



**Stadt
Konstanz**

Klimaanalyse und Verwundbarkeitsuntersuchung der Stadt Konstanz



Methodik und Ergebnisse

Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Im Auftrag der

Stadt Konstanz

Amt für Stadtplanung und Umwelt

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

Mai 2026

Impressum

Auftraggeber:

Stadt Konstanz

Amt für Stadtplanung und Umwelt

Untere Laube 24

78462 Konstanz

Ansprechpartner: Jana Schirrmacher

**Auftragnehmer:**

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel.: 0511/ 388 7200

www.geo-net.de

Dr. Björn Büter

M. Sc. Janine Könitz





Inhaltsverzeichnis

Impressum	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Glossar	XI
1. Hintergrund und Anlass.....	1
2. Fachliche Grundlagen.....	2
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit.....	2
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	6
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik.....	9
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	12
4. Klima und Klimawandel im Raum Konstanz.....	14
4.1 Datengrundlage und Methodik	14
4.2 Gegenwärtiges Klima	17
4.3 Autochthone Wetterlagen.....	21
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen	22
5. Analysemethoden	26
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	26
5.2 Szenarienentwicklung.....	30
5.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten.....	33
5.4 Rahmen- und Randbedingungen.....	39
5.5 Modellausgabegrößen.....	41
5.6 Qualitätssicherung.....	43
5.7 Unsicherheiten und Herausforderungen.....	43
6. Analyseergebnisse.....	46
6.1 Numerische Modellierungen	46
7. Zwischenprodukte.....	64
7.1 Klimaanalysekarte.....	64
7.2 Sensitivitätsanalyse.....	69
8. Endprodukte.....	75
8.1 Grundlagen	75
8.2 Geometrische Basis	75



8.3	Bewertungskarten	76
8.4	Planungshinweiskarte.....	88
9.	Zusammenfassung & Ausblick.....	95
	Quellenverzeichnis.....	96
	Anhang II: Klimawandel in Konstanz	102
	Beobachtete Klimaveränderungen	102
	Temperaturzunahme und Hitze	103
	Niederschlagsverschiebung	104
	Trockenheit.....	105
	Starkniederschläge: Starker Niederschlag ($N \geq 10 \text{ mm/d}$)	106
	Starkniederschläge: Stärkerer Niederschlag ($N \geq 20 \text{ mm/d}$).....	106
	Starkniederschläge: Starkniederschlag ($N \geq 30 \text{ mm/d}$)	107
	Sturm	107

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH: VDI 3787, BLATT 4, 2020)	2
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (QUELLE: DWD, 2025)	3
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN ET AL., 2021)	4
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ & SETT, 2019).....	5
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL., 2019).	6
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: LINE, 2017, OBEN), (MVI 2012, MITTE), (DWD, 2023, UNTEN).....	7
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG, 2022, S. 18)	10
ABBILDUNG 8: DIE BEARBEITUNGSSTUFEN EINER TYPISCHEN STADTKLIMAANALYSE	12
ABBILDUNG 9: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCP) UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100. (QUELLE: MEINSHAUSEN ET AL., 2011)	15
ABBILDUNG 10: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS (EIGENE DARSTELLUNG).....	17
ABBILDUNG 11: KLIMADIAGRAMM DER STADT KONSTANZ FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DEN RASTERDATENPRODUKTEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (NACH DWD, 2024B).....	18
ABBILDUNG 12: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN KONSTANZ IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2023 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B)	18
ABBILDUNG 13: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE (TMAX ≥ 30 °C) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN KONSTANZ (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B)	19
ABBILDUNG 14: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER SAISONALEN MITTELWERTE DER BODENFEUCHTE IN KONSTANZ IM ZEITRAUM 1991 BIS 2024 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B).....	20
ABBILDUNG 15: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN KONSTANZ FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION KONSTANZ (DWD, 2024A) ...	20
ABBILDUNG 16: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN KONSTANZ (CA. 79 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN GEEIGNETEN DWD-STATION KONSTANZ (DWD, 2024A)	21
ABBILDUNG 17: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN KONSTANZ (AUSGEWÄHLTE RCP-SZENARIEN, EIGENE BERECHNUNG NACH EURO-CORDEX-DATEN DES DWD, 2024C).	22
ABBILDUNG 18: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN IN KONSTANZ IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 – 2000 (BEZOGEN AUF DAS SZENARIO RCP 8.5). DIE X-ACHSE GIBT DIE ABKÜRZUNGEN FÜR DIE MONATE BZW. JAHRESZEITEN AUS (BSPW. JJA = JUNI-JULI-AUGUST).	23
ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN FÜR KONSTANZ (RCP 8.5). DIE X-ACHSE GIBT DIE ABKÜRZUNGEN FÜR DIE MONATE BZW. JAHRESZEITEN AUS (BSPW. JJA = JUNI-JULI-AUGUST).....	25
ABBILDUNG 20: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	28
ABBILDUNG 21: 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.....	30
ABBILDUNG 22: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN 2023)	31
ABBILDUNG 23: STADTGRENZE (PINKE LINIE); HINTERGRUND: LUFTBILD STAND AUGUST 2023 (WMS LGL-BW ATKIS).33	
ABBILDUNG 24: DIGITALES GELÄNDEMDELL FÜR KONSTANZ UND UMGEBUNG.....	35



ABBILDUNG 25: KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG / STADTSTRUKTUR DER BESTANDSSITUATION IN KONSTANZ UND UMGEBUNG.	37
ABBILDUNG 26: BEISPIELHAFTE ARBEITSSCHRITTE ZUR IDENTIFIKATION VON BAUMSTANDORTEN ANHAND VON NDVI-WERTEN UND STRUKTURHÖHEN.	38
ABBILDUNG 27: BEISPIELHAFTE ÜBERFÜHRUNG DER INFORMATIONEN EINES ENTWURFS IN DAS FITNAH-NUTZUNGSRASTER.	38
ABBILDUNG 28: ZWEI BEISPIELE FÜR MIT DEM MISCHPIXELANSATZ GEFÜLLTE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IN KONSTANZ	39
ABBILDUNG 29: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROSS, 1992).	40
ABBILDUNG 30: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER 21-UHR-TEMPERATUR WÄHREND AUSTAUSCHARMER WETTERLAGEN IN DEN SOMMERMONATEN (JJA) AN SOMMERTAGEN ($T_{\text{MAX}} \geq 25^{\circ}\text{C}$) AN DER STATION KONSTANZ (ANZAHL: 407) FÜR DIE JAHRE 1991 - 2020 (EIGENE DARSTELLUNG NACH DWD, 2024A).	41
ABBILDUNG 31: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS STADTGEBIET KONSTANZ.	47
ABBILDUNG 32: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIET KONSTANZ FÜR ALLE DREI SZENARIEN (OBEN = IST; MITTE = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045.	49
ABBILDUNG 33: ÄNDERUNG DES NÄCHTLICHEN BODENNAHEN TEMPERATURFELDS VON 04 UHR IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES KONSTANZER STADTGEBIETS (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	50
ABBILDUNG 34: PRINZIPISSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM.	51
ABBILDUNG 35: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS STADTGEBIET KONSTANZ.	53
ABBILDUNG 36: ÄNDERUNG DES NÄCHTLICHEN KALTLUFTVOLUMENSTROMS IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045). ..	54
ABBILDUNG 37: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	56
ABBILDUNG 38: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	58
ABBILDUNG 39: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	60
ABBILDUNG 40: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DER ALTSTADT VON KONSTANZ. OBEN: IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO 2045.	61
ABBILDUNG 41: ÄNDERUNG DER WÄRMEBELASTUNG AM TAGE IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	62
ABBILDUNG 42: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAAANALYSEKARTEN FÜR ALLE DREI SZENARIEN	64
ABBILDUNG 43: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG)	66
ABBILDUNG 44: KLIMAAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTAND FÜR DAS STADTGEBIET VON KONSTANZ.	68
ABBILDUNG 45: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DEN KLIMAAANALYSEKARTEN ZU DEN ZUKUNFTSSZENARIEN MIT POTENZIELLEN AUSWIRKUNGEN VON SIEDLUNGSENTWICKLUNGEN AUF KALTLUFTABFLÜSSE (LINKS 2035 UND RECHTS 2045).	69
ABBILDUNG 46: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON HOCHALTRIGEN (OBEN), KINDERN UNTER 6 JAHREN (UNTEN LINKS) UND SGB II EMPFANGENDEN (UNTEN) IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	71
ABBILDUNG 47: SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ	73
ABBILDUNG 48: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	76

ABBILDUNG 49: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 3785, BLATT 1, 2008)	77
ABBILDUNG 50: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION.	80
ABBILDUNG 51: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	81
ABBILDUNG 52: BEWERTUNGSKARTE FÜR DEN IST-ZUSTAND DER NACHTSITUATION DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.....	82
ABBILDUNG 53: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO 2045). VERKÜRZTE LEGENDE.....	84
ABBILDUNG 54: BEWERTUNGSKARTE FÜR DEN IST-ZUSTAND DER TAGSITUATION DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	86
ABBILDUNG 55: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO 2045). VERKÜRZTE LEGENDE.....	87
ABBILDUNG 56: SYMBOLOGIE FÜR GEBIETE MIT SENSITIVEN BEVÖLKERUNGSANTEILEN.	90
ABBILDUNG 57: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON KONSTANZ.	91
ABBILDUNG 58: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR KONSTANZ (VERKÜRZTE LEGENDE).	94
ABB. A 1: ENTWICKLUNG DES NIEDERSCHLAGS IN KONSTANZ 1881 -2024 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B).....	102
ABB. A 2: ZEITLICHER TREND DER TÄGLICHEN MINIMUMTEMPERATUREN (LINKS) BZW. MAXIMUMTEMPERATUREN (RECHTS) IN KONSTANZ (AUSGEWÄHLTE RCP-SZENARIEN, EIGENE BERECHNUNG NACH EURO-CORDEX-DATEN DES DWD, 2024C).....	103
ABB. A 3: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN (LINKS) UND MITTLEREN SAISONALEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN (RECHTS) IN KONSTANZ FÜR DAS RCP 4.5 (DWD, 2024C)	103
ABB. A 4: ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT $T_{MAX} \geq 30^{\circ}C$) IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	104
ABB. A 5: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMME IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	104
ABB. A 6: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN KONSTANZ FÜR DAS RCP 4.5 (DWD, 2024C)	105
ABB. A 7: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN ANZAHL EXTREMER TROCKENPERIODEN (MEHR ALS 28 AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT < 1 MM NIEDERSCHLAG) INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	105
ABB. A 8: ÄNDERUNG DER AUFTRITTHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 10$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	106
ABB. A 9: ÄNDERUNG DER AUFTRITTHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 20$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	106
ABB. A 10: ÄNDERUNG DER AUFTRITTHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 30$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN KONSTANZ IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DAS RCP-SZENARIO 4.5 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	107

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN...	11
TABELLE 2: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOGISCHEN KENNTAGEN IN KONSTANZ (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B, 2024A).	19
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN KONSTANZ (P 0 / 100 = MINIMUM/MAXIMUM, P 50 = MEDIAN).	23
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN KONSTANZ (P 0 / 100 = MINIMUM / MAXIMUM, P 50 = MEDIAN).	24
TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	27
TABELLE 6: PROJIZIERTE ZUNAHME DER MITTLEREN TEMPERATUR IN DEN SOMMERMONATEN (J/J/A) FÜR VERSCHIEDENE ZIELJAHRE GEGENÜBER 1971-2000 FÜR DEN RAUM KONSTANZ.	31
TABELLE 7: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE	32
TABELLE 8: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	41
TABELLE 9: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	42
TABELLE 10: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (VDI 3787, BLATT 2, 2022)	59
TABELLE 11: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	65
TABELLE 12: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG.	72
TABELLE 13: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IM WIRKRAUM (WOHNEN, GEWERBE & VERKEHRSRAUM) AM TAG.	78
TABELLE 14: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN SITUATION IM WIRKRAUM IN DER NACHT	78
TABELLE 15: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG (IN ANLEHNUNG AN VDI 3785, BL.1).	80
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045)	83
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG FÜR DEN SIEDLUNGSRAUM IN DER NACHT, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045)	83
TABELLE 18: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER AUFENTHALTSQUALITÄT IM AUßENRAUM DES SIEDLUNGSGEBIETES AM TAGE, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045)	85
TABELLE 19: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE POTENZIELLE ERHOLUNGSFUNKTION AM TAGE, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045)	88
TABELLE 20: BEWERTUNGSMATRIX DER BELASTUNGSKLASSEN FÜR DEN WIRKRAUM.	89
TABELLE 21: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN BELASTUNGSKLASSEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.	89
TABELLE 22: BEWERTUNGSMATRIX DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM.	89
TABELLE 23: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARFS UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSPAUMS.	90
TABELLE 24: MIT DEN BELASTUNGEN IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM RAHMEN BAULICHER ENTWICKLUNGEN.	92
TABELLE 25: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN IM RAHMEN BAULICHER ENTWICKLUNGEN.	93



Abkürzungsverzeichnis

ALKIS *Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem*

ArbStättV *Arbeitsstättenverordnung*

BIM *Building Information Modeling*

BImSchG *Bundes-Immissionsschutzgesetz*

CMIP6 *Coupled Model Intercomparison Project 6*

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*

DOM *Digitales Oberflächenmodell*

DWD *Deutscher Wetterdienst*

EURO-CORDEX *Coordinated Downscaling Experiment - European Domain*

EWO *Einwohner*

FITNAH *Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat sources*

HLNUG *Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*

IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO *Internationale Organisation für Normung*

KAK *Klimaanalysekarte*

KI *Künstliche Intelligenz*

KPR *Kaltluftproduktionsrate*

LES *Large eddy simulation*

NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*

nFK *nutzbare Feldkapazität*

PET *Physiologisch Äquivalente Temperatur*

PHK *Planungshinweiskarte*

PMV *Predicted Mean Vote*

RANS *Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen*

RCP *Representative Concentration Pathway*

ReKliEs-De *Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland*

RGBI *Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot*

S1 *Szenario 2035*

S2 *Szenario 2045*

SRES *Special Report on Emissions Scenarios*

SSP *Shared Socioeconomic Pathways*

T04 *nächtliche bodennahe Lufttemperatur um 4 Uhr*



$T_{\max}$ *Maximum der Lufttemperatur eines Tages*

$T_{\min}$ *Minimum der Lufttemperatur eines Tages*

ü. NN *über Normal Null*

UBA *Umweltbundesamt*

UTCI *Universal Thermal Climate Index*

VDI *Verein Deutscher Ingenieure*

WMO *World Meteorological Organisation*

Glossar

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

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

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

Austauscharme Wetterlage: →*Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 3787, Blatt 5, 2003).

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

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

Kaltluftproduktionsrate: Das Volumen an Kaltluft (in m^3), das über einer Fläche pro Stunde und m^2 gebildet wird.

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

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

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

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

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

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

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

Strahlungswetterlage $\rightarrow$ *Autochthone Wetterlage*



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

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

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

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

1. Hintergrund und Anlass

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab. Für eine fundierte Erarbeitung einer Strategie in der Klimaanpassung ist unter anderem die Klimaanalyse mit der Beurteilung des Status Quo (zum Stichtag der zugrundeliegenden Daten) des Klimas sowie von Klimaszenarien und einer Verwundbarkeitsanalyse eine wichtige Grundlage. Die bisher existierende Klimafunktionskarte (KFK) für Konstanz aus dem Jahr 2015 wird mit der vorliegenden Stadtklimaanalyse (SKA) nicht nur hinsichtlich der Stadtentwicklung, sondern auch bezüglich der verwendeten Methoden und der Auflösung an den aktuellen Stand der Technik angepasst (INKEK, 2015).

Der Umgang mit „Hitze in der Stadt“ ist eines der relevanten Themen für Konstanz, da in Teilen des Stadtgebietes bereits heute hohe Wärmebelastungen auftreten und sich in Zukunft steigende Temperaturen sowie häufigere Hitzeereignisse abzeichnen. Um Strategien bzw. Maßnahmen zur Minderung der Belastung und Anpassung an die erwartenden Klimaveränderungen zu entwickeln, bedarf es räumlich genauer Informationen zur bioklimatischen Situation in Konstanz, die mit der vorliegenden Klimaanalyse gegeben werden. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere die Kaltluftprozesse getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Konstanzer Stadtklimas. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der daraus abgeleiteten Planungshinweiskarte soll unter anderem die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen ggf. erforderliche kleinräumige Klimamodellierungen und für den aktuell laufenden KLAK-Prozess (Stand 2025) darstellen.

Der vorliegende Bericht gibt zunächst einen Überblick über die fachlichen Grundlagen zum Themenkomplex Stadtklima (Kap. 2). In Kapitel 3 folgt die Dokumentation des Bearbeitungs- und Beteiligungsprozesses. Die übergeordnete Einordnung der Stadtklimaanalyse für Konstanz erfolgt im Kapitel zum Thema Klima und Klimawandel (Kap. 4). Danach wird die Methodik der Modellierungen für die Stadtklimaanalyse (Kap. 5) erläutert. Die Ergebnisse der Modellrechnung werden im anschließenden Kapitel dargestellt (Kap. 6). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „Klimaanalysekarte“ zusammengefasst wurden (Kap. 7.1). Außerdem wird die parallel angefertigte Sensitivitätsanalyse anhand aktueller Bevölkerungsdaten erläutert (Kap. 7.2). Um aus allen Ergebnissen planerische Konsequenzen ableiten zu können ist eine zusammenfassende Betrachtung von z. B. Tag- und Nachtsituation, aber auch aller Szenarien auf der sog. „Wertebene“ und eine Verknüpfung mit Maßnahmenpotentialen notwendig (Kap. 8). Kapitel 9 fasst die vorliegende Klimaanalyse allgemein zusammen.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse¹ 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) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

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

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

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

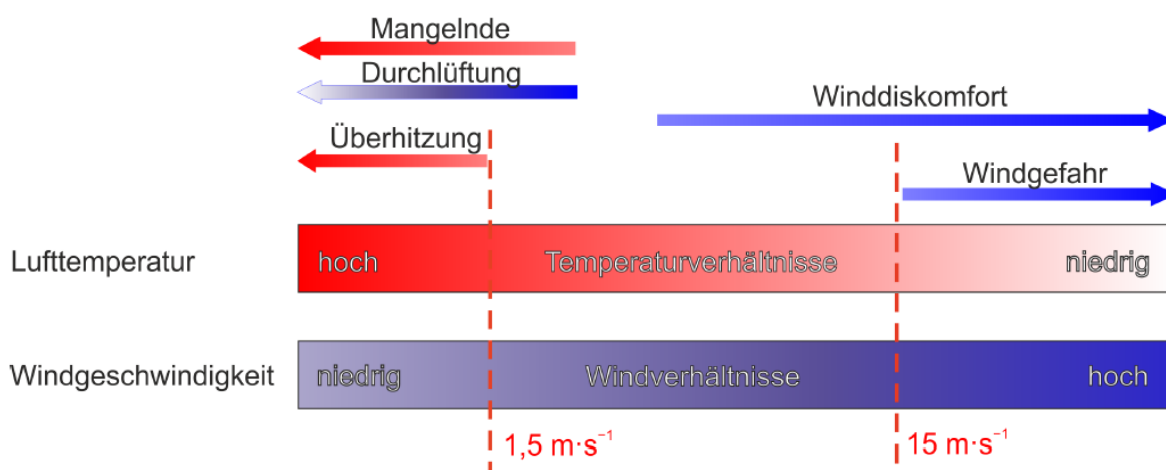


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach: VDI 3787, Blatt 4, 2020)

¹ Synonyme Verwendung der Stadtklimaanalyse zu Klimaanalyse der Stadt Konstanz

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 (Mayer & Höppe, 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI, Jendritzky et al., 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger, 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen 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, 2022). 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 (Klepeis et al., 2001)– 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 3785, Blatt 1, 2008, S. 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, 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 Arbeitsgebers, 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.

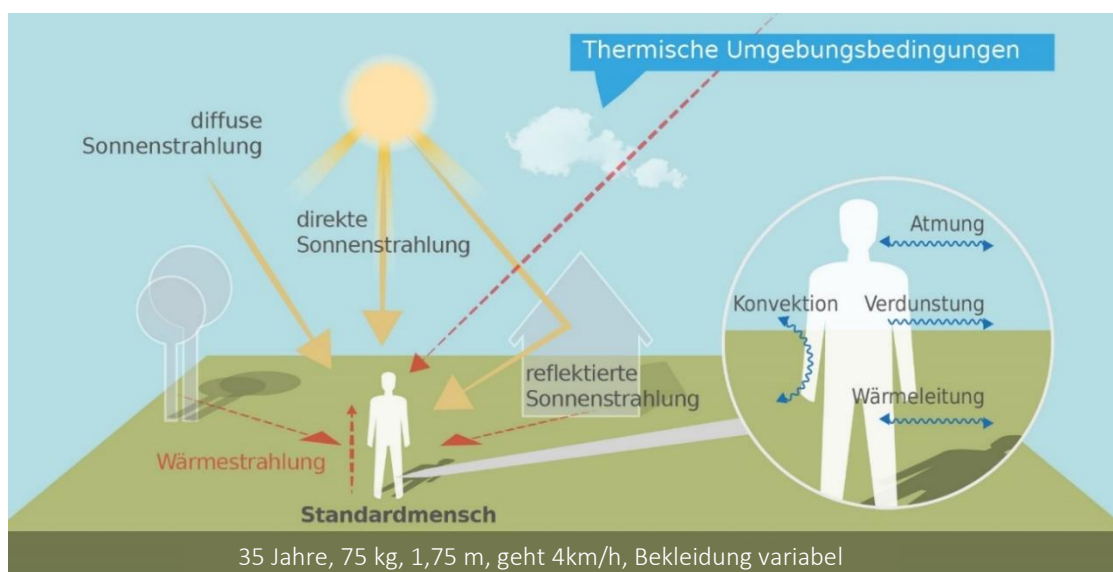


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (Quelle: DWD, 2025)

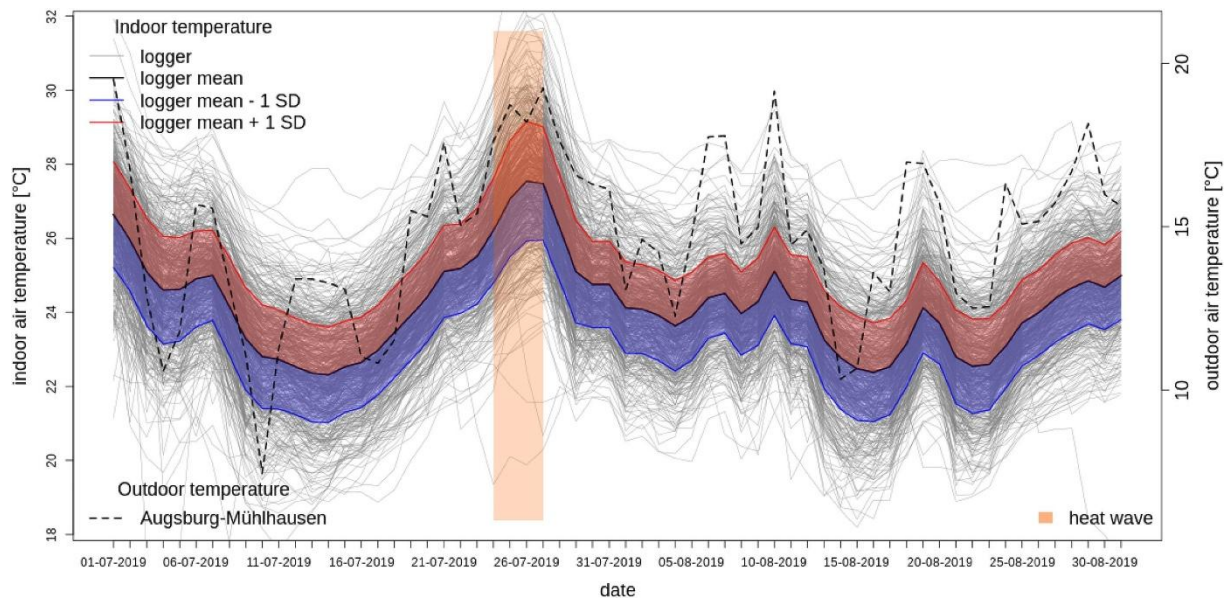


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann et al., 2021)

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: „Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.“ (VDI 3785, Blatt 1, 2008, S. 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 et al., 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO, 2017). 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 (Cedeño Laurent et al., 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund

einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnen und Senioren 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).

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 $> 20^{\circ}\text{C}$ 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; Winklmayr et al., 2022; Winklmayr & an der Heiden, 2022). 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, 2024).

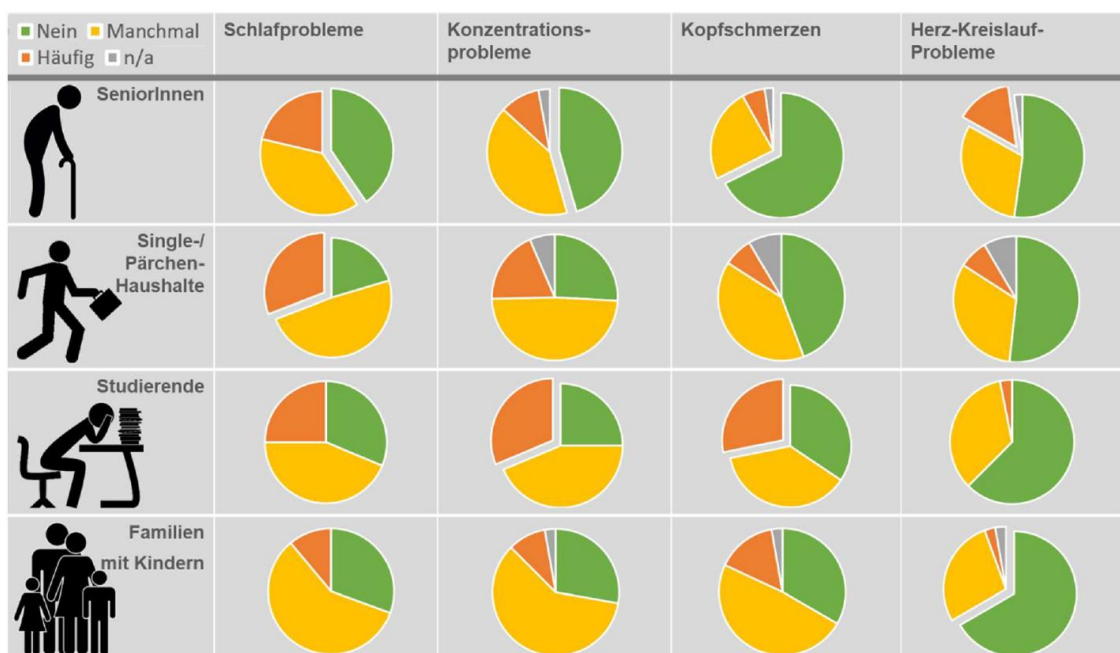


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019)

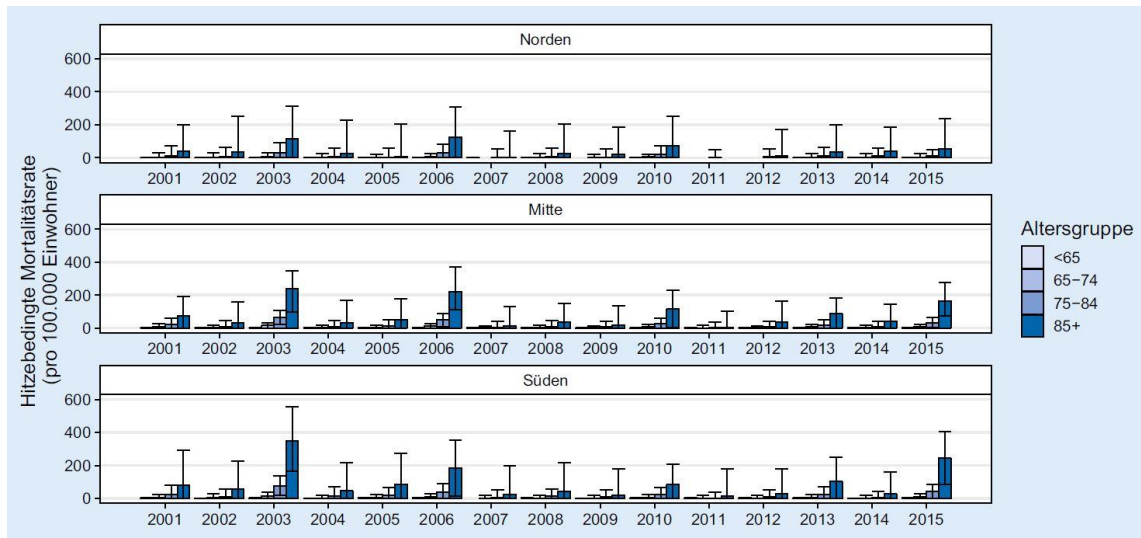


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An Der Heiden et al., 2019).

2.2 WÄRMEINSELEFFEXT 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-/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 (Gross, 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (2024; 2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

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

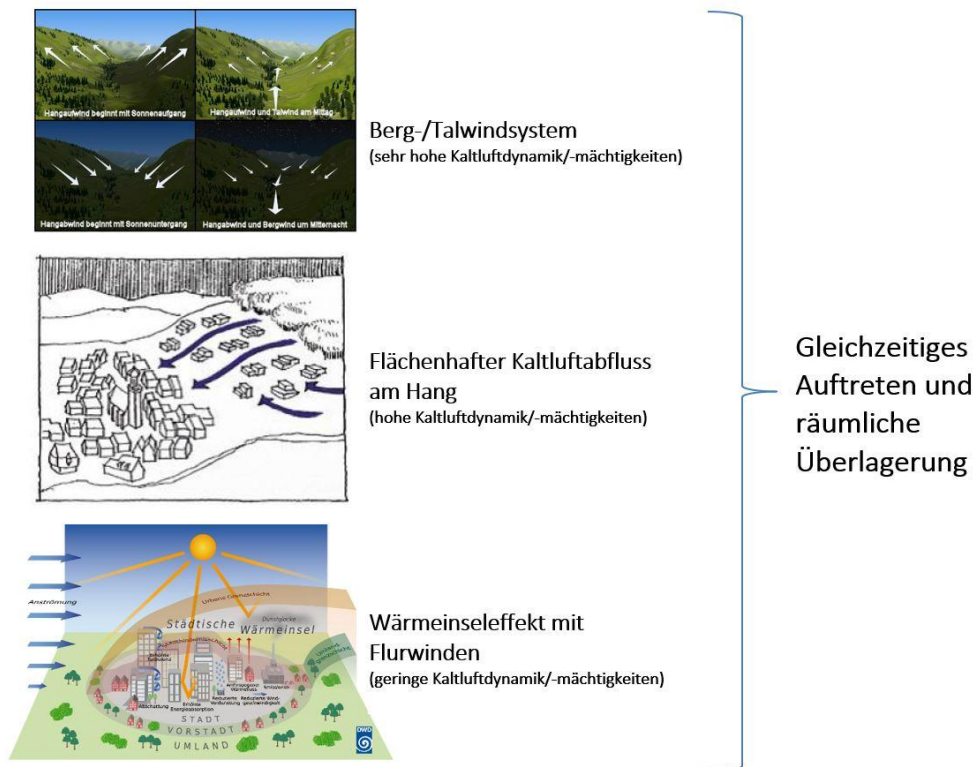


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: Line, 2017, oben), (MVI 2012, Mitte), (DWD, 2023, unten)

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al., 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). 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 Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 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 3787, Blatt 5 - Entwurf, 2024; VDI 3787, Blatt 5, 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum Thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrundeliegenden 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, Stadtsanierung, 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 (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))
- VDI 3787 Blatt 2 (2022): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- VDI 3787 Blatt 5 (Entwurf 03/2024): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))

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

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (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 Modell Anwendungen 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.

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	- Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet - Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen	- Klimaeigenschaften der Flächen - Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume - Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft	- Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) - Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	- Kleine und mittlere Kommunen - Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen - Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten.	- 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.	- 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	- Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere - Bebauungsstruktur/-typ - Flächennutzung	- Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) - Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) - Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart	- Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe - Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung - Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur - Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich	- Klimatope - Klimaanalysekarte	- 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, S. 18)

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

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 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 aufgelösten 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 1. Analyse 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 8). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Juli 2024 und Dezember 2025. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelemente sind numerische Stadtklimamodellierungen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt, sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarte. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der dortigen Projektleitung beim Amt für Stadtplanung und Umwelt sowie zu speziellen Einzelthemen zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.



Abbildung 8: Die Bearbeitungsstufen einer typischen 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). 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 Bewertungsmaß-



stäben und -verfahren zulässig (Fürst & 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, 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, 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 Ansprechpartner der Stadt andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandenen Produkte sind 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.

Folgende Abteilungen waren in den Abstimmungsprozess einbezogen:

- Amt für Stadtplanung und Umwelt
 - Abteilung Stadtentwicklung
 - Abteilung Stadtplanung
 - Abteilung Umwelt und Grün

Neben diversen Abstimmungsterminen zu Detailabsprachen fanden im Projektverlauf insgesamt zwei übergreifende Sitzungen zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- 02.09.2025: Vorstellung der Ergebnisse der Modellierung des Status Quo und der Zukunftsmodellierungen, Präsentation der Klimaanalysekarten und der Bewertungskarten (Online)
- 09.12.25 Vorstellung der Sensitivitätsanalyse, Diskussion eines Entwurfes der Planungshinweiskarte (PHK) (Online)

4. Klima und Klimawandel im Raum Konstanz

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Konstanz basiert überwiegend auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2024b; Kaspar et al., 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von monatlichen oder jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze von Konstanz wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km-Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige (Normal-)Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können.

