Kaltluftabfluss
 Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme, insbesondere aus Hangbereichen

- 
Bodennahes nächtliches Strömungsfeld (aggregiert, ab 0,1 m/s Windgeschwindigkeit)

FLÄCHENENTWICKLUNG



- 
Planungsflächen Ist-Zustand
 Diese Flächen wurden im Ist-Zustand bereits als bebaut angenommen, da dort Baurecht besteht und eine Bebauung kurz bevorsteht (Auswahl erfolgte durch die GMS Kommunen, Stand 2021). Es handelt sich um eine beispielhafte Bebauungsstruktur, keine endgültige Planung.
- 
Planungsfläche "Martinshöfe"
 Die Modellierung & Bewertung erfolgte auf Basis eines frühen Planungsstandes. Die jetzigen Planunterlagen mit aktualisierter Freiraumgestaltung lassen vermuten, dass die stadtklimatische Situation günstiger ausfällt als hier dargestellt.

Abbildung 45: Legendenelemente der Planungshinweiskarte

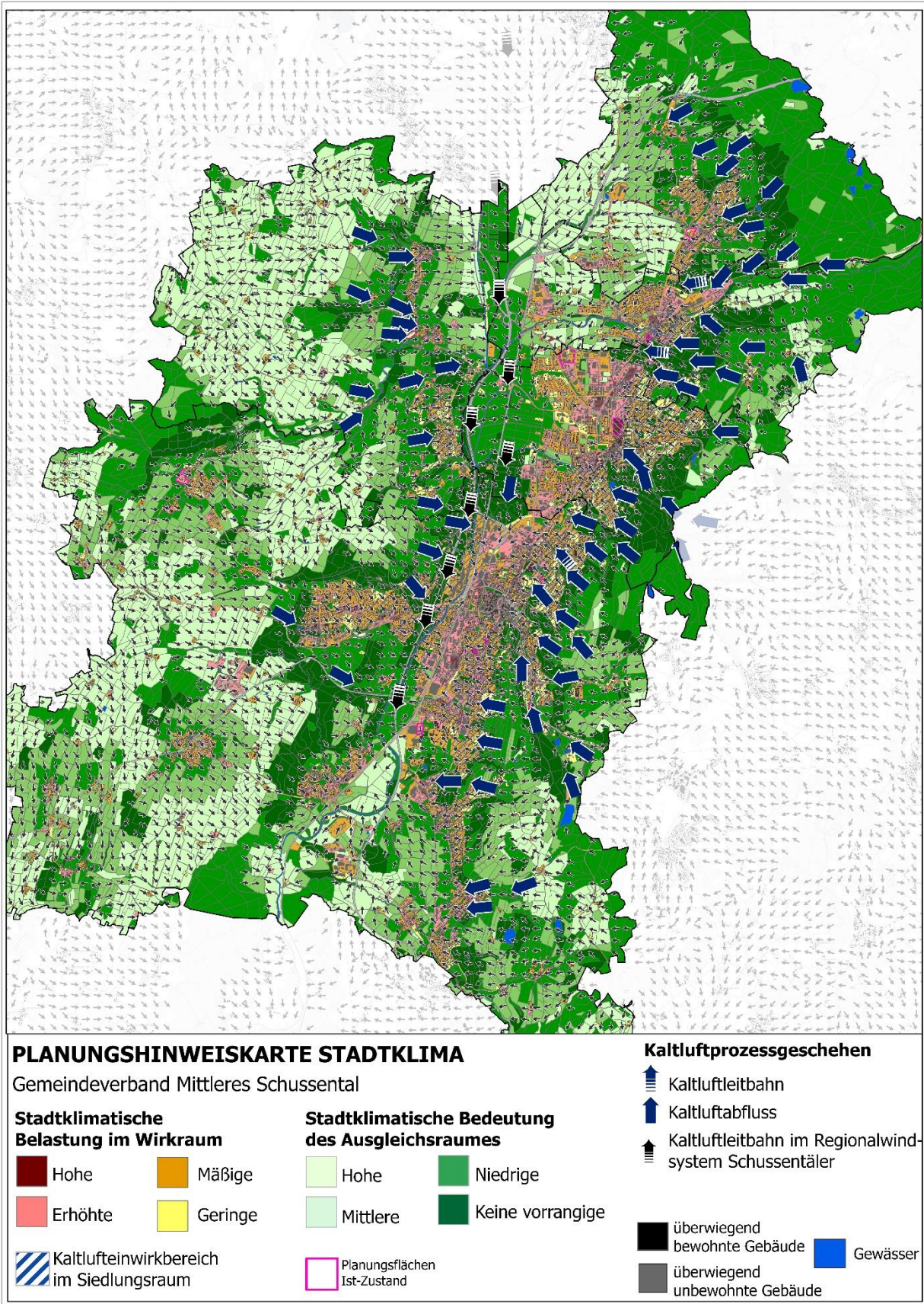


Abbildung 46: Karte Ab 25: Planungshinweiskarte für das Mittlere Schussental (verkürzte Legende).

Tabelle 15: Flächenanteile der stadtklimatischen Belastung im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Belastung in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
hohe	5,4	Über die verschiedenen Klassen wird eine Abstufung der stadtklimatischen Situation in den Siedlungsräumen des GMS gezeigt. Bereiche ab einer erhöhten stadtklimatischen Belastung sind als stadtklimatische Hotspots mit einer übergeordneten Relevanz zu verstehen. In den Hotspots ist eine Verschlechterung der stadtklimatischen Situation zu vermeiden. Zudem sollten Maßnahmen zur Verbesserung geprüft werden, deren Auswahl in Einzelfallentscheidungen auf kommunaler Ebene erfolgt. Das im Zusammenhang mit dem KLAK entwickelte Handlungsprogramm zeigt dafür ein Set möglicher Maßnahmen auf.
erhöhte	27,4	
mäßige	50,7	
geringe	16,5	

Die Tabelle 15 zeigt die Flächenanteile der verschiedenen stadtklimatischen Belastungen auf. Mit 5,4 % ist die höchste Belastung zuallererst im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerbebereich zu finden. Aber auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Innenstadtbereichen sind solche hohen Handlungsprioritäten gegeben. Die Klasse der erhöhten Belastung, macht mit insgesamt 27,4 % der Flächen etwas mehr als ein Viertel des Wirkraumes aus. Knapp die Hälfte der Wirkraumflächen (Wohnen, Gewerbe und Verkehr) im mittleren Schussental ist durch eine mäßige Belastung gekennzeichnet. Die Bewertungskarten der Zukunftsszenarien liefern Hinweise, welche dieser Flächen in Zukunft durch eine erhöhte Belastung bedroht sein könnten. Durch eine geeignete Klimaanpassung in den betrachteten Flächen kann es gelingen, in den Bereich „geringer Belastung“ vorzudringen, deren Flächenkulisse in der vorliegenden Analyse 16,5 % ausmacht.

Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an heißen Tagen ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) darstellen, sind in der PHK durch eine entsprechende stadtklimatische Bedeutung ausgewiesen. Tabelle 16 stellt den Bedeutungen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Klasse. Mit einem Anteil von 16,8 % besitzt weniger als ein Fünftel des GMS Ausgleichsraum eine hohe stadtklimatische Bedeutung. Hierzu zählen vorrangig die Freiflächen, die mit den primären Funktionen des Schussentälers und der sonstigen Leitbahnen assoziiert sind (z. B. entlang des Lauratales), aber auch Waldflächen wie der Höllwald und südlich der Ravensburger Weststadt. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils sehr hohen Bedeutungen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, zu der die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Fortbestand in der hohen Kategorie bei Eingriffen stets zu erhalten und dieser auch nachzuweisen.

Auch der Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse der mittleren stadtklimatischen Bedeutung, die immerhin ein Drittel aller Ausgleichsflächen betrifft (35,7 %), ist anzustreben und Klimabelange sind bei Umsetzung des Planvorhabens aufmerksam zu berücksichtigen. Etwa ein weiteres Fünftel (17,3 %) der Grün- und Freiflächen weisen eine niedrige stadtklimatische Bedeutung auf. Hierzu zählen vorrangig die an den Rändern der kleineren Siedlungen gelegenen Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten

durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben (z.B. bei Gewerbeparks/Hochhäusern) eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten.

