

Stadtklimaanalyse Göppingen



Erstellt von
GEO-NET Umweltconsulting GmbH



Im Auftrag der
Stadt Göppingen



Februar 2025



Auftraggeber

Stadt Göppingen

Nördliche Ringstraße 35
73033 Göppingen

Projektbegleitung

Fachbereich 7
Stadtentwicklung, Stadtplanung und Baurecht



Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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



Projektförderung

Förderprogramm KLIMOPASS

LUBW - Landesanstalt für Umwelt
Baden-Württemberg
Postfach 10 01 63
76231 Karlsruhe



Landeskreditbank Baden-Württemberg

– Förderbank –

L-Bank

Schlossplatz 12
76131 Karlsruhe





Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Glossar	1
1. Hintergrund und Anlass	3
2. Fachliche Grundlagen	4
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	4
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	8
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	11
3. Klima und Klimawandel im Raum Göppingen	15
3.1 Datengrundlage und Methodik	15
3.2 Gegenwärtiges Klima	19
3.3 Zukünftige Klimaveränderungen	22
4. Analysemethoden	27
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	27
4.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	33
5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	46
5.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	46
5.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	51
5.3 Klimaanalysekarten	55
5.4 Wärmebelastung am Tage	62
6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte	65
6.1 Grundlagen	65
6.2 Geometrische Basis	66
6.3 Bewertungskarten	67
6.4 Planungshinweiskarte	76
7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima	83
Quellenverzeichnis	98
Anhang	102



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimakomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (Grafik modifiziert, aus VDI 3787, Bl.4 (2020))	4
Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a).....	5
Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur und Außentemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) am Beispiel von 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)	6
Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)	7
Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)	8
Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten)).....	9
Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100 (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)	16
Abbildung 8: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots	19
Abbildung 9: Klimadiagramm für Göppingen für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2023b)	20
Abbildung 10: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Göppingen im Zeitraum von 1881 bis 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2023b).....	21
Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Anzahl Heiße Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}C$) in verschiedenen Perioden im Raum Göppingen (eigene Berechnung nach DWD 2023b)	21
Abbildung 12: Saisonale Abweichungen vom Mittelwert der Bodenfeuchte in Göppingen im Zeitraum 1991 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2023b).....	22
Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Göppingen (alle RCP-Szenarien)	24
Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Göppingen (RCP 4.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000	24
Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag – Verdunstung) in den Zukunftsperioden in Göppingen (RCP 4.5).....	26
Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D	29
Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages	31
Abbildung 18: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)	32
Abbildung 19: Digitales Geländemodell mit Gebäudekulisse (links) und Strukturhöhe (rechts) für das Untersuchungsgebiet	33
Abbildung 20: Klassifizierte Landnutzung im 10 m Modell-Raster für die Gegenwart.....	35
Abbildung 21: Klassifizierte Landnutzung im 10 m Modell-Raster für das Zukunftsszenario RCP 4.5 für den Zeitraum 2021-2050.....	36
Abbildung 22: Prinzipskizze des Mischpixelansatzes. Verteilungsbeispiel für eine als Wohngebiet (links) und als Gewerbegebiet (rechts) umgesetzte Entwicklungsfläche.....	38
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992) ..	39
Abbildung 24: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).	47
Abbildung 25: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Klimaszenario RCP 4.5 (2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen blau umrandet).	48
Abbildung 26: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).	49



Abbildung 27: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen weiß umrandet).	50
Abbildung 28: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).	51
Abbildung 29: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen grün umrandet).	52
Abbildung 30: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).	53
Abbildung 31: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen grün umrandet).	54
Abbildung 32: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten	56
Abbildung 33: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Gegenwart	58
Abbildung 34: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050).....	60
Abbildung 35: Wärmebelastung am Tag (PET) im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, Wärmebelastung gemäß VDI 3787 Blatt 9).	63
Abbildung 36: Wärmebelastung am Tag (PET) für das Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, Wärmebelastung gemäß VDI 3787 Blatt 9).	64
Abbildung 37: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (Musterdarstellung).	66
Abbildung 38: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008).	67
Abbildung 39: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht.	70
Abbildung 40: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben Ist-Situation, unten Klimaszenario RCP 4.5, Zeitraum 2021-2050). Verkürzte Legende.	72
Abbildung 41: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben Ist-Situation, unten Klimaszenario RCP 4.5, Zeitraum 2021-2050). Verkürzte Legende.	74
Abbildung 42: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima (Legende auf der nächsten Seite).	79



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18).	12
Tabelle 2: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.	14
Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Göppingen (P 15 = 15. Perzentil, P 85 = 85. Perzentil, P 50 = Median).	23
Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Göppingen (P 15 = 15. Perzentil, P 85 = 85. Perzentil, P 50 = Median).	25
Tabelle 5: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.	28
Tabelle 6: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters.....	34
Tabelle 7: In die Modelleingangsdaten eingeflossene Flächen für geplante Bauvorhaben.....	37
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: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.	57
Tabelle 11: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.	68
Tabelle 12: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht.	69
Tabelle 13: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario.	73
Tabelle 14: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario.	73
Tabelle 15: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario	75
Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung am Tage in Bezug auf den Siedlungsraum, nach Modellierungsszenario.....	75
Tabelle 17: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den Bewertungskarten Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.	76
Tabelle 18: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.	77
Tabelle 19: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.	78
Tabelle 20: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den Bewertungskarten Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum.	81
Tabelle 21: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.....	81
Tabelle 22: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.	82
Tabelle 23: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für Göppingen.	87

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 → *autochthone Wetterlage*.

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

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

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

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *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 windenergie relevanten Parametern in verschiedenen Höhen bereit.

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

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

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

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

Strahlungswetterlage \rightarrow *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

1. Hintergrund und Anlass

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

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

Die siedlungsklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse in Göppingen sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2021 - 2050 darstellen und abschließend bewerten. Die Ergebnisse dienen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen und ermöglichen somit eine gezielte Einordnung der potenziellen Flächenentwicklung im Hinblick auf die klimatische Situation. Dafür werden neben der aktuellen Hitze- bzw. Wärmebelastung der Siedlungsflächen am Tage und in der Nacht auch die Ausgleichsleistungen der Grün- und Freiflächen erfasst. Letztere können in der Nacht bedeutende Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Luftleitbahnen darstellen und sorgen dadurch für Durchlüftung und nächtliche Abkühlung der Siedlungsgebiete. Weiterhin wird für die Tagsituation das Potenzial der Grün- und Freiflächen als kühler Erholungsraum untersucht. Als ergänzende Hinweise für die langfristige Planung wurde das Stadtklima zu Ende des Jahrhunderts für den Zeitraum von 2071 – 2100 modelliert.