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

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Jacob et al., 2014). Ergänzt wurden diese Modellierungen für Deutschland im Projekt ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Hübener, Hoffmann, et al., 2017; Hübener, Spekat, et al., 2017). Durch den DWD wurde aus diesem übergeordneten Prozess ein für Deutschland repräsentatives Referenzensemble ausgewiesen (DWD, 2024c). Zudem wurden diese Daten im Rahmen eines Ressortforschungsprojektes einer Biasadjustierung unterzogen und auf eine höhere Auflösung regionalisiert.

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

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Konstanz ein Modellensemble bestehend aus 10 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden. Laut Vorgaben des Landes Baden-Württemberg wurden dabei nur Modellläufe für die RCP Szenarien 4.5 und 8.5 berücksichtigt (LUBW, 2021).

Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamolldaten“ durchgeführt (Linke et al., 2024).

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von 5 km verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Deutschland flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl passender Gitterpunkte entsprechend der Stadtgrenze. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten.

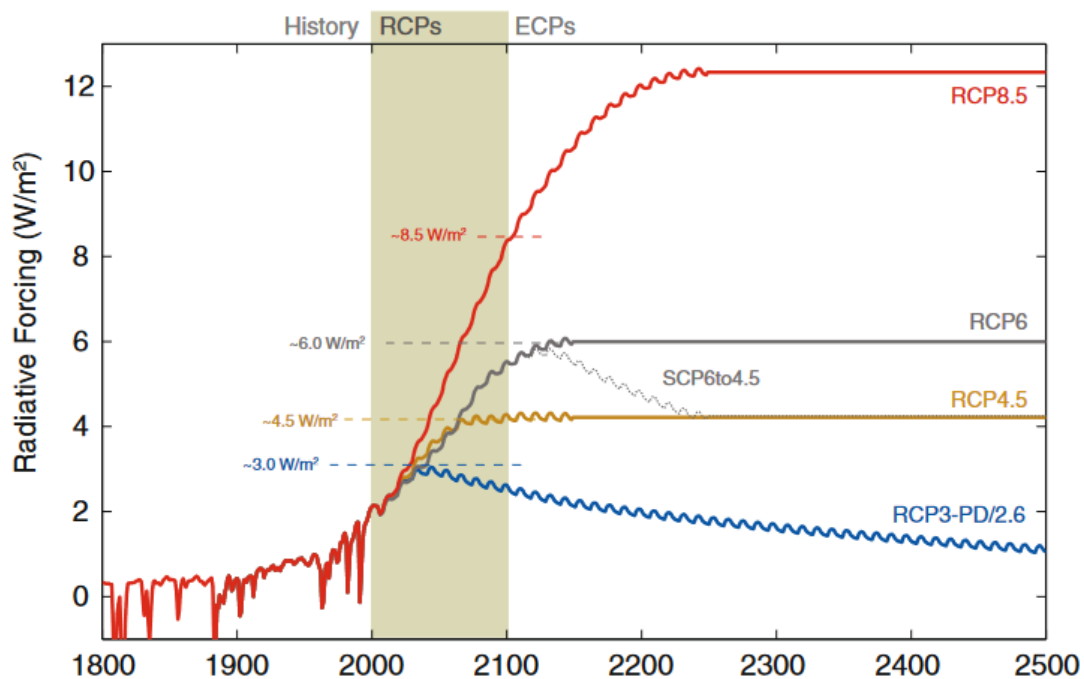


Abbildung 9: Strahlungsantrieb der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP²) und ihre Entwicklung bis 2100. (Quelle: Meinshausen et al., 2011)

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. In den vom DWD aufbereiteten Daten stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die sozioökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = Shared Socioeconomic Pathways; DKRZ, 2025). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien³), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten und dem DWD Referenzensemble enthalten.

² RCPs = Representative Concentration Pathways (repräsentativer Konzentrationspfad); ECP = Extended Concentration Pathways, sind ergänzende Szenarien bis 2300.

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

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m^2 , der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Abbildung 9)(Moss et al., 2010):

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

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO_2 -Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden et al., 2017; Peters et al., 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert.

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

Die verwendeten Daten wurden vom DWD im Zuge der Regionalisierung einer Biasadjustierung unterzogen. Trotzdem kann ein gewisses Maß an Unsicherheiten immer noch in den Daten enthalten sein. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Unsicherheiten für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben diese Unsicherheiten, also deren Differenz, daher keinen Einfluss und man erhält eine robustere Aussage.

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

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 – 2000

- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2021 – 2050
- 2. Zukunftsperiode (mittlere Zukunft): 2031 – 2060
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (Linke et al., 2024). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abbildung 10).

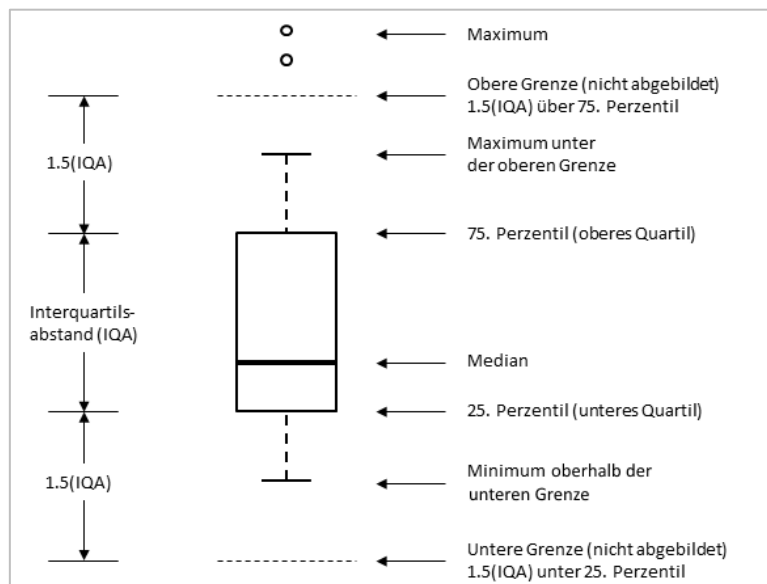


Abbildung 10: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots (eigene Darstellung)

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Konstanz ist, bezogen auf die Klimanormalperiode von 1991 – 2020, gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 10,1 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von 845 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen im Juni/Juli auftreten (Abbildung 11 & Tabelle 2). Damit ist die Stadt um 0,8 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (UBA, 2025a). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in derselben Periode liegt über dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (UBA, 2025b).

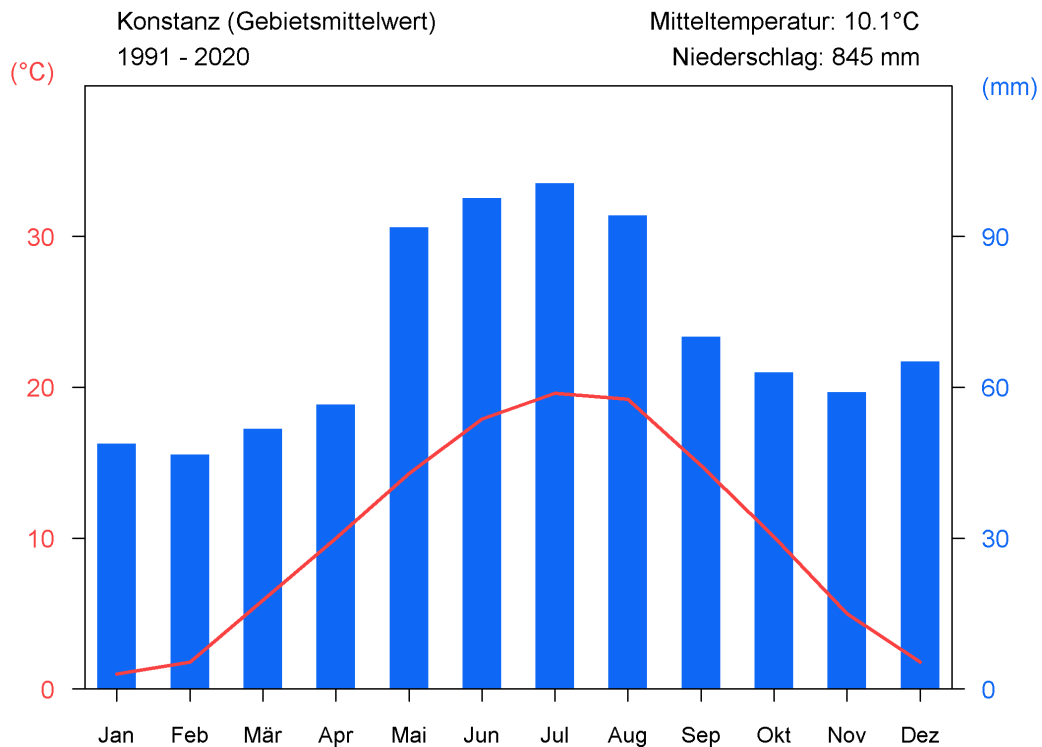


Abbildung 11: Klimadiagramm der Stadt Konstanz für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Rasterdatenprodukten des Deutschen Wetterdienstes (nach DWD, 2024b)

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Konstanz – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur dort seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,6 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 12).

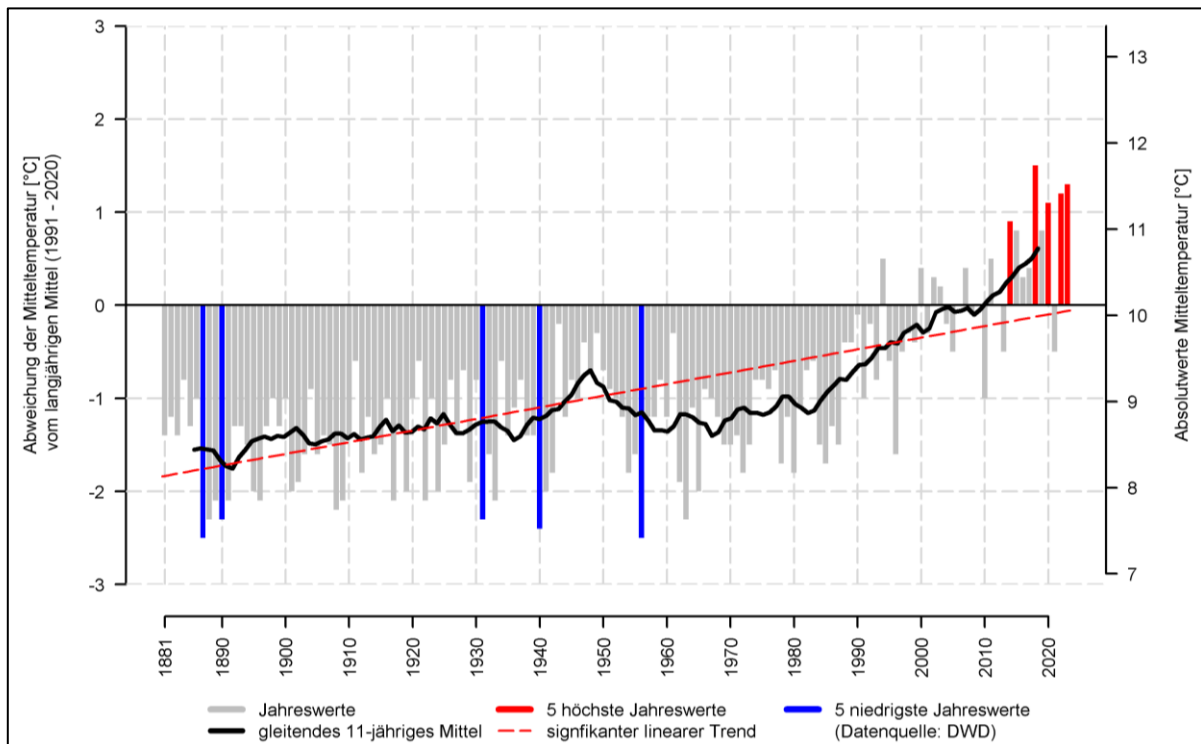


Abbildung 12: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Konstanz im Zeitraum von 1881 bis 2023 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

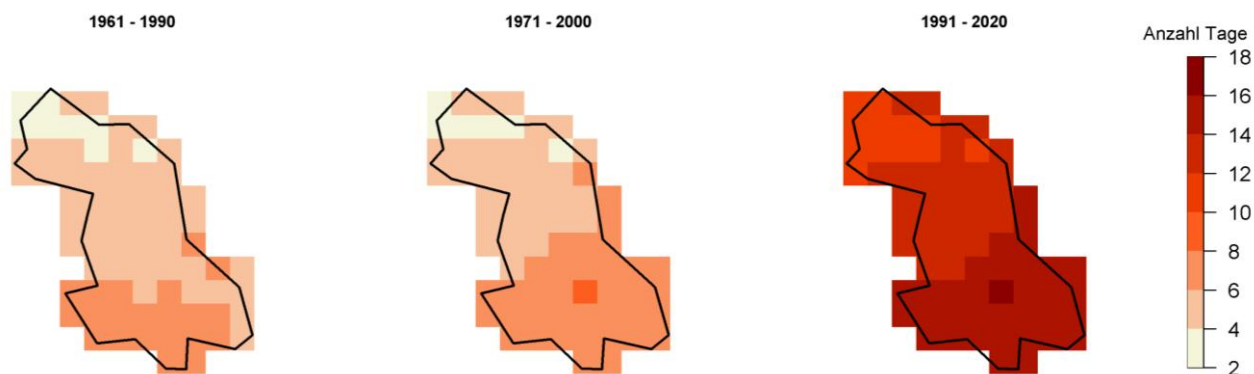


Abbildung 13: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in verschiedenen Perioden in Konstanz (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

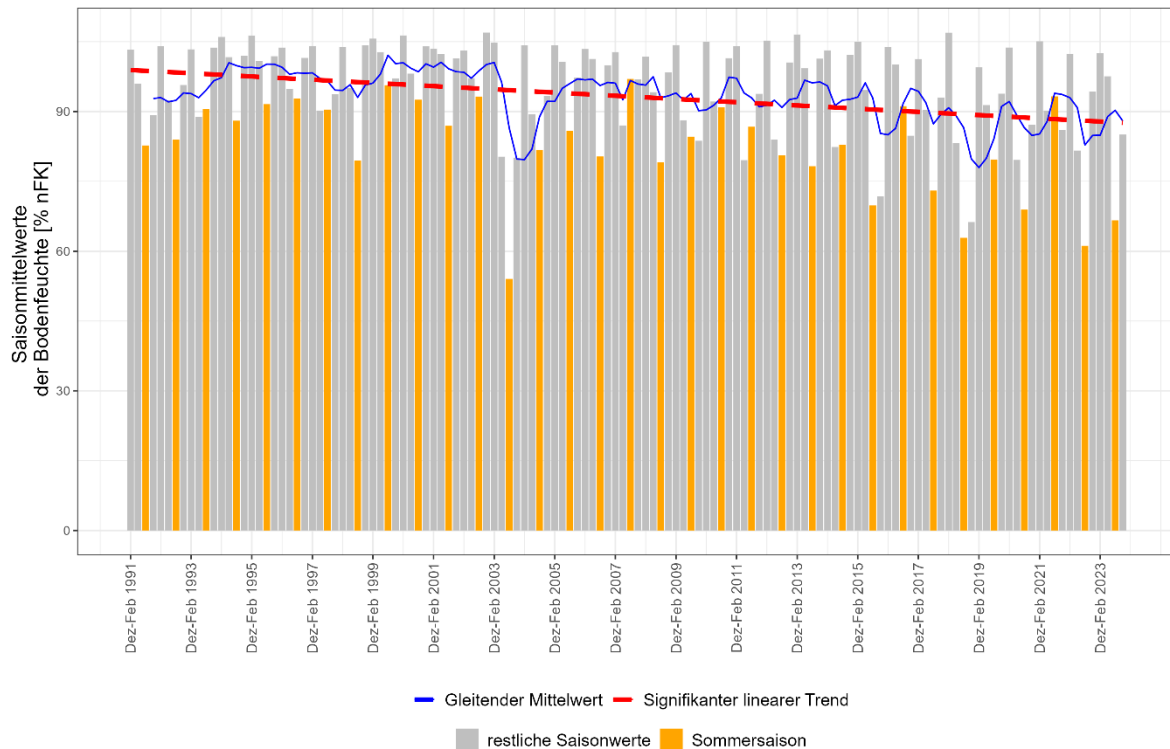
Tabelle 2: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kennzahlen in Konstanz (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b, 2024a).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
Mittelwert der Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	8,9	9,2	10,1
Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	38	41	57
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	5	6	14
Tropennächte ⁴ ($T_{\min} \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	< 1	1
Frosttage ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	85	79	73
Eistage ($T_{\max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	22	20	15
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	857	863	845

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 – 2020 traten in Konstanz 57 Sommertage und 14 Heiße Tage pro Jahr auf. Die typische Bodenseeklima zeigt sich unter anderem in der Anzahl meteorologischer Kenntage im Winter. In Konstanz wurden in den letzten drei Dekaden im Mittel 73 Frosttage und 15 Eistage pro Jahr registriert.

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt in Konstanz deutlichen jahreszeitlichen Schwankungen (Abbildung 14). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Zeitspanne 1991 bis 2023 ist klar zu erkennen, dass die nFK im Sommer (Juni, Juli, August / orangefarbene Balken in der Abbildung) deutlich niedriger liegt als zu anderen Jahreszeiten. Die Werte der Sommermonate schwanken in den letzten Jahren zunehmend um ca. 60 % nFK. Es ist davon auszugehen, dass es im Stadtgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress standen.

⁴ Da die Tropennächte vom DWD nicht als flächendeckende Raster veröffentlicht werden, beziehen sich die Angaben der Tropennächte auf die DWD Station Konstanz (DWD, 2024a)



(Quelle: DWD 1x1km Raster)

Abbildung 14: Langjährige Entwicklung der saisonalen Mittelwerte der Bodenfeuchte in Konstanz im Zeitraum 1991 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

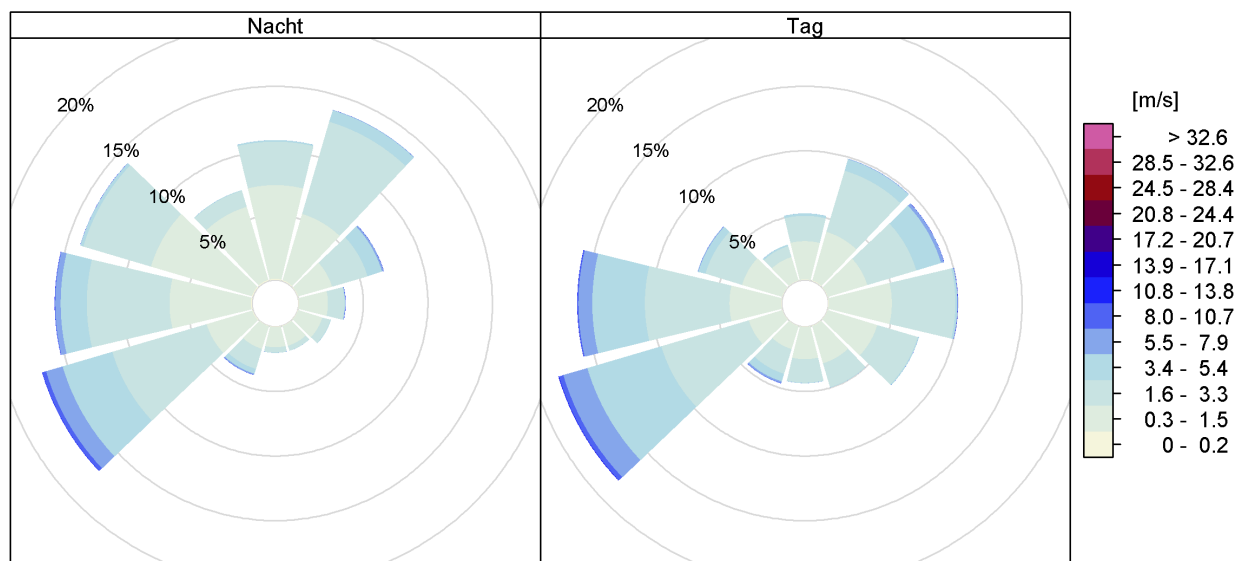


Abbildung 15: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Konstanz für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Konstanz (DWD, 2024a)

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Konstanz (westlich von Wollmatingen) dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Konstanz. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit für 1991 - 2020 liegt bei 2,1 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 0,3 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leiser Zug bis leichte Brise). In den Tagstunden dominieren Winde aus südwestlicher Richtung, während nachts der Wind auch etwas häufiger aus nordöstlichen Richtungen weht (Abbildung 15).

4.3 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 wind-schwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt.

Um autochthone Nächte zu ermitteln braucht es Angaben zur stündlichen Windgeschwindigkeit, zur Temperatur und zum Bedeckungsgrad (Berechnung nach Augter, 1997). Daher wurden diese für die nahe gelegene repräsentative Station Konstanz des Deutschen Wetterdiensts (DWD) ausgewertet. Dort traten im langjährigen Mittel der Jahre 1991 - 2020 rund 79,5 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf (Abbildung 16). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im Mittel rund 9 windschwache Strahlungsnächte pro Monat beobachtet, was einem Anteil von 30,3 % entspricht – etwas weniger als jede dritte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen. Die Station Konstanz liegt westlich von Wollmatingen und ist von Ackerflächen umgeben. Sie ist, wie die meisten DWD Stationen, WMO-konform⁵ aufgebaut und liegt nicht im urbanen Stadtgebiet, sondern am rural geprägten Rand der Stadt. Daher kann es zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Auftrittshäufigkeit autochthoner Nächte in der Innenstadt von Konstanz kommen. Die obenstehenden Angaben sind daher als Mindestmaß zu verstehen.

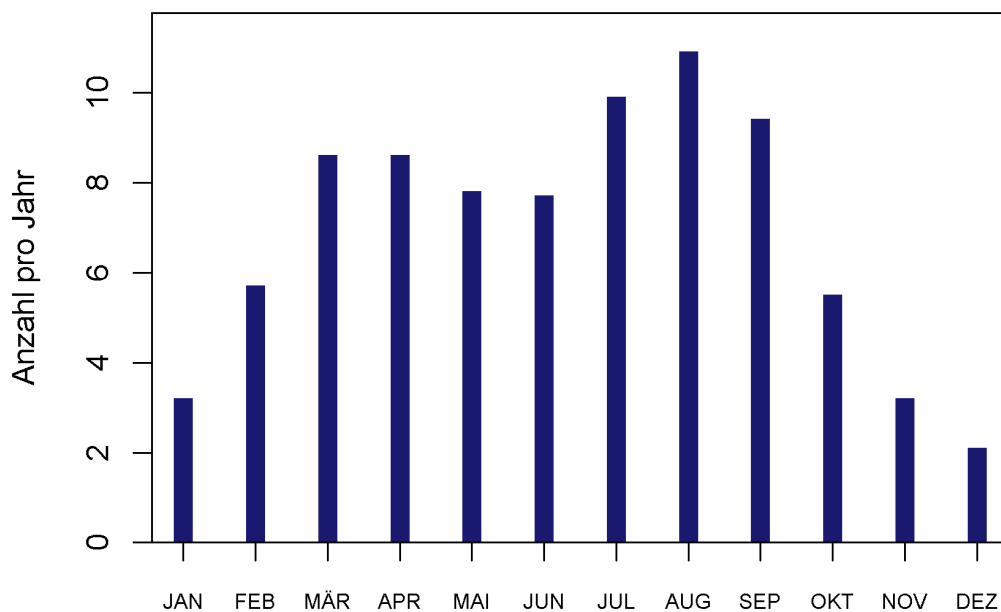


Abbildung 16: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Konstanz (ca. 79 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen geeigneten DWD-Station Konstanz (DWD, 2024a)

⁵ Nach Vorgaben der World Meteorological Organization (WMO) gestaltete Messstationen befinden sich in Deutschland meist auf flachem Terrain, fernab von Gebäuden oder größeren Waldflächen und auf Rasenflächen, um eine langzeitige Vergleichbarkeit zwischen den Stationen herstellen zu können.

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle ausgewerteten RCP-Szenarien projizieren ein Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Konstanz bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 17 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁶ (siehe Tabelle 3 & Abb. A 2 im Anhang).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 4.5 wird ein Temperaturanstieg bis fast zum Ende des Jahrhunderts erwartet mit einer Stagnation und ggf. leichten Abnahme ca. ab den 2080er Jahren.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 17 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel). Die in diesem Kapitel beschriebenen Änderungen der klimatischen Parameter werden, wie in Kapitel 4.1 erläutert, im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 angegeben.

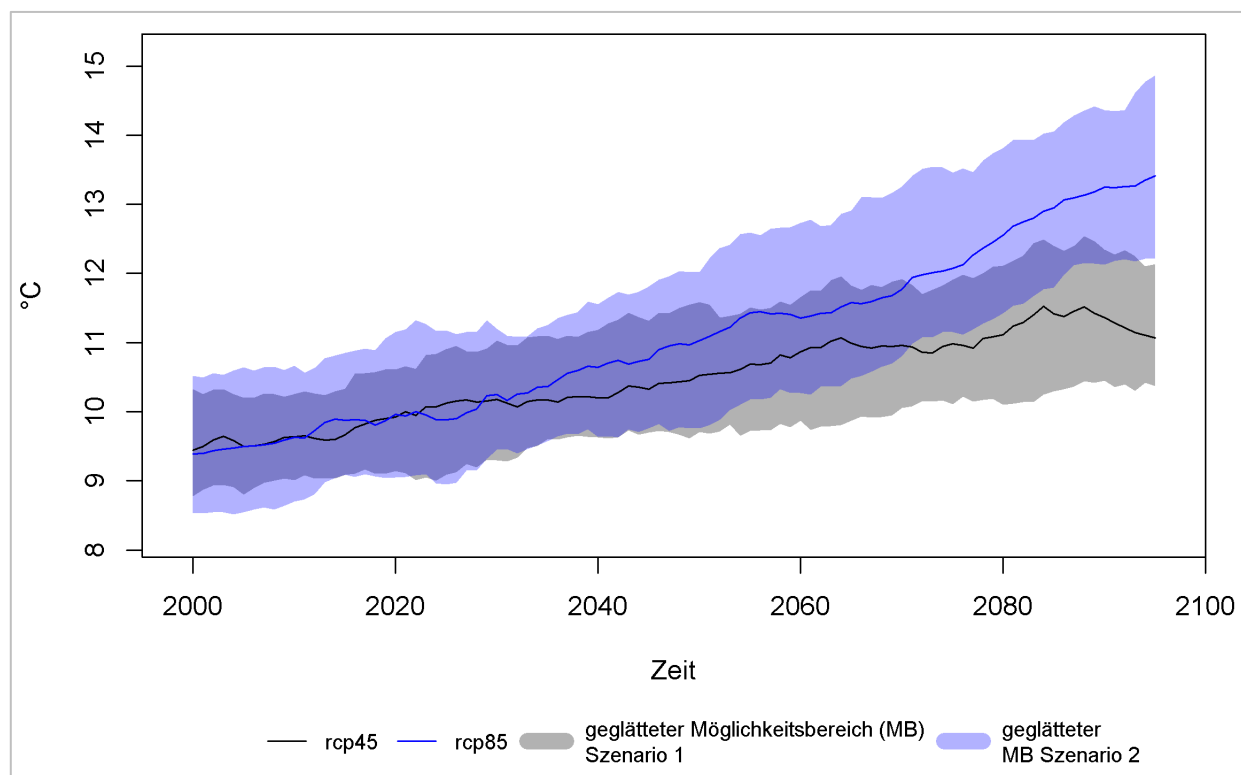


Abbildung 17: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Konstanz (ausgewählte RCP-Szenarien, eigene Berechnung nach EURO-CORDEX-Daten des DWD, 2024c).

⁶ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Konstanz (P 0 / 100 = Minimum/Maximum, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 4.5	0,9	1,4	1,8	0,9	1,6	2,2	1,5	2,1	2,7
	RCP 8.5	1,2	1,8	2,6	1,6	2,1	2,9	3	3,9	4,5
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 4.5	0,4	2,5	3,9	0,8	2,9	4,2	2,9	4,4	5,1
	RCP 8.5	0,7	3,5	5,7	1,2	3,8	4,8	5,2	6,5	8,6
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 4.5	0,9	1,9	2,7	1,1	2	3	1,5	2,4	4
	RCP 8.5	1,3	2,1	3,5	1,8	2,5	4,4	4,1	5,5	7,8

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar (ohne Abb.), jedoch treten in Konstanz im Sommer (JJA) tendenziell größere Temperaturänderungen auf als im Rest des Jahres (Abbildung 18). Dieses Muster zeigen alle RCP-Szenarien (ohne Abbildung), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen).

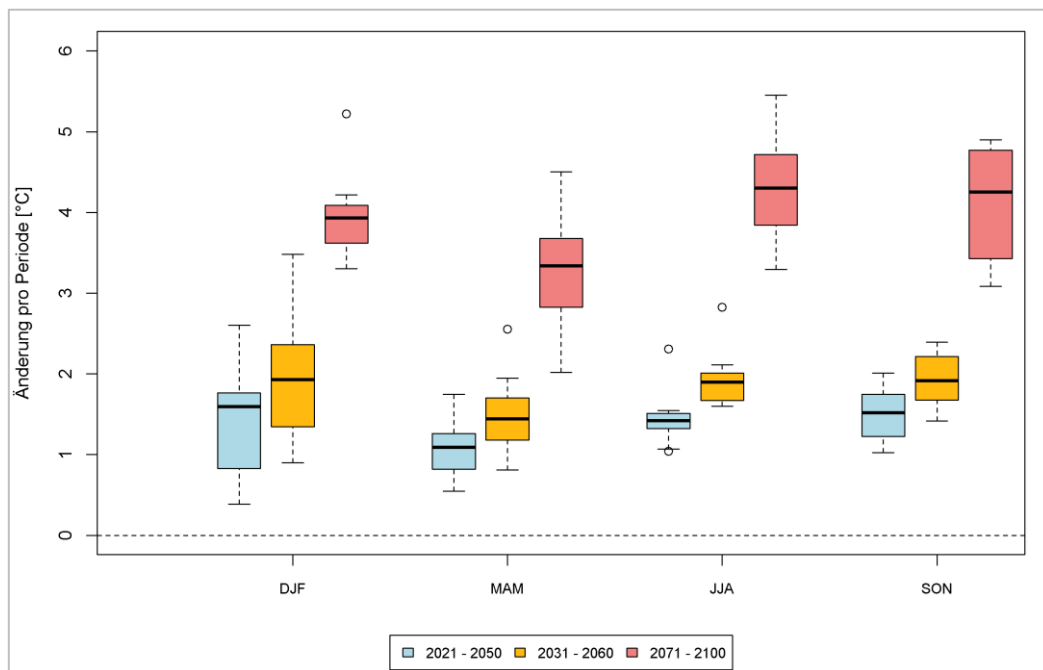


Abbildung 18: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Konstanz im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 (bezogen auf das Szenario RCP 8.5). Die X-Achse gibt die Abkürzungen für die Monate bzw. Jahreszeiten aus (bspw. JJA = Juni-Juli-August).

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen künftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit **51 zusätzlichen Heißen Tagen pro Jahr** zu rechnen, während diese in der Referenzperiode nur sechsmal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte treten in Konstanz derzeit relativ selten auf (im Mittel eine Tropennacht pro Jahr). In der mittleren Zukunft (2031 – 2060) wird im RCP 8.5 zusätzlich rund ein bis zwei Tropennächte pro Jahr erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des

Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 4.5 im Vergleich zur ersten Hälfte nur leicht zunimmt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode im Mittel **zehn zusätzliche Tropennächte pro Jahr** in Konstanz möglich. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Es existieren verschiedene Definitionen für solche Ereignisse z. B. nach Vorgabe des DWD (VDI 3787, Blatt 7, 2024) oder nach WMO (WMO, 2017), letztere war Grundlage für die Berechnung im vorliegenden Bericht. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Konstanz zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um bis zu acht Tage (ohne Abb.).

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer **Abnahme an Frost- und Eistagen**. In Konstanz wurden im langjährigen Mittel 79 Frosttage bzw. 20 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 34 Frosttage bzw. 7 Eistage auftreten.

Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an **Tagen mit Frost- und Tauwechseln** und eine verlängerte **Vegetationsperiode** nach sich ziehen (ohne Abb.).