Abschließend weisen rund 30% der Ausgleichsflächen für den heutigen Wirkraum keine stadtklimatische Bedeutung auf. Die Bewertungskarten der Zukunftsszenarien geben auch hier Hinweise, welche der Flächen im Zusammenhang mit einem voranschreitenden Klimawandel in Zukunft von Bedeutung sein werden. Darüber hinaus besitzen einige der Flächen ohne stadtklimatische Bedeutung das Potential über entsprechende Maßnahmen zu einem wichtigen Ausgleichsraum zu werden, sei es über eine verbesserte Aufenthaltsqualität am Tage oder eine Optimierung für Kaltluftprozesse in der Nacht.

Tabelle 16: Flächenanteile der stadtklimatischen Bedeutung im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
hoch	16,8	Bei Eingriffen in die Flächen ist die jeweilige stadtklimatische Funktion zu erhalten (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). <i>Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche besonders aufmerksam zu berücksichtigen.</i>
mittel	35,7	Bei Eingriffen in die Flächen sollte die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion angestrebt werden (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). <i>Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche aufmerksam zu berücksichtigen.</i>
niedrig	17,3	Bei Eingriffen in die Flächen sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen in ihren Grundzügen zu berücksichtigen (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). <i>Klimabelange sind bei der Entwicklung der Fläche zu berücksichtigen.</i>
Keine	30,2	-

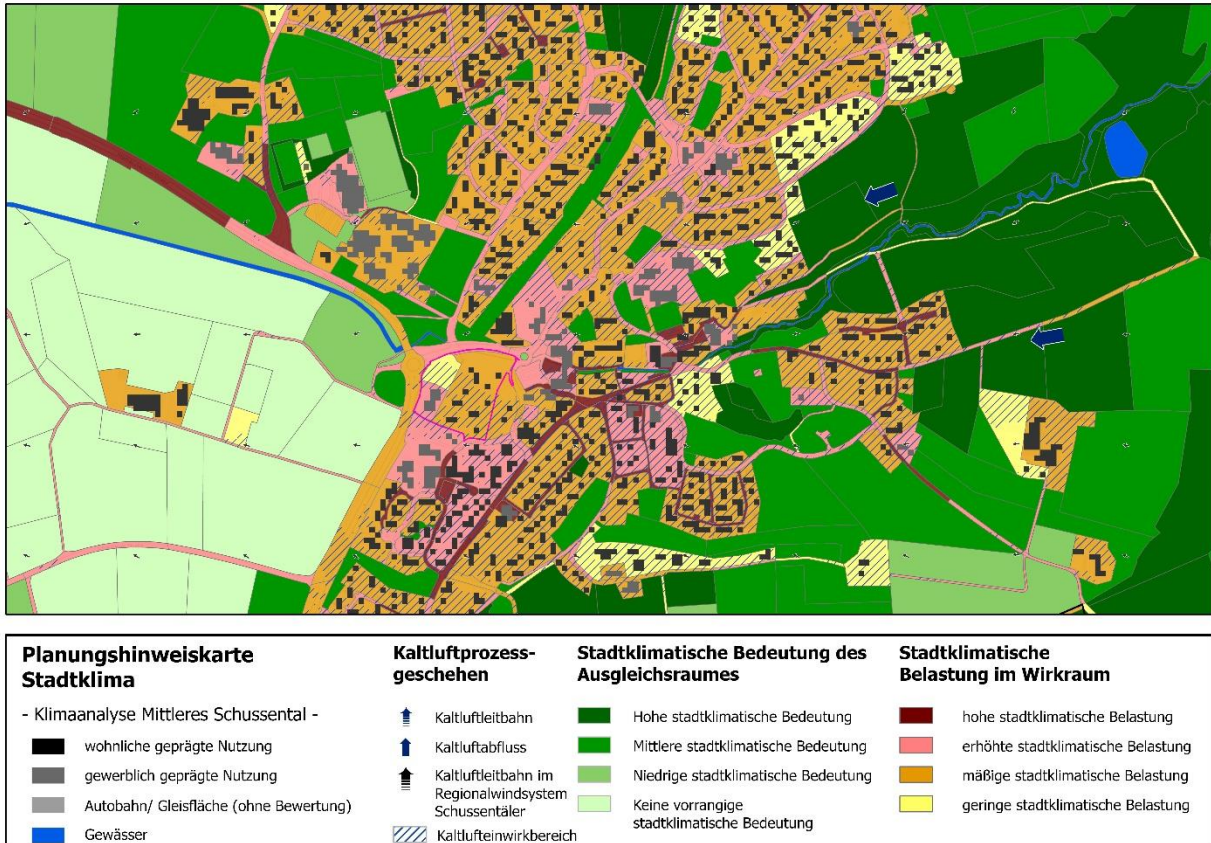


Abbildung 47: Karte AB 25: Detailausschnitt aus der PHK für den GMS (verkürzte Legende).

8.5 ERGÄNZENDE ENDPRODUKTE

Mit den Ergebnissen der Planungshinweiskarten (und den vorbereitenden Bewertungskarten) können „Hotspots“ identifiziert werden, in denen Anpassungsmaßnahmen bspw. zur Hitzevorsorge im Innen- und Außenraum vorrangig umgesetzt werden sollten (Abbildung 48). Dabei wurde je nach dem wie stark die Belastung ausfällt zwischen heutigen und zukünftigen Hotspots differenziert. Die heutigen Hotspots sind schon heute während belastender Wetterlagen mit thermischen Belastungen assoziiert und dort sollten prioritär Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden. Die zukünftigen Hotspots sind heutzutage noch nicht so stark thermisch belastet und sind vorrangig unter der Perspektive eines voranschreitenden Klimawandels zu beachten.

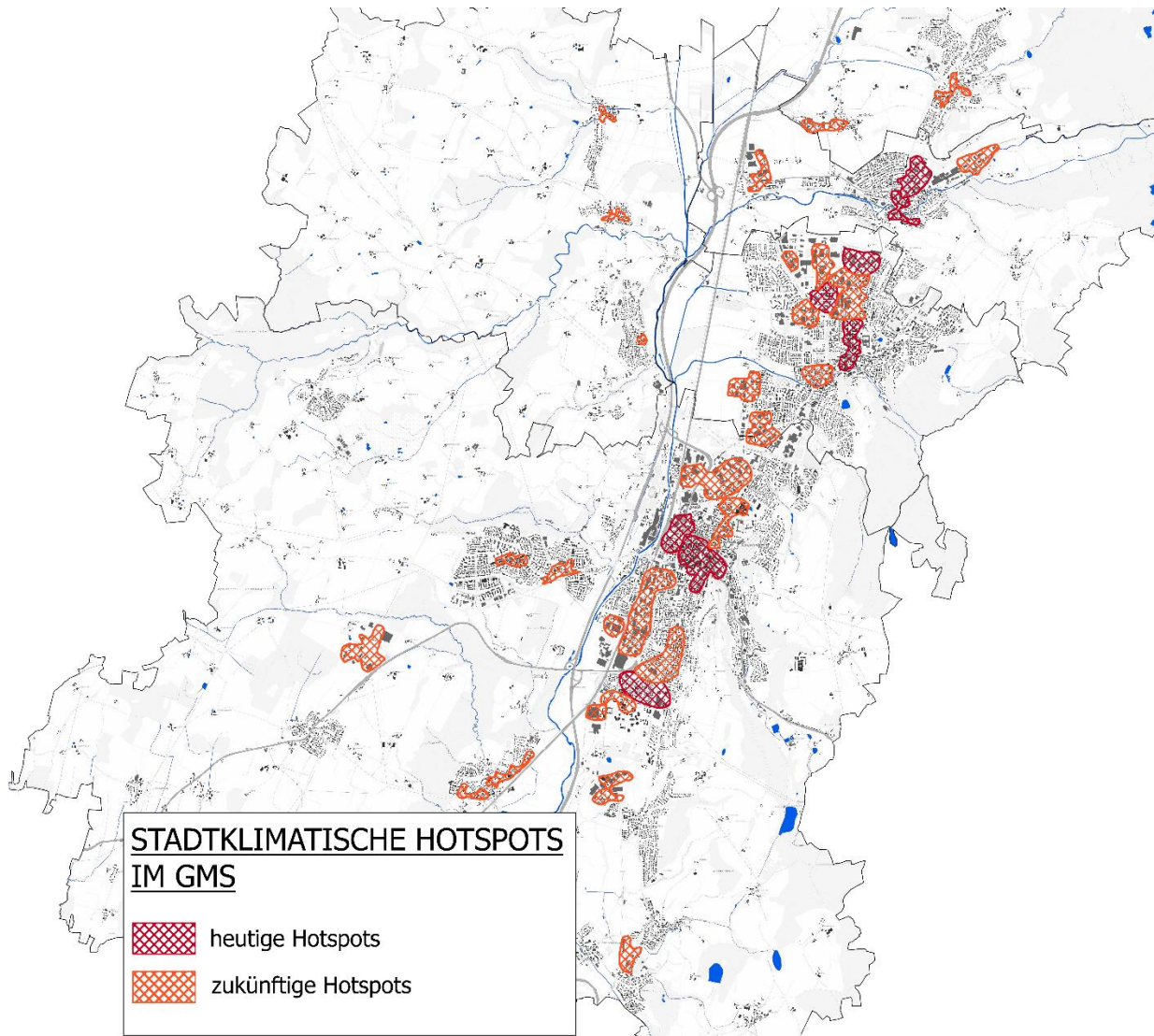


Abbildung 48 Karte AB 26: aus der SKA abgeleitete Stadtklimatische Hotspots für das mittlere Schussental.