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

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikro-skalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 10 m x 10 m-Raster erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Durch die Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung der bioklimatischen Situation in Göppingen.

2. Fachliche Grundlagen

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

2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit

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

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

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

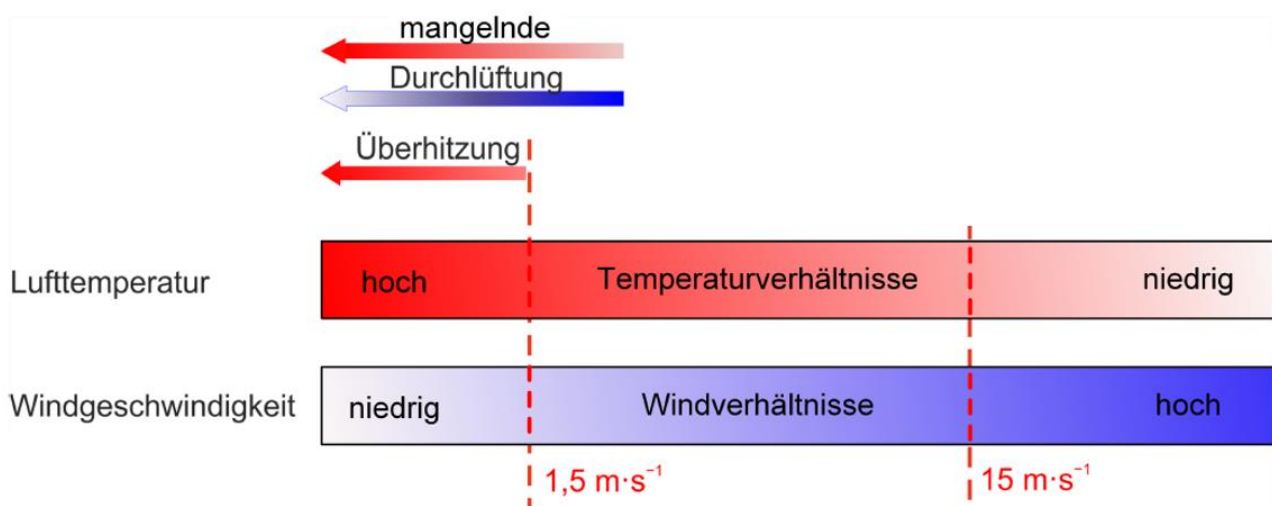


Abbildung 1: Klimakomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (Grafik modifiziert, aus VDI 3787, Bl.4 (2020))

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

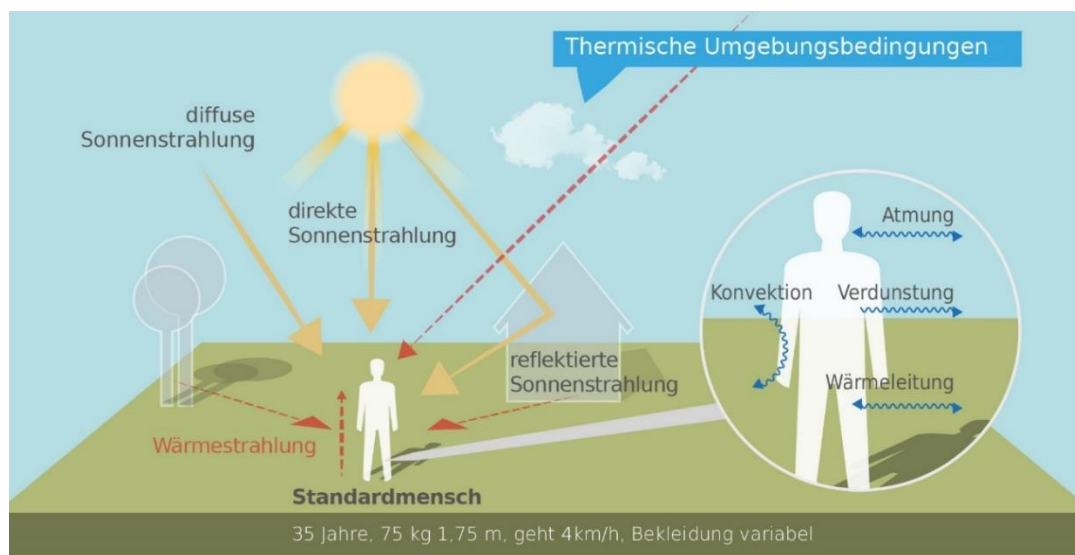


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

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

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

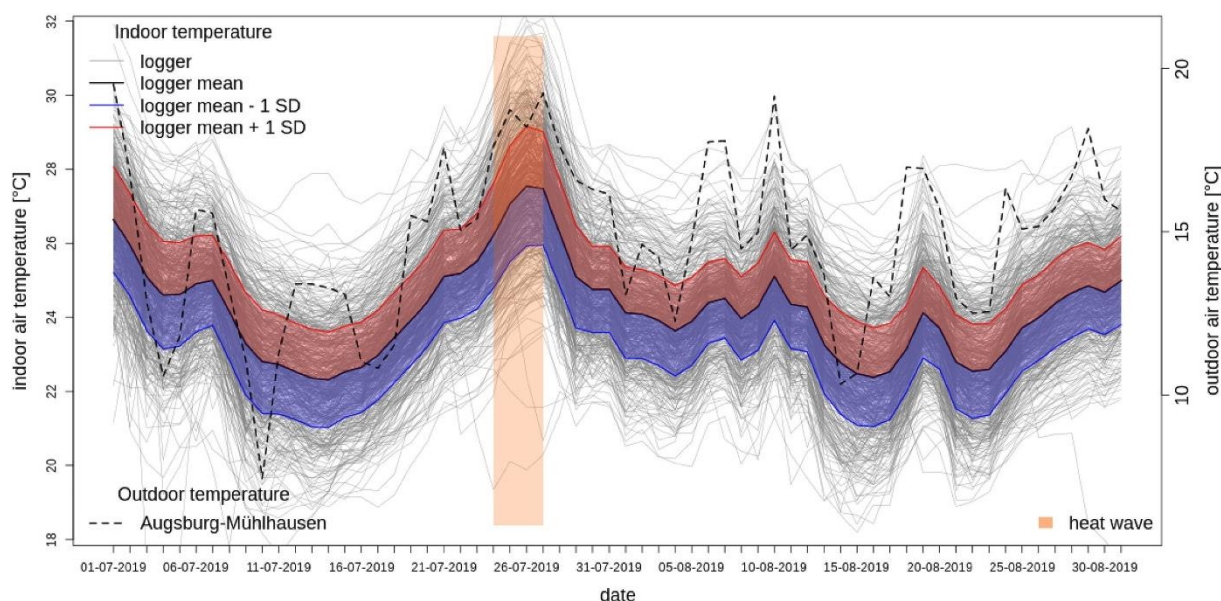


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur und Außentemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) am Beispiel von 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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