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Konstanz (P 0 / 100 = Minimum / Maximum, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 4.5	14,8	21,6	30,6	15,7	25,4	36,6	25,1	28,7	35,7
	RCP 8.5	23,7	26	37,4	25,9	32	47	42,4	51,8	65,9
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 4.5	7,5	10,8	16,4	8,1	12,9	19,2	8	14,3	23
	RCP 8.5	8,9	12,5	19,9	13,1	14,4	27,1	23,5	32,5	43
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 4.5	0	0,2	0,7	0,2	0,7	1,4	0,5	1,6	2,2
	RCP 8.5	0,1	0,9	3	0,2	1,6	5	3,9	10,2	19,5
Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 4.5	-28,8	-8,1	-0,7	-36,6	-12,4	0,4	-48,5	-24,8	-3,7
	RCP 8.5	-48,6	-21,3	-5,1	-49,6	-25	-9,3	-67,9	-45,9	-31,6
Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 4.5	-8,3	-5,1	0	-9,1	-6,2	0,1	-11,6	-8,8	-5,9
	RCP 8.5	-13,4	-8,7	-1,8	-11,7	-8,9	-1,9	-16,1	-13,2	-8,7

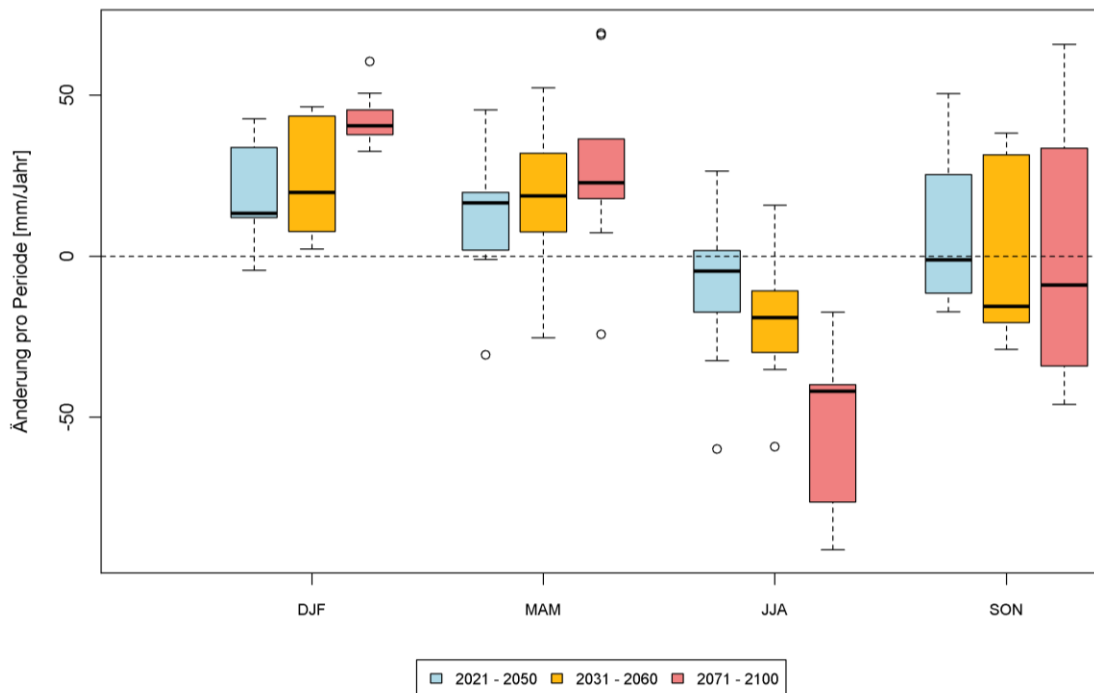


Abbildung 19: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den drei Zukunftsperioden für Konstanz (RCP 8.5). Die X-Achse gibt die Abkürzungen für die Monate bzw. Jahreszeiten aus (bspw. JJA = Juni-Juli-August)

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung von **Trockenperioden** sind nur bedingt Aussagen aus den EURO-CORDEX-Daten möglich, da der Parameter Bodenfeuchte nicht im Datensatz enthalten ist.

Als Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 8.5 einen Rückgang vorrangig in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 19).

In Bezug auf den Sommer zeichnet sich damit eine verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass sie sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird.

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, 2012a, 2012b, 2014, 2017; Gross et al., 2002)

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

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

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Gross, 1989).

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 (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
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Stadt Konstanz und angrenzendes Umland rd. 8,7 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 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Verkehrsraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

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

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
20	Gebäude	individuell
21	Gebäude mit Dachbegrünung	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
14	Gewässer	0
7	Gleis	0
9	niedrige Vegetation	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Rasen	individuell
23	niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5

26	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	Individuell
27	Solarpaneele	0
28	Sand	0
15	Rebflächen	0

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

Abbildung 20 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an 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 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 Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) 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.

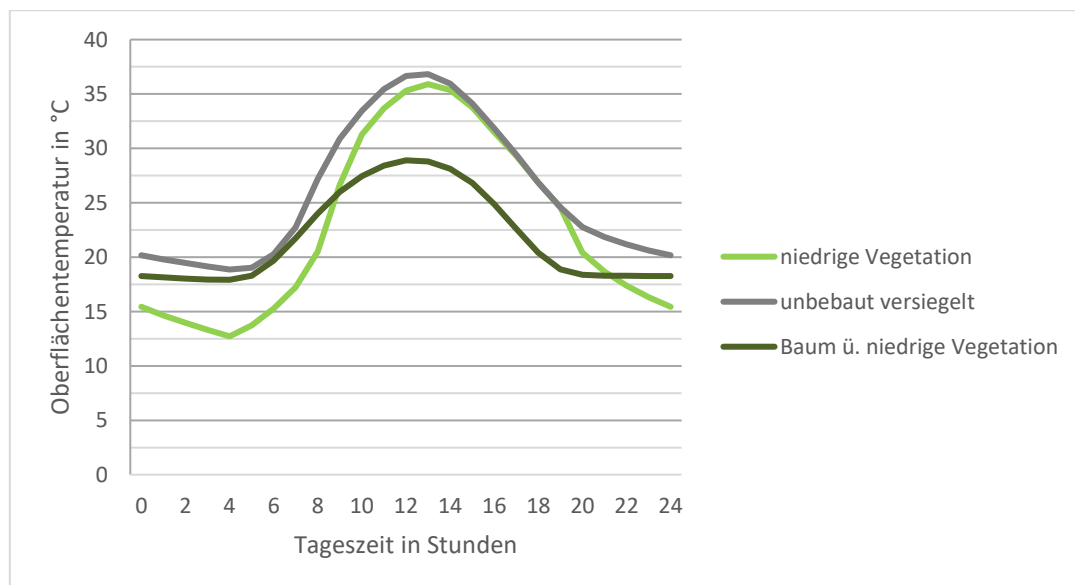


Abbildung 20: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D



Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher 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 21 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

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

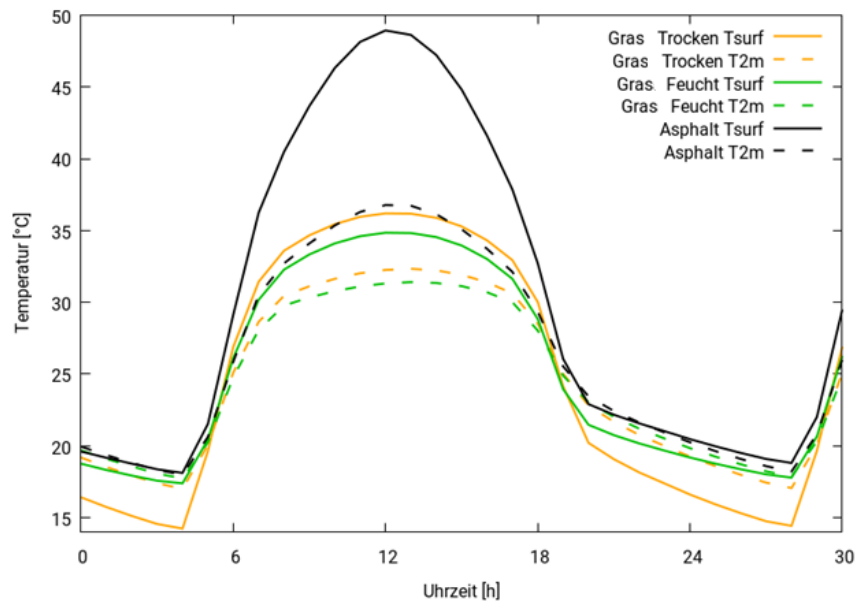


Abbildung 21: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.2 SZENARIENENTWICKLUNG

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

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

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

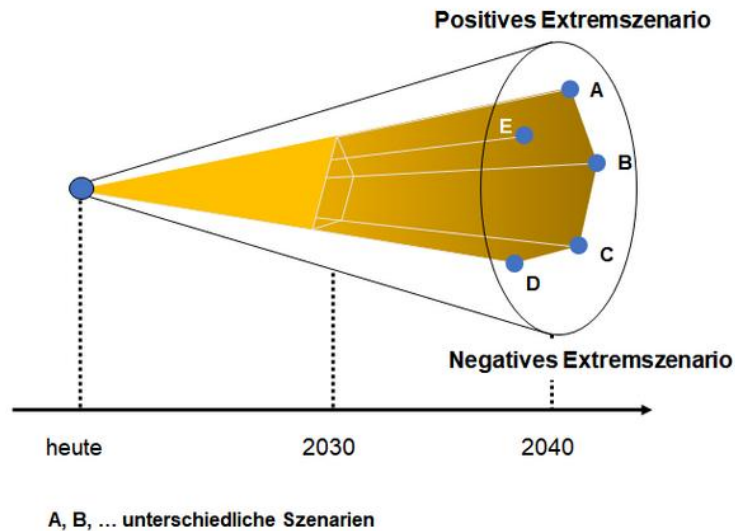


Abbildung 22: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen, 2023)

Im vorliegenden Fall wurden unter Beteiligung der Abteilung Stadtentwicklung zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont eins ist die Periode 2021 – 2050, mit Fokusjahr 2035 (Tabelle 6). Zielhorizont zwei ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Die Szenarien basieren auf dem Median des RCP-Szenarios 8.5. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 wurde zur Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D hinzugerechnet (+1,4K bzw. +1,9 K, fettgeschrieben in Tabelle 6).

Tabelle 6: Projizierte Zunahme der mittleren Temperatur in den Sommermonaten (J/J/A) für verschiedene Zieljahre gegenüber 1971–2000 für den Raum Konstanz.

	Zielhorizont 2021-2050 (Mitte = 2035)		Zielhorizont 2031-2060 (Mitte = 2045)	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
15. Perzentil	1,2	1,2	1,4	1,6
Median	1,4	1,4	1,6	1,9
85. Perzentil	1,4	1,5	1,8	2,1

Für das Szenario 2045 wurde zusätzlich die Auswirkung einer abnehmenden Bodenfeuchte berücksichtigt. In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde von flächendeckend 60 % im Ist-Zustand auf einen Wert von 30 % herabgesetzt. Die Bodenfeuchte hat dabei nur auf die FITNAH Nutzungsklassen 9 (niedrige Vegetation / Rasen) und 25 (Baum über Rasen) einen Einfluss.

Für die Zukunftsszenarien wurden, wie auch schon für den Ist-Zustand eine Reihe städtebaulicher Entwicklungsflächen, in die Modelleingangsdaten übernommen. Für den Fall, dass noch keine konkrete Planung vorlag wurden Mischpixel verwendet (Methodik siehe Kapitel Aufbereitung der Modelleingangsdaten).



Es wurden keine Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation modelliert. Ansatz ist hier, einzig die Auswirkungen des Klimawandels und der städtebaulichen Entwicklung (letztere begrenzt auf oben genannte Flächen) auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen. Tabelle 7 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 7: Entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Status Quo, Ist-Zustand	■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von Mitte 2024 ■ 13 B-Pläne und Bauprojekte überprüft & ggf. eingepflegt, die derzeit oder in Kürze umgesetzt werden
Szenario 2035	■ Berücksichtigung eines Temperaturänderungssignals von 1,4 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5, Median) ■ 5 städtebauliche Entwicklungsflächen
Szenario 2045	■ Berücksichtigung eines Temperaturänderungssignals von 1,9 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5, Median) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte ■ 2 städtebauliche Entwicklungsflächen

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 erhältlichen Geoinformationen und aus den ergänzenden Daten der Stadt gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Wie in Kap. 5.1 beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet von Konstanz, von Kreuzlingen, sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach Vorgaben der Stadt und gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers (Ausschnitt mit Fokus auf die Stadtgrenze Konstanz: Abbildung 23).



Abbildung 23: Stadtgrenze (pinke Linie); Hintergrund: Luftbild Stand August 2023 (WMS LGL-BW ATKIS).



Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert. Ein numerisches Modell wie FITNAH 3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind:

- **Geländehöhe**
 - ➔ Digitales Geländemodell (Auflösung: 1m; Stand: 2020)
- **Landnutzung**
 - ➔ ALKIS Nutzungen (Stand: 2024)
 - ➔ DOP (Stand: 2021)
 - ➔ Realflächenkartierung Stadt Konstanz (Stand: Herbst 2023)
 - ➔ OpenStreetMap (Stand: 2024)
 - ➔ Bebauungspläne und ähnliches (in Absprache mit der Stadt, bis Ende 2024)
- **Gebäude**
 - ➔ ALKIS (Stand: 2024),
 - ➔ LOD2 (Stand: 2020)
- **Vegetation**
 - ➔ RGBI-Luftbilder⁷ mit NDVI-Wert = -0,1; (Auflösung: 0,2m; Stand: 2023)
- **Strukturhöhe**
 - ➔ Digitales Oberflächenmodell (DOM) (Auflösung: 1m; Stand: 2020)
 - ➔ Digitales Geländemodell (DGM) (Auflösung: 1m; Stand: 2020)
- **Versiegelungsgrad**
 - ➔ RGBI mit NDVI-Wert = -0,04 (Auflösung: 0,2m; Stand: 2023)
- **Wassertemperatur „sommerlicher Mittelwert“**
 - ➔ Landsat (Auflösung: 30m; Stand: 2024)
 - ➔ CLMS (Auflösung: 30m; Stand: 2023)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Landnutzung von Konstanz wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2021 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Die Datengrundlagen zu Gebäuden stammen jedoch aus dem ersten Quartal 2024 und waren zum Zeitpunkt der Eingangsdatenaufbereitung (Ende 2024) demnach sehr aktuell. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthophotos abgeglichen und auch vom Auftraggeber gegengeprüft. Die Auswirkungen sehr neuer Planvorhaben wurden zum Teil über aktuelle Bebauungspläne oder andere Planunterlagen berücksichtigt.

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Im Umland von Konstanz sind die Eingangsdaten teilweise weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen Konstanz und seinen Nachbarorten auch in der Schweiz hinreichend genau zu erfassen. Darüber hinaus wurde bei der Modellrechnung ein Nesting-Verfahren angewandt, um weitergehende regionale Einflüsse zu berücksichtigen (siehe Kap. 2.3, bzw. Kap. 5.4).

Das Stadtgebiet Konstanz erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 9 km in Ost-West- bzw. ca. 12 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von etwa 108 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 224 km² auf (12,2 km x 18,3 km). Insgesamt wird das Modellgebiet mit ca. 8,7 Mio. Rasterzellen beschrieben, wobei für jede Rasterzelle jeweils eine Information zur Geländehöhe, Landnutzung und Strukturhöhe hinterlegt ist. Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem

⁷ 4-Kanal Multispektralbilder mit der Kanalbelegung RGBI (Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot)

digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 1m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 5 m-Rasterauflösung gemittelt wurde (Abbildung 24). Im Untersuchungsgebiet treten Höhenunterschiede von ca. 240 Metern auf. Der höchste Punkt innerhalb der Stadtgrenze von Konstanz liegt auf ca. 570m ü. NN. In den Randbereichen des Untersuchungsgebietes steigt das Gelände zum Teil auf bis zu 624m ü. NN an.

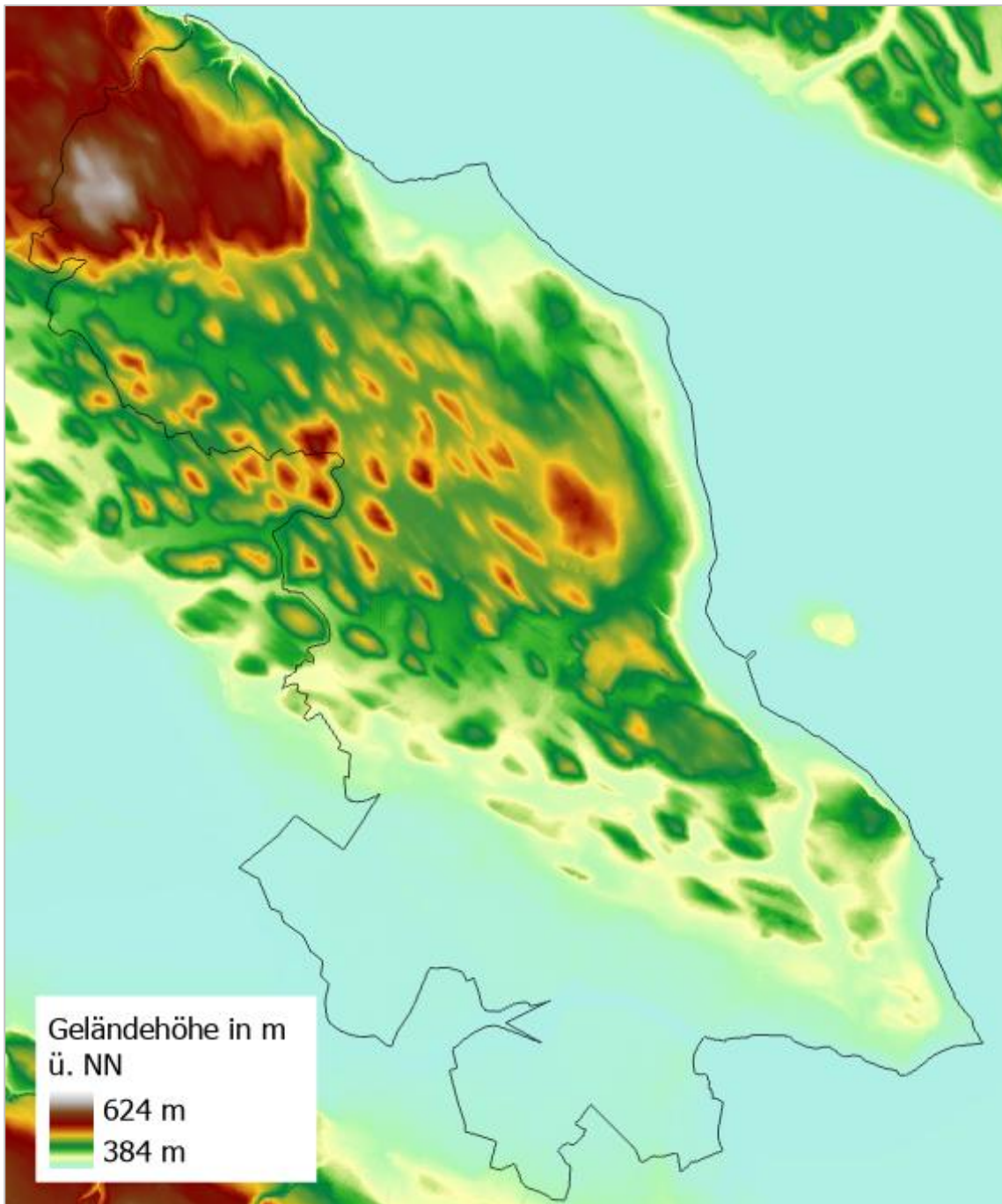


Abbildung 24: Digitales Geländemodell für Konstanz und Umgebung.

Die Konstanzer Landnutzung wird über 10 verschiedene Nutzungsklassen (Tabelle 5 & Abbildung 25) definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 3 m werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden Bäume über Versiegelung (z.B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) und Bäume über



naturfernem Boden (z.B. Bäume neben Gleisanlagen oder Sportplätzen) ausdifferenziert. Es lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2023 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von -0,1 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Prinzip siehe Abbildung 26). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

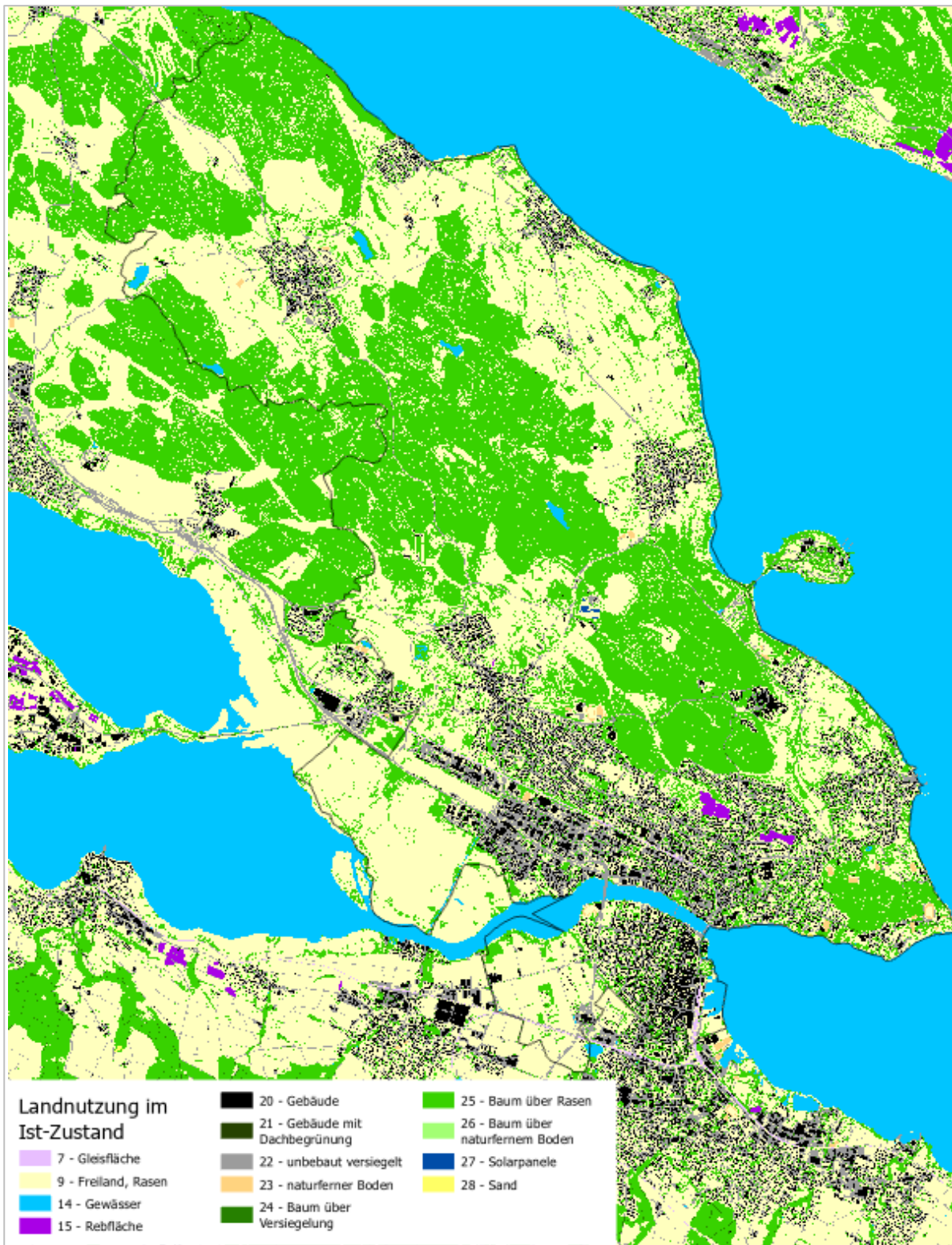


Abbildung 25: Klassifizierte Landnutzung / Stadtstruktur der Bestandssituation in Konstanz und Umgebung.

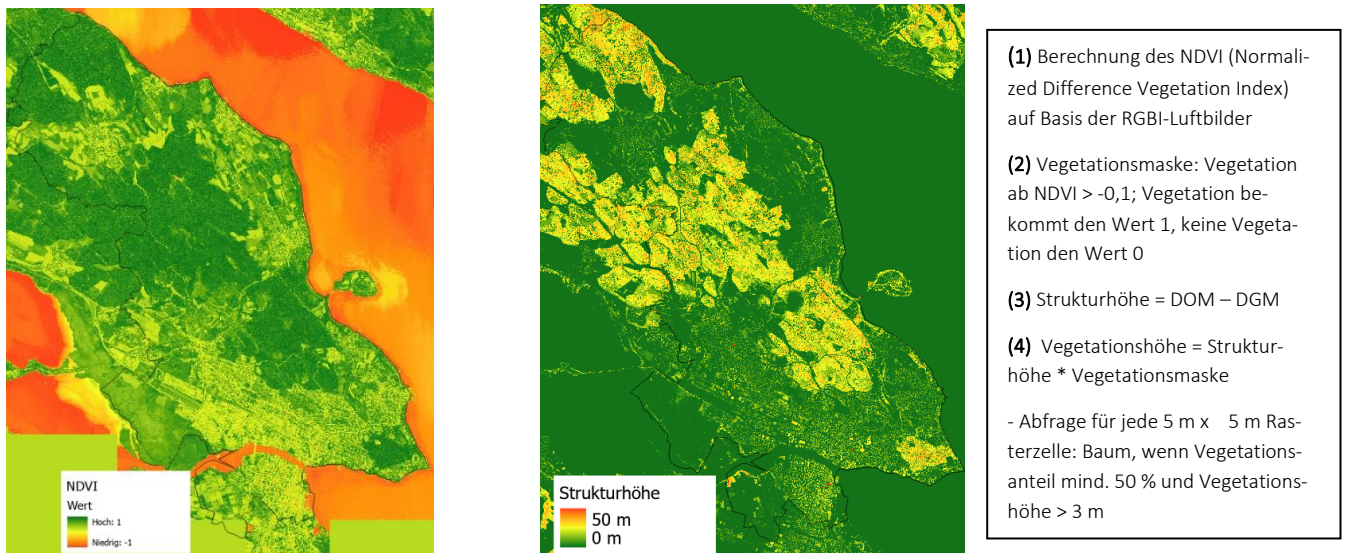


Abbildung 26: Beispielhafte Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen.

Da das verwendete Luftbild (Stand 2023) Bereiche mit aktueller Bautätigkeit zeigte, wurden in Abstimmung mit der Stadt Konstanz in 13 Gebieten Änderungen des Nutzungsrasters anhand von Bebauungsplänen (BP) oder sonstigen Planunterlagen in die FITNAH-Landnutzung für den Ist-Zustand eingearbeitet (Prinzip in Abbildung 27).



Abbildung 27: Beispielhafte Überführung der Informationen eines Entwurfs in das FITNAH-Nutzungsraaster.

Der Landnutzung für die **Zukunftssituation** liegt an erster Stelle diejenige des Status Quo zugrunde. In den veränderten Gebieten wurde allerdings eine mögliche Bebauung auf Grundlage verschiedener Quellen (vorrangig aus dem Agglomerationsprogramm Kreuzlingen-Konstanz) angenommen (vgl. Kap. 5.2).

Da für diese Flächen zum Teil noch keine weitergehenden Konzeptionen, städtebaulichen Entwürfe oder genauere Daten zu Entwicklungsumfang und Intensität existierten, wurden allgemeine Parameter zu Grunde gelegt. Mit Hilfe von Flächenzwillingen, also Vorbildern aus der bestehenden Stadtstruktur, wurden dann statistische Verteilungen der Landnutzungsklassen und Gebäudehöhen für diese Flächen abgeleitet.

Die Einarbeitung dieser Flächen erfolgte über den Mischpixelansatz. Hierfür wurden die prozentualen Anteile der FITNAH-Nutzungsklassen und die Gebäudehöhenangaben verwendet. Neue Bäume wurden standardmäßig auf 6 m gesetzt. Bäume, die in Szenario 2035 neu hinzugekommen waren, wurden für das Szenario 2045 auf 12m hochgestuft.

In den Zukunftsmodellläufen füllt das FITNAH-Modul „Randomisator“ die Siedlungsentwicklungsflächen rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen entsprechend dem Mischpixelansatz auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen (Abschätzung der Unsicherheit siehe Kap. 5.7). Abbildung 28 zeigt exemplarisch zwei mit dem Randomisator gefüllte Flächen.

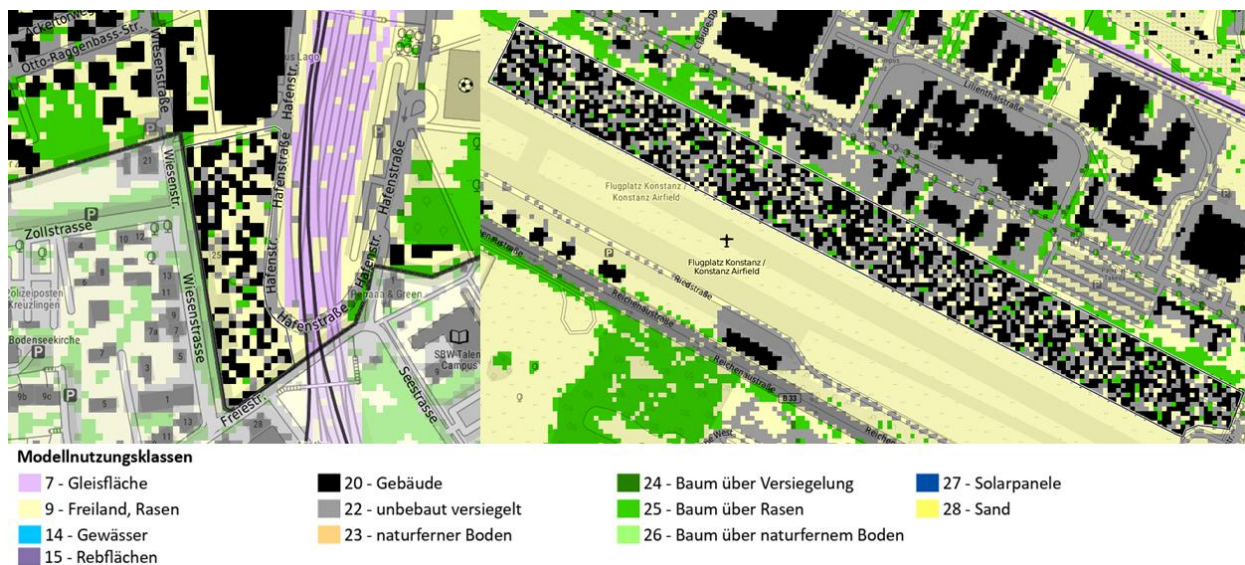


Abbildung 28: Zwei Beispiele für mit dem Mischpixelansatz gefüllte Entwicklungsflächen in Konstanz

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Konstanz regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (siehe Kapitel 4.3). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21.06.). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Konstanz besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 29 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 kön-

nen, 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.

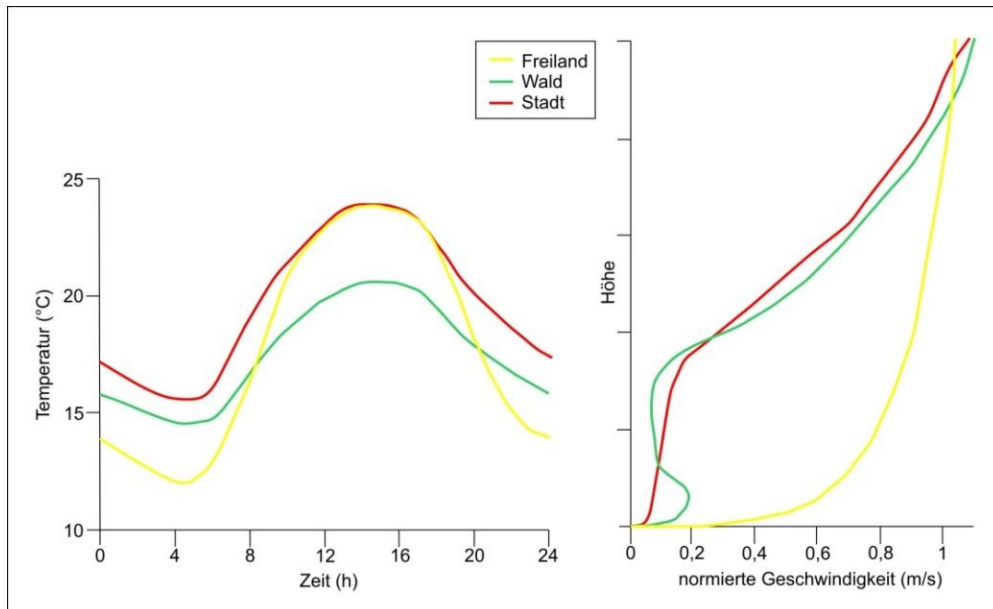


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross, 1992).

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

Zur Festlegung der Starttemperatur für die Modellierung des Ist-Zustandes wurden Daten zu Wind, Bedeckungsgrad und Temperatur an der DWD Messstation Konstanz ausgewertet (Abbildung 29Abbildung). Die so ermittelte Verteilung von 21 Uhr Temperaturen in autochthonen Nächten in den Sommermonaten Juni, Juli, August an Sommertagen ($t_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) für den Zeitraum 1991 – 2020 ergab einen Mittelwert von $20,7^\circ\text{C}$, welcher als Starttemperatur festgelegt wurde.