Mit den Ergebnissen der Planungshinweiskarten können zusätzlich zu den oben beschriebenen „Hotspots“ weitere wichtige **Ableitungen** getroffen werden. Zum einen wird aus den Ergebnissen ersichtlich, welche öffentlich zugänglichen Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht besonders wertvoll sind (Abbildung 49). Dies bezieht sich vorrangig auf innerstädtische und siedlungsnaher Parks und Wälder, die insgesamt eine gute Aufenthaltsqualität bieten.

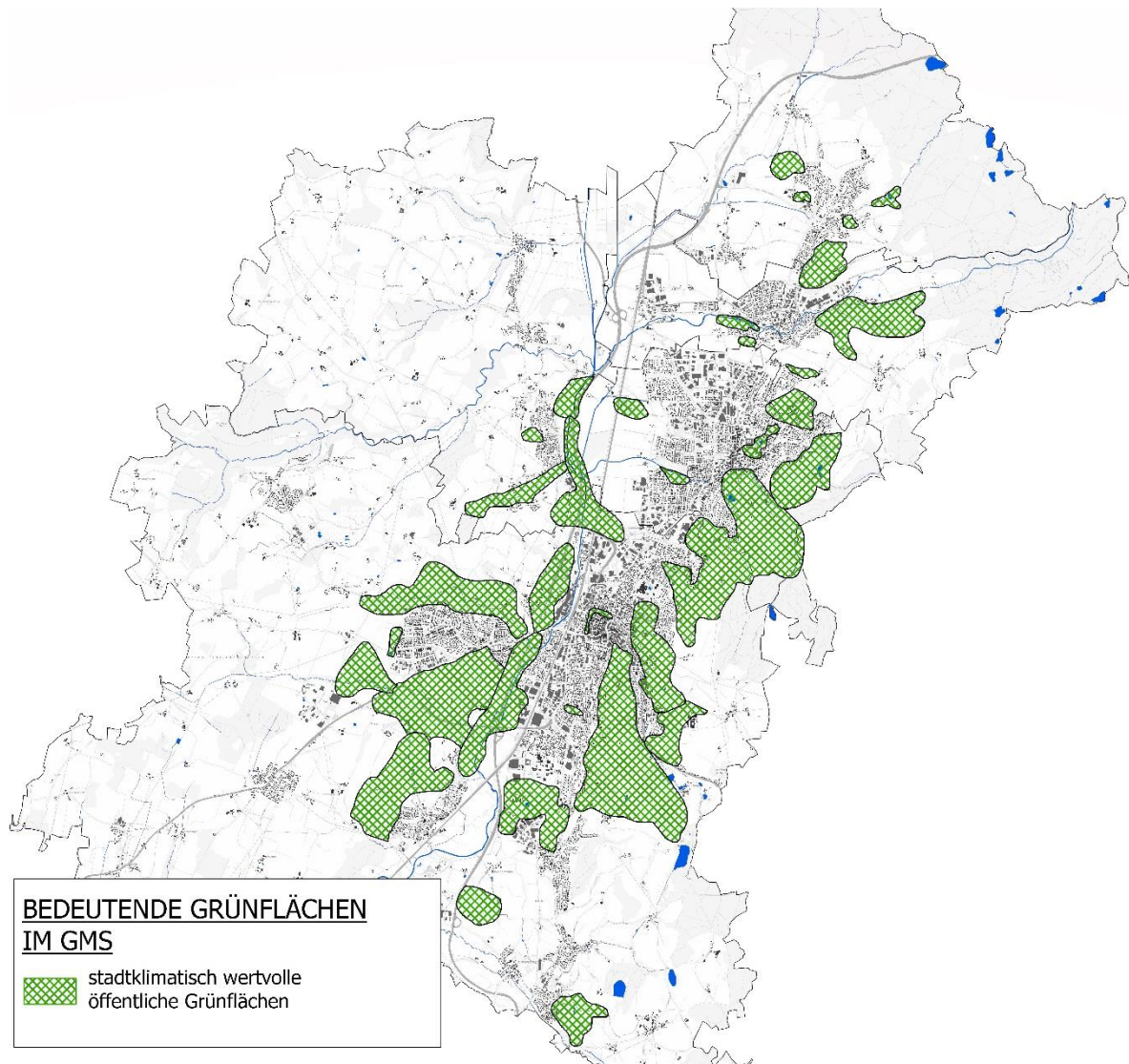


Abbildung 49 Karte AB 27: stadtklimatisch wertvolle öffentlich zugängliche Grünflächen im GMS.

Abschließend wurden aus den verschiedenen Daten die wichtigsten Kaltluftprozessräume abgeleitet (Abbildung 50). Die primären und sekundären Kaltluftprozessbereiche beziehen sich dabei auf die wichtigsten Flächen im Außenraum. Der Einwirkungsbereich visualisiert das Vordringen dieser Prozesse in den Siedlungskörper. Alle drei Kategorien wurden gutachterlich auf Basis der Bewertungen in der PHK für den Zeitpunkt 4 Uhr nachts abgeleitet. Primäre Prozessbereiche zeichnen sich durch das Vorhandensein von besonderen Kaltluftprozessen (Kaltluftleitbahnen, flächenhafte Kaltluftabflüsse oder Kaltluftproduktion), bei gleichzeitiger hoher Intensität der Prozesse (Hohe Volumenstromdichten, hohe Windgeschwindigkeiten, hohe Produktionsraten) und Nähe zum belasteten Siedlungsraum aus. Bei den sekundären Prozessbereichen sind ebenfalls besondere Kaltluftprozesse vorhanden, die Intensität ist aber meist geringer oder die Distanz zum belasteten Siedlungsraum größer. Bezogen auf die heutige Situation sind Eingriffe in sekundäre Prozessbereich weniger kritisch zu beurteilen als in primäre Bereiche. Durch den voranschreitenden Klimawandel und eine parallele Siedlungsentwicklung ist es allerdings möglich, dass sich die sekundären zu primären Kaltluftprozessbereichen entwickeln und in ihrer Schutzbedürftigkeit steigt.