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

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

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75–84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von $> 20^{\circ}\text{C}$ 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). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

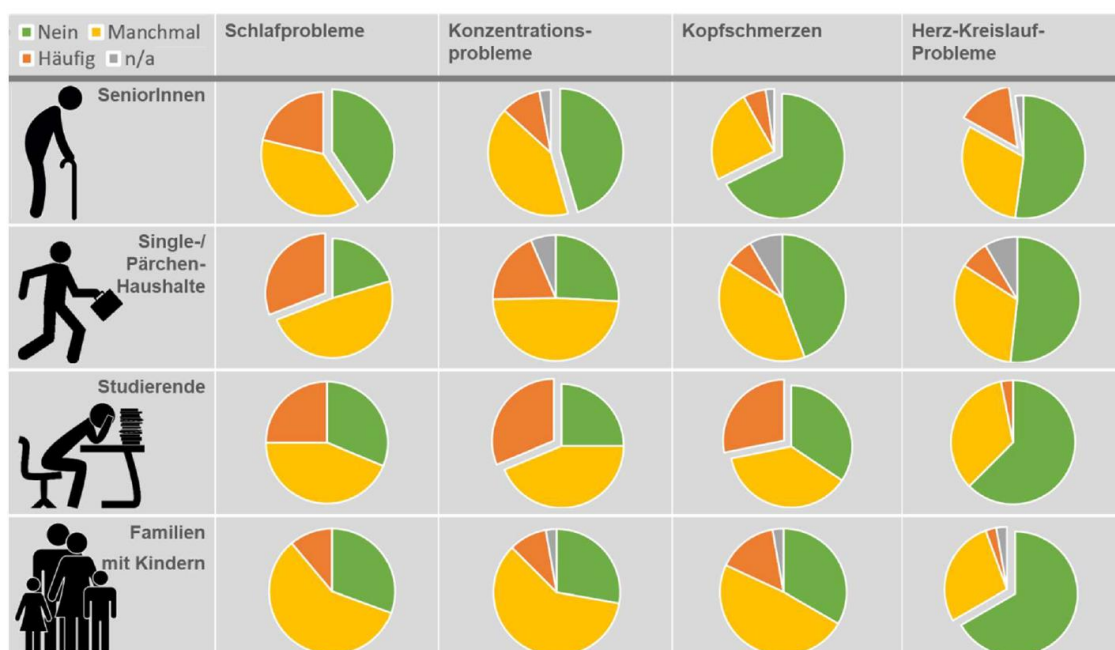


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

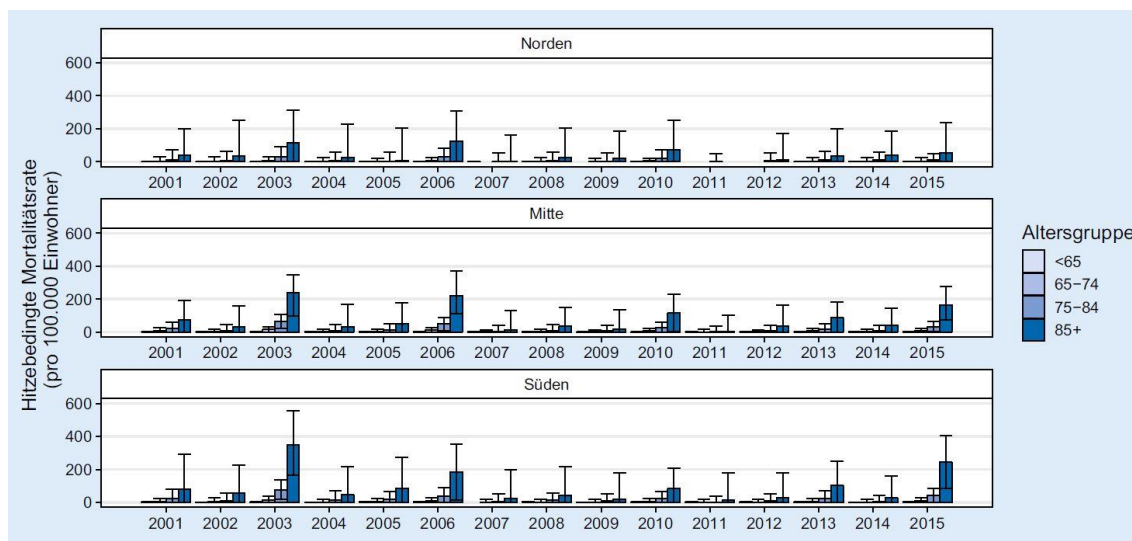


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse

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

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

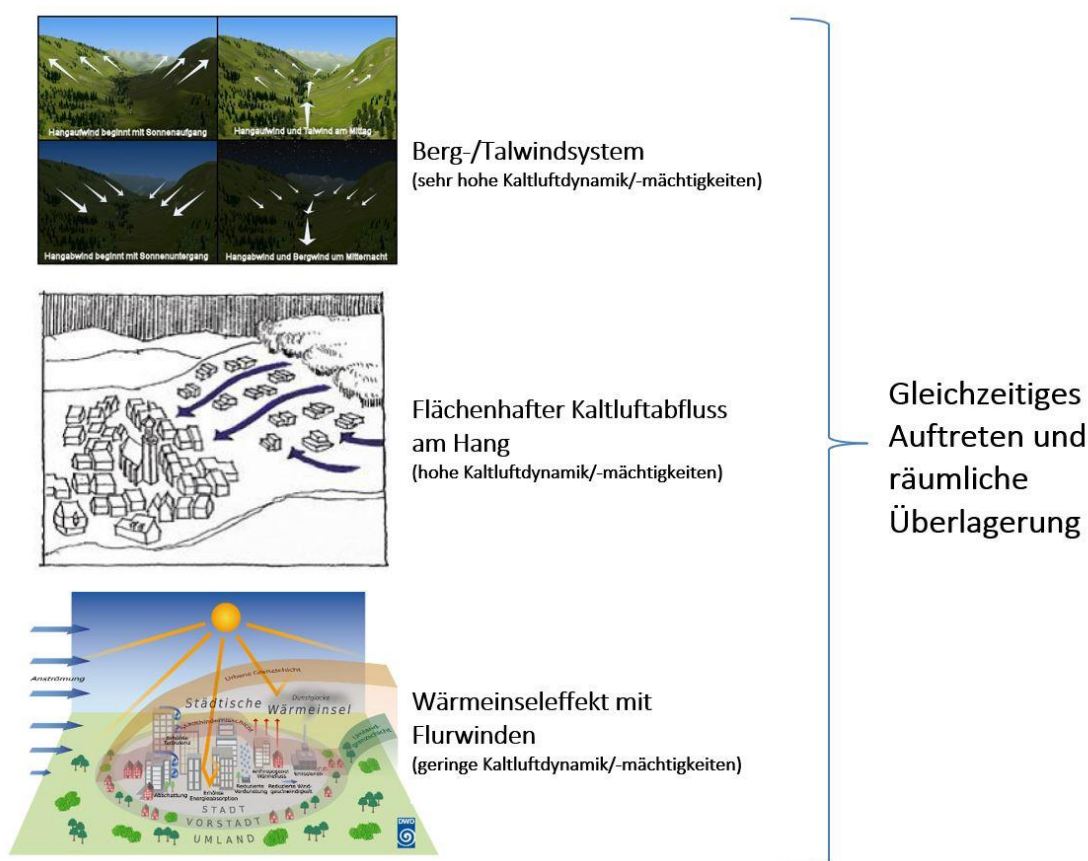


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

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

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich

um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind. In Göppingen treten auf Grund des hügeligen Reliefs vor allem Kaltluftabflüsse am Hang in Richtung des Tals der Fils in Erscheinung und weniger Berg- und Talwindssysteme, die für eine stärkere Ausprägung größere Höhenunterschiede erfordern.

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

2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik

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

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

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

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; Entwurf 03/2024) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

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



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

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

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

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

Übersicht stadtklimatischer Modelle

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

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

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

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im



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

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

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, bioklimatische 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, bioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, bioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder

Für die Begutachtung der stadtklimatischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Göppingen wurde das Modell FITNAH-3D genutzt, welches auf Grund der hohen Auflösung von 10x10 m Maschenweite besonders in dem komplexen Gelände mit größeren Höhenunterschieden und kleinräumigen Änderungen der Bodennutzung entscheidende Vorteile für die Darstellung dynamischer Prozesse bietet. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurde das Modell zudem in die übergeordnete Modellrechnung (FITNAH, GEO-NET 2024) für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg genestet.

3. Klima und Klimawandel im Raum Göppingen

3.1 Datengrundlage und Methodik

Beobachteter Klimawandel

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

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