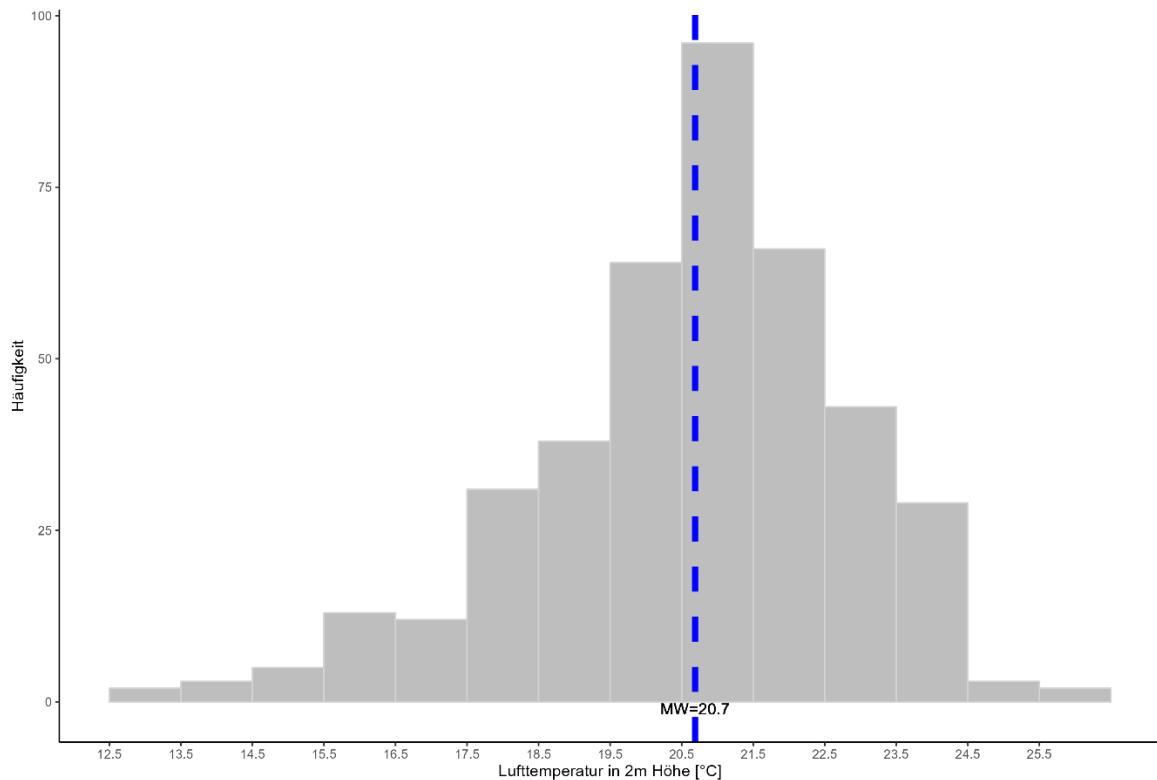


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der 21-Uhr-Temperatur während austauscharmer Wetterlagen in den Sommermonaten (JJA) an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) an der Station Konstanz (Anzahl: 407) für die Jahre 1991 - 2020 (eigene Darstellung nach DWD, 2024a)

Um die regionalen Winde im Großraum berücksichtigen zu können, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus einer Modellrechnung in 50 m Auflösung für ganz Baden-Württemberg. Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsgeschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Konstanzer Klimaanalyse weitergegeben.

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 8). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie Größen, welche die bodennahe Lufttemperatur beeinflussen, beispielsweise der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 8: 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]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potentielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m²/s²]	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 sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 9).

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 existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

Tabelle 9: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

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

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

5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätze 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 erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (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 beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der in anderen Stadtklimamodellen Anwendung findet, die aber selten dieselbe hohe räumliche Auflösung bei gleichzeitiger Modellgebietsgröße erreichen.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis



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

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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte in der Größenordnung von Konstanz modelliert werden kann. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrundeliegenden 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 Klötzchenmodell (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. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Ein gesamtstädtischer Geodatenatz ist für dieses Thema i. d. R. nicht verfügbar, sodass diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden können. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturnaher Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.



Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Gross, 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 gesamstädtische Ebene bereitstehen und modelltechnisch abgebildet werden können.

Bezüglich der Zukunftsmodellierung ist es denkbar, dass sich randomisierte Flächen im Modell ungünstiger darstellen als die spätere tatsächliche Entwicklung. Durch die Zufallsverteilung (vgl. Kap. 5.3) werden keinerlei zusammenhängende Gebäudestrukturen, Straßen, größere Freiräume oder Grünbereiche abgebildet, die ggf. dem Luftaustausch zuträglich sind. Für die Betrachtungsebene der Gesamtstadt sind die durchschnittlichen Wirkungen der Entwicklungsflächen aber repräsentativ.

Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. 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

6.1 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als ArcGIS Pro Kartenpaket visualisiert und als Geodaten sowie als hochauflösende PDF-Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten rasterbasierter Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftproduktionsrate, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 5.4). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Klassenschritte in der Farblegende wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

6.1.1 NACHTSITUATION

NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb städtischer Bereiche bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung in den Bewertungskarten, usw. auf diesen beruht.

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Konstanzer Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur um 4 Uhr (T04) im Ist-Zustand bei Minimalwerten von ca. 13 °C über Freiflächen und Maximalwerten bis etwa 26 °C über dem Bodensee eine Spannweite von 13 °C (Abbildung 31). Die mittlere nächtliche Temperatur der Stadt liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei ~16,5 °C. Die Modellrechnung bestätigt den bereits in den Grundlagen benannten Wärmeinseleffekt (Kapitel 2.2) und erlaubt darüber hinaus eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Altstadt von Konstanz sind die höchsten Bebauungsdichten und – insbesondere auch in den gewerblich geprägten Bereichen – hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (s. Abbildung 31 & Abbildung 32). Überwärmungen zeigen sich auch im Umfeld von Straßen und Plätzen (z.B. entlang der Wollmatinger Straße). In der Altstadt liegt die Temperatur im Ist-Zustand häufig im Bereich von 19 bis 20 °C. Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden mit Spannen zwischen 15,0 und 17 °C in den locker bebauten Stadt- & Ortsteilen (z.B. Wallhausen) erreicht.

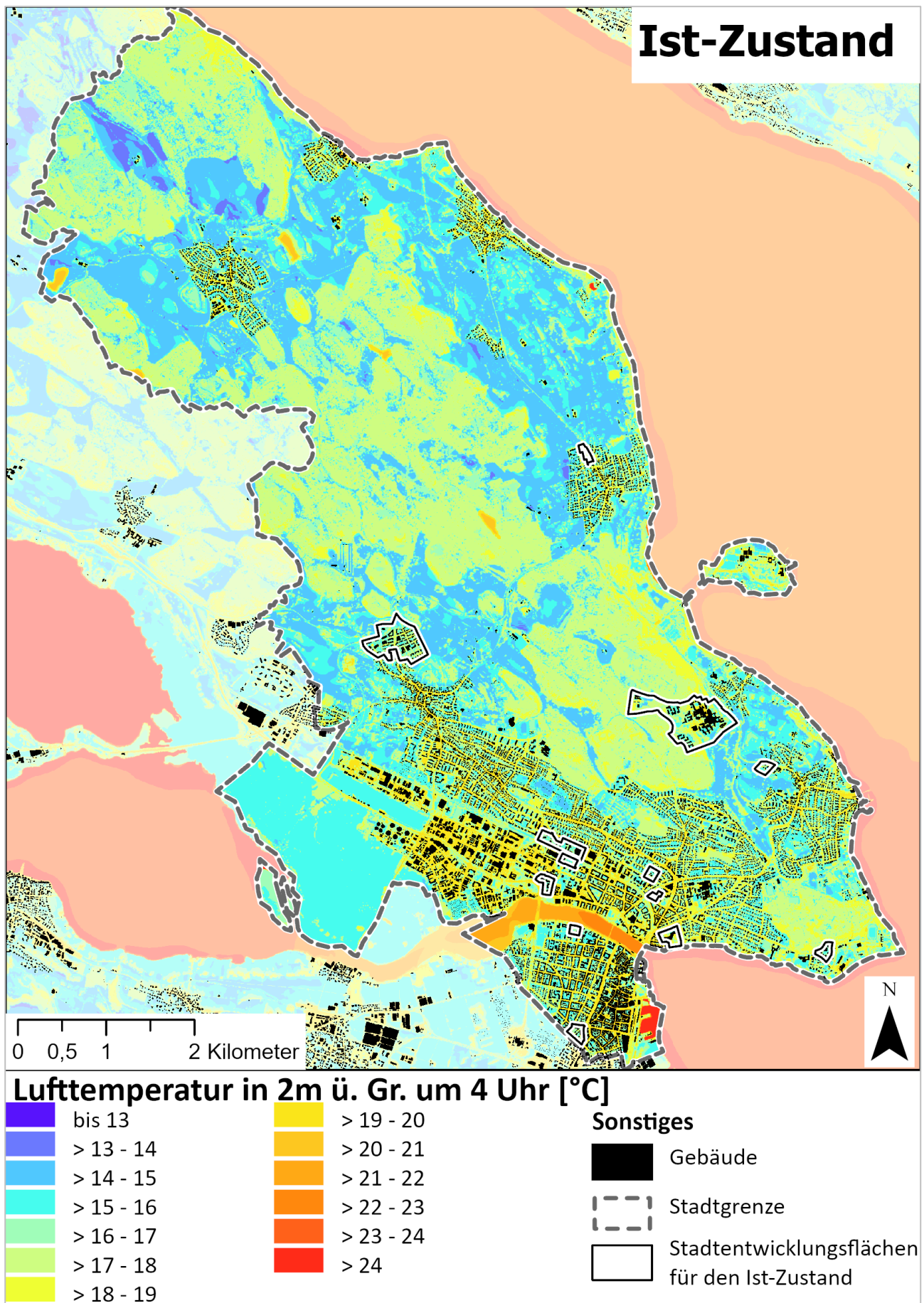


Abbildung 31: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Stadtgebiet Konstanz.



Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Freiflächen in höheren Lagen wie z. B. nördlich von Dettingen mit rund 13,5 °C zu den kältesten Bereichen innerhalb der Stadtgrenze. Acker- und auch Rasenflächen kühlen sich nachts auch in den tieferen Lagen stark ab, weshalb diese Orte in der Regel Temperaturen unterhalb von 15 °C aufzeigen und auch eine Gunstwirkung auf umliegende Bebauung bedingen können. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 15,5 bis 18 °C ein etwas höheres Wertespektrum auf, wobei aufgrund der lockeren Siedlungsstruktur ein relativ geringer Unterschied zu den Außenbereichen besteht.

In Wäldern aber auch flächig baumbestanden parkähnlichen Arealen dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und verhindert damit eine stärkere Abnahme der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 17 – 19 °C erreicht werden (z.B. im Lorettowald). Nachts fällt hier daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduzenten ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen geringen Tagesgang der Wassertemperatur. Dieser beeinflusst folglich auch die darüberliegende 2 m-Lufttemperatur des Modells, die sich am Tage und in der Nacht vergleichsweise konstant verhält. So sind die Wasserflächen (vorrangig der Bodensee) wie oben beschrieben nachts bei Temperaturen von 20 °C bis 26 °C wärmer als der Siedlungsraum.

In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine zunehmende flächendeckende Erwärmung der Stadt (Abbildung 32 Mitte und unten, Differenzen in Abbildung 33). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Das Zentrum ist nach wie vor das am stärksten überwärmte Gebiet und ab dem Szenario 2035 werden stellenweise nächtliche Temperaturen über 21 °C im Siedlungsgebiet erreicht, was heutzutage nur über Gewässern der Fall ist. Öffentliche Parks wie der Herosépark stellen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus.

Gesondert müssen die möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen betrachtet werden (schwarzweiß umrandete Flächen in Abbildung 33). Durch die Entwicklung einer bisherigen Freifläche nimmt die Lufttemperatur zusätzlich zum Klimawandelsignal infolge der Überbauung zu, wie bspw. auf den Entwicklungsflächen Hafner 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.



Abbildung 32: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr für einen Ausschnitt des Stadtgebiet Konstanz für alle drei Szenarien (oben = Ist; Mitte = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).

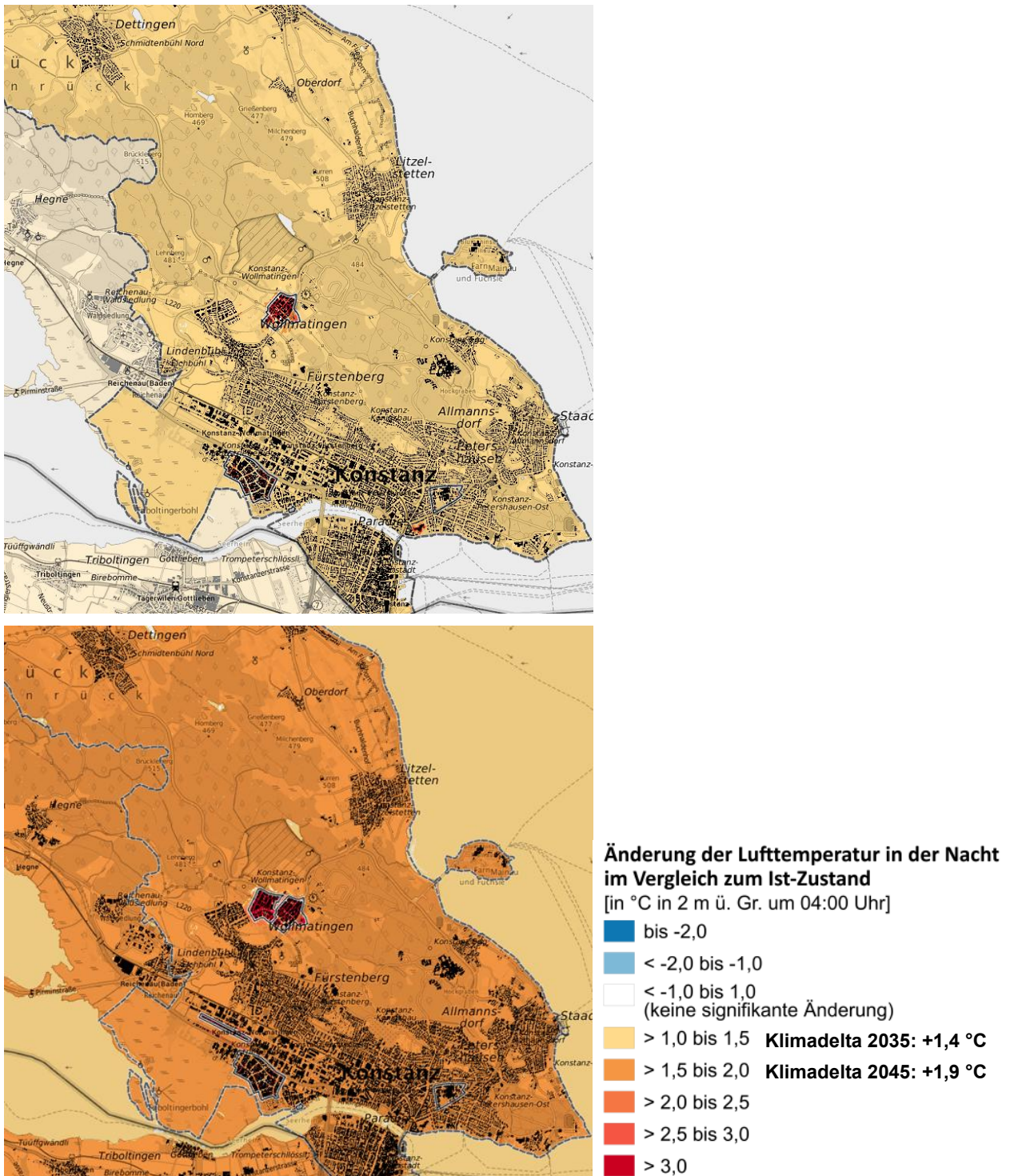


Abbildung 33: Änderung des nächtlichen bodennahen Temperaturfelds von 04 Uhr im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Konstanzer Stadtgebiets (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).

KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung des Stadtkörpers herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich

eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 34).

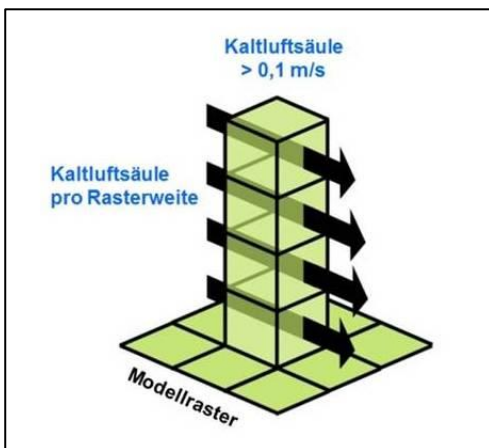


Abbildung 34: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit m^3/s) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ synonym verwendet.⁸

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Mächtigkeit der Kaltluftschicht nimmt im Verlaufe einer Nacht in der Regel zu und ist, genau wie die Luftaustauschprozesse allgemein, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig⁹ markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee¹⁰ zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strö-

⁸ Der Kaltluftvolumenstrom in m^3/s beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 5 m breit) fließt. Um Ergebnisse verschiedener Modellauflösungen miteinander vergleichbar zu machen, bietet sich der Kaltluftvolumenstrom als Dichte (in $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) an, da seine Intensität nicht von der Rasterzellenbreite abhängt.

⁹ dem Wind zugewandte Seite

¹⁰ dem Wind abgewandte Seite



mungsmaxima stehen können. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine hohe Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von knapp $80 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Stadtgebiet Konstanz liegt bei $16 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Abbildung 35). Unter anderem über den Grünflächen rund um Dettingen entsteht Kaltluft, die aufgrund der Geländeneigung in Richtung Südosten abfließt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem auf den bebauten Teil des Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse. Kaltluftvolumenströme sind dabei jedoch nicht ausschließlich geländeorientiert. Kaltluftbewegungen entstehen auch durch Temperaturunterschiede zwischen kühlem Ausgleichsraum und warmen Siedlungskörper. Über letzterem steigt die warme Luft auf, wodurch ein Vakuum entsteht, das durch vergleichsweise kühlere Luft vom umgebenen Umland ausgeglichen wird. Diese Art thermisch bedingter Winde werden Flurwinde genannt. Die eher lockere Bebauung der verschiedenen Wohnsiedlungen von Konstanz begünstigt ein relativ weites Vordringen der durch Hangab- und Flurwinde induzierten Kaltluft. In den eher gewerblich genutzten Gebieten in Petershausen West nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung in der Folge ab. Ein weiteres wichtiges Phänomen für Konstanz ist das Land-Seewind-System, das sich durch die Lage am Bodensee einstellt. Da das Wasser des Bodensees, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, um einige Grad wärmer ist, steigt die warme Luft über dem See auf und induziert eine Ausgleichsströmung, sodass eine Kaltluftbewegung in Richtung See entsteht. Bei Oberdorf reicht dieses Phänomen, gestützt durch die Geländeneigung und die geringe Rauigkeit der Landschaft bis zu 1,5 km weit in das Stadtgebiet von Konstanz. An anderen Stellen, wie z. B. beim Lorettowald ist das Phänomen nur über wenige hundert Meter ausgeprägt.

Rauigkeitsarme Strukturen wie Bahntrassen (z. B. zwischen Reichenau und Konstanz-Wollmatingen) oder breite Straßen sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüingeprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen).

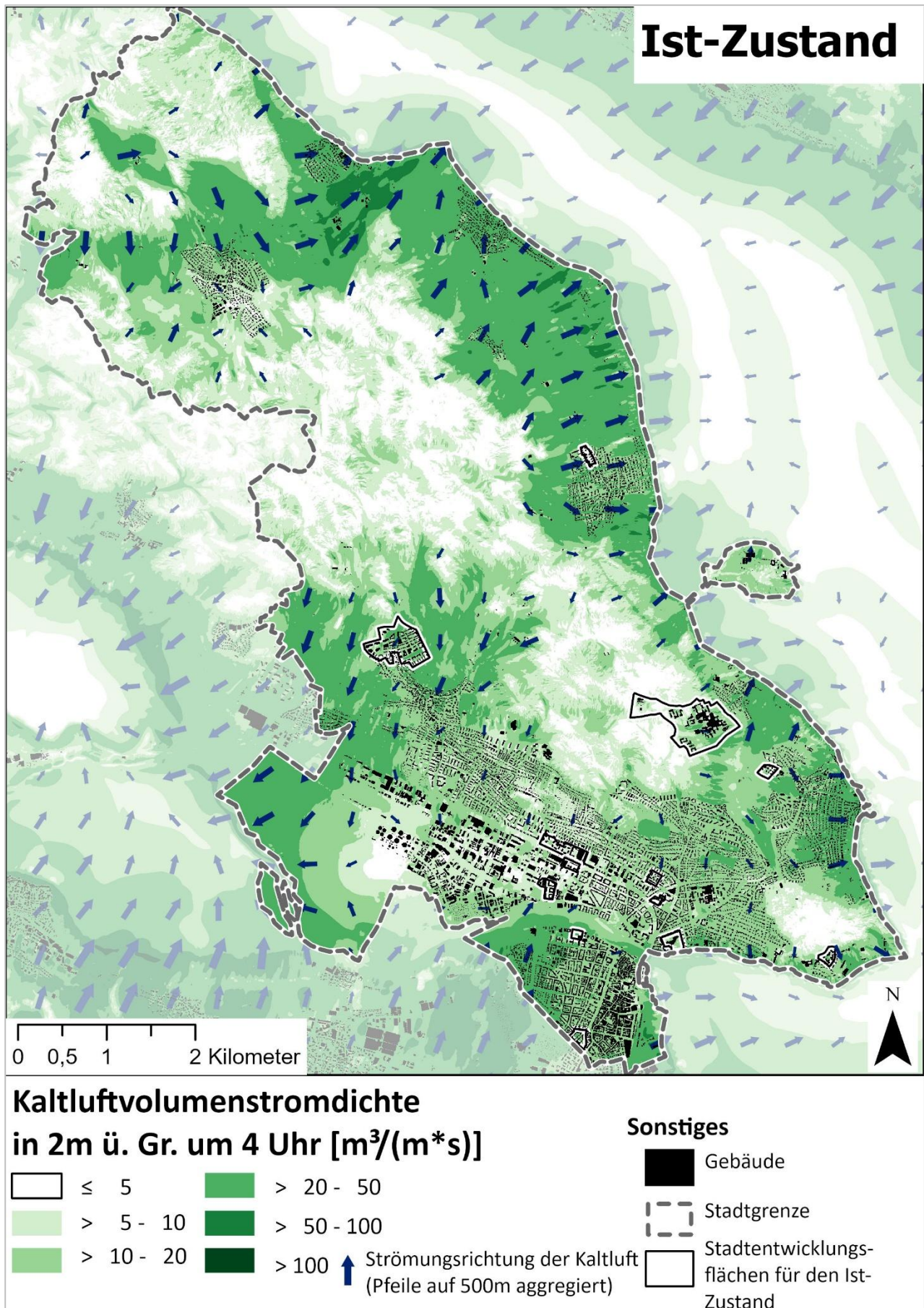


Abbildung 35: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Stadtgebiet Konstanz.



Änderung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms
im Vergleich zum Ist-Zustand
[m³/(s*m) um 04:00 Uhr]

- bis -10,0
- <-10,0 bis -5,0
- <-5,0 bis 5,0
(keine signifikante Änderung)
- > 5,0 bis 10,0
- > 10,0
- ↑ Strömungsrichtung*

Abbildung 36: Änderung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).

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 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 Hafner zu erkennen ist (siehe Abbildung 36 unten), 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. Diese Aussagen lassen sich analog auf die Windgeschwindigkeit und das Bodennahe Strömungsfeld übertragen (Abbildung 37).

Abbildung 37 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur¹¹) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen. Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfelds folgt zum großen Teil dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Stadtgebiet Konstanz treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 2 m/s kleinräumig im Uferbereich des Bodensees, z. B. nahe Wallhausen, auf. Im Nordosten des Stadtgebietes weisen fast alle Freiflächen Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und mehr auf. In 2 m ü. Gr. tritt die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass viele Siedlungsgebiete, nicht nur die Altstadt, bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren. Der mittlere Wind beträgt insgesamt innerhalb der Stadtgrenze $\sim 0,3$ m/s. Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Verkehrsraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).

¹¹ Die Pfeile wurden in einer höheren räumlichen Auflösung von 500 m abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

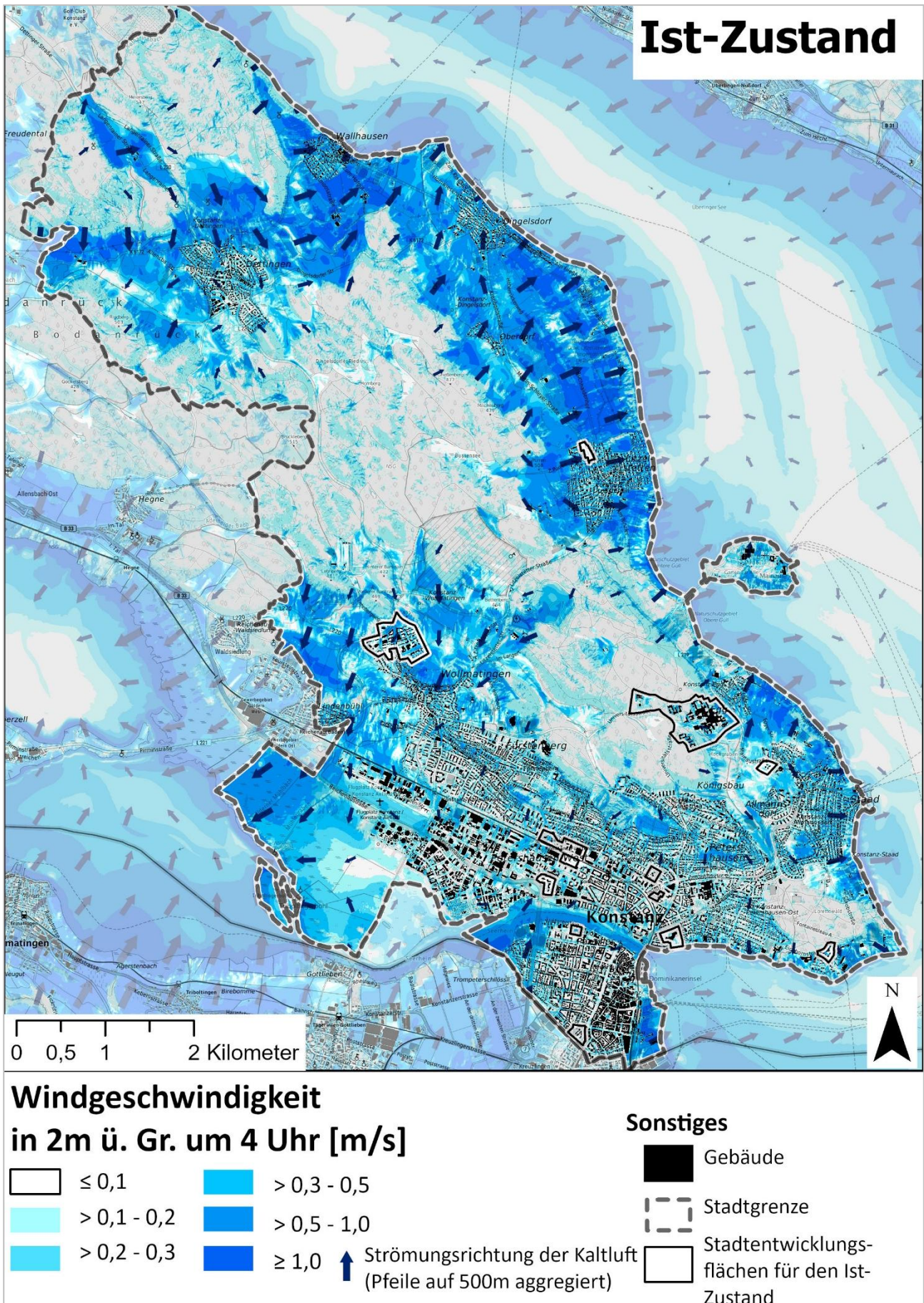


Abbildung 37: Nächtliches bodennahe Windfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz.



Neben Gebäuden stellen Bäume und insbesondere Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis für bodennahe Strömung dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den Waldrändern her auch bodennahe Ausgleichsströmungen einsetzen. Oftmals sind Wälder jedoch vielmehr Orte der Kaltluftentstehung bzw. Kaltluftproduktion als solche mit hohem Kaltluftvolumenstrom. Die Kaltluftproduktionsrate (KPR) gibt an, wie viele Kubikmeter Luft sich pro Quadratmeter innerhalb einer Stunde lokal durch Ausstrahlung abgekühlt hat. Die Abkühlungsrate hängt unter anderem von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Bodens ab. Für die Berechnung der Kaltluftproduktionsraten sind somit Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften des Untergrundes von großer Bedeutung. Die in der Literatur aufgeführten Werte zu den wichtigsten Bodeneigenschaften decken eine große Bandbreite ab, sodass Parametrisierung der Wärmeleitung im Boden für Modellsimulationen stets mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Bestimmung der Kaltluftproduktion kann daher erhebliche Fehler aufweisen, was sowohl für modellhafte Berechnungen als auch für Geländemessungen gilt. In der hier durchgeführten Modellsimulation wurden einheitliche thermische Eigenschaften für den nicht versiegelten Untergrund angenommen. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenfeuchten und daraus resultierender Abkühlungsraten fand damit nicht statt.

Anhand der kleinteiligen Flächen hoher Kaltluftproduktionsrate z. B. rund um Dettingen wird bei KPR-Werten über $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Maximum des Stadtgebietes bei $104 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) ersichtlich, dass die Geländeneigung die bestimmende Größe für Kaltluftentstehung darstellt (Mittelwert innerhalb der Stadtgrenze: $24,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Zusätzlich ist die Landnutzung die zweite entscheidende Größe zur Beeinflussung der Kaltluftproduktion – je versiegelungsärmer der Untergrund, desto größer die Kaltluftproduktionsrate. So weisen die geneigten Freiflächen oftmals überdurchschnittlich hohe Werte von 40 und mehr $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ auf. Auch im Siedlungsbereich sind Grünflächen auszumachen, die mit KPR-Werten zwischen 20 und $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ einen wichtigen innerstädtischen Abkühlungsfaktor darstellen. Dies gilt z. B. für viele der Parks. Stark versiegelte Areale wie große Teile des Verkehrsraums sind hingegen mit Werten unter $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ nicht mit Kaltluftproduktionsprozessen assoziiert (z. B. Schiffstraße bei der Autofähre Staad).

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.

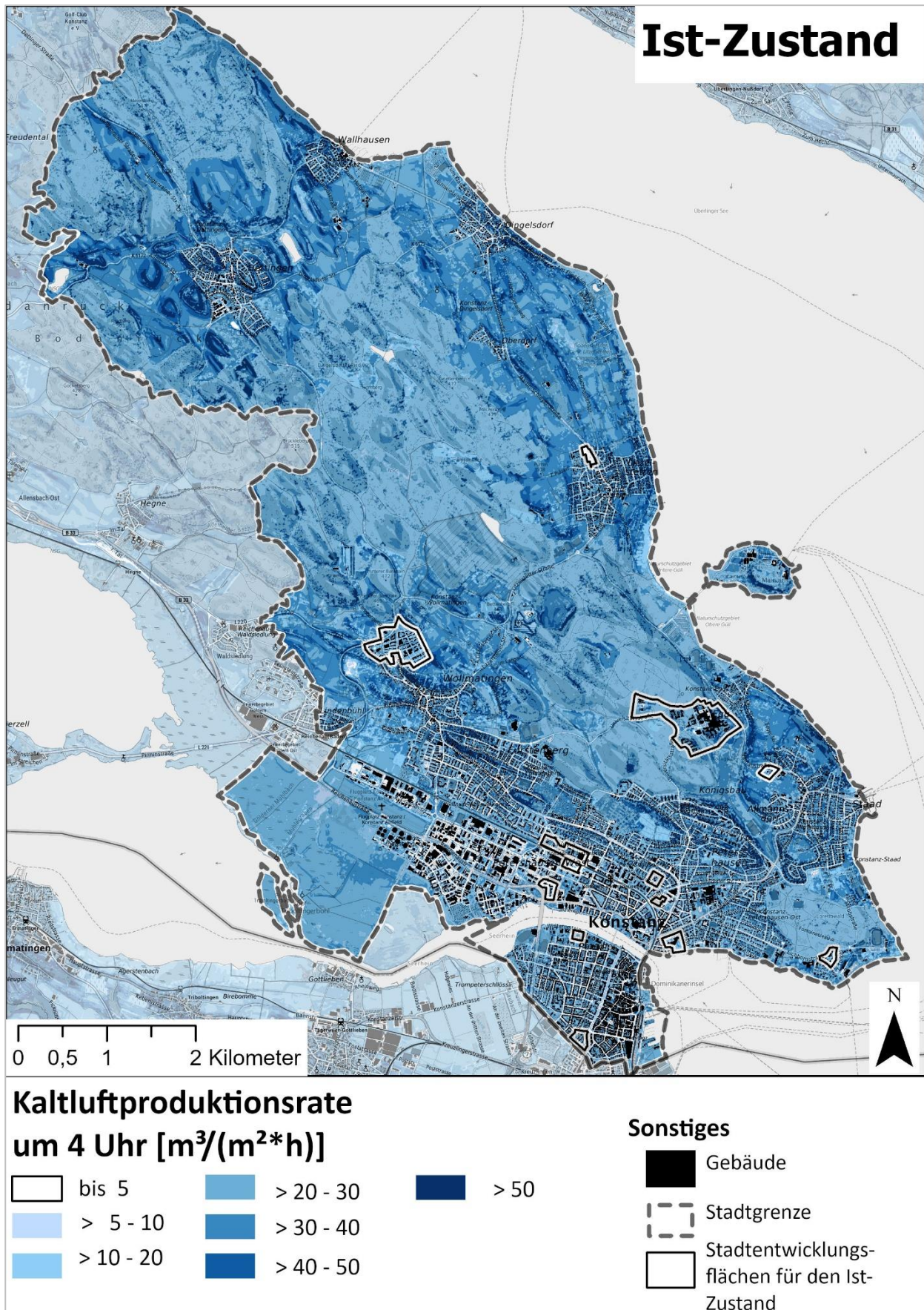


Abbildung 38: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz.

6.1.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹².