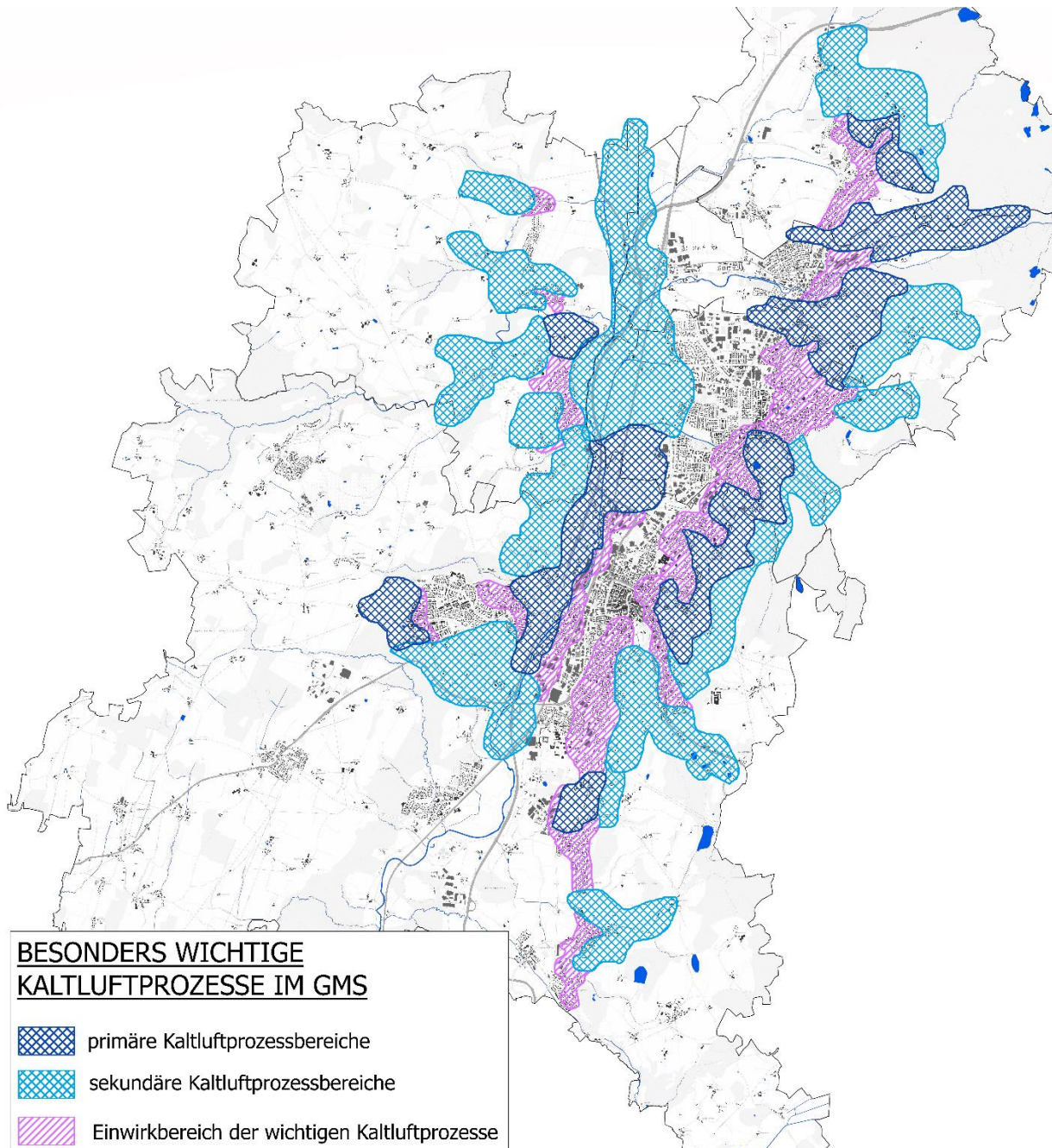


Abbildung 50 Karte AB 28: Besonders wichtige Kaltluftprozesse im GMS.

8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung in Form von Geodaten und gelayouteten GIS-Projekten zur Verfügung.

Das Stadtklimamanagementsystem bietet gegenüber den reinen Kartendarstellungen (als Plot, PDF oder Bild-datei) einige Vorteile:

- Die komplexen flächenbezogenen Informationen können über einige Mausklicks direkt abgerufen werden

- Die Informationen können mit weiteren Daten (z.B. neuen Entwicklungsvorhaben) überlagert und über Geodatenverarbeitungsprozesse miteinander verknüpft werden
- Einige Informationen können bei Verfügbarkeit von Aktualisierungen direkt ersetzt werden (z.B. demographische Daten)

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der knapp 16.500 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 20 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen für den Status Quo, Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Zugang zu Grünflächen oder Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (siehe Abbildung 51).

Mit Hilfe des Super-Shapes können innerhalb kurzer Zeit verschiedene Fragestellungen beantwortet werden. Zum Beispiel: Warum herrscht auf dieser Fläche eine hohe stadtklimatische Belastung? Liegt es an einer problematischen Situation in der Nacht, am Tage oder zu beiden Zeiten? Ist diese Fläche nebenan mit einem besonderen Kaltluftprozess assoziiert? Wodurch ist dieser Prozess charakterisiert (hohe Kaltluftproduktion, großer Volumenstrom, hohe Windgeschwindigkeit)? Der Vorteil dieses Datenformates liegt darin, dass über einen Zugriff auf eine Attributtabelle viele zusammenhängende Informationen abgerufen werden können, anstatt diese Informationen über mehrere Dateien einzeln zusammenstellen zu müssen.

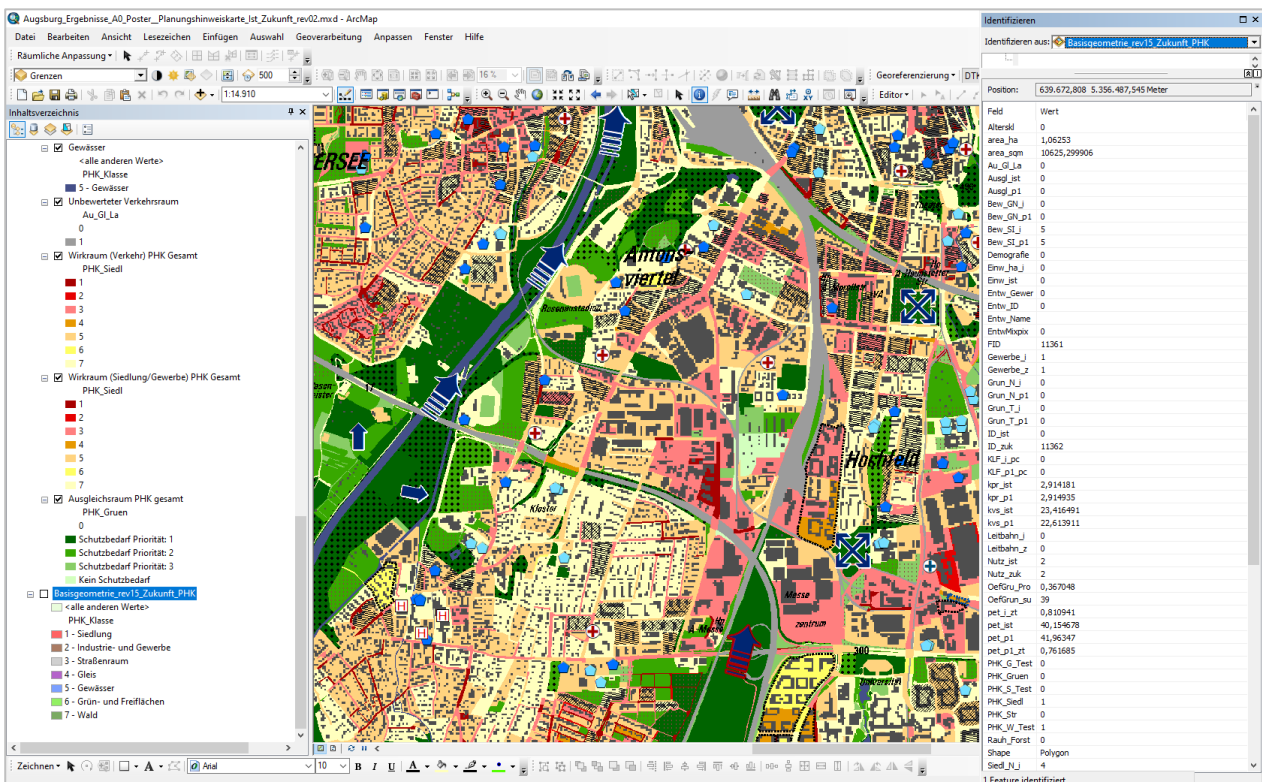


Abbildung 51: Beispielbild einer digitalen Planungshinweiskarte innerhalb eines Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.

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.
- 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>
- 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).
- DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges bauen.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2022): Gefühlte Temperatur. Online: https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitze_thermische_belastung/gefuehlte_temperatur.html.
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/derpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- DWD (2023c): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2023d): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- GMS – Gemeindeverband Mittleres Schussental (2021): Gemeinsamer Flächennutzungsplan, aktueller Übersichtsplan aller rechtswirksamen Darstellungen, Planfassung vom 21.03.2021. Stadtplanungsamt Ravensburg
- 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 n environment – numerical experiments, Journal of Heat Island Institute International Vol. 12-2.
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg., 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: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf (zuletzt geprüft am 11.01.2023.)
- Höppe, P.; H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Der 19. S. 22–29.
- iMA Richter & Röckle (2012): Gutachten zu den Auswirkung des geplanten Wohnbaugebietes „Oberer Büchelweg“ auf die lokalklimatischen Verhältnisse von Ravensburg. Im Auftrag der Stadt Ravensburg.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (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.
- ISO - International Organization for Standardization (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.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf
- Krämer, R. und Kabisch, N. (2022): Parks Under Stress: Air Temperature Regulation of Urban Green Spaces Under Conditions of Drought and Summer Heat. Front. Environ. Sci. 10:849965. doi: 10.3389/fenvs.2022.849965
- Cedeño **Laurent** JG, Williams A, Oulhote Y, Zanobetti A, Allen JG, Spengler JD (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. PLoS Med. 15(7).
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von Stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- Moore, G. E. (1903): Principia Ethica. Ditzingen: REKLAM.
- MVI - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke (2017): Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. Geophys. Res. Lett. 23, 669-672.
- Schwab und Zachenbacher (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben REKLIBO - Wissenschaftlicher Abschlussbericht Band 1 – 3. Regionalverband Bodensee-Oberschwaben

Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.

Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. <https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de>

Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.der-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>

The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. Online: <https://satelliteliaison-blog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>

UBA – Umweltbundesamt (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.

UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>

Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler 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 (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.

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

Wiesner, S.; Eschenbach, A. Ament, F. (2014): Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. Meteorologische Zeitschrift Vol 23, No. 2, 143-157.

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
$\geq 2,0$	sehr stark zunehmend
$\geq 1,5$ und $< 2,0$	stark zunehmend
$\geq 1,0$ und $< 1,5$	schwach zunehmend
$< 1,0$ und $> -1,0$	kein Trend
$\leq -1,0$ und $> -1,5$	schwach abnehmend
$\leq -1,5$ und $> -2,0$	stark abnehmend
$\leq -2,0$	sehr stark abnehmend

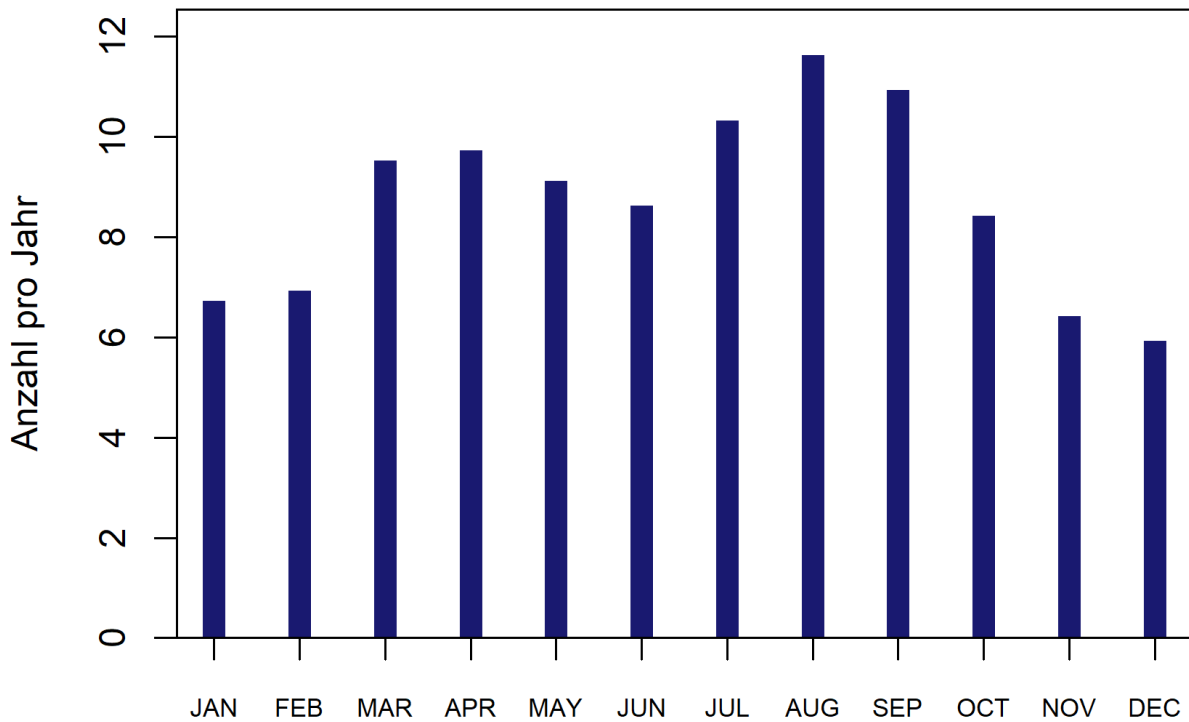


Abbildung A 1: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten an einer der für den GMS ausgewählten DWD-Stationen (Kempten) für den Zeitraum 1994 - 2020 (97 pro Jahr; DWD 2023c).

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

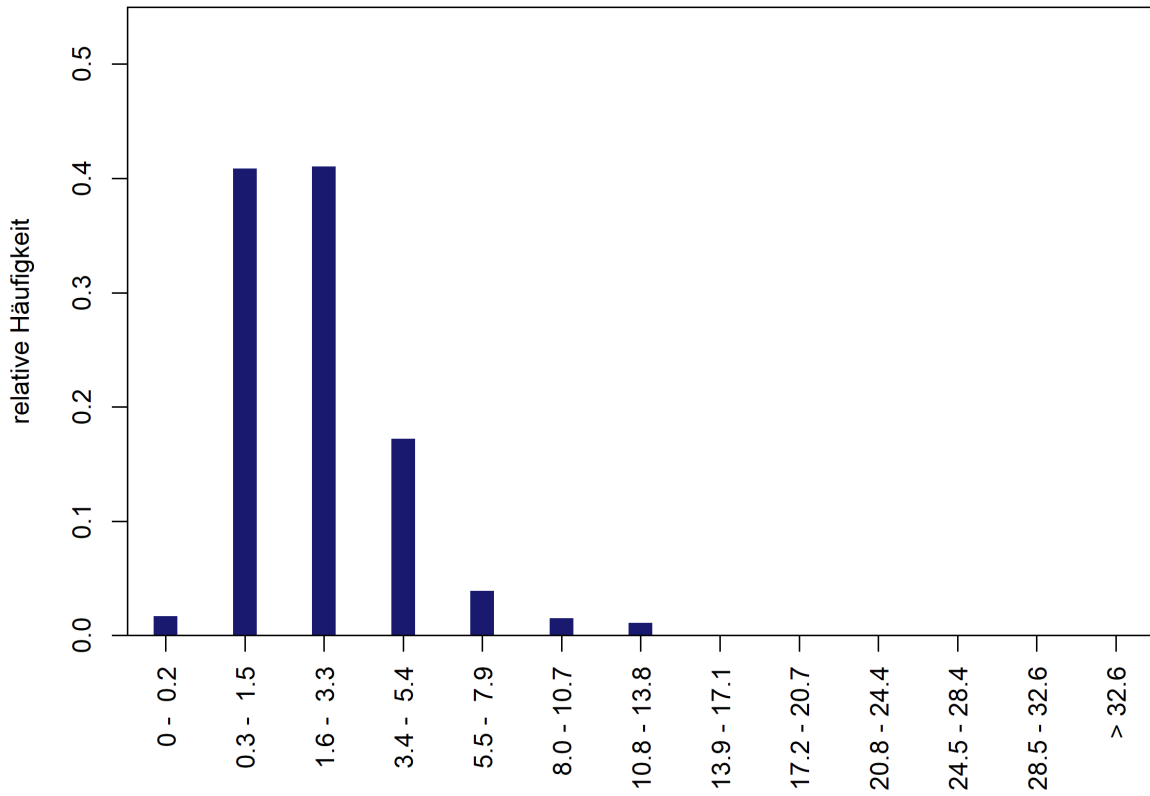


Abbildung A 2: Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten an der DWD-Station Weingarten für den Zeitraum 1998 – 2020 (DWD 2023c).

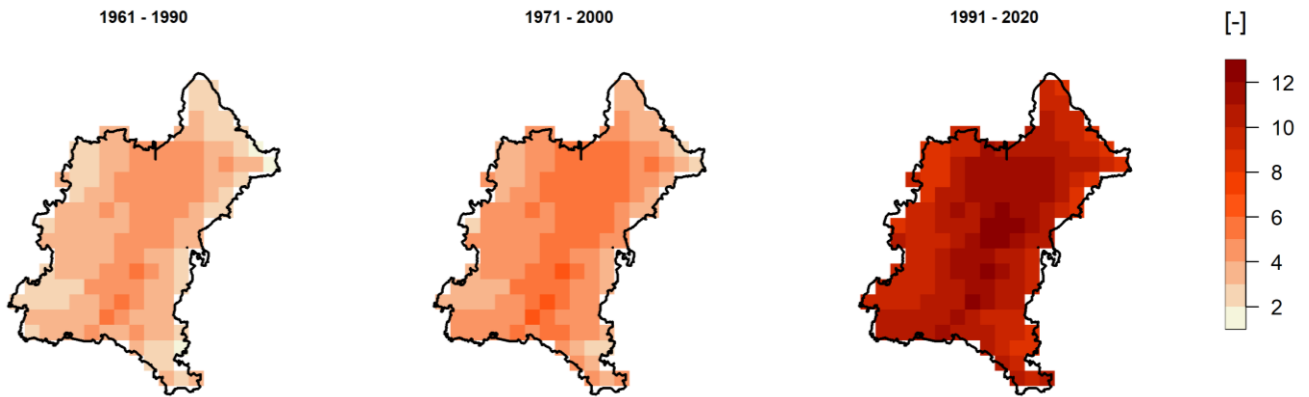


Abbildung A 3: Räumliche Verteilung der Anzahl Heißer Tage für verschiedene Klimaperioden (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