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

Erwarteter Klimawandel

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative in Kombination mit Daten des Projektes REKLiEs-De. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt¹. Das bundesweite Forschungsprojekt ReKLiEs-De wurde von den Bundesländern initiiert, um robuste Informationen über die Bandbreiten und Extreme der zukünftigen Klimaentwicklung für die Politikberatung bereitzustellen. Das Projekt wurde von sechs Klimaforschungs-Institutionen durchgeführt, vom HLNUG koordiniert und Ende Dezember 2017 abgeschlossen. Im Projekt wurden neue globale Klimasimulationen aus dem fünften IPCC-Report (2013/2014) für Deutschland höher aufgelöst berechnet (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie – HLNUG, 2014-2017). Durch die Kombination der Modelldaten zur zukünftigen Klimaentwicklung von EURO-CORDEX und REKLiEs-DE wird die Datenbasis breiter aufgestellt, wobei einige verwendete Modelle in den beiden Klimaensembles auf die gleichen Klimamodelle verweisen.

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

¹ Homepage: www.euro-cordex.net

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 Göppingen ein Modellensemble bestehend aus 19 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tabelle A1 im Anhang). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den Modellergebnissen permanent aktualisiert werden, können bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind.

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

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt von der zusammengekommenen Siedlungsfläche Göppings am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. 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 (vgl. DWD 2020a).

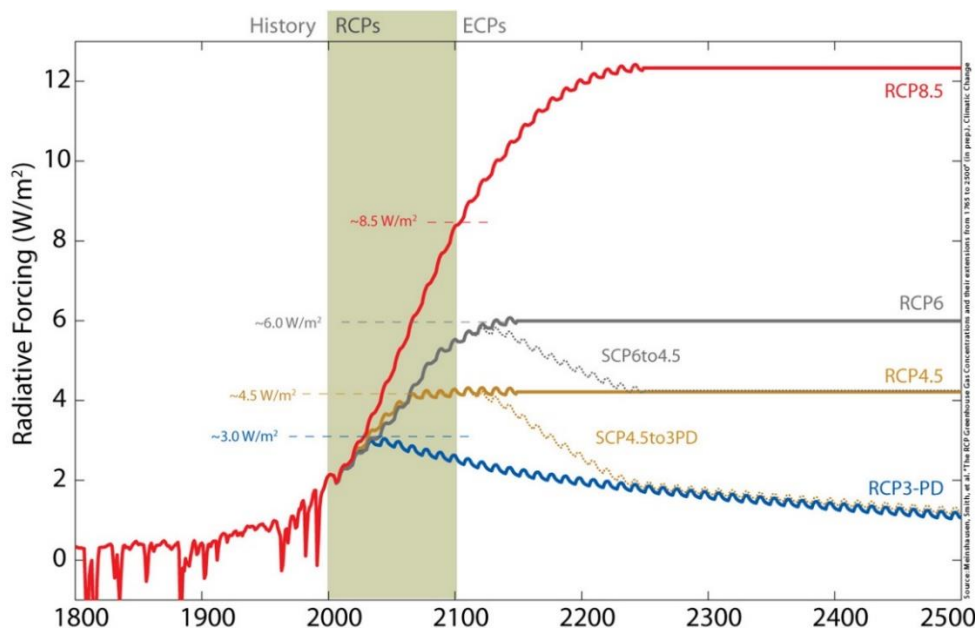


Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100² (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

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

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. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die sozioökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023). 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 enthalten.

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abbildung 7):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² 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 CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. In den letzten Dekaden befanden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Für die Einschätzung zukünftiger Klimarisiken wird das RCP 4.5 als Szenario für die Modellierung der zukünftigen Verhältnisse in Göppingen herangezogen. Ausgehend, dass in Zukunft weiterhin gewisse, aber nicht global umfassende Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgase erfolgen, wurde dieses Szenario als repräsentativ eingestuft. Ergänzend wurden in den Auswertungen die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 dargestellt. Unabhängig von den Klimaszenarien ist davon auszugehen, dass die im Gutachten modellierte Wetterlage mit hoher Hitzebelastung bei fortschreitendem Klimawandel in erster Linie häufiger auftreten wird und nicht in jedem Fall intensiver wird.