Tabelle 10: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (VDI 3787, Blatt 2, 2022)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
$PET \leq 4$	Sehr kalt	extremer Kältestress
$4 < PET \leq 8$	Kalt	starker Kältestress
$8 < PET \leq 13$	Kühl	moderater Kältestress
$13 < PET \leq 18$	Leicht kühl	leichter Kältestress
$18 < PET \leq 23$	Komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
$23 < PET \leq 29$	Leicht warm	leichte Wärmebelastung
$29 < PET \leq 35$	Warm	moderate Wärmebelastung
$35 < PET \leq 41$	Heiß	starke Wärmebelastung/Hitzestress
$PET > 41$	Sehr heiß	extrem starke Wärmebelastung/Hitzestress

In der vorliegenden Analyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis et al., 1999). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit intuitiver nachvollzogen werden zu können¹³. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler, 2013). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tabelle 10).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET um 14 Uhr in Konstanz im Ist-Zustand mit einer Spannbreite von ~29 °C größere Unterschiede im Untersuchungsgebiet auf und reicht von ~17 bis ~46 °C. Die geringsten Werte sind in den Uferbereichen der Stillgewässer (z. B. am Mühlenweiher bei Dettingen), sowie in Waldgebieten (z.B. im Lorettowald) zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 26°C (leichte Wärmebelastung) eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung induzieren (Abbildung 39).

¹² Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky, 1990).

¹³ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

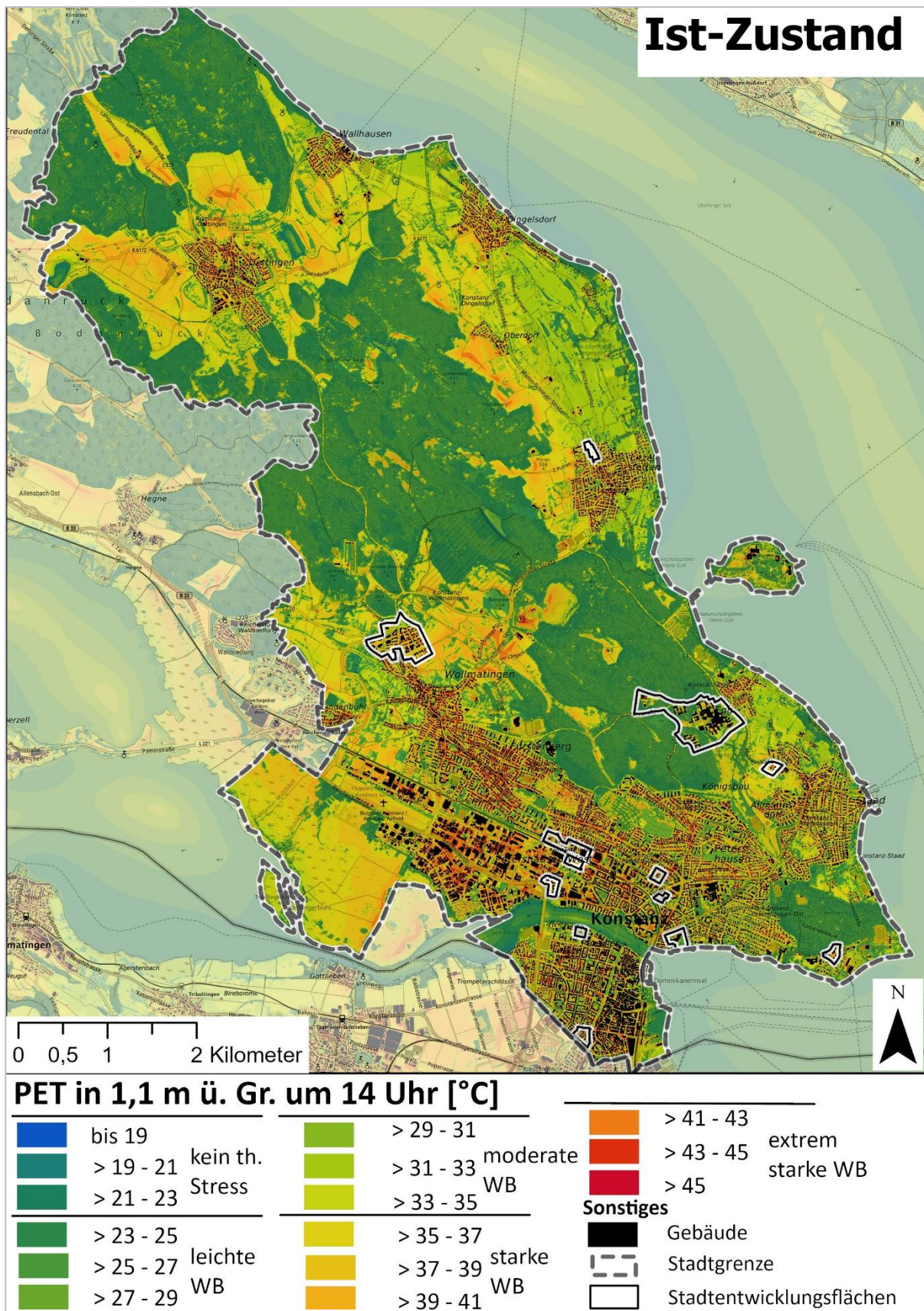


Abbildung 39: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz.

Der Aufenthaltsbereich des Menschen unterhalb des Kronendachs ist vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder und Baumgruppen auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden

Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt). Auch in Parks (z.B. im Herosépark) oder auf Friedhöfen (z.B. Dorffriedhof Litzelstetten) herrschen unter größeren Baumgruppen größtenteils PET-Werte von unter 29 °C. Besonders wertvoll zeigen sich all jene Flächen, die die Schattenwirkung von Bäumen und die an Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse kombinieren. Hierfür ist beispielhaft die Insel Mainau zu nennen, wo baumbestandene Bereiche bei PET-Werten von um 22 °C einen angenehmen Aufenthalt am Tage ermöglichen.

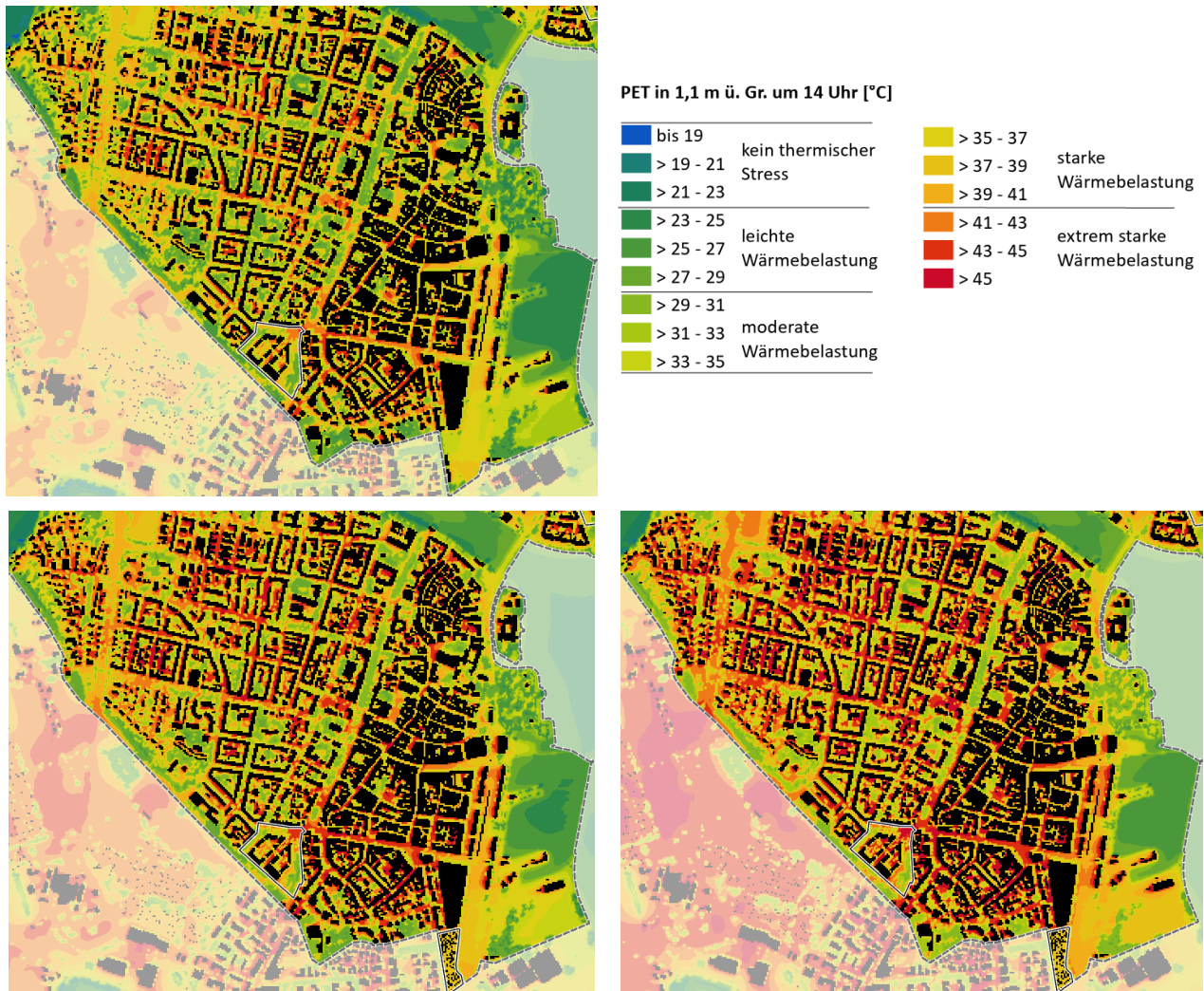


Abbildung 40: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Altstadt von Konstanz. Oben: Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts: Zukunftsszenario 2045.

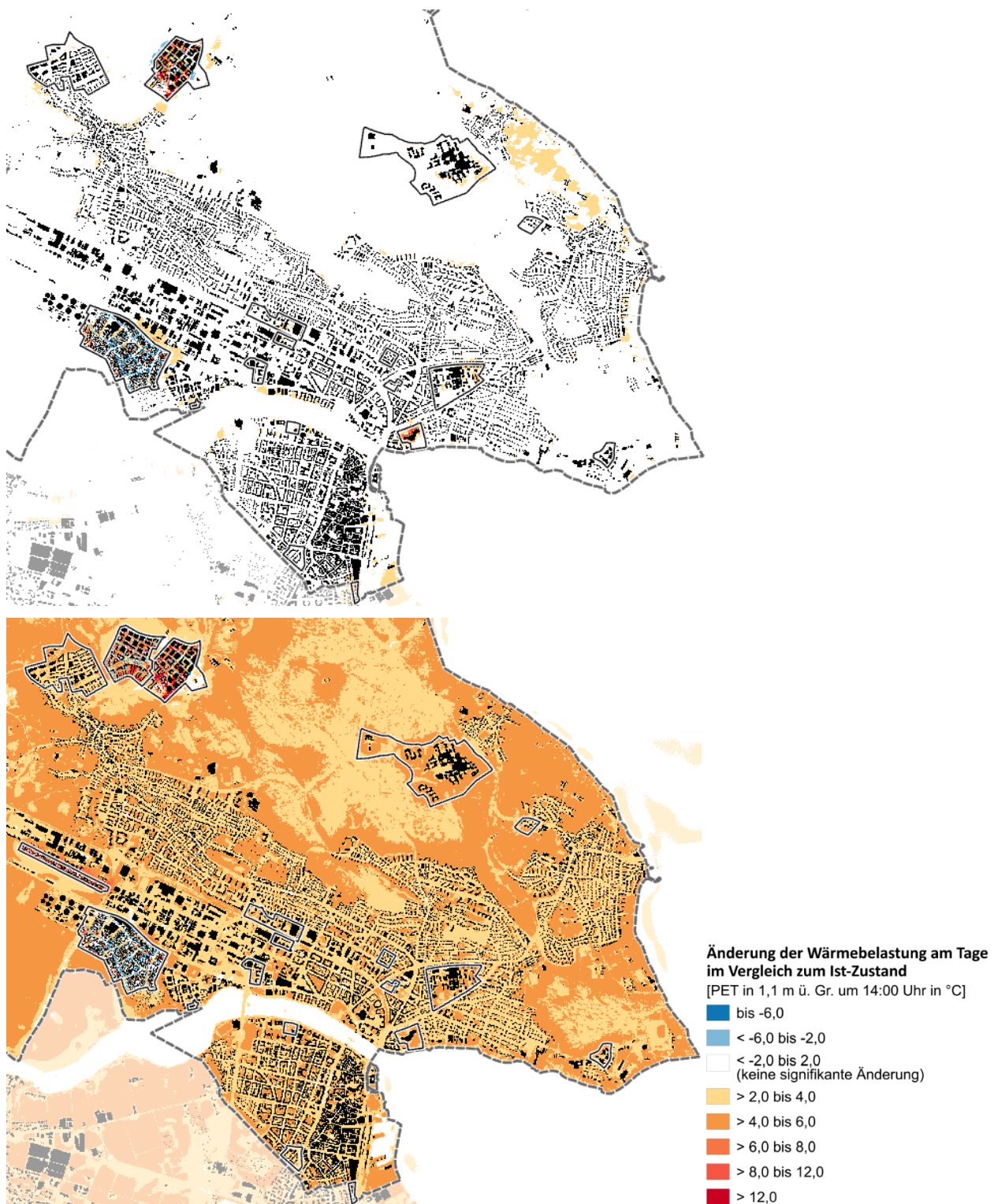


Abbildung 41: Änderung der Wärmebelastung am Tage im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).



Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine moderate Wärmebelastung auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer starken oder auch extrem starken Wärmebelastung betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbe- & Industriegebieten (z.B. Unterlohn) und im versiegelten und unverschatteten Verkehrsraum zu finden (z. B. Wolmatinger Straße). Auch Teile der Altstadt sind schon heute mit einer extremen Wärmebelastung assoziiert. Teilweise profitieren diese Flächen zum Modellausgabezeitpunkt jedoch bereits von der gegen Osten sichtbaren Schattenwirkung der westlich des Verkehrsraums gelegenen Gebäude, die die PET hier auf teils 35 °C absenken kann. Damit ergibt sich auf der Westseite der Straßen eine moderate, auf der Ostseite eine starke Wärmebelastung (z. B. Wessenbergstraße am Münsterplatz). Die Schattenwirkung als vornehmlich PET-steuernder Parameter wird auch auf den Ackerflächen im Außenbereich deutlich. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte wie in den unverschatteten Siedlungsräumen. Beispielhaft sind hier die Agrarflächen nördlich von Wollmatingen zu nennen, in welchen bis zu 42 °C PET auftreten. Dass Schatten spendende Bäume die Klimasituation am Tag wesentlich verbessern können, wird u. a. in den Straßenräumen sichtbar. So erscheinen baumbestandene Straßen, wie z. B. die Beethovenstraße in Petershausen-Ost, mit PET-Werten um 29 °C kühler als stark versiegelte und nur geringfügig verschattete Siedlungsbereiche.

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann (vgl. Abbildung 40 und Abbildung 41). Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario 2045 gibt es noch Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten (z. B. Stadtgarten in Abbildung 40) sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen. Bei den Entwicklungsflächen ergibt sich ein differenzierteres Bild. Bei größeren Entwicklungsflächen wie Hafner (Abbildung 41), kommt es teilweise zu einer Kompensation des Klimawandelsignals (weiße Farbe = keine signifikante Änderung in der Differenzkarte). Z. B. entlang des grünen Rings im Hafner, sieht man stellenweise den positiven Effekt von Schattenwurf durch Baumpflanzungen auf heutigen Freiflächen.

7. Zwischenprodukte

7.1 KLIMAANALYSEKARTE

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte (KAK) die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – für die Nachtsituation in einer Karte pro Szenario 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 3787, Blatt 1, 2015, S. 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, S. 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 (ab Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurden im vorliegenden Projekt die Klimaanalysekarten für alle drei modellierten Szenarien erstellt.

Die Legende der Klimaanalysekarte (Abbildung 42) 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 Modellausgabe¹⁴ (5 m x 5 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.

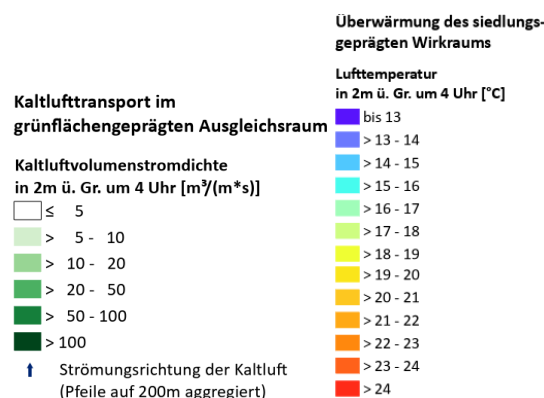


Abbildung 42: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten für alle drei Szenarien

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

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch fünf Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 11 & Abbildung 43). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 200 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleichs- 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 Kaltluftproduktionsflächen gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen von mindestens einem Hektar (ha) und einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 31,43 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Die Flächengröße von einem ha repräsentiert einen in der numerischen Klimamodellierung gebräuchlichen Wert. Die entsprechende Konvention legt fest, dass für bestimmte Auswertungen nicht einzelne Gitterpunkte des Modells (was hier 25 m^2 entspräche), sondern auch die jeweils umgebenden mitberücksichtigt werden sollten („moving window Ansatz“).

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Konstanz von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften **Kaltluftleitbahnen**. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al., 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können. **Flächenhafte Kaltluftabflüsse** 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. In der Stadt Konstanz gibt es zudem eine Reihe von innerstädtischen Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in die bebaute Umgebung transportieren, so dass hier von einem sogenannten **Parkwind** gesprochen werden kann. Breite Straßenzüge bzw. rauigkeitsarme Strukturen und eine strömungsparallele Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer Luft in den Siedlungsbereich.

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

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 200 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,10 \text{ m/s}$
Kaltluftproduktionsfläche	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 31,43 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Kaltluftleitbahn (linear)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen; mit Fokus auf die Siedlungs-/Bebauungsgrenzen
Parkwind	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen und Karteninformationen zur Nutzung als Park o. ä.

Die Ausweisung der Leitbahnen, Austauschbereiche und Parkwinde erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 43 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Allmannsdorf einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

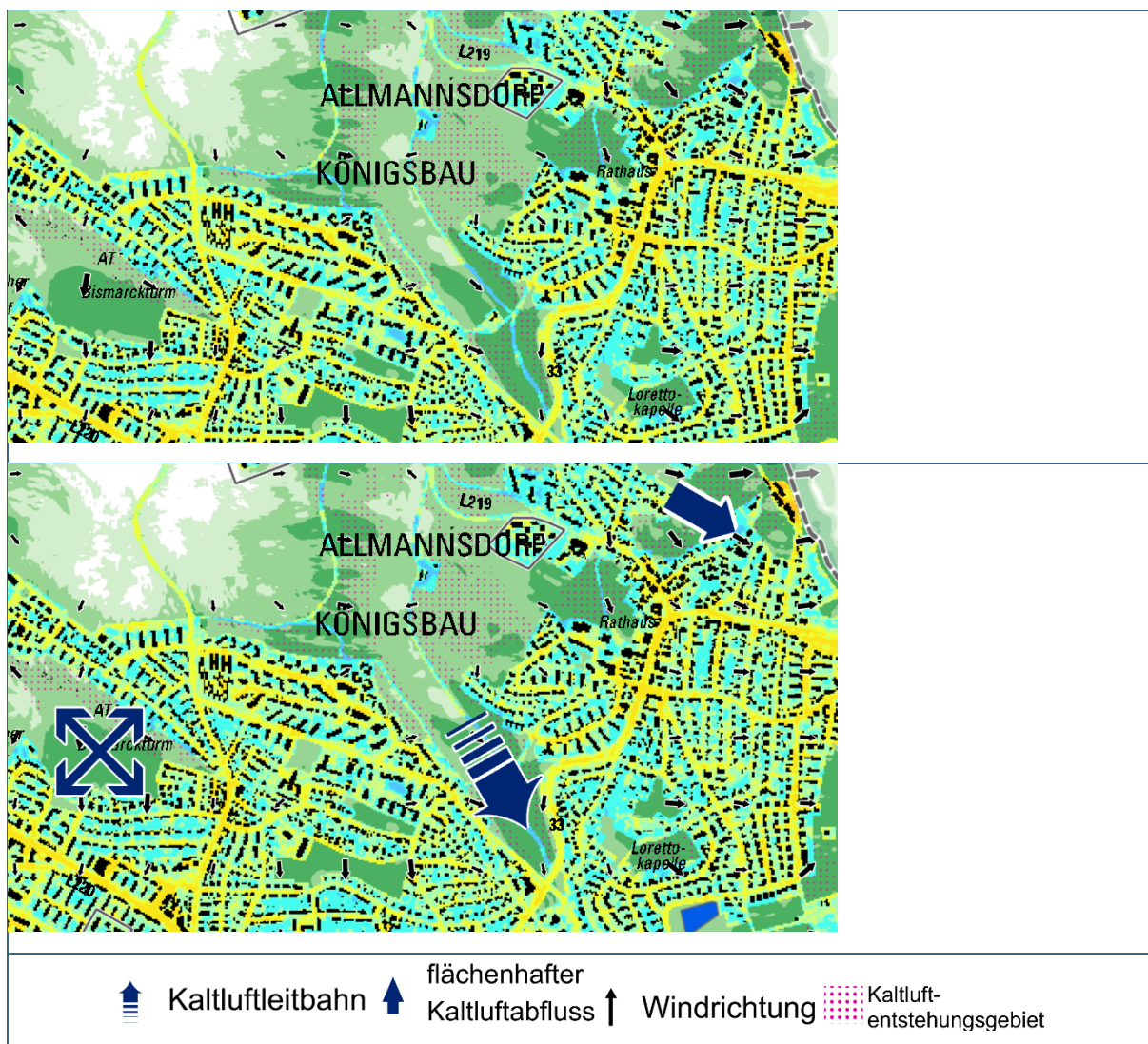


Abbildung 43: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung)

Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

Im Folgenden werden die Inhalte der Klimaanalysekarte inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Sie fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter, sodass auf die Erstellung von Klimaanalysekarten für die Tagsituation verzichtet wurde. Die Karten der PET (Abbildung 39, Abbildung 40) können jedoch auch als „Klimaanalysekarten für die Tagsituation“ verstanden werden.

Die Abbildung 44 zeigt die Klimaanalysekarte des Status Quo für das Stadtgebiet Konstanz. Die auf Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (Wirkraum) durch die nächtliche Überwärmung dargestellte thermische Belastungssituation zeigt sich z. B. im Bereich der Konstanzer Altstadt. Auch auf Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. im Oberlohn) und entlang von Verkehrsachsen (z.B. B33n) wird eine hohe Betroffenheit bei ähnlichen Temperaturdifferenzen zwischen Wirk- und Ausgleichsraum ersichtlich.

Die über den Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) hinterlegte Kaltluftvolumenstromdichte deckt sich für den Ist-Zustand mit jener aus Abbildung 35 und ist gemeinsam mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten essenzieller Bestandteil der gutachterlich festgelegten Kaltluftleitbahnen und -abflüsse. Im Stadtgebiet von Konstanz gibt es heutzutage zwei **Kaltluftleitbahnen**. Sie zeigen sich entlang der Bahntrasse bei Fürstenberg und zwischen Königsbau und Allmannsdorf (siehe auch Abbildung 43).

Neben der Kaltluftleitbahn, als linienhafte Struktur wurden für Konstanz auch **Kaltluftabflüsse** identifiziert, welche flächenhaft über unbebauten Hangbereichen oder rein thermisch in Form von Flurwinden auftreten. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse aus Hangbereichen meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte, orografiebedingte Kaltluftabflüsse sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und treten z. B. bei Dettingen und Wallhausen auf. Flurwinde hingegen konnten angesichts der variablen Topographie nicht klar ermittelt werden. Parkwinde wurden z. B. für den Fürstenberg abgeleitet.

In den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien konnten keine negativen Beeinträchtigungen von Kaltluftprozessen durch Entwicklungsgebiete festgestellt werden (Abbildung 45). Außerdem wurde ein zusätzlicher flächenhafter Kaltluftabfluss im Szenario 2045 hervorgehoben, der durch die Entwicklung des Hafner Gebietes an Bedeutung gewinnt. Wie bereits im Kap. 6.1.1 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 beschriebene Beeinflussung durch die Entwicklungsflächen, deckungsgleich in Anzahl, Lage und Ausrichtung.

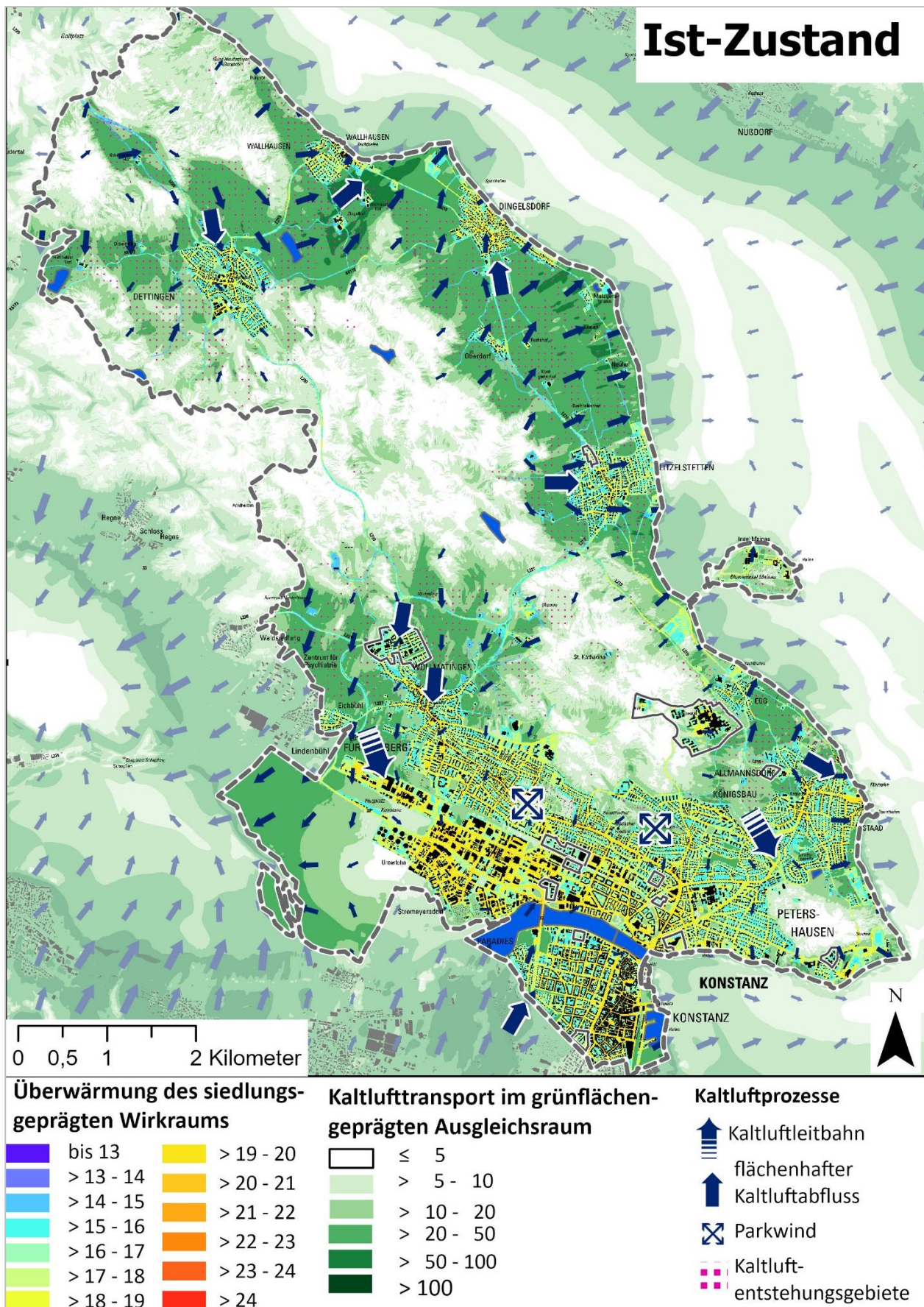


Abbildung 44: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustand für das Stadtgebiet von Konstanz.

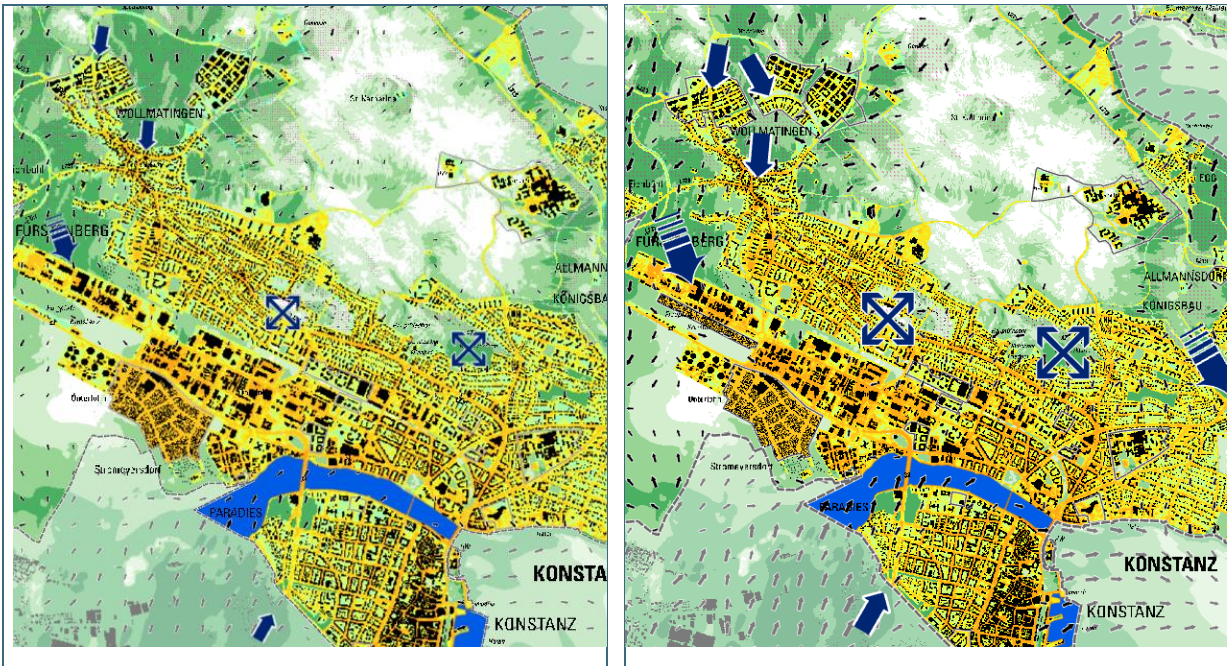


Abbildung 45: Zwei Ausschnitte aus den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien mit potenziellen Auswirkungen von Siedlungsentwicklungen auf Kaltluftabflüsse (links 2035 und rechts 2045).

7.2 SENSITIVITÄTSANALYSE

Die in diesem Kapitel vorgestellte Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsanalyse soll als Ergänzung zur Klimaanalyse die Betroffenheit der Konstanzer Bevölkerung in Bezug auf eine anzunehmende Wärmebelastung aufzeigen. Auf der Basis von sozialen und demographischen Daten wurden verschiedene vulnerable Bevölkerungsgruppen identifiziert, die eine im besonderen Maße physiologische Empfindlichkeit (Vulnerabilität) gegenüber Hitzeextremen aufweisen. Die methodische Vorgehensweise orientiert sich am „Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen -Hitze und Gesundheit-“, welcher vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG, 2019) herausgegeben wurde.

7.2.1 DATENGRUNDLAGE

Für die Analyse wurden bestimmte Indikatoren verwendet, anhand derer die Sensitivität eines jeden Gebietes ermittelt werden konnte. Die Indikatoren sind folgende, als vulnerabel gegenüber Hitze beschriebene, Bevölkerungsgruppen:

Hochaltrige: Der Begriff hochaltrig wird in der Fachliteratur und Praxis je nach Anwendungsfall und Fokus unterschiedlich definiert (ab 65, 75 oder auch 85 Jahren). Im oben genannten Handlungsleitfaden und nach Abstimmung mit den beteiligten städtischen Fachbereichen werden in dieser Untersuchung auf Grundlage empirischer Daten zu Morbidität bzw. Mortalität im Kontext von Hitzebelastungen Personen im Alter ab 75 Jahren als „Hochaltrige“ bezeichnet. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multimorbidität sowie Multimedikation und eine herabgesetzte Fähigkeit zur physiologischen Anpassung an Hitze (Becker et al., 2019; HLNUG, 2019). Die von der Stadt Konstanz bereitgestellten Daten zu dieser Bevölkerungsgruppe wurden zum Stichtag 31.12.2024 erhoben und lagen auf Baublockebene vor.

Kleinkinder: Kinder unter 6 Jahren wurden als „Kleinkinder“ definiert. Im Vergleich zu Erwachsenen besteht bei Kleinkindern eine geringere Thermoregulation, der Körper produziert weniger kühlenden Schweiß, gleichzeitig bietet die Körperoberfläche eine größere relative Absorptionsfläche für Wärmestrahlung. Weiterhin liegt



bei Kleinkindern ein höherer Flüssigkeitsanteil im Körper vor und die relative Verdunstung ist aufgrund der größeren Körperoberfläche in Bezug zum Körpervolumen ebenfalls höher als bei Erwachsenen. Bei Hitze sind sie daher einem größeren Risiko ausgesetzt, eine Exsikkose (Austrocknung des Körpers) als Folge einer Dehydratation zu erleiden (HLNUG, 2019). Die verwendeten Daten der Stadt Konstanz hatten ebenfalls den Stichtag 31.12.2024 und bezogen sich auf dieselben Baublöcke.