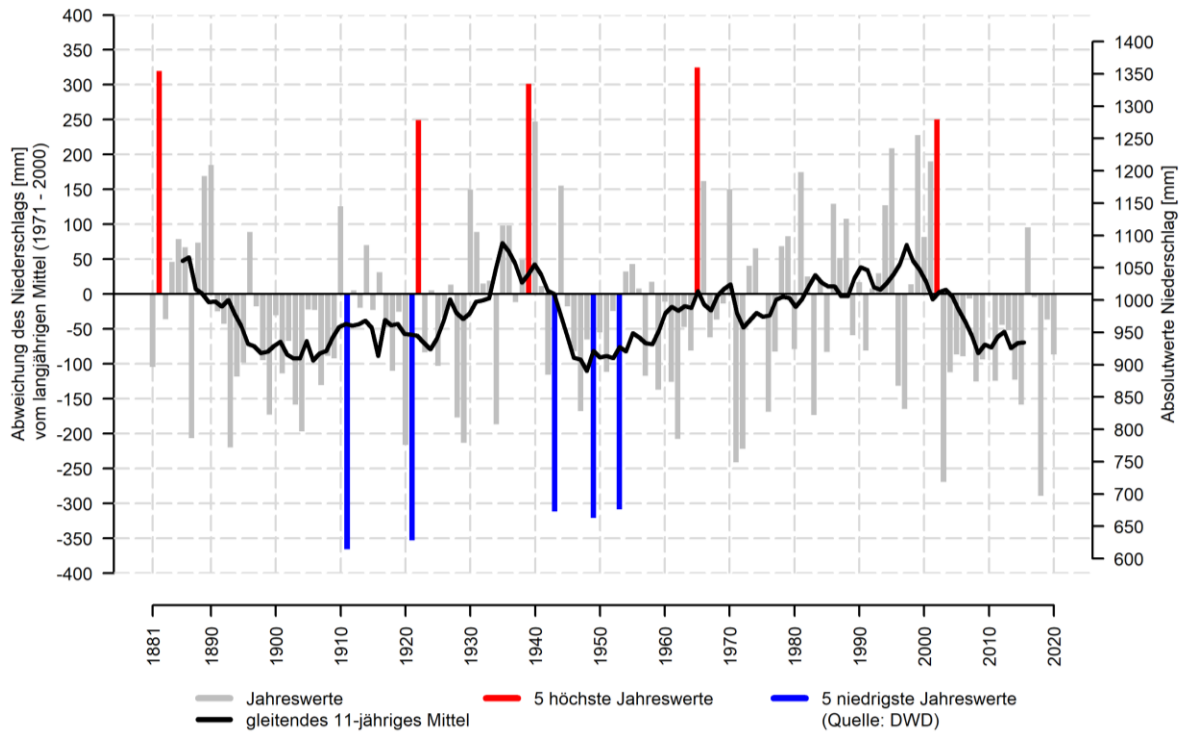


Abbildung A 4: Jahresniederschlag im GMS im Zeitraum 1881 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

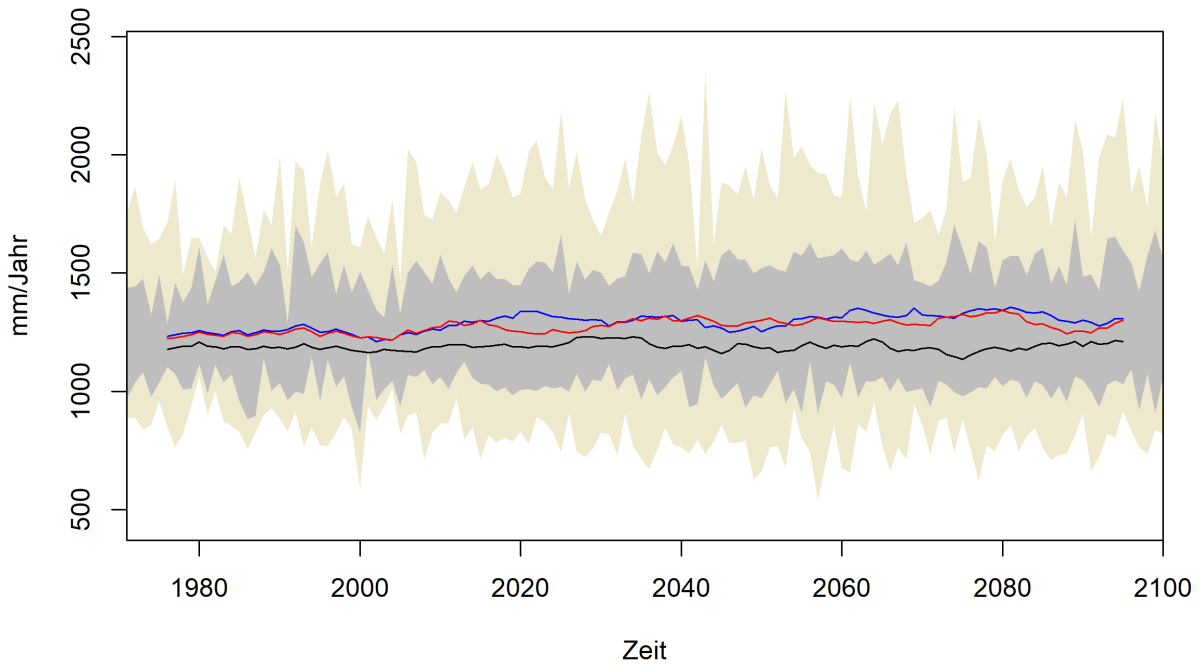


Abbildung A 5: mögliche zukünftige Entwicklung der Niederschlagssummen pro Jahr im GMS (alle Szenarien) (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