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. $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; siehe ReKliEs-De 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Göppingen wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

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

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

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

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

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

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet. Für die „Mitte des Jahrhunderts“ wurden zwei verschiedene Zukunftsperioden ausgewertet, wobei sich die Ergebnisse vorrangig auf die Periode 2031-2060 beziehen, die etwa in den Klimawirkungsanalysen des Umweltbundesamts betrachtet wird (UBA 2021). Gemäß den Vorgaben der Klimopass-Förderung wird zusätzlich ein näherer Zukunftszeitraum von 2021-2050 betrachtet:

- | | |
|--|-------------|
| ■ Referenzperiode: | 1971 – 2000 |
| ■ 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft) | 2021 – 2050 |
| ■ 2. Zukunftsperiode (mittelfristige 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 (vgl. Linke et al. 2016).

Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abbildung 8).

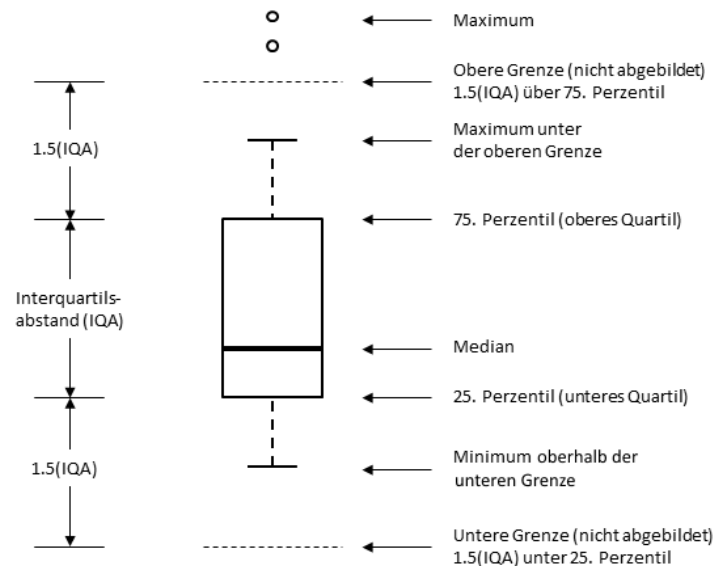


Abbildung 8: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

3.2 Gegenwärtiges Klima

Göppingen liegt wenige Kilometer nordwestlich der Schwäbischen Alb im Tal der Fils und ist geprägt durch eine größtenteils ländliche Bodennutzung mit über drei Viertel an Freiland und Waldflächen, sowie etwa 20 % bebauten Flächen. Das Relief mit markanten Höhenunterschieden zwischen dem Tal der Fils und dem Hohenstaufen prägen die Landschaft. Die mittlere **Jahres-Niederschlagssumme** von rund **884 mm/Jahr⁴** ist im Vergleich überdurchschnittlich gegenüber dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (1991 – 2020) (UBA 2022a). Zudem zeichnet sich die Region durch einen tendenziell geringen Wolkenbedeckungsgrad und eine hohe Anzahl an Sonnenstunden aus. Die **langjährige jährliche Mitteltemperatur** im Gebiet von Göppingen beträgt **9,8 °C** (DWD 2023b), mit Durchschnittswerten von rund 18 °C in den Sommermonaten (Abbildung 9). Damit ist die Stadt um 0,5 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (1991 – 2020) (UBA 2022a).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Göppingen – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,4 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind vier der letzten fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 10).

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



Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) und insbesondere heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Göppingen zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode **1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 39 auf 49 pro Jahr** und die Anzahl an **heißen Tagen von 7 auf 11 pro Jahr gestiegen** (vgl. Abbildung 11).

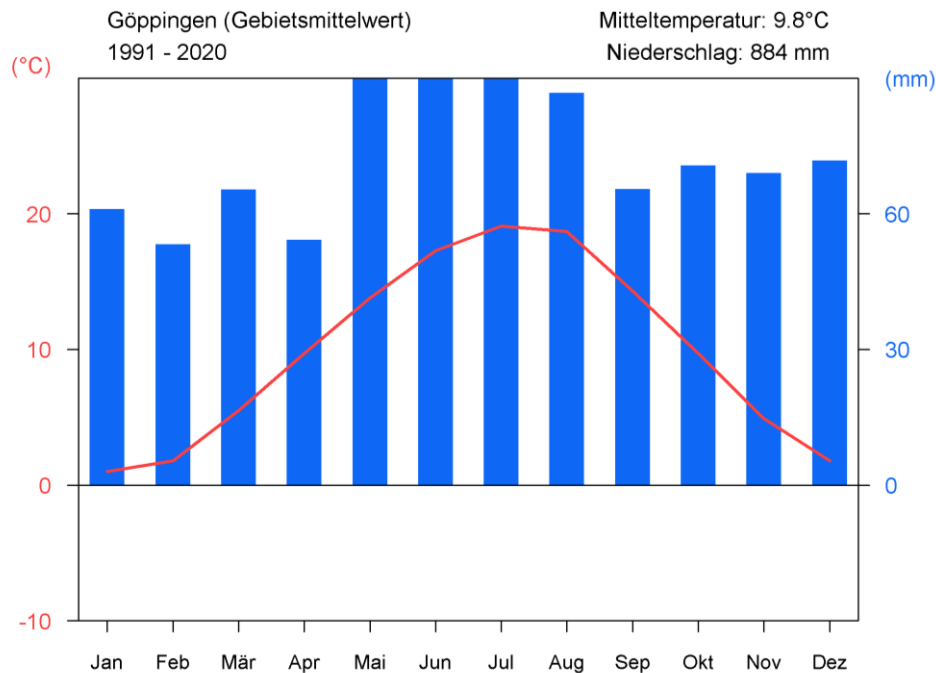


Abbildung 9: Klimadiagramm für Göppingen für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2023b)