Ökonomisch und sozial benachteiligte Menschen: definiert als Menschen, die Leistungen zur Existenzsicherung nach SGB II (Grundsicherung für Arbeitssuchende) und SGB XII (Sozialhilfe) erhalten. Die Herleitung erfolgt hierbei über den Mangel an ökonomischen Ressourcen, meist vorhandene Mehrfachbelastungen und den schlechteren Gesundheitszustand sozial benachteiligter Bevölkerungsgruppen (Bolte et al., 2012; HLNUG, 2019; Lampert et al., 2013). Die Wohnbedingungen sind meist schlechter, als bei nicht benachteiligten Bevölkerungsgruppen und Aufenthaltsalternativen sind seltener vorhanden. Diese und weitere Faktoren können zumindest in der Theorie zu einer höheren Gefährdung bei Hitzeextremen führen. Für Konstanz standen die Daten zu Arbeitslosen nur auf Ebene der Stadtteile (Stand Dezember 2024) zur Verfügung.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung von Konstanz in einer Karte. Die demographischen Daten lagen auf der Ebene von 670 Baublöcken vor und die Arbeitsmarktstatistik auf der Ebene von 16 Stadtteilen. Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Bevölkerungsdichte pro Stadtzelle im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

Analyse sensibler Orte / Einrichtungen: Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. Für Konstanz wurden 286 Einrichtungen der Altenhilfe, Bildungseinrichtungen, Kindertagesbetreuung, Freizeiteinrichtungen und Soziale Einrichtungen wie Krankenhäuser ausgewertet (Stichtag 31.01.2025). Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zuteilwerden, um den Aufenthalt von hitzesensibler Bevölkerung im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend zu gestalten. Die Klimaanalyse ermöglicht es der Stadtverwaltung, sensible Einrichtungen und Orte mit einer besonders hohen bioklimatischen Belastung zu identifizieren. Auf diese Weise können mit den Trägern der Einrichtungen zielgerichtet Maßnahmen in besonders sensiblen Gebieten im Stadtgebiet geplant werden. Für Bolz- und Spielplätze gelten bereits hohe Standards hinsichtlich einer Verschattung der Spielflächen. Auf Grundlage der Daten, lassen sich diese unter Berücksichtigung weiterer relevanter Aspekte (Schattenwurf, etc.) auf ihre bioklimatische Situation am Tage hin überprüfen.

Analyse der Bevölkerungsanzahl /-dichte: Gebiete (*hier*: Baublöcke) mit einer hohen relativen Anzahl an Einwohnern auf geringem Raum (= hohe Einwohnerdichte) wurden ebenfalls zur Identifikation sensibler Bereiche herangezogen. Eine hohe Einwohnerdichte wurde festgelegt ab 100 Einw. / Hektar. Enger Wohnraum kann als eine relevante Benachteiligung betrachtet werden. Gegenüber einer Einfamilienhaussiedlung steht weniger Fläche pro Person für Wohnraum oder für Ausweichmöglichkeiten im Freien zur Verfügung. Zudem geht eine hohe Einwohnerdichte häufig auch mit einer hohen Bebauungsdichte einher, welche die Hitzebelastung im Verkehrsraum zusätzlich fördert.

7.2.2 METHODIK

Zur Ermittlung der Sensitivität eines Gebietes wurden Klassengrenzen definiert, welche sich aus den vorhandenen demographischen Daten ableiten. Dafür wurde die Verteilung eines jeden Indikators (Hochaltrige, Kleinkinder, ökonomisch und sozial Benachteiligte) berechnet und in Dezile eingeteilt. Der erste Schritt bestand aus

der Berechnung der Dichte der jeweiligen vulnerablen Bevölkerungsgruppe in Einwohner pro Hektar pro Bau-block. Als nächstes wurden die einzelnen Einwohnerdichten in je zehn Dezile eingeteilt¹⁵, wodurch sich jeweils 10 Prozent der betrachteten Raumeinheit miteinander vergleichen lassen.

Die berechneten Dezile wurden nach folgender Klassifikation zur Beschreibung von Sensitivitätsgraden eingeteilt:

- Dezile 1 bis 7 = Klasse „wenig sensibles Gebiet“
- Dezil 8 = Klasse „sensitives Gebiet“
- Dezil 9 = Klasse „hoch sensibles Gebiet“
- Dezil 10 = Klasse „extrem sensibles Gebiet“

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in der nachfolgenden Abbildung 46 für jede vulnerable Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Ausschnittes des Stadtgebiet von Konstanz dargestellt.

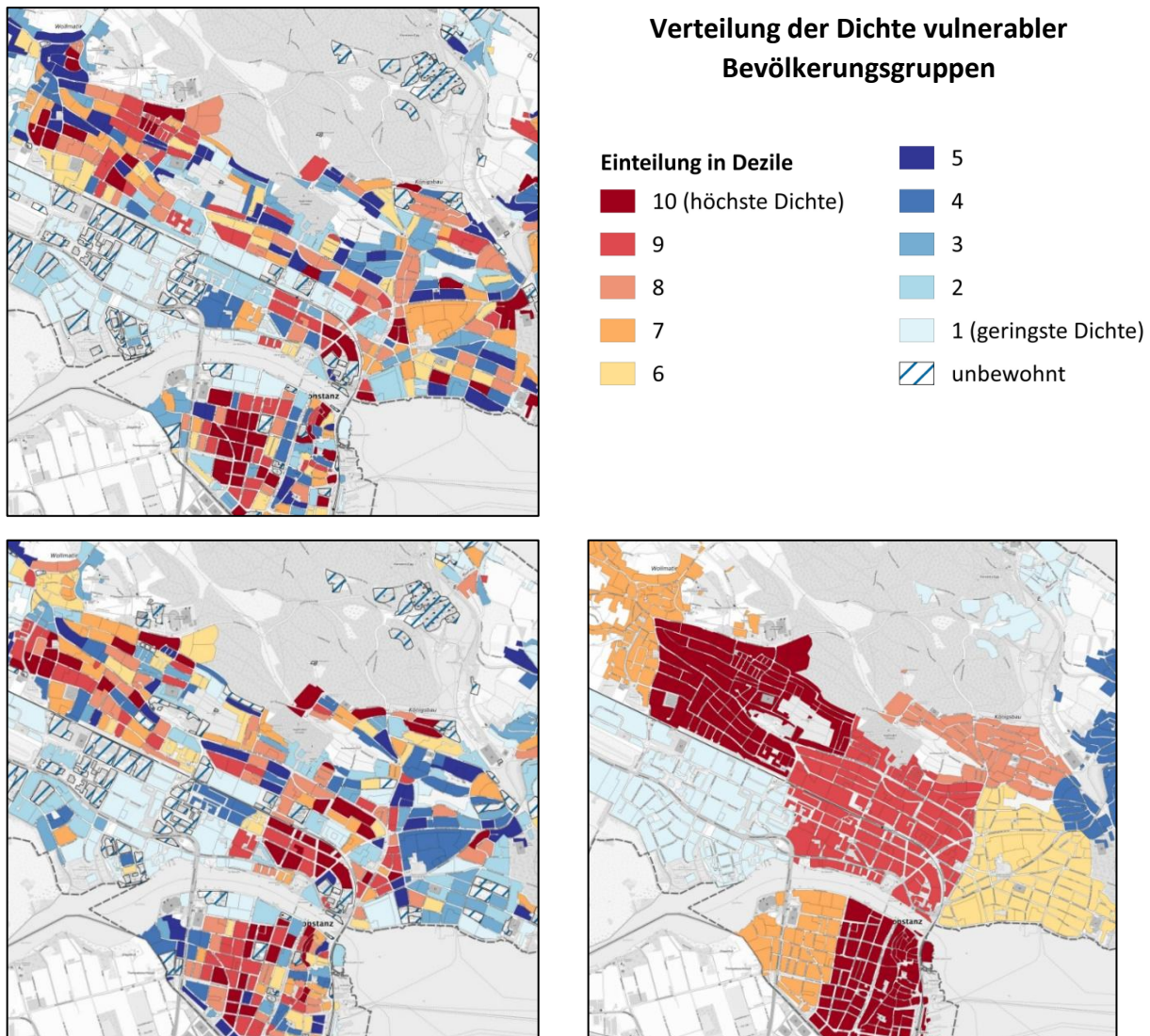


Abbildung 46: Konzentration der Sensitivität von Hochaltrigen (oben), Kindern unter 6 Jahren (unten links) und SGB II Empfangenden (unten) in einem Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz.

¹⁵ Dezil-Bildung: Die Einzelwerte eines Indikators werden der Größe nach sortiert und in zehn gleichstark besetzte Gruppen eingeteilt.

7.2.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

Die vorangestellte Analyse ermöglicht es der Stadtverwaltung bereits, Gebiete mit einer besonders hohen Dichte an sensiblen Bevölkerungsgruppen zu identifizieren. Über eine Kombination der ausgewählten Indikatoren können im Detail städtische Räume lokalisiert werden, in denen verschiedene gefährdete Bevölkerungsgruppen gehäuft vorkommen. Auf diese Weise können zielgerichtet Maßnahmen in besonders sensiblen Gebieten im Stadtgebiet geplant und umgesetzt werden, da dort die Vulnerabilität der Bevölkerung gegenüber Hitze besonders hoch ist.

Zur Identifizierung sensibler Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der folgenden Tabelle 12 zu entnehmen ist. Die Gefährdung der Hochaltrigen wurde bei der Ausweisung sensibler Gebiete stärker gewichtet als die Kinderdichte, da eine auf Deutschland übertragbare, wissenschaftliche Evidenz für die Vulnerabilität von älteren Menschen gegenüber Hitze vorliegt (Becker et al., 2019; HLNUG, 2019) wohingegen die Kinder- und Armutsdichte nicht auf eindeutiger Evidenz beruht (HLNUG, 2019). Die Armutsdichte konnte in die gemeinsame Betrachtung nicht mit einbezogen werden, da diese Information nur auf einer wesentlich gröberen räumlichen Auflösung (Stadtteile) vorlag.

Tabelle 12: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung.

Klasse	Indikatoren
Extrem sensibles Gebiet	Hochaltrigen-Dichte Dezile 8 bis 10 UND Kinderdichte Dezil 10
Hoch sensibles Gebiet	Hochaltrigen-Dichte Dezile 8 bis 10 ODER Kinderdichte Dezil 10
Sensitives Gebiet	Bisheriges nicht zutreffend, aber hohe Einwohnerdichte* ODER ≥ 2 sensible Orte
wenig sensibles Gebiet	keines der Kriterien ist zutreffend, aber die Einwohnerdichte > 0

* hohe Einwohnerdichte = ab 100 EWO / Hektar

Die Sensitivitätsanalysekarte (Abbildung 47) zeigt die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen auf Baublockebene. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Konstanzer Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

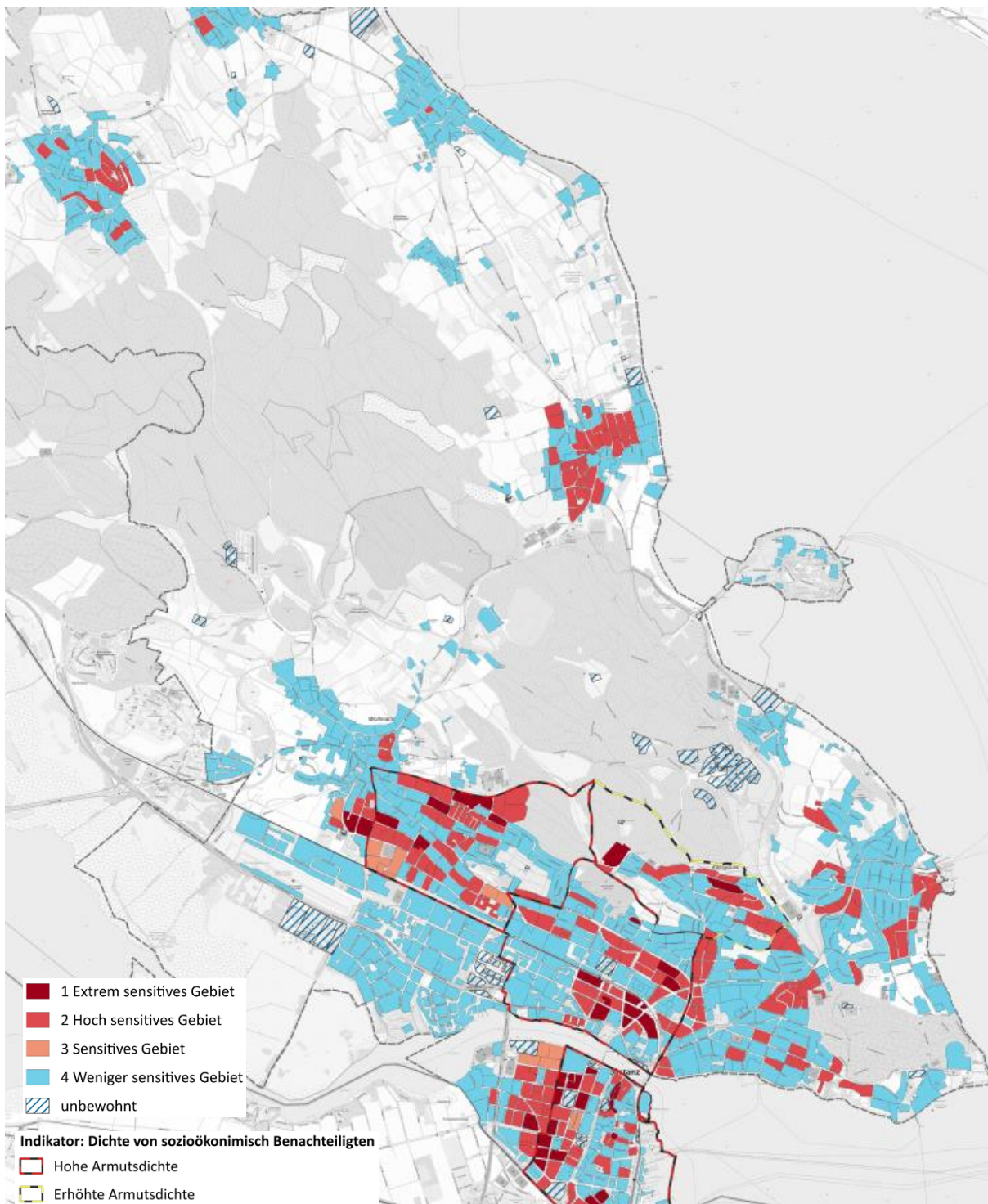


Abbildung 47: Sensitivitätsanalysekarte des Stadtgebiets von Konstanz



7.2.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

In den extrem bzw. hoch sensitiven Gebieten wird empfohlen, Maßnahmen zur Anpassung an Hitze-extreme vorzunehmen, da dort gehäuft Menschen mit besonderem Schutzbedarf in Bezug auf Hitzeminderung leben. Der Leitfaden zur Klimaanpassung (HLNUG, 2019) gibt zum Schutz von Hochaltrigen folgende Empfehlungen vor: „Zur Vermeidung von Übersterblichkeit ist der präventive Aufbau von geeigneten Unterstützungsstrukturen für ältere, alleinlebende Menschen im Stadtteil im Rahmen der kommunalen Gesundheitsförderung anzustreben. Während Hitzeextremen wird empfohlen, kühle Orte bereit zu stellen, an denen sich hochaltrige Menschen aufhalten können.“ (HLNUG, 2019, S. 108).

In den Gebieten werden folgende Empfehlungen für Kinder unter 6 Jahren vorgeschlagen: „Insbesondere dann, wenn die betroffenen Gebiete zugleich eher bildungsbenachteiligte Gebiete sein könnten, sollten Strategien zur Information von Eltern über geeignete Multiplikatoren entwickelt werden. Die Bauten von Kindertagesstätten und Schulen in öffentlicher Trägerschaft sollten auf ihr thermisches Verhalten hin überprüft und ggf. saniert werden. Empfehlungen zum Aufenthalt im Freien während Hitzeextremen sollten gegeben werden. Familienhebammen, Kinderärztinnen und Kinderärzte, Erzieherinnen und Erzieher sowie Lehrkräfte sind potenzielle Multiplikatoren für Präventionsstrategien.“ (HLNUG, 2019, S. 108).

In Gebieten mit einer erhöhten Armutsdichte wird Folgendes empfohlen: „Hier ist mit einem geringeren Potenzial für Schutzmöglichkeiten zu rechnen. Sowohl Wohnbedingungen als auch geringes Wissen könnten Anpassungen an Hitzeextreme erschweren. Öffentlich nutzbare, gut beschattete Grünflächen, öffentliche kühle Räume sowie eine Sanierung der Bausubstanz im Bezirk haben eine besondere Bedeutung.“ (HLNUG, 2019, S. 108).

8. Endprodukte

8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 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 3787, Blatt 1, 2015, S. 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 3787, Blatt 1, 2015, S. 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 Kaltluftfunktionen) und Flächen im Wirkraum (mit potentiellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) 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 Verkehrsraum 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 aus der Planungshinweiskarte vollumfänglich Bestandteil der Abwägung 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.

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. 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 die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt- und Verkehrsraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum).

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkräumen), 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 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 48).

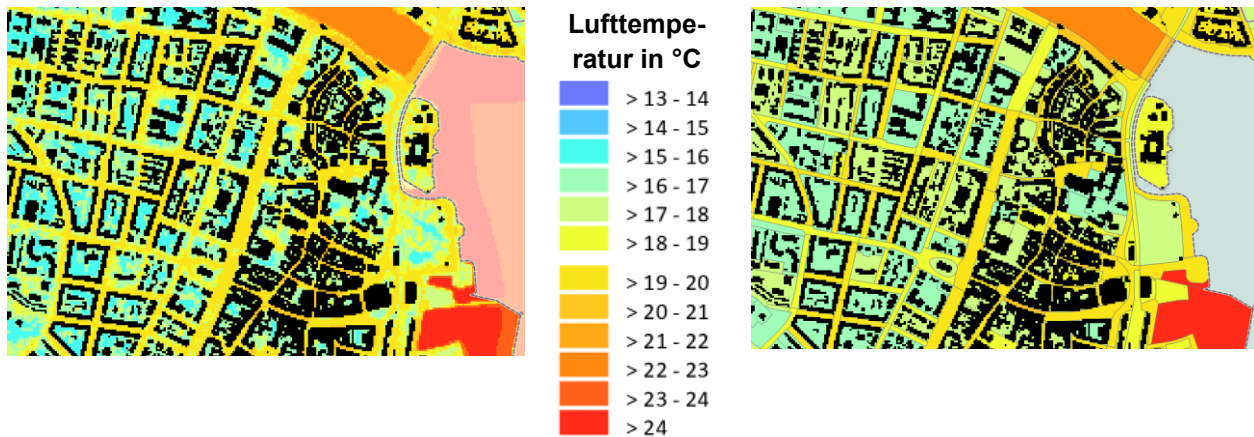


Abbildung 48: Links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie

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 (vgl. Kap. 7.1). 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 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 3785, Blatt 1, 2008; VDI 3787, Blatt 1, 2015). Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Karten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die beiden Tageszeiten geschildert.

8.3.1 WIRKRAUM – METHODIK

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 14:00 für die Belastungssituation am Tage sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.5). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb einer autochthonen Wetterlage gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden (autochthonen) Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser 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 3785, Blatt 1, 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten 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 resultierenden z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 49).

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

Dabei ist

z standardisierter Wert der Variablen x

x Ausgangswert der Variablen x

μ arithmetisches Mittel

σ Standardabweichung

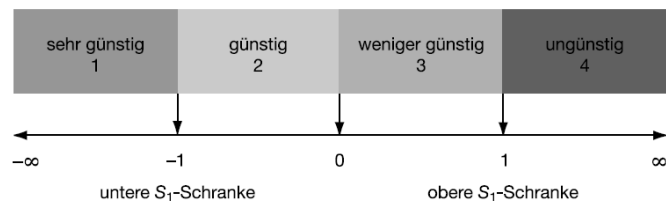


Abbildung 49: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 3785, Blatt 1, 2008)

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 (vgl. hierzu Kap. 4). 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 für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Ist-Zustand und die Szenarien 2035 sowie 2045) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo (als kühlsste Situation) und des Szenarios 2045 (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen



tionen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für beide Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Konstanz wurde aus Gründen der Darstellung die ursprünglich 4-stufige in eine 5-stufige Skala von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen. Sowohl für die Tagsituation als auch die Nacht wurden alle Flächen aus den Kategorien Wohnen, Gewerbe/Industrie und Straßen/Plätze als Wirkraum definiert und bewertet (Tabelle 13 & Tabelle 14). Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.

Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohnen, Gewerbe & Verkehrsraum) am Tag.

	Aufenthaltsqualität am Tag	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte für [°C]
	sehr günstig	$z \leq -1,0$	$PET \leq 32,0$
	günstig	$-1,0 < z \leq -0,33$	$32,0 < PET \leq 35,7$
	mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$35,7 < PET \leq 39,3$
	ungünstig	$0,33 < z \leq 1,0$	$39,3 < PET \leq 43,0$
	sehr ungünstig	$z > 1,0$	$PET > 43,0$

Tabelle 14: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum in der Nacht

	Humanbioklimatische Situation in der Nacht	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige Lufttemperaturen (T04) [°C]
	sehr günstig	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 16,6$
	günstig	$-1,0 < z \leq -0,33$	$16,6 < T04 \leq 17,7$
	Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$17,7 < T04 \leq 18,8$
	ungünstig	$0,33 < z \leq 1,0$	$18,8 < T04 \leq 19,9$
	sehr ungünstig	$z > 1,0$	$T04 > 19,9$

8.3.2 AUSGLEICHSPACE – 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 in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen und Parkwinden stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung, wenn sie sich in deren direktem Luv befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet). 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 50 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Kaltluftfunktion (es müssen zwei der folgenden Bedingungen auf die Fläche zutreffen):
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 16,3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ *oder /und*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,33 \text{ m/s}$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 27,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹⁶

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

¹⁶ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

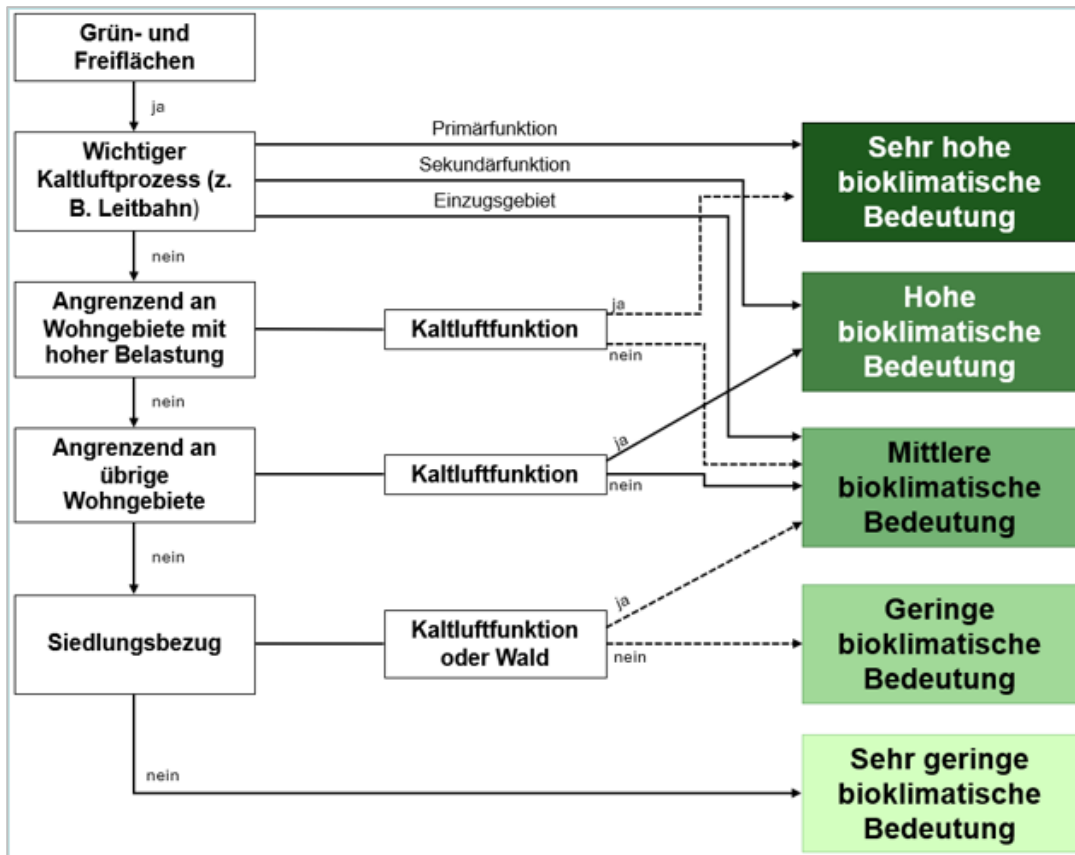


Abbildung 50: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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. **Tabelle 15** listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für alle Ausgleichsflächen im Stadtgebiet Konstanz auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 3785, Blatt 1, 2008) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.

Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag (in Anlehnung an VDI 3785, Bl.1).

Aufenthaltsqualität an Sommertagen		Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	sehr hoch	$z \leq -1,0$	$PET \leq 25,7$
	hoch	$-1,0 < z \leq -0,33$	$25,7 < PET \leq 29,7$
	mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$29,7 < PET \leq 33,7$
	gering	$0,33 < z \leq 1,0$	$33,7 < PET \leq 37,7$
	sehr gering	$z > 1,0$	$PET > 37,7$

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 44) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7.1).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen werden in der nächtlichen Bewertungskarte auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkungsbereich in blauer Schraffur zeigt an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (Abbildung 51). Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms und gleichzeitig die klimaökologisch wirksame Windgeschwindigkeit von 0,10 m/s erreichen oder überschreiten. Je nach Szenario schwankt dieser Mittelwert nur minimal, sodass die Klassifizierung für jedes Szenario mit dem Mittelwert des Ist-Zustandes erfolgte ($15,1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Wenn mehr als 50 % der Fläche eines Baublocks im Kaltlufteinwirkungsbereich liegen, verfügen diese Flächen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichsströmungen in den Siedlungskörper hinein. Deshalb wurden diese Flächen als „Siedlungsfläche mit Belüftungsfunktion“ gekennzeichnet.

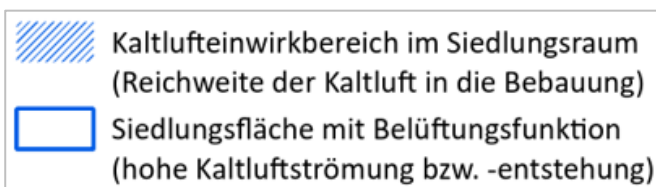


Abbildung 51: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 52 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Konstanz im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 20,9 % der heutigen Siedlungsflächen & Straßen der Stadt sind durch eine sehr günstige und 49,9 % durch eine günstige thermische Situation gekennzeichnet (**Tabelle 16**). Durch die Annahme eines starken Klimawandels werden diese Flächen sich zu den betrachteten Zeithorizonten 2035 und 2045 zu 2/3 in den mittleren bis ungünstigen Bereich verschieben. Es gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen dieser Kategorie an. Sie weisen heutzutage einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier 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. 18,7 % der Siedlungsflächen und Straßen weisen in der Nacht mittlere thermische Bedingungen auf (Anstieg auf rund 50 % im Szenario 2035). Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad. 10,4 % der Flächen gehören heute der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Über die Hälfte der Flächen in dieser Kategorie sind Straßenräume innerhalb der Stadtteile. Abschließend sind aktuell erst ca. 0,1 % der Flächen durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. In den Zukunftsszenarien steigt dieser Anteil auf ~14 bzw. ~22 %. Gründe für diese sehr ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Im Ist-Zustand sind nur ein paar Straßen so warm, dass die klimatische Situation als sehr ungünstig zu bewerten ist. In den Zukunftsszenarien kommen viele weitere Straßen hinzu, gefolgt von

gewerblich genutzten Flächen in Industriegebieten. Nur wenige Wohngebiete stehen vor der Gefahr zu thermischen Hotspots zu werden.

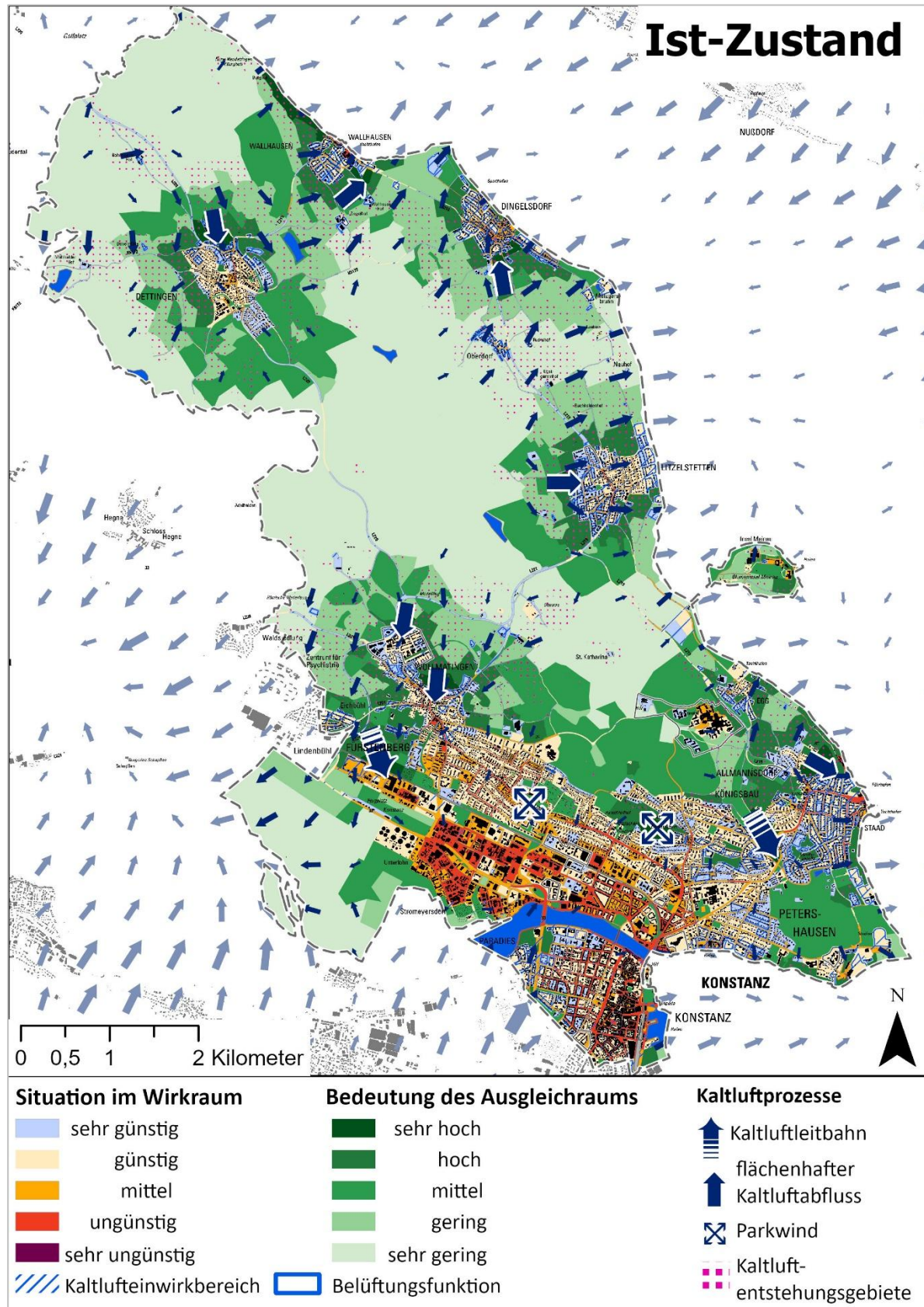


Abbildung 52: Bewertungskarte für den Ist-Zustand der Nachtsituation des Stadtgebiets von Konstanz.

Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der humanbioklimatischen Situation in der Nacht, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

Humanbioklimatische Situation (Überwärmung in der Nacht)	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr günstig	20,9 %	0,9 %	0,0 %
günstig	49,9 %	9,5 %	2,6 %
mittel	18,7 %	53,4 %	38,8 %
ungünstig	10,4 %	22,5 %	37,3 %
sehr ungünstig	0,1 %	13,7 %	21,2 %

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt (vgl. Abbildung 53). Dabei fand eine Ausweisung von 1,7 % aller heutigen Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung in der Nacht statt (Tabelle 17). Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt ein großer Teil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen und weiterer bedeutender Kaltluftprozesse. Zusätzlich gehören manche Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an. Der Anteil mit „sehr hoher“ Bedeutung steigt bei den angenommenen Zukunftssituationen auf 2,6 % bzw. 5,7 %. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um Flächen, die heutzutage eine „hohe“ humanbioklimatische Bedeutung in der Nacht innehaben. Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich heutzutage zu 9,9 % innerhalb der Konstanzer Stadtgrenze wieder. Mit 20,5 % entfällt ein Fünftel aller heutigen Ausgleichsflächen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftabflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Kaltluftfunktion aufweisen. Mehr als die Hälfte der Ausgleichsflächen des Status Quo (19,3 % und 48,5 %), aber auch der Zukunftsszenarien, leisten nur einen geringen bzw. keinen nennenswerten Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen in der Nacht.