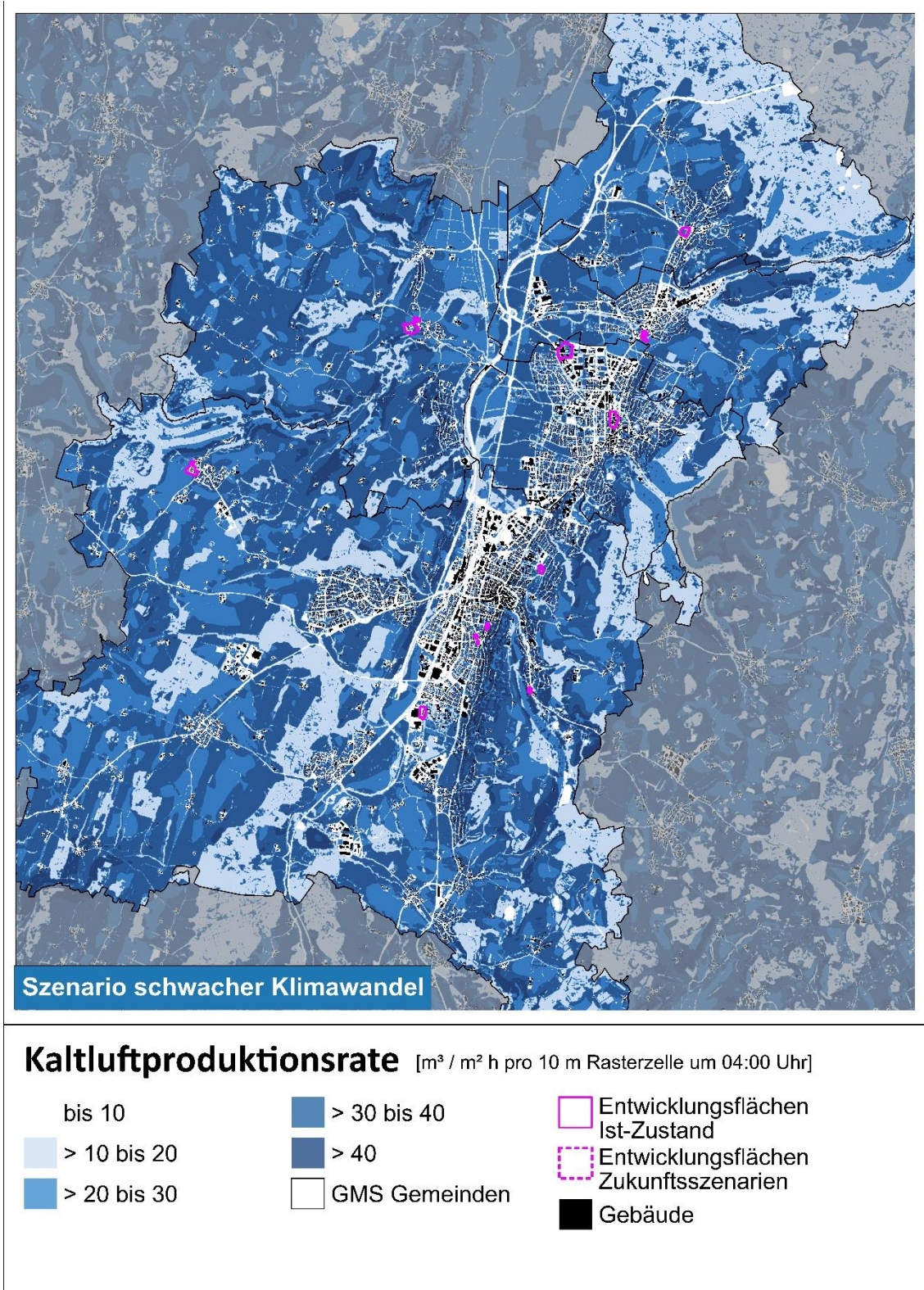


Abbildung A 6: Karte AB 14: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario P1 im GMS (verkürzte Legende).

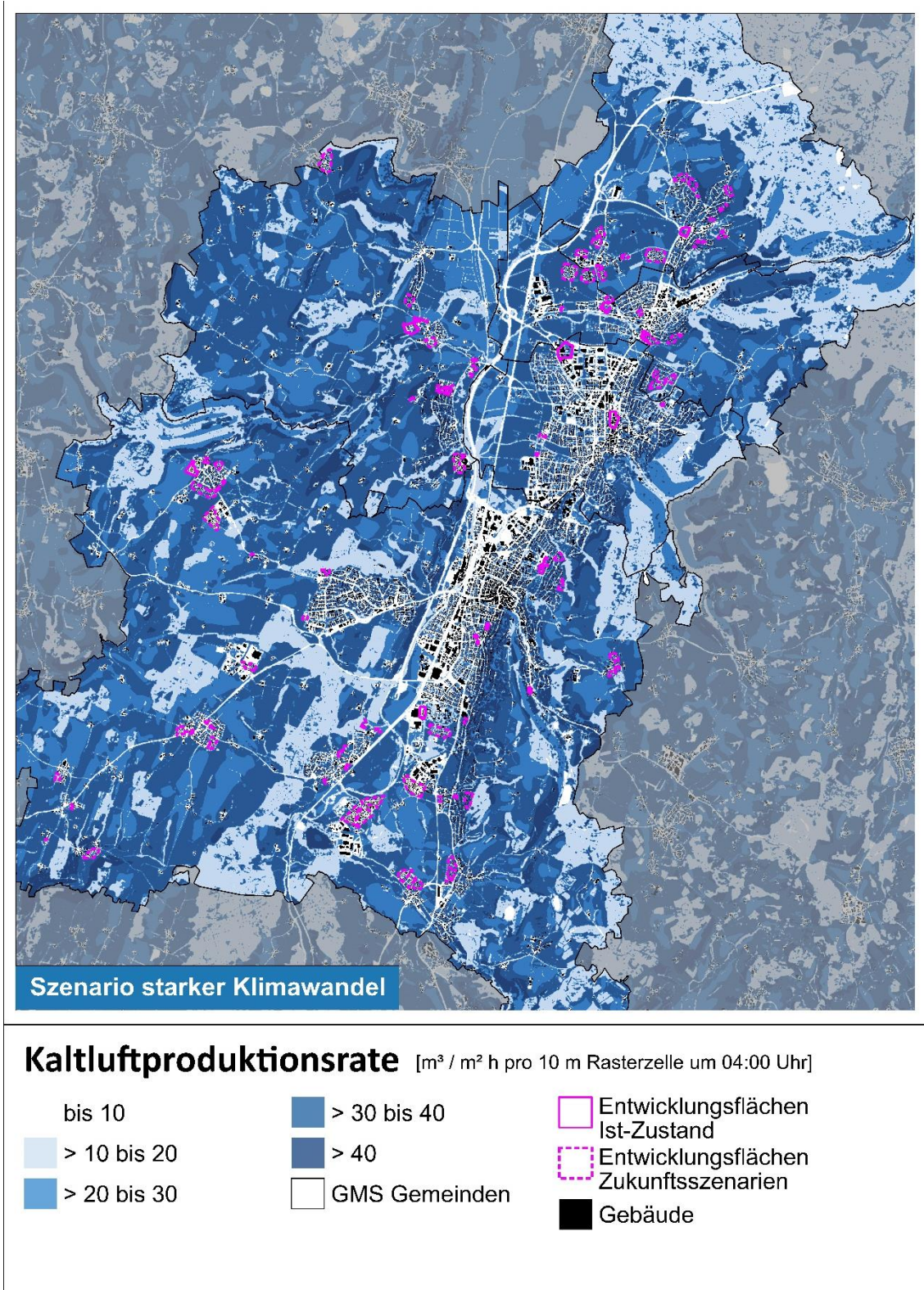


Abbildung A 7: Karte AB 15: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario P2 im GMS (verkürzte Legende).

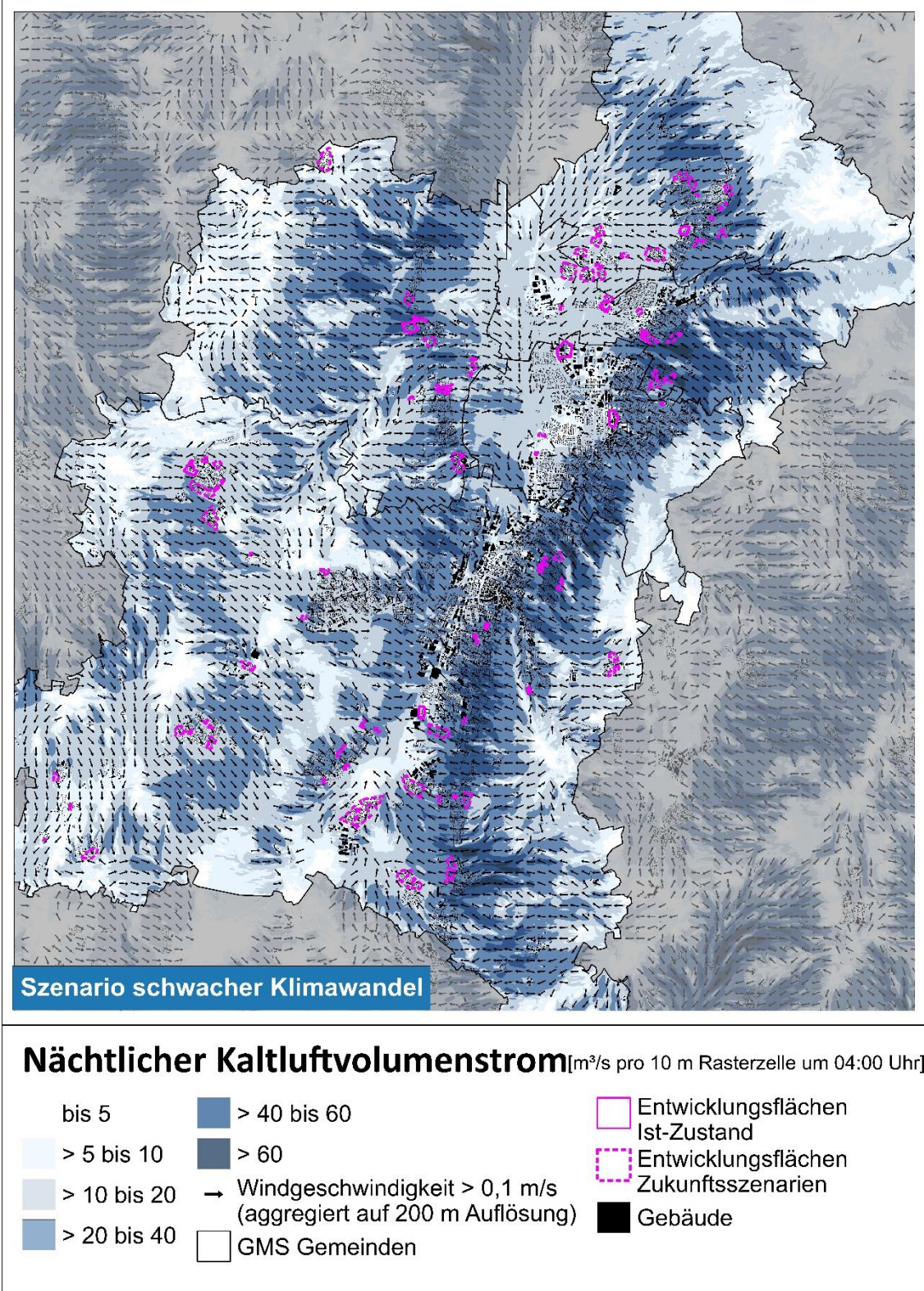


Abbildung A 8: Karte AB 11: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario P1 im GMS (verkürzte Legende).