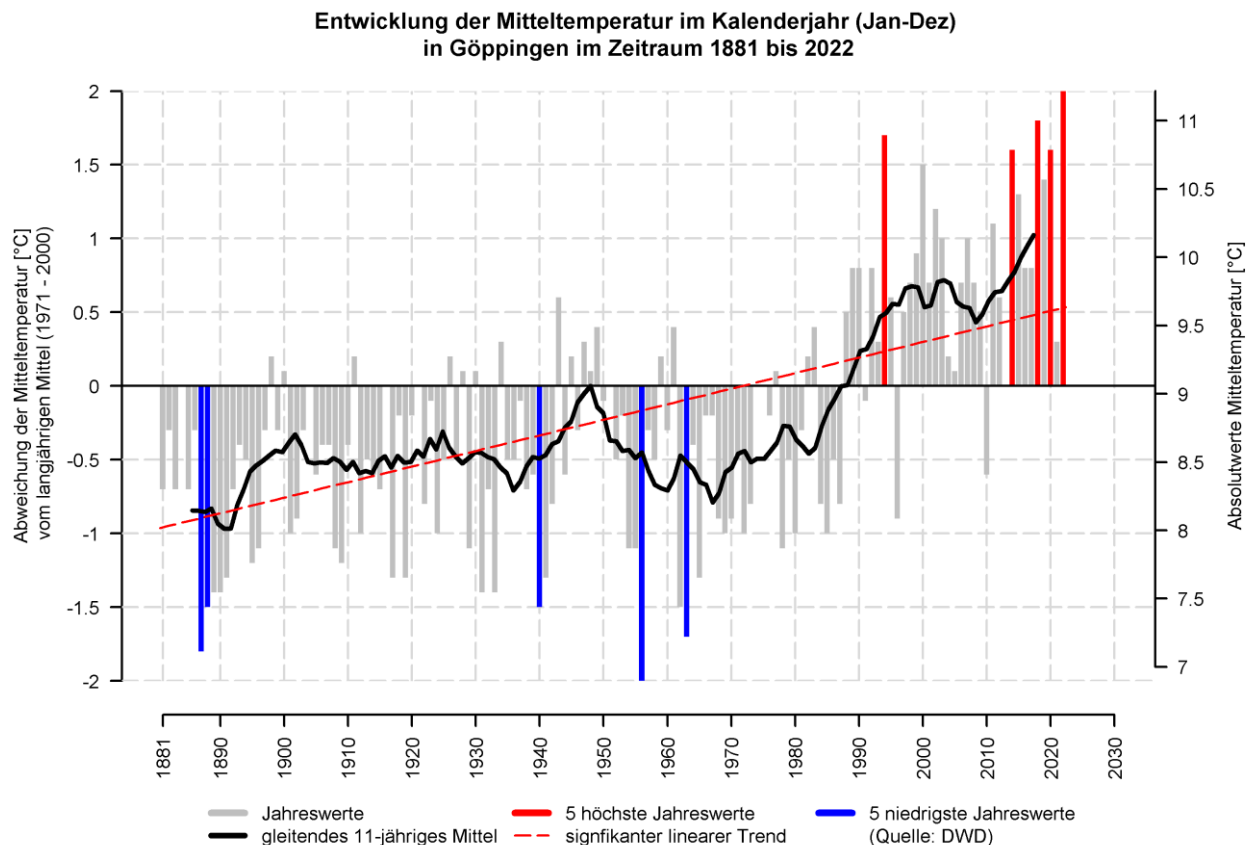


Abbildung 10: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Göppingen im Zeitraum von 1881 bis 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2023b)

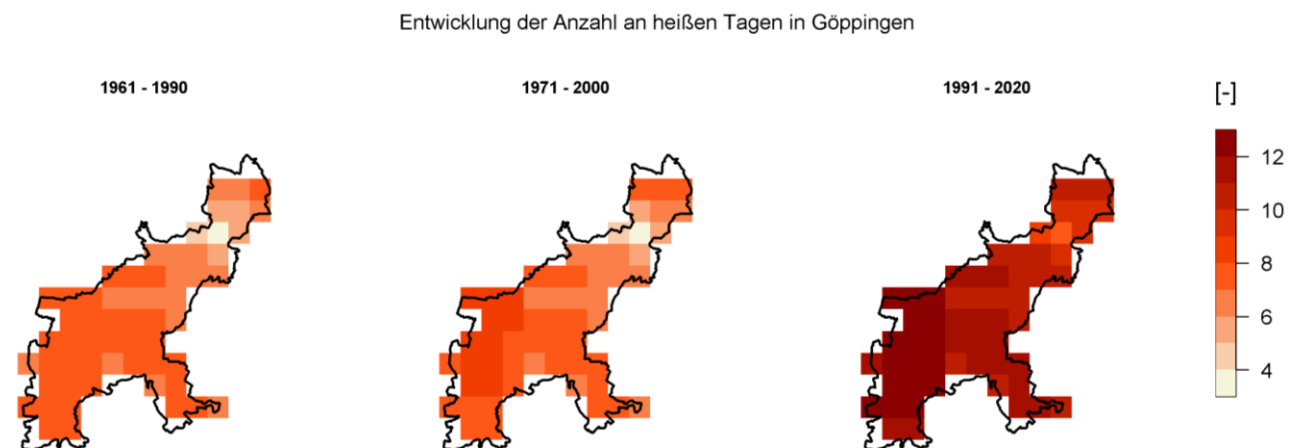


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in verschiedenen Perioden im Raum Göppingen (eigene Berechnung nach DWD 2023b)

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt im Raum Göppingen deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1991 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (Abbildung 12). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Periode 1991 bis 2022 schwankt die Bodenfeuchte um Werte von plus 18 % bis minus 38 % im Vergleich zum Mittelwert desselben Zeitraums. Im Sommer sind häufigere

negative Abweichungen erkennbar als in den anderen Jahreszeiten. Es ist davon auszugehen, dass es im Siedlungsgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