Tabelle 17: Flächenanteile der Klassifizierung der humanbioklimatischen Bedeutung für den Siedlungsraum in der Nacht, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

humanbioklimatische Bedeutung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr gering	48,5 %	47,7 %	46,9 %
gering	19,3 %	17,7 %	17,9 %
mittel	20,5 %	22,7 %	23,4 %
hoch	9,9 %	9,2 %	6,2 %
sehr hoch	1,7 %	2,6 %	5,7 %

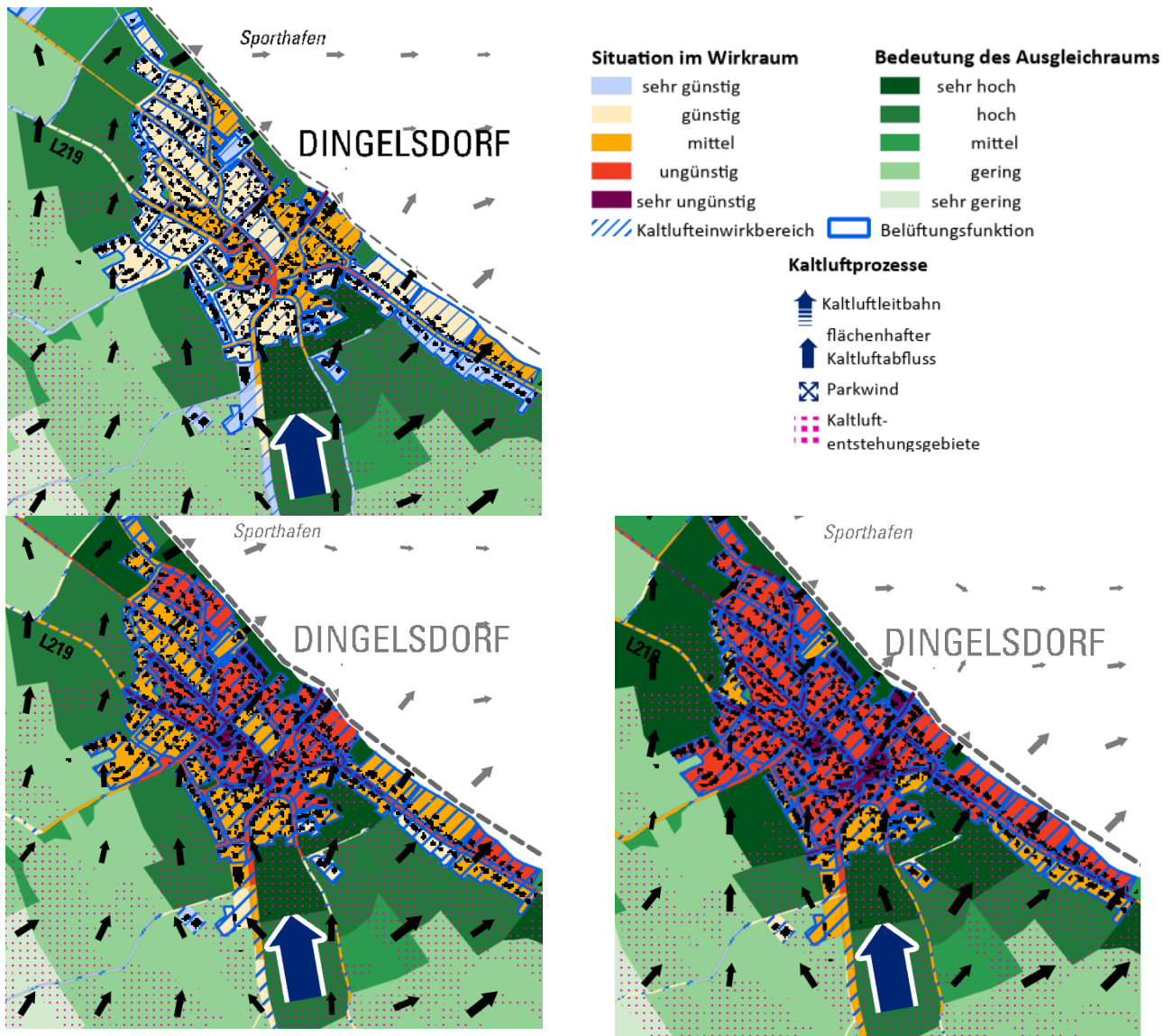


Abbildung 53: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts Zukunftsszenario 2045). Verkürzte Legende

8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in den Bewertungskarten der Tagsituation für Konstanz, die für den Ist-Zustand in Abbildung 54 aufgetragen ist, wurden 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.

In Konstanz sind heutzutage 10,9 % der Wirkraumflächen (inkl. Verkehrsraum) durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet (**Tabelle 18**). Vor allem durchgrünte, gewässernahe Siedlungsteile und gut verschattete Straßenabschnitte gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- (insbesondere Baum-)anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Durch einen starken Klimawandel kann dieser Anteil allerdings bis 2045 auf ca. 1,5 % absinken. 28,9 % der Wirkraumflächen der Stadt Konstanz wurden unter heutigen klimatischen Bedingungen der Kategorie der günstigen human-bioklimatischen Situation am Tage zugeordnet. Diese im Vergleich zum Innenstadtbereich noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Mit 50,1 % ist die Hälfte der Wirkraumflächen heutzutage mit mittleren



thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten.

Mit 10,0 % der Konstanzer Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen sind am Tage bereits heute Teile der Wirkraumflächenkulisse durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert, wobei der Anteil erst unter Annahme eines starken Klimawandels und bis 2045 auf über 50 % ansteigen könnte. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen Stadtbereiche. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den Industrie- und Gewerbearealen ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören am Tage z.B. Teile der Hussenstraße bzw. Wessenbergstraße, die durch bei Sonnenhöchststand fehlende Verschattung und starke Versiegelung eine Wärmebelastung für den Langsamverkehr (Fahrradfahrende sowie Fußgängerinnen und Fußgänger) mit sich bringen.

Eine sehr ungünstige thermische Situation am Tage wird heutzutage quasi nicht erreicht (0,04 %), aber 1 % bzw. 3,9 % der Wirkraumflächen haben das Potential in Zukunft in diesen Bereich abzurutschen. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. Überwiegend ist der an belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum potenziell in der Zukunft durch diese thermische Situation charakterisiert (z. B. die Maybachstraße in Oberlohn).

Tabelle 18: Flächenanteile der Klassifizierung der Aufenthaltsqualität im Außenraum des Siedlungsgebietes am Tage, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

	Aufenthaltsqualität im Außenraum	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
	sehr günstig	10,9 %	4,4 %	1,4 %
	günstig	28,9 %	18,5 %	7,1 %
	mittel	50,1 %	47,5 %	32,4 %
	ungünstig	10,0 %	28,5 %	55,2 %
	sehr ungünstig	0,0 %	1,0 %	3,9 %

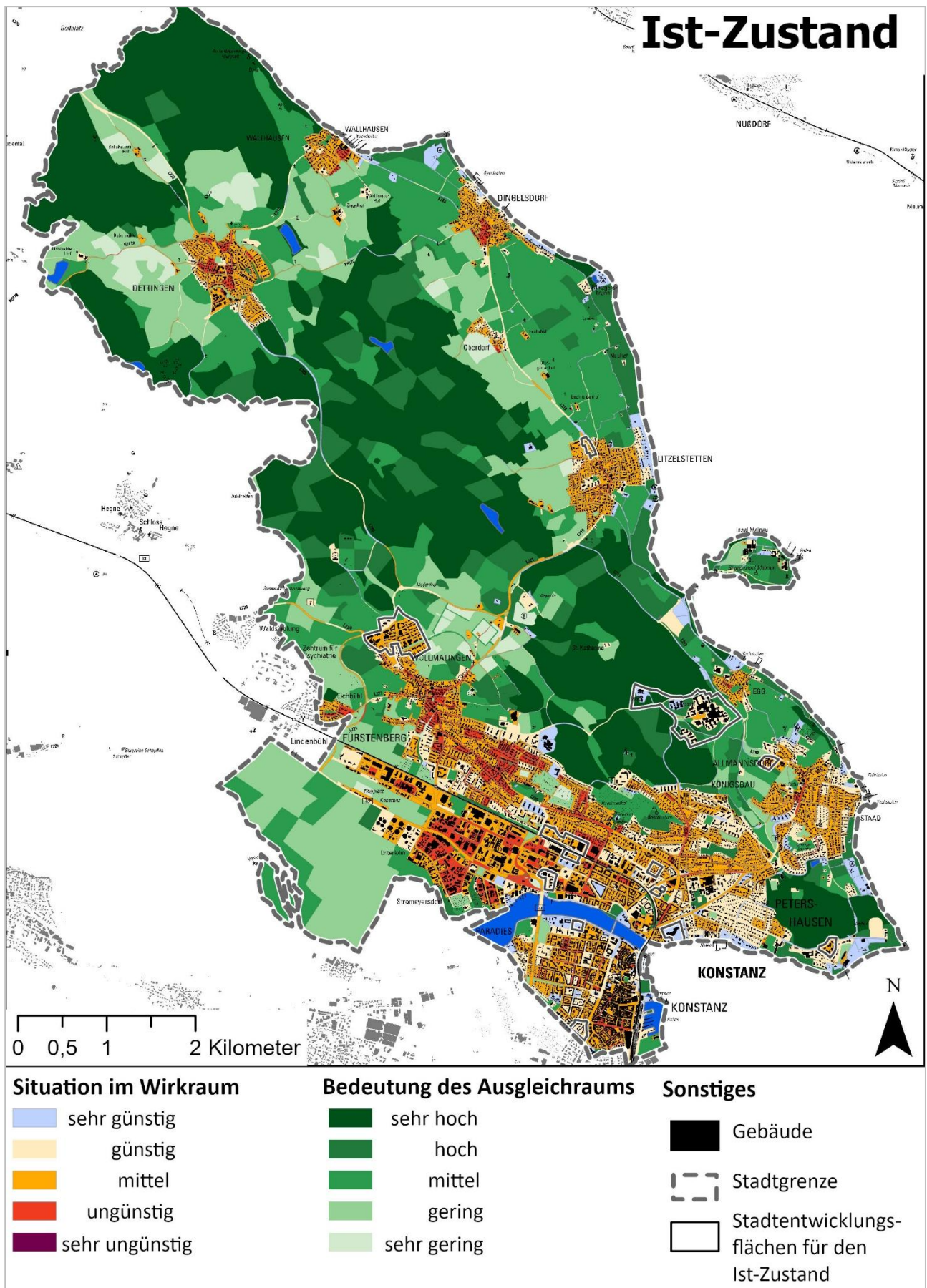


Abbildung 54: Bewertungskarte für den Ist-Zustand der Tagsituation des Stadtgebiets von Konstanz.

Wie in Abbildung 55 erkennbar ist, nimmt die Aufenthaltsqualität des Ausgleichsraumes aufgrund steigender Temperaturen in Zukunft eher ab. Flächen mit einem konstanten relativ dichten Baumbestand können diesen Effekt deutlich verringern. Die klimatische Belastungssituation im Wirkraum kann durch den Klimawandel auch in relativ kleinen Ortschaften tagsüber deutlich ungünstiger werden als heute.

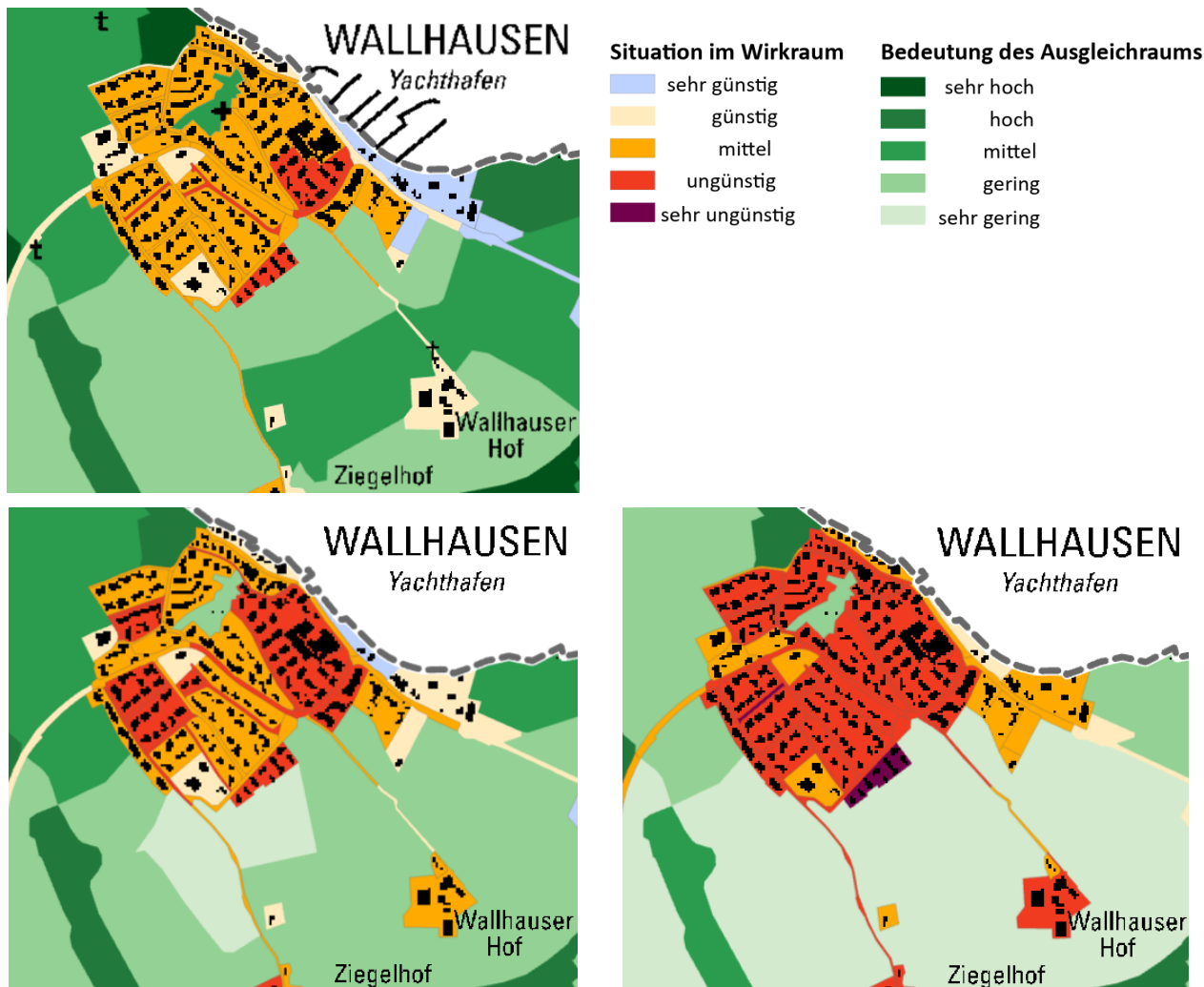


Abbildung 55: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts Zukunftsszenario 2045). Verkürzte Legende.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt aber insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien in den Fokus. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher oder hoher Aufenthaltsqualität (heutzutage 38,9 % bzw. 13,7 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese zwei höchsten Bewertungsklassen fallen alle Waldareale im gesamten Stadtgebiet und diese Flächen bleiben hinsichtlich eines zunehmenden Klimawandels in Vergleich zu den Freiflächen robust. Allerdings führt der resultierende generelle Temperaturanstieg des angenommenen Klimawandelszenarios bei allen sehr günstigen Flächen zu einem Klassensprung, da diese im Mittel sehr dicht an der Klassengrenze von 25,7 °C PET liegen (Tabelle 15 & Tabelle 19). Einen der wichtigsten innerstädtischen Rückzugsorte für die Bewohner stellt dabei der Lorettowald dar.

23,7 % der Ausgleichsflächen sind im Status Quo einer mittleren Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen, in den angenommenen Zukunftsszenarien sinkt der Anteil ab. Die Flächen dieser Kategorie sind z. B. an den Rändern der Waldbereiche und der Gewässer zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichtereren Baumbestand,



sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch im Siedlungsraum sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Hauptfriedhof Konstanz) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume geringer Aufenthaltsqualität (22,2 % der heutigen Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit 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 sehr geringer Aufenthaltsqualität am Tag (heute 2,5 %), welche aufgrund der geringen Verschattung in Zukunft einen steigenden Anteil der Ackerflächen überall im Stadtgebiet Konstanz ausmachen könnten (bis zu 27,2 % bis 2045).

Tabelle 19: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Erholungsfunktion am Tage, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr gering	2,5 %	10,7 %	27,2 %
gering	21,2 %	25,7 %	21,4 %
mittel	23,7 %	15,5 %	11,0 %
hoch	13,7 %	48,1 %	40,2 %
sehr hoch	38,9 %	0,0 %	0,0 %

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der sechs Bewertungskarten (s. Kapitel 8.3) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen einen hohen stadtklimatische Schutzbedarf innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine Handlungspriorität vorliegt.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird die **Handlungspriorität** dargestellt. Die Bewertung beruht zu gleichen Teilen auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion) und der Aufenthaltsqualität am Tage. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5. Die Zusammenfassung der Tag- und Nachtbewertung erfolgte nach dem in Tabelle 20 beschriebenen Muster im ersten Schritt für jedes der drei Szenarien getrennt.

Tabelle 20: Bewertungsmatrix der Belastungsklassen für den Wirkraum.

Wirkraum						
Bioklimatische Situation Nacht (Bew.karten zT04 Wohnen, Gewerbe, Verkehr)						
		1 - sehr günstige	2 - günstige	3 - mittlere	4 - ungünstige	5 - sehr ungünstige
Aufenthaltsqualität am Tag (Bew.karten zPET Wohnen, Gewerbe,Verkehr)	1 - sehr hoch	1	2	2	3	3
	2 - hoch	2	2	3	3	4
	3 - mittel	2	3	3	4	4
	4 - gering	3	3	4	4	5
	5 - sehr gering	3	4	4	5	5

Je nachdem, ob bereits heutzutage eine für die Tag-Nacht-Kombination ermittelte Wirkraumbelastung vorherrscht oder ob die Wahrscheinlichkeit in der Zukunft steigt, wurden Belastungsklassen vergeben (Tabelle 21).

Tabelle 21: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Belastungsklassen und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Handlungspriorität 1	Flächen, die bereits heute eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 20).	0,1 %
Handlungspriorität 2	Flächen, die ab dem Szenario 2035 eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 20).	8,0 %
Handlungspriorität 3	Flächen, die ab dem Szenario 2045 eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 20).	7,4 %
Handlungspriorität 4	Flächen, die bereits heute oder in einem der Zukunftsszenarien eine hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 4 in Tabelle 20).	60,7 %
Handlungspriorität 5	Flächen, die bereits heute oder in einem der Zukunftsszenarien eine mittlere Wärmebelastung aufweisen (Klasse 3 in Tabelle 20).	23,6 %
keine Handlungspriorität	Übrige Flächen	0,3 %

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den **stadtklimatischen Schutzbedarf** 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 zunächst getrennt für alle drei Szenarien gegenüberstellt (Tabelle 22).

Tabelle 22: Bewertungsmatrix der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsraum						
Bioklimatische Bedeutung der Fläche in der Nacht						
		5 - sehr hoch	4 - hoch	3 - mittel	2 - gering	1 - sehr gering
Bioklimatische Aufenthaltsqualität am Tag	5 - sehr hoch	5	5	4	4	3
	4 - hoch	5	4	4	3	3
	3 - mittel	5	4	3	3	2
	2 - gering	5	3	3	2	2
	1 - sehr gering	5	3	2	2	1

Die daraus resultierenden bioklimatischen Ausgleichsraumbewertungen und stadtklimatischen Schutzbedarfe sind in Tabelle 23 aufgeführt. In Abhängigkeit vom stadtklimatischen Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen (siehe Kap. 8.4.2).

Tabelle 23: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Ausgleichsraum
sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 5 in Tabelle 22)	5,3 %
hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 4 in Tabelle 22)	21,4 %
erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 3 in Tabelle 22)	50,7 %
Schutzbedarf	Übrige Flächen	22,5 %

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte bzw. Bewertungskarte Nacht übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Windpfeilen, Kaltluftabflüssen und Kaltlufteinwirkungsbereichen. Darüber hinaus enthält die Planungshinweiskarte Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden und Gleisflächen (nicht bewertet), sowie den berücksichtigten Stadtentwicklungsflächen (vgl. Kapitel 5.3).

Zusätzlich sind für den Wirkraum die in der Sensitivitätsanalysekarte abgebildeten Informationen (vgl. Kapitel 7.2) überlagert worden. Über Schraffuren erfolgt eine Kennzeichnung von Baublöcken, die ein extrem sensibles oder ein (hoch) sensibles Gebiet darstellen. Diese Gebiete weisen einen entsprechend hohen Anteil an vulnerabler Wohnbevölkerung auf, sodass kenntlich wird, wo sich thermische Belastungsräume mit hohen Bevölkerungsdichten überschneiden (Abbildung 56).

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

 extrem sensitive Gebiete
 hoch und normal sensitive Gebiete

Abbildung 56: Symbologie für Gebiete mit sensiblen Bevölkerungsanteilen.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Konstanz, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 57 (ausschnittsweise) und Abbildung 58 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Handlungsprioritäten und Schutzbedarfen aus.

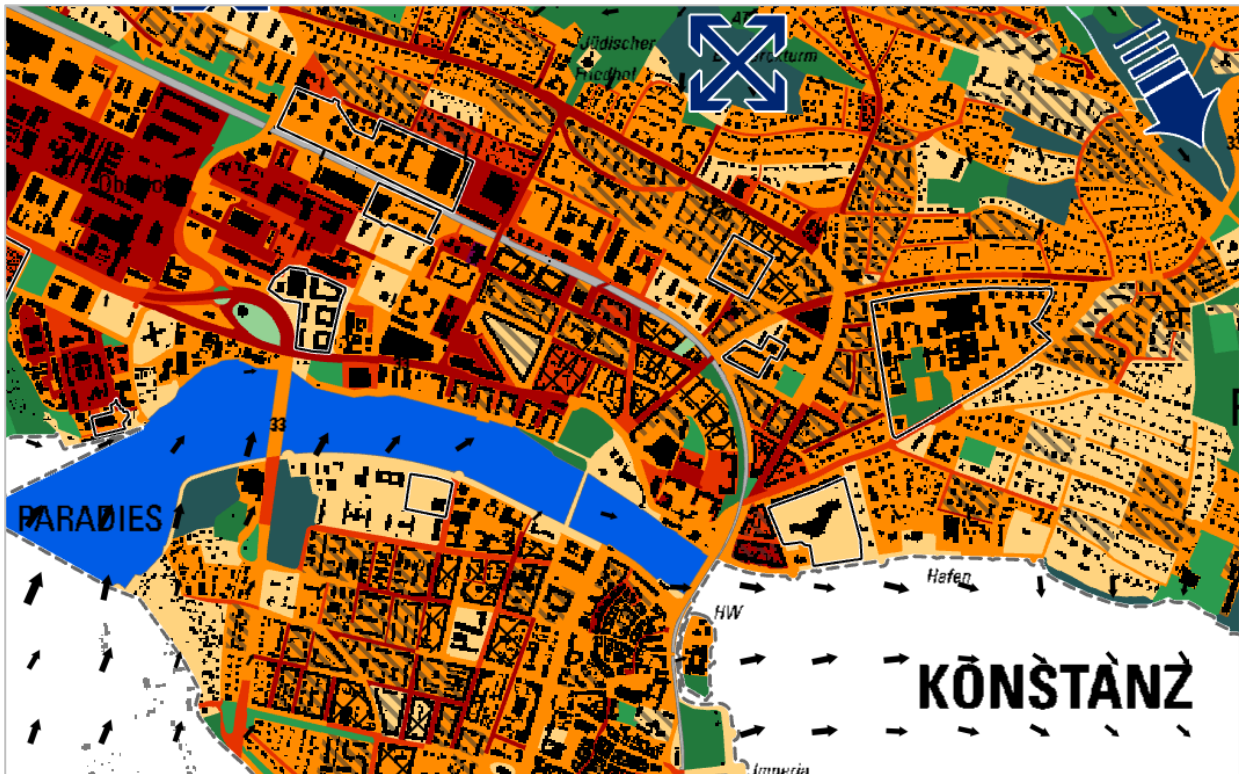


Abbildung 57: Planungshinweiskarte Stadtklima für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Konstanz.

Die **Handlungsprioritäten des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird (**Tabelle 24**). Ergänzend werden Handlungsempfehlungen im Rahmen baulicher Entwicklungen zu den verschiedenen Klassen angegeben.

Tabelle 24: Mit den Belastungen im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise und Handlungsempfehlungen im Rahmen baulicher Entwicklungen.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise	Vorgehen im Rahmen baulicher Entwicklungen / Überplanung
Handlungspriorität 1-3 = klimatischer Sanierungsbereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind hier notwendig und prioritär. Es besteht ein sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen. Die Prioritäten bedeuten eine sehr ungünstige thermische Situation bereits in der Bestandsituation (1), ab dem Szenario 2035 (2) oder ab dem Szenario 2045 (3).	mikroklimatisches Gutachten erforderlich
Handlungspriorität 4 = klimatischer Optimierungsbereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind hier notwendig. Es besteht ein hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen	Qualitative Stellungnahme erforderlich
Handlungspriorität 5 = klimatischer Erhaltungsbereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen.	klimaökologische Mindeststandards beachten
keine Handlungspriorität	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation haben keine Priorität, sollten jedoch immer geprüft werden.	mögliche Auswirkungen auf Luftleitbahnen oder Kaltlufteinzugsgebiete beachten

Die Tabelle 21 zeigt die Flächenanteile der verschiedenen bioklimatischen Handlungsprioritäten auf. Mit 0,1 % ist die höchste Handlungspriorität heutzutage nur in ganz wenigen Flächen ausgeprägt. Im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerbebereich steigt die Handlungspriorität deutlich im Laufe des Klimawandels (Handlungspriorität 2 & 3, insg. 15,4%, Abbildung 57). Der klimatische Optimierungsbereich (Handlungspriorität 4) macht mit insgesamt 60,7 % der Wirkraumflächen einen überwiegenden Teil des Wirkraumes aus (Abbildung 58). Die in den Planungshinweisen für die Handlungspriorität 5 (23,6 %) genannten „klimaökologischen Mindeststandards“ meinen u. a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum oder eine Dachbegrünung. Diese sollten im Sinne der Klimaanpassung bei größeren Vorhaben auch geprüft werden, wenn laut der aktuellen Analyse noch keine Handlungspriorität besteht (0,3 % der Flächen).

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 darstellen, sind in der PHK durch entsprechende **stadtklimatische Schutzbedarfe** ausgewiesen. Tabelle 25 stellt den stadtklimatischen Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber. Mit einem Anteil von 5,3 % ist ein kleiner Teil des Konstanzer Ausgleichsraums als besonders schutzbedürftig anzusehen (Tabelle 23). Hierzu zählen die Kaltluftleitbahn und weitere oft innerstädtische Flächen (z. B. Freifläche rund um die Schänzle Sporthalle). Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils hohen bioklimatischen Ausgleichsfunktionen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, an dem die Flächen ihre Funktion entfalten, ist der Erhalt dieser Funktionen in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen stets nachzuweisen. Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse des hohen stadtklimatischen Schutzbedarfes ist zu achten (21,4 %). Etwa die Hälfte (50 %) der Grün- und Freiflächen weisen einen erhöhten stadtklimatischen Schutzbedarf auf. Hierzu zählen vor allem die Waldflächen im Stadtgebiet. Deren Klimafunktionen sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend



unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere im Innenbereich, eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten. Abschließend besitzen 22,5 % der Flächen keine besondere stadtklimatische Funktion für den derzeitigen Siedlungsraum. Sie besitzen trotzdem einen grundlegenden Schutzbedarf und innerstädtische Grünstrukturen in dieser Klasse sind zu erhalten und als Klimaoasen weiterzuentwickeln.

Tabelle 25: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise und Handlungsempfehlungen im Rahmen baulicher Entwicklungen.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise	Vorgehen im Rahmen baulicher Entwicklungen / Überplanung
sehr hoher Schutzbedarf	In diese Klasse fallen alle Grünflächen, die im Einzugsgebiet einer Kaltluftleitbahn liegen oder einen flächenhaften Hangabfluss mit Bezug zum Siedlungsraum aufweisen. Sie besitzen eine hohe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung. Dies gilt auch für Flächen, die durch die untersuchten baulichen Entwicklungen in Zukunft Teil eines wichtigen Kaltluftprozesses werden könnten.	mikroklimatisches Gutachten erforderlich
hoher Schutzbedarf	Die Flächen in dieser Kategorie weisen heute oder in den Zukunftsszenarien eine gute bis sehr gute Aufenthaltsqualität am Tage auf und liegen nachts meist am Rand von wichtigen Kaltluftprozessen.	qualitative Stellungnahme erforderlich
erhöhter Schutzbedarf	In diese Klasse fallen Grünflächen, die sowohl nachts als auch tagsüber und sowohl heute, also auch in den Zukunftsszenarien eine mittlere bis hohe Bedeutung aufweisen.	klimaangepasste Optimierung empfohlen, insbesondere im Innenbereich
Schutzbedarf	Diese Flächen haben für die heutige und die untersuchte zukünftige Stadtstruktur keine wichtige Bedeutung für die Kaltluftversorgung in der Nacht oder als Rückzugsraum am Tag. Es handelt sich hierbei meist um siedlungsferne Flächen	innerstädtische Grünstrukturen sind zu erhalten und als Klimaoasen weiterzuentwickeln

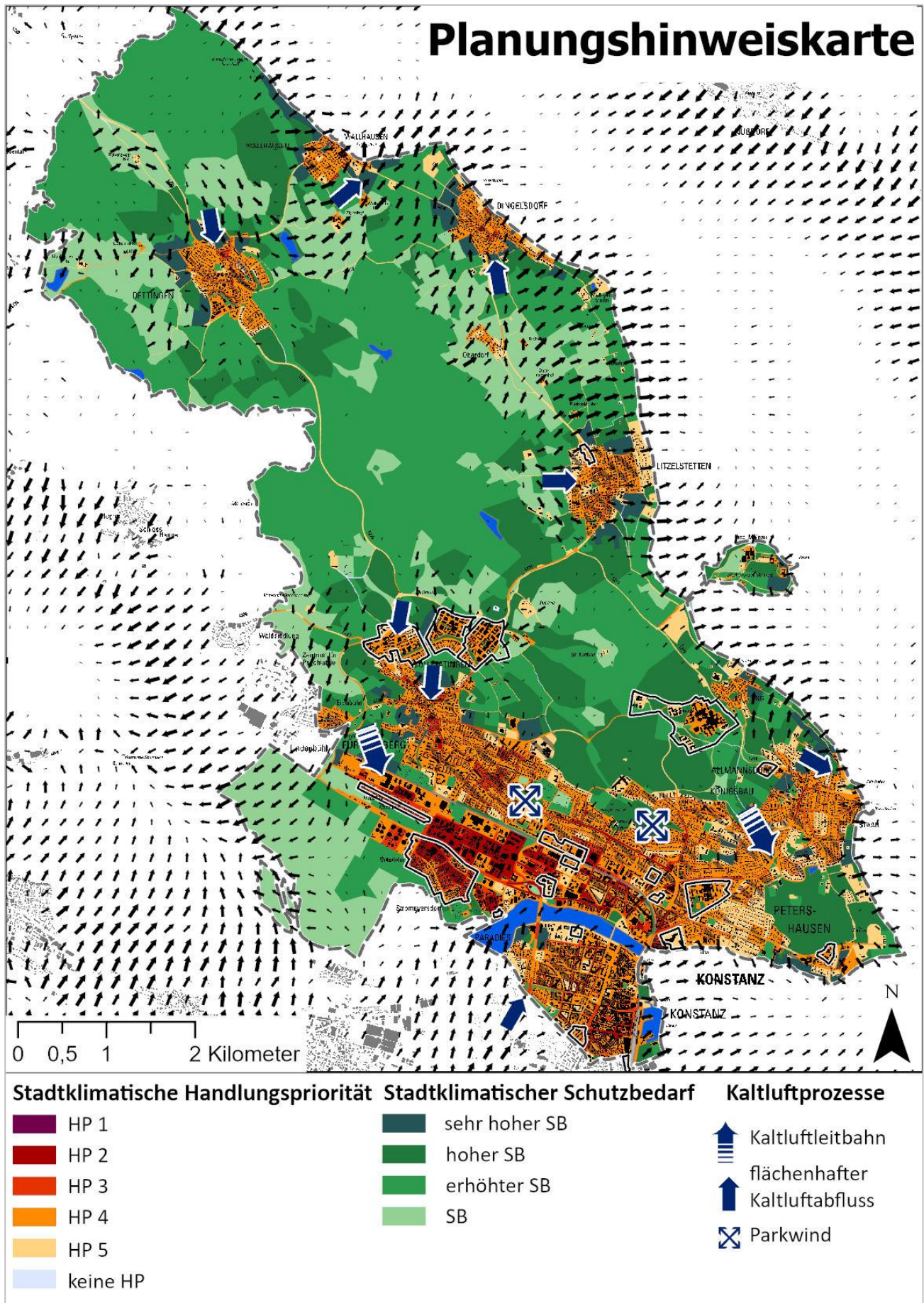


Abbildung 58: Planungshinweiskarte Stadtklima für Konstanz (verkürzte Legende).

9. Zusammenfassung & Ausblick

Mit der in diesem Bericht dokumentierten Klimaanalyse liegt die erste hochaufgelöste Analyse des Konstanzer Stadtklimas nach heutigem Stand der Technik vor. Im Fokus standen dabei insbesondere der städtische Kaltlufthaushalt sowie die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht (Schutzgut der „Menschlichen Gesundheit“). Methodisches Herzstück der Analyse waren hochaufgelöste computergestützte Modellierungen einer typischen belastenden sommerlichen Wetterlage im heutigen Klima und für zwei Zukunftsszenarien.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Verwundbarkeitsuntersuchung/Betroffenheitsanalyse. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungsnotwendigkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Konstanzer Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht sichtbar. Zum anderen weisen die Karten aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) eine Wertigkeit hinsichtlich der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu.

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse ist somit die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann neben der vorbereitenden auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf seitens eines externen Gutachters möglich.