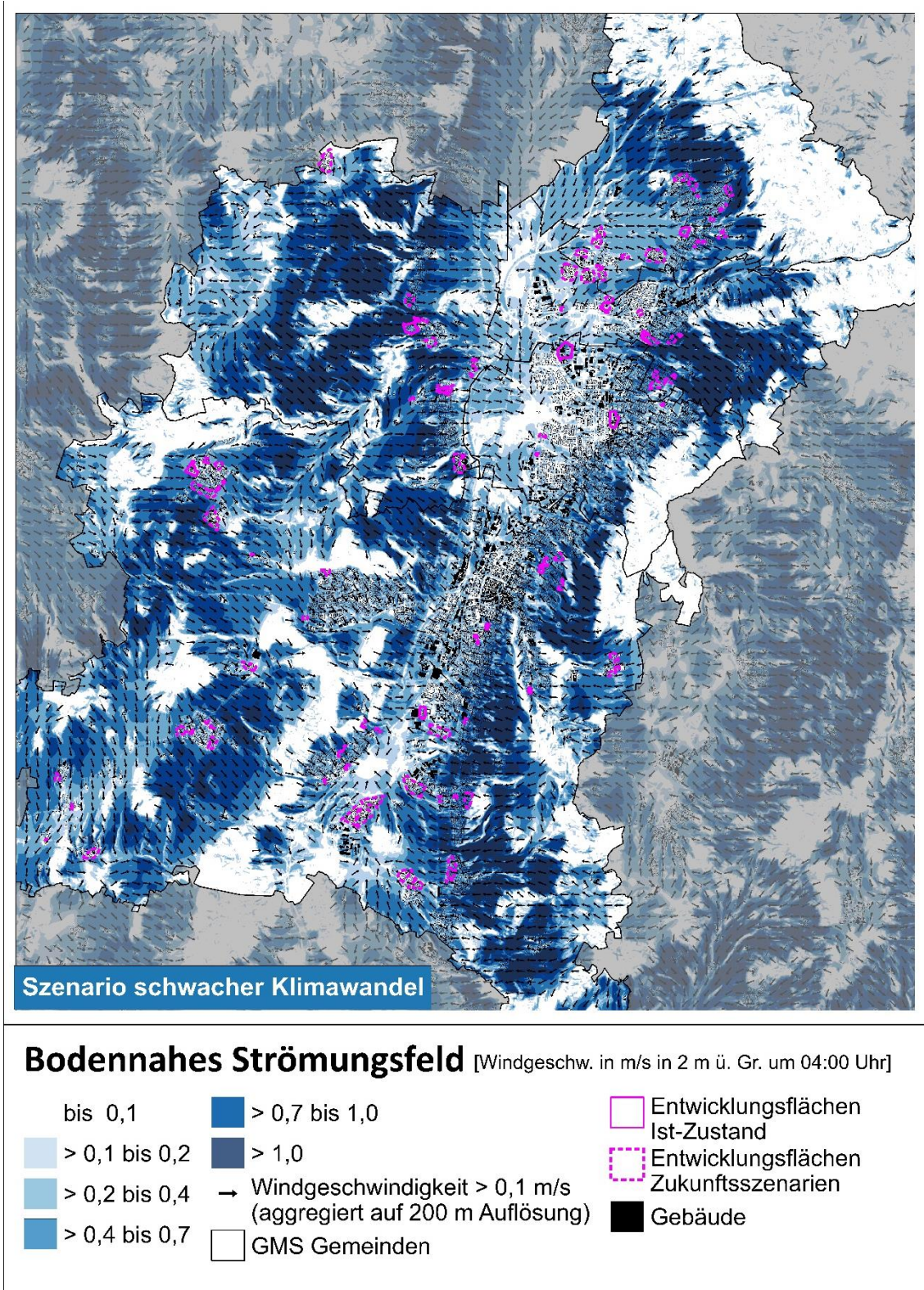


Abbildung A 9: Karte AB 5: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Szenario P1 im GMS (verkürzte Legende).

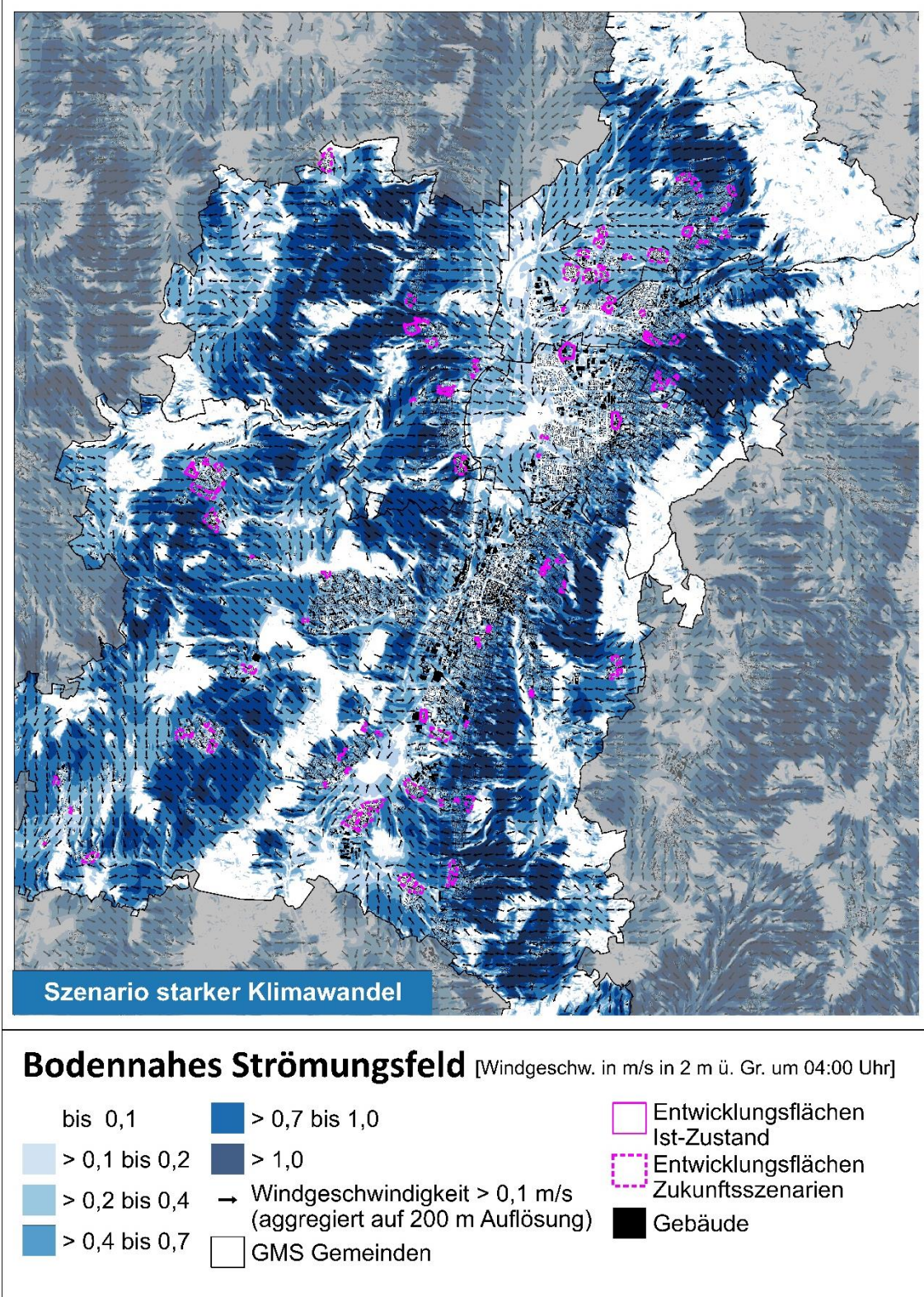


Abbildung A 10: Karte AB 6: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Szenario P2 im GMS (verkürzte Legende).