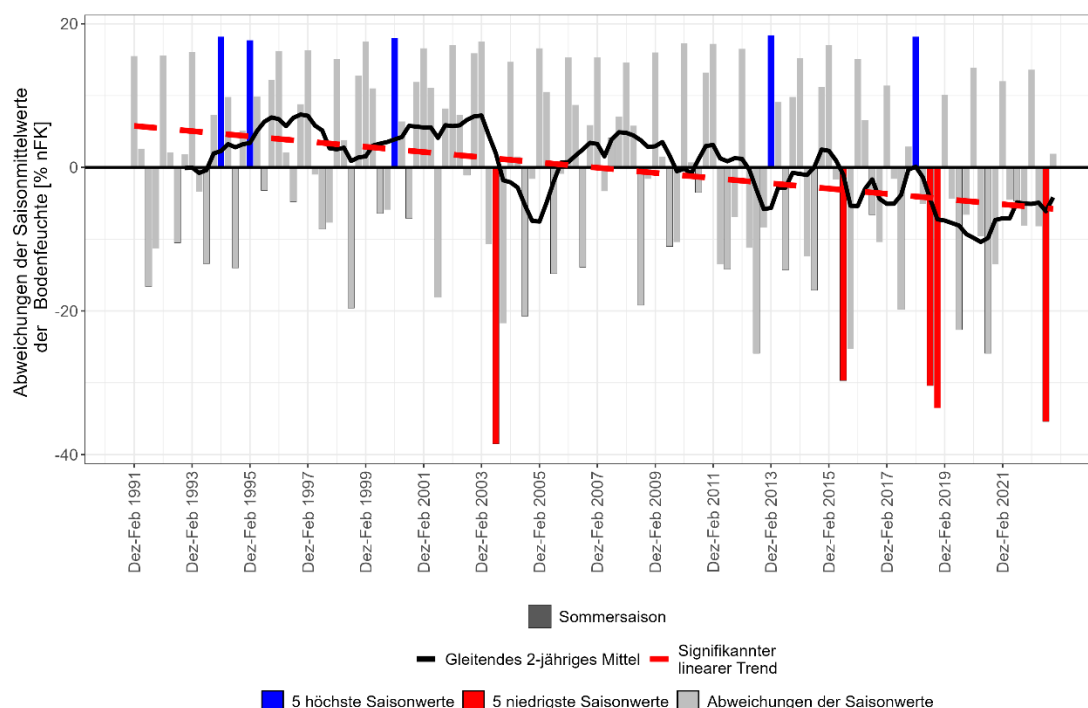


Abbildung 12: Saisonale Abweichungen vom Mittelwert der Bodenfeuchte in Göppingen im Zeitraum 1991 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2023b)

3.3 Zukünftige Klimaveränderungen

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Göppingen bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in

Abbildung 13 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁵ (Tabelle 3).

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

Für die Modellierung der zukünftigen klimatischen Verhältnisse wurde für Göppingen das Klimaszenario RCP 4.5 herangezogen, welches eine Bewertung des zukünftigen Klimawandels unter Einbeziehung globaler Klimaschutzmaßnahmen bei weiter mäßig steigenden Treibhausgasemissionen darstellt (sogenannter Mittelweg).

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



Das im Pariser Klimaabkommen angestrebte 2°-Ziel wird mit diesem Szenario nicht erreicht, was unter Einschätzung der aktuellen Situation als realistisch einzuschätzen ist.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Göppingen (P 15 = 15. Perzentil, P 85 = 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber Referenzzeitraum 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1	1,6	0,8	1,2	1,7	0,9	1,1	1,8
	RCP 4.5	0,9	1,3	1,6	1	1,5	1,9	1,6	2,2	2,8
	RCP 8.5	1	1,6	2	1,6	2,2	2,4	3,1	4,1	5,1
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,3	2,2	3	1,4	2,5	3	1,9	2,6	3,7
	RCP 4.5	1,7	2,9	4,2	2,3	3,5	4,4	3,2	4,8	5,3
	RCP 8.5	2,2	3,3	4,2	3,1	4,5	6,3	5,9	8,7	11,2
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,4	1,1	2,7	0,6	1,1	2,5	0,5	1,3	2,5
	RCP 4.5	1	1,6	2,4	1,2	1,9	2,9	1,8	2,4	3,7
	RCP 8.5	1,5	1,8	2,4	1,6	2,7	3,6	4,2	5,7	7,4

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglickeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modelsergebnissen). Der in

Abbildung 13 enthaltene Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles.

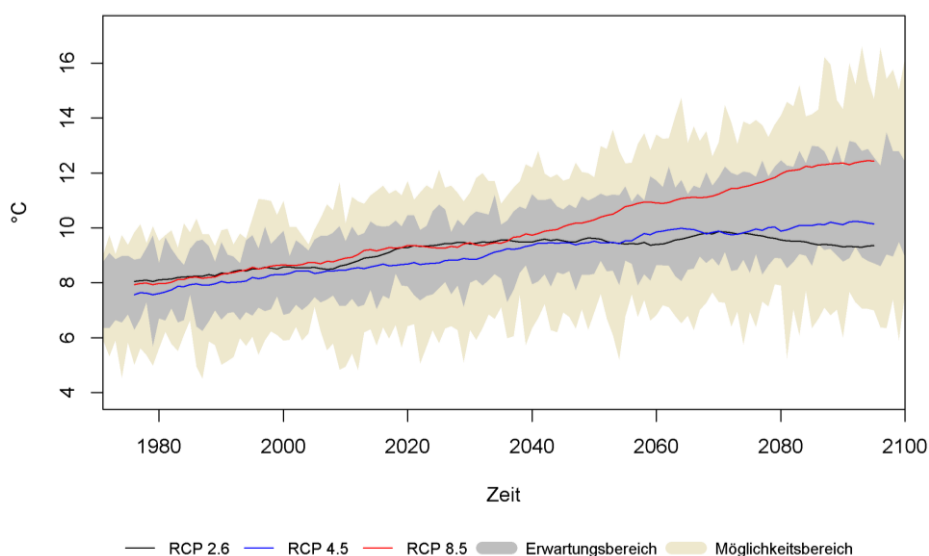


Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Göppingen (alle RCP-Szenarien)⁶

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer die größten und im Frühjahr die geringsten Temperaturänderungen auf (Abbildung 14). Dieses Muster wird sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen).

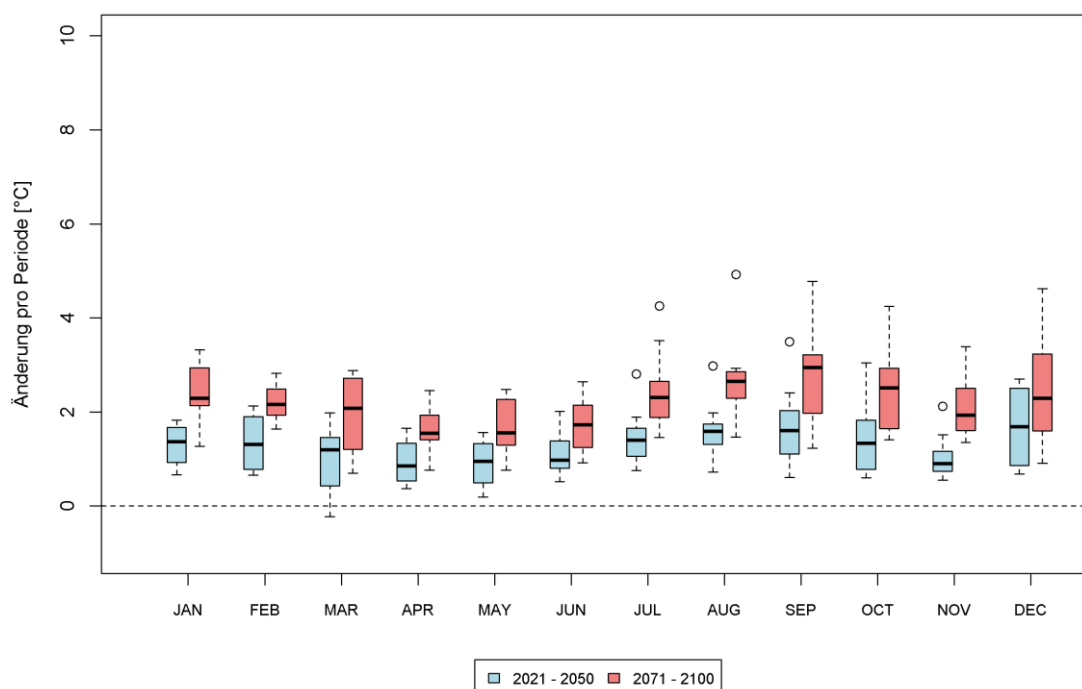


Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Göppingen (RCP 4.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000

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 zukünftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit 28 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur gut 7mal jährlich auftraten.