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums sowie städtischer Gebäude, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamtstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Konstanzer Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5-10 Jahren anzustreben. Dabei könnte dann auch die explizite Berücksichtigung weiterer Themen wie die politische Zieldefinition in Verbindung mit passgenauen gesamtstädtischen Maßnahmenzenarien anvisiert werden.

Quellenverzeichnis

39. BImSchV. (2010). Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*) (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen—39. BImSchV) (40. Aufl.). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/39._BImSchV.pdf
- An Der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L., & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62(5), 571–579. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y>
- Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (2004). https://www.gesetze-im-internet.de/arbstaettv_2004/BJNR217910004.html
- Augter, G. (1997). Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- Becker, C., Herrmann, A., Haefeli, W. E., Rapp, K., & Lindemann, U. (2019). Neue Wege zur Prävention gesundheitlicher Risiken und der Übersterblichkeit von älteren Menschen bei extremer Hitze. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62(5), 565–570. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02927-9>
- Beckmann, S. K., 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*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- Boden, T., Andres, R., & Marland, G. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751—2014) (V. 2017) [Datensatz]. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017
- Bolte, G., Bunge, C., & Hornberg, C. (Hrsg.). (2012). Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven (1. Aufl.). Verlag Hans Huber.
- Business Wissen. (2023). Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. [business-wissen.de](https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik/). <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik/>
- Cedeño Laurent, J. G., Williams, A., Oulhote, Y., Zanobetti, A., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (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 Medicine*, 15(7), e1002605. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002605>
- DKRZ. (2025). Die SSP-Szenarien. <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>
- DWD. (2022). Nationaler Klimareport (6. überarbeitete Auflage). Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf;jsessionid=B0A90BE96E70B4EB4F9FD6717A50D3C6.live21063?__blob=publicationFile&v=15
- DWD. (2023). Stadtklima—Die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimafor-schung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html
- DWD. (2024a). Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD. (2024b). Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/

- DWD. (2024c). Liste der Klimaprojektionen (DWD-Referenz-Ensembles v2018). https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html;jsessionid=D4387517088804B6642FDE40968118F7.live21071?nn=541460
- DWD. (2025, Februar 19). Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Leistungen—Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendindizesthermisch/gefuehltetemp.html?nn=16102&lsbld=463812>
- Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill. <https://books.google.de/books?id=SOFSAAAAMAAJ>
- Fürst, D., & Scholles, F. (Hrsg.). (2008). Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung (3., vollst. überarb. Aufl.). Rohn.
- Gaede, M., & Härtling, J. W. (2010). Umweltbewertung und Umweltprüfung (Dr. A 1). Westermann.
- Gross, G. (1989). Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph., (62), 57–72.
- Gross, G. (1992). Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research, 10(4–6), 483–498. (K:_GRUNDLAGENLiteraturFITNAH_DOKUResultsOfSupercomputerSimulationsOfMeteorologicalMesoscalePhenomena_Gross_1992.pdf). [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(92\)90035-U](https://doi.org/10.1016/0169-5983(92)90035-U)
- Gross, G. (2002). The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteorologische Zeitschrift, 11(4), 295–302. (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2002_Exploration of boundary layer phenomena mesoscale model.pdf). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2002/0011-0295>
- Gross, G. (2012a). Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Microscale numerical experiments. Meteorologische Zeitschrift, 21(4), 399–412. (K:_GRUNDLAGENLiteraturModelleAsmusGross_2012_effects_of_different_vegetation_on_temperature_in_an_urban_building_enviroment_ggross.pdf). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0363>
- Gross, G. (2012b). Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. Meteorologische Zeitschrift, 21(2), 173–181. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0291>
- Gross, G. (2014). On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorology, 150(2), 319–326. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9863-5>
- Gross, G. (2017). Some effects of water bodies on the n environment—numerical experiments. Journal of Heat Island Institute International. (k:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2017_Some effect of water bodies on the urban environment.pdf). https://www.heat-island.jp/web_journal/JGM8SpecialIssue/2-1_gross.pdf
- Gross, G. (2021). A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. Meteorologische Zeitschrift, 30(3), 227–236. <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1066>
- Gross, G., Frey, T., & Trute, P. (2002). On the applicability of numerical models for calculating local winds in complex terrain; Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhaeltnisse in komplexem Gelaende. DEWI-Magazin, (20). (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2001_On the applicability of a numerical model system for calculating new European air pollution measures.pdf).
- HLNUG. (2019, April 30). Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen – Hitze und Gesundheit. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/KLIMPRAXstadtklima2019/L-Handlungsleitfaden2019_Einzelseiten.pdf

- HLNUG. (2022). Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse (S. 54). Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf
- Hübener, H., Hoffmann, P., Keuler, K., Pfeifer, S., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., & Warrach-Sagi, K. (2017). Deriving user-informed climate information from climate model ensemble results. *Advances in Science and Research*, 14, 261–269. <https://doi.org/10.5194/asr-14-261-2017>
- Hübener, H., Spekat, A., Bülow, K., Früh, B., Keuler, K., Menz, C., Radtke, K., Ramthun, H., Rathmann, T., Steger, C., Toussaint, F., & Warrach-Sagi, K. (2017). ReKliEs-De Nutzerhandbuch. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch
- INKEK. (2015). Klimafunktionskarte Stadt Konstanz. im Auftrag der Stadt Konstanz, Amt für Stadtplanung und Umwelt.
- ISO. (2017). ISO 7243:2017. Ergonomics of the thermal environment—Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. <https://www.iso.org/standard/67188.html>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jendritzky, G. (1990). Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Bd. 114). ARL.
- Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E., & DeDear, R. (2007). The Universal Thermal Climate Index UTCI. Goal and state of COST Action 730.
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, 10(1), 99–106. <https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013>
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Kuttler, W. (2013). *Klimatologie* (2., aktualisierte und erg. Aufl., Bd. 3099). Schöningh. <https://doi.org/10.36198/9783838540597>
- Lampert, T., Kroll, L. E., Müters, S., & Stolzenberg, H. (2013). Messung des sozioökonomischen Status in der Studie „Gesundheit in Deutschland aktuell“ (GEDA). *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 56(1), 131–143. <https://doi.org/10.1007/s00103-012-1583-3>
- Line, B. (2017). Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. *Satellite Liaison Blog*. <https://satellieliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- Linke et al., C. (2024). Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“.
- LUBW. (2021). Klimazukunft Baden-Württemberg—Was uns ohne effektiven Klimaschutz erwartet! (Klimaleitplanken 2.0). Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10200>
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

- Mayer, H., Beckroege, W., & Matzarakis, A. (1994). Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (UVP-Report 5, S. 265–268).
- Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & Van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1–2), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI) (Hrsg.). (2012). Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Druckfrisch Verlag für Druckerzeugnisse. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>
- Moore, G. E. (1903). *Principia Ethica*. Cambridge University Press.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. (). <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., & Wilson, C. (2013). The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4–6. <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>
- Richtlinie 2008/50/EG. (2008). RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1419250736800&from=DE>
- Sandholz, S., & Sett, D. (2019). Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress: Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn (Nr. 2; Zures Working Paper, S. 11). United Nations University – Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS). <http://collections.unu.edu/view/UNU:7510>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Verlag.
- UBA (Hrsg.). (2005). *Gesünder Wohnen—Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gesuender-wohnen-aber-wie>
- UBA. (2024). *Gesundheitsrisiken durch Hitze* [Text]. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze>
- UBA. (2025a). *Trends der Lufttemperatur* [Text]. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>
- UBA. (2025b). *Trends der Niederschlagshöhe* [Text]. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>
- Urban, H., & Steininger, K. W. (2015). Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In K. Steininger, M. König, B. Bednar-Friedl, L. Kranzl, W. Loibl, & F. Prettenhaler (Hrsg.), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts* (S. 301–322). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12457-5_16
- VDI 3783, Blatt 7. (2017). Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle—Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder: VDI 3783/7. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3783-blatt-7-umweltmeteorologie-prognostische-mesoskalige-windfeldmodelle-evaluierung-fuer-dynamisch-und-thermisch-bedingte-stroemungsfelder>



- VDI 3785, Blatt 1. (2008, Dezember). Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3785-blatt-1-umweltmeteorologie-methodik-und-ergebnisdarstellung-von-untersuchungen-zum-planungsrelevanten-stadtklima>
- VDI 3787, Blatt 1. (2015, September). Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-1-umweltmeteorologie-klima-und-lufthygienekarten-fuer-staedte-und-regionen>
- VDI 3787, Blatt 2. (2022). Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-2-umweltmeteorologie-methoden-zur-human-biometeorologischen-bewertung-der-thermischen-komponente-des-klimas>
- VDI 3787, Blatt 4. (2020). Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-4-umweltmeteorologie-methoden-zur-beschreibung-von-stark-und-schwachwinden-in-bebauten-gebieten-und-deren-bewertung>
- VDI 3787, Blatt 5. (2003). Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft>
- VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf. (2024). Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft-1>
- VDI 3787, Blatt 7. (2024). Umweltmeteorologie. Klimaindikatoren. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-7-umweltmeteorologie-klimaindikatoren>
- Winklmayr, C., & an der Heiden, M. (2022). Hitzebedingte Mortalität in Deutschland 2022. <https://doi.org/10.25646/10695.2>
- Winklmayr, C., Muthers, S., Niemann, H., Mücke, H.-G., & An Der Heiden, M. (2022). Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. Deutsches Ärzteblatt international. <https://doi.org/https://doi.org/10.3238/arztebl.m2022.0202>
- WMO. (2017, November 9). Event Types of Hazards and Extreme Events (Draft). World Meteorological Organization. https://wmoomm.sharepoint.com/sites/wmocpdb/eve_activityarea/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fwmocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FWorld%20Climate%20Programme%20%28WCP%29%5F649f07e1%2D1373%2De911%2Da965%2D000d3a396ff4%2FCatalogue%5FHazards%5FExtreme%5FEvents%5FWMO%5F091117%2Epdf&parent=%2Fsites%2Fwmocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FWorld%20Climate%20Programme%20%28WCP%29%5F649f07e1%2D1373%2De911%2Da965%2D000d3a396ff4&p=true&ga=1



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 16.07.2026

Erstellt von: Janine Könitz (M. Sc. Umweltnaturwissenschaften)

Geprüft von: Dr. Björn Büter

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Stadtklimaanalyse bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.

Anhang II: Klimawandel in Konstanz

BEOBACHTETE KLIMAVERÄNDERUNGEN

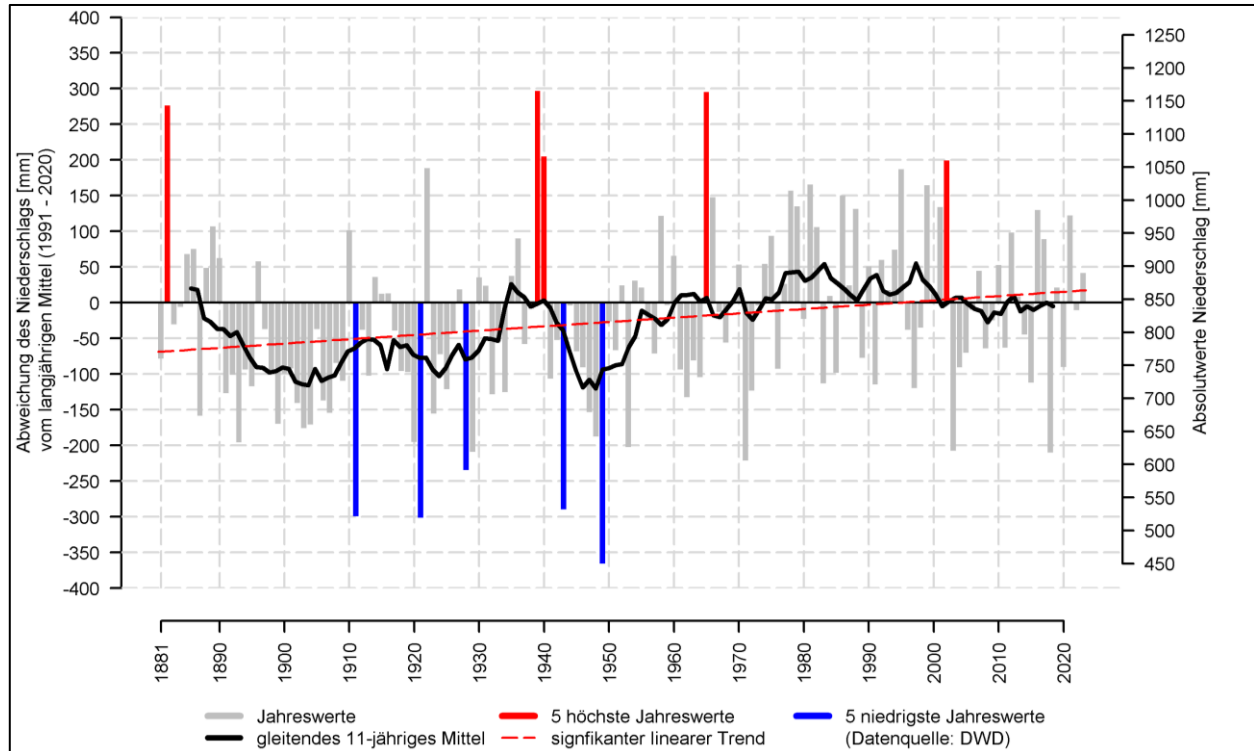


Abb. A 1: Entwicklung des Niederschlags in Konstanz 1881 -2024 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b).

TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

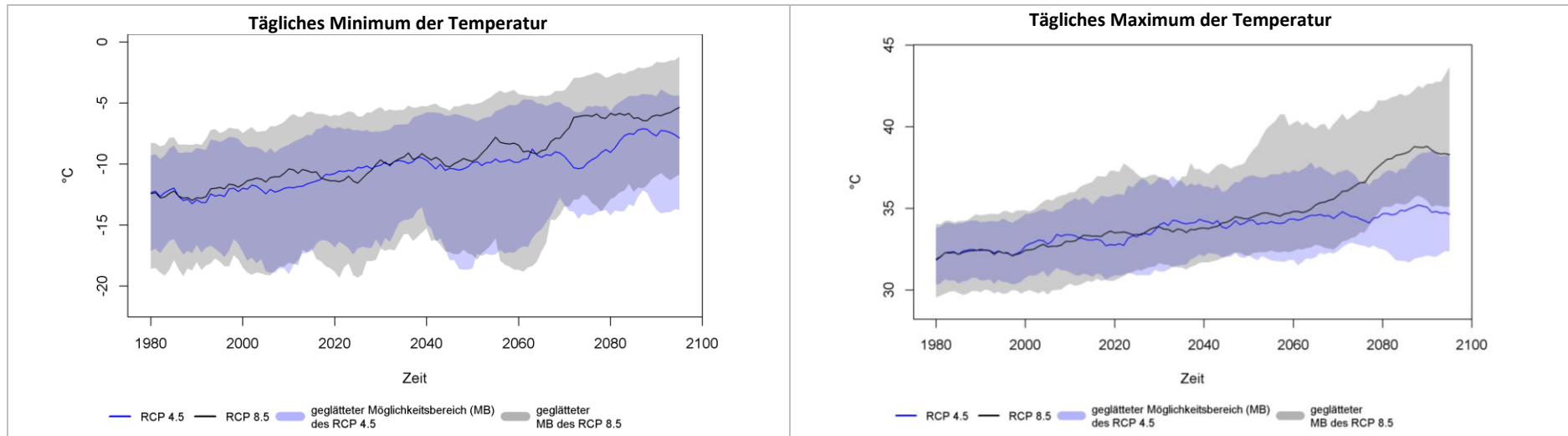


Abb. A 2: Zeitlicher Trend der täglichen Minimumtemperaturen (links) bzw. Maximumtemperaturen (rechts) in Konstanz (ausgewählte RCP-Szenarien, eigene Berechnung nach EURO-CORDEX-Daten des DWD, 2024c).

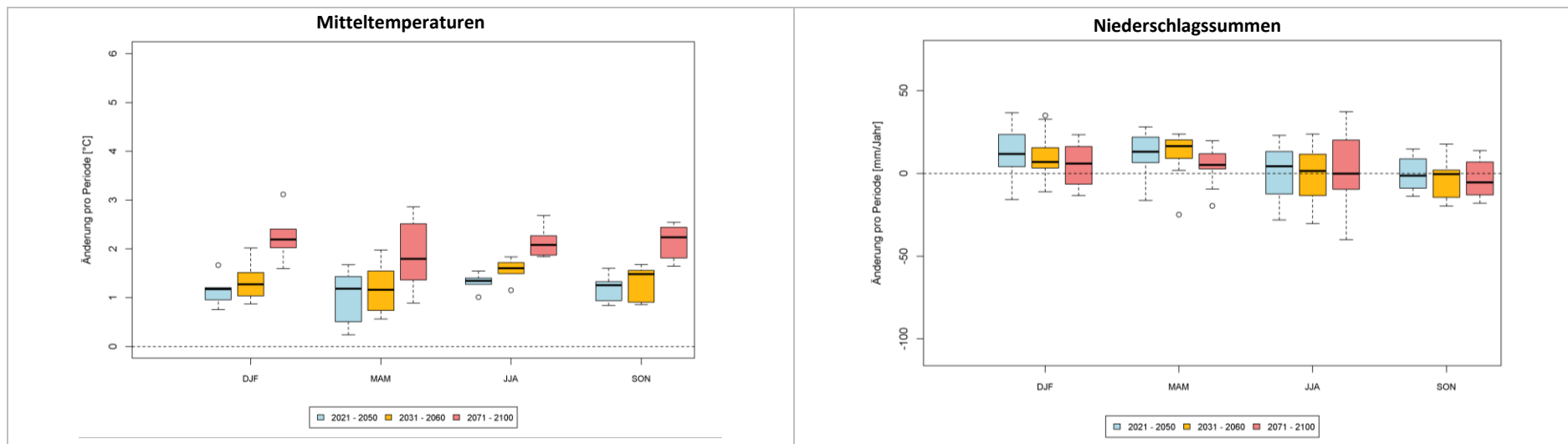


Abb. A 3: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen (links) und mittleren saisonalen Niederschlagssummen (rechts) in Konstanz für das RCP 4.5 (DWD, 2024c)

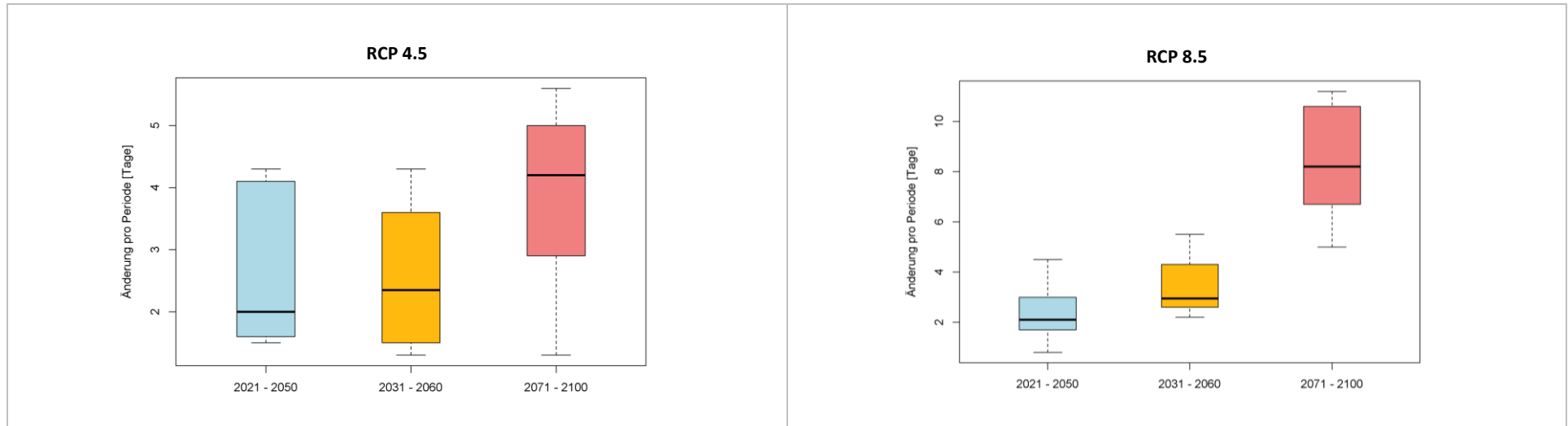


Abb. A 4: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30$ °C) in Konstanz in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

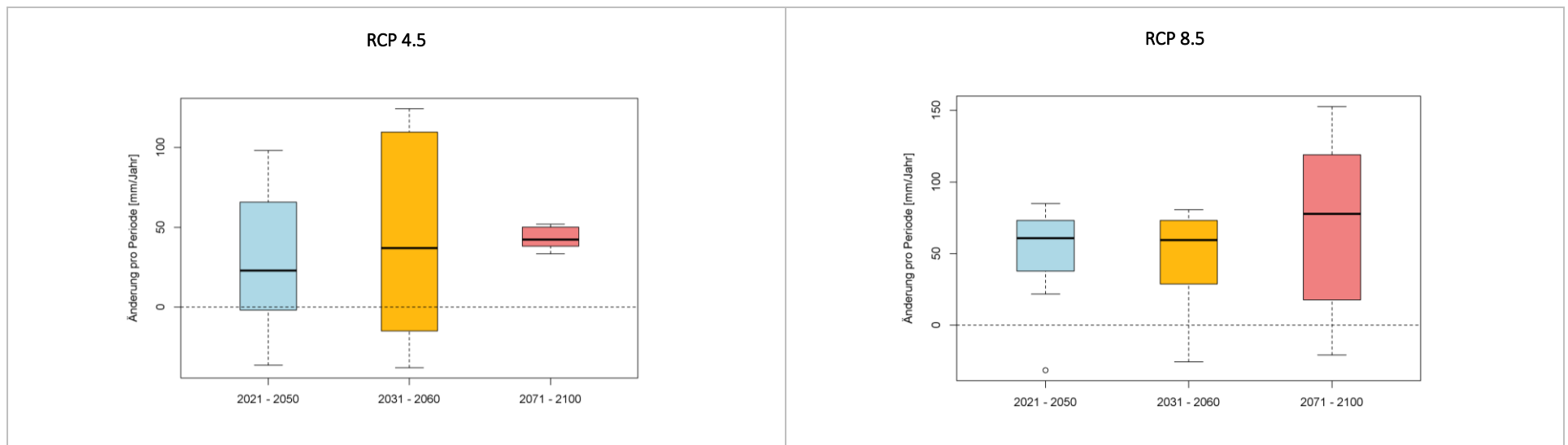


Abb. A 5: Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in Konstanz in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

TROCKENHEIT

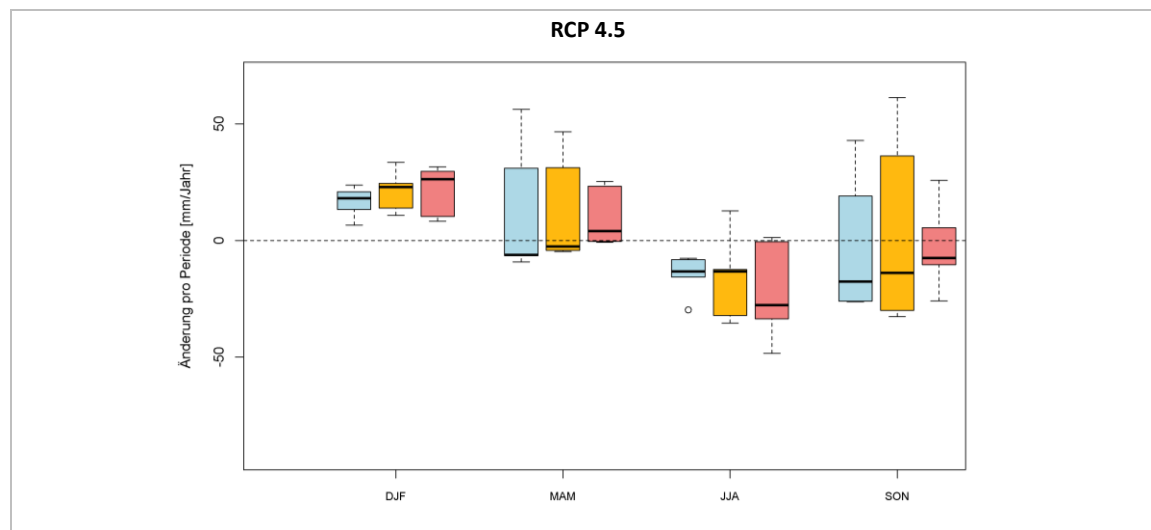


Abb. A 6: Änderung der langjährigen mittleren saisonalen klimatischen Wasserbilanz in Konstanz für das RCP 4.5 (DWD, 2024c)

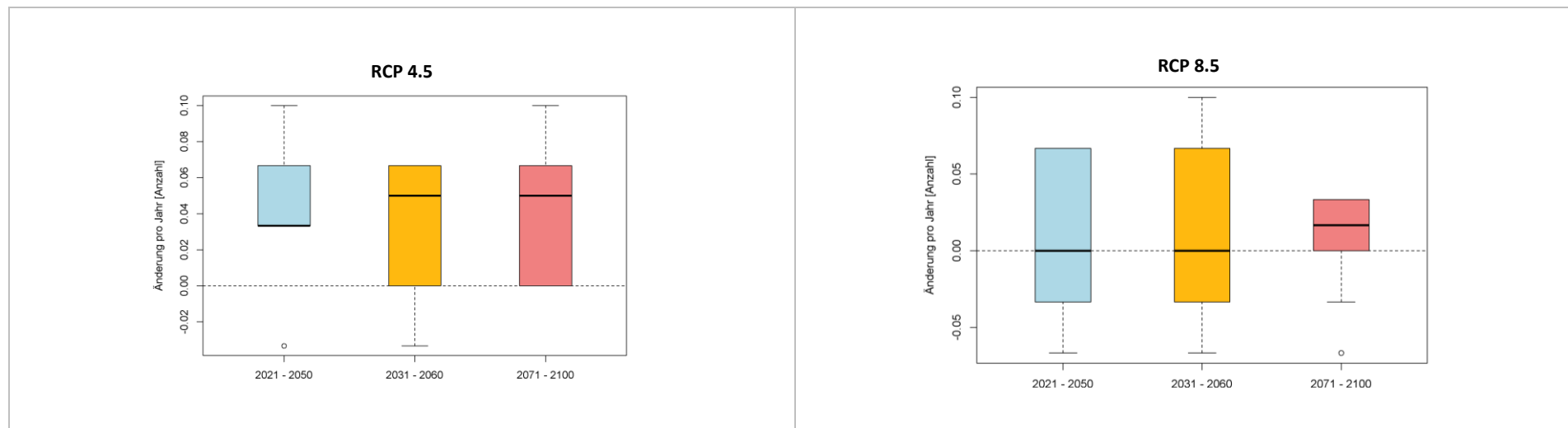


Abb. A 7: Änderung der langjährigen mittleren Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit < 1 mm Niederschlag) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Konstanz in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 10$ MM/D)

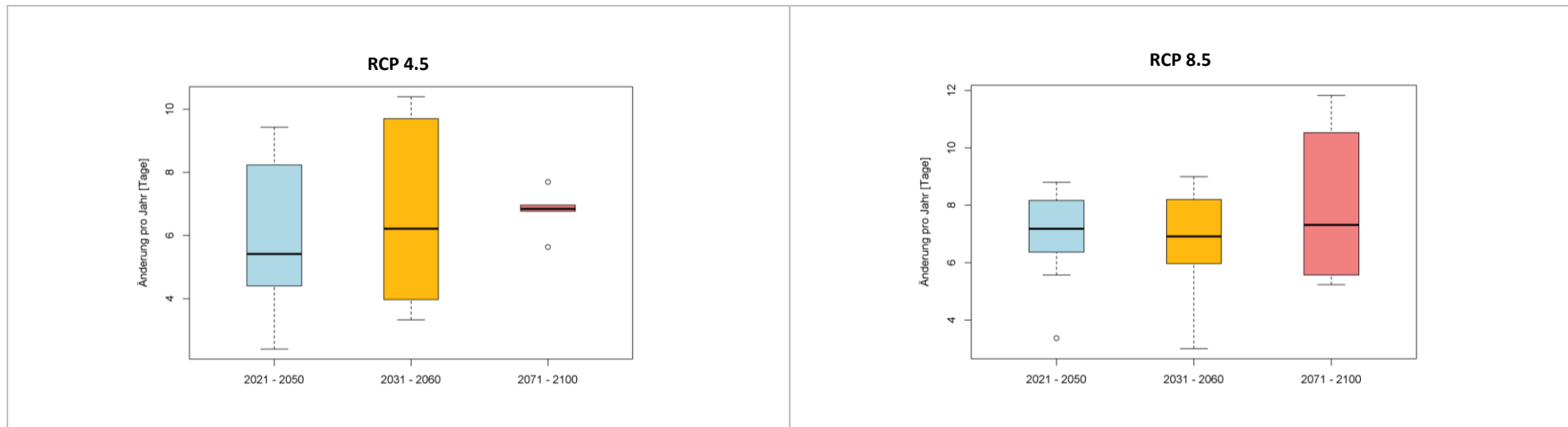


Abb. A 8: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 10$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Konstanz in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STÄRKERER NIEDERSCHLAG ($N \geq 20$ MM/D)

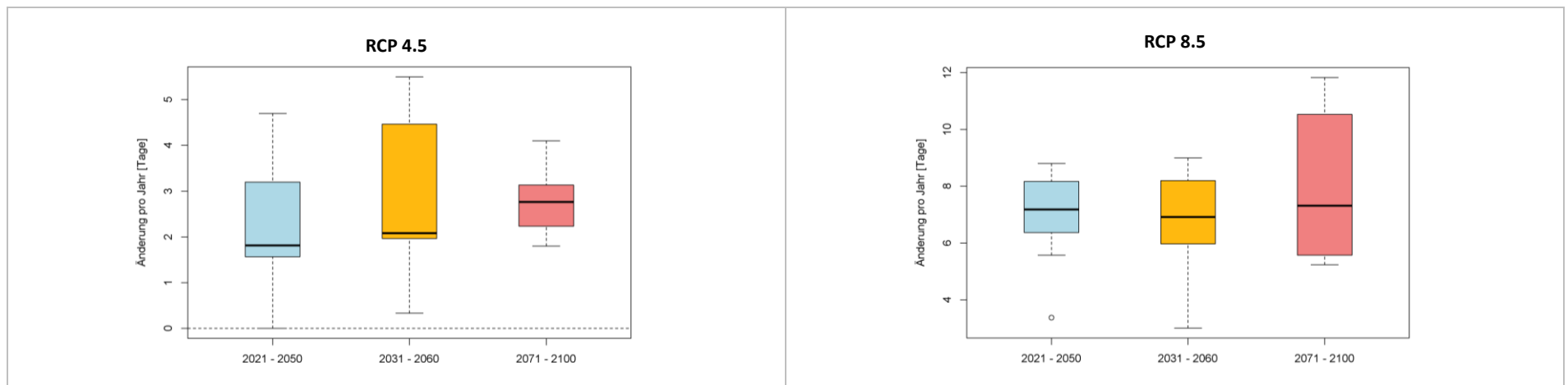


Abb. A 9: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 20$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Konstanz in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

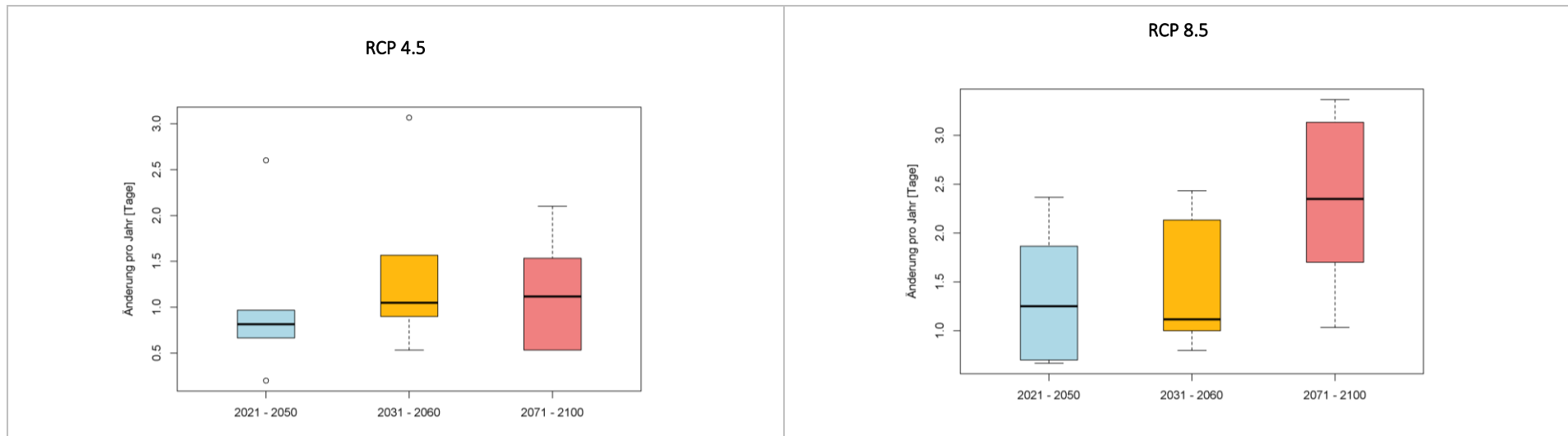
STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKNIEDERSCHLAG ($N \geq 30$ MM/D)

Abb. A 10: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Konstanz in den Zukunftsperioden für das RCP-Szenario 4.5 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

STURM

Die Auswertungen zum Thema Sturm erbrachten aufgrund der hohen Unsicherheit der Ergebnisse keine validen Aussagen. Aus diesem Grund sind die betreffenden Abbildungen und Tabellen an dieser Stelle nicht mit aufgeführt.