Tropennächte (Nächte mit Temperaturen über 20 °C) treten in Göppingen derzeit sehr selten auf (im Mittel < 1 Tropennacht pro Jahr). Während in naher Zukunft (2021-2050) 1 bis 3 Tropennächte für das RCP 4.5 projiziert werden, sind in der mittelfristigen Zukunft (2031 – 2060) bereits ca. 2 – 6 Tropennächte pro Jahr zu erwarten, 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 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären bis Ende des Jahrhunderts bis ca. 17 Tropennächte im Mittel pro Jahr in Göppingen 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. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um

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



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 im Raum Göppingen zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um ca. 1 bis 7 Tage (Tabelle 4).

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Göppingen (P 15 = 15. Perzentil, P 85 = 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	7,5	11,1	20,2	7,4	13,3	21,4	8,9	11,6	18,1
	RCP 4.5	9,6	12,8	16,1	10,8	15,4	20,8	18	21	27,3
	RCP 8.5	12,1	14,9	19,1	17,2	20,3	28,9	41,5	50,7	67,2
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	2	3,8	9,9	2,1	3,4	9,3	3	5	11,2
	RCP 4.5	3,6	6,2	7,7	4,8	7,3	9,7	7,4	9,7	13,7
	RCP 8.5	4,7	6,5	12,2	7,6	9,5	15,4	19,7	28,4	39
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,6	1,1	1,7	0,5	1,2	1,6	1	1,3	2,4
	RCP 4.5	1	1,8	3	1,6	2,1	3,3	2,5	4,9	6,1
	RCP 8.5	1,4	2,2	3,9	2,5	3,6	6,2	12,2	17,3	27,7
Änderung der Länge von Hitze- perioden (aufei- nanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	0,6	1	3,1	0,5	1,2	2,5	0,8	1,2	3,7
	RCP 4.5	0,9	1,5	2,6	1	1,6	2,7	1,4	2,8	4,8
	RCP 8.5	0,7	1,4	3,7	1,4	2,2	4	4	7,3	10,4

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

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 4.5 einen Rückgang in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 15). Für den Herbst werden ebenfalls (leichte) Abnahmen der klimatischen Wasserbilanz projiziert, während für den Frühling und Winter Zunahmen erwartet werden, sodass im Jahresmittel kein eindeutiger Trend besteht.

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

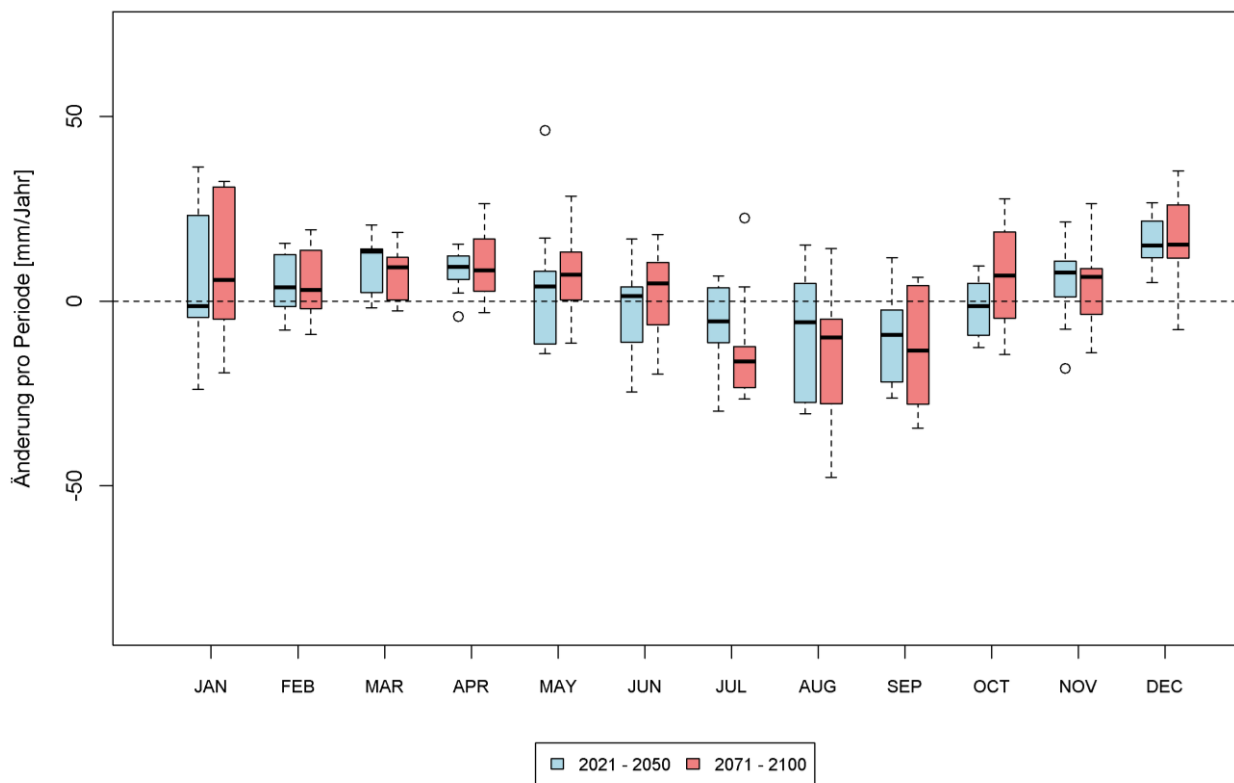


Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag – Verdunstung) in den Zukunftsperioden in Göppingen (RCP 4.5)

4. Analysemethoden

4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D

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

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

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

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

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

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

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der



bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturböhe

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

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

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

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

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

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 100 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Abbildung 16 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, 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.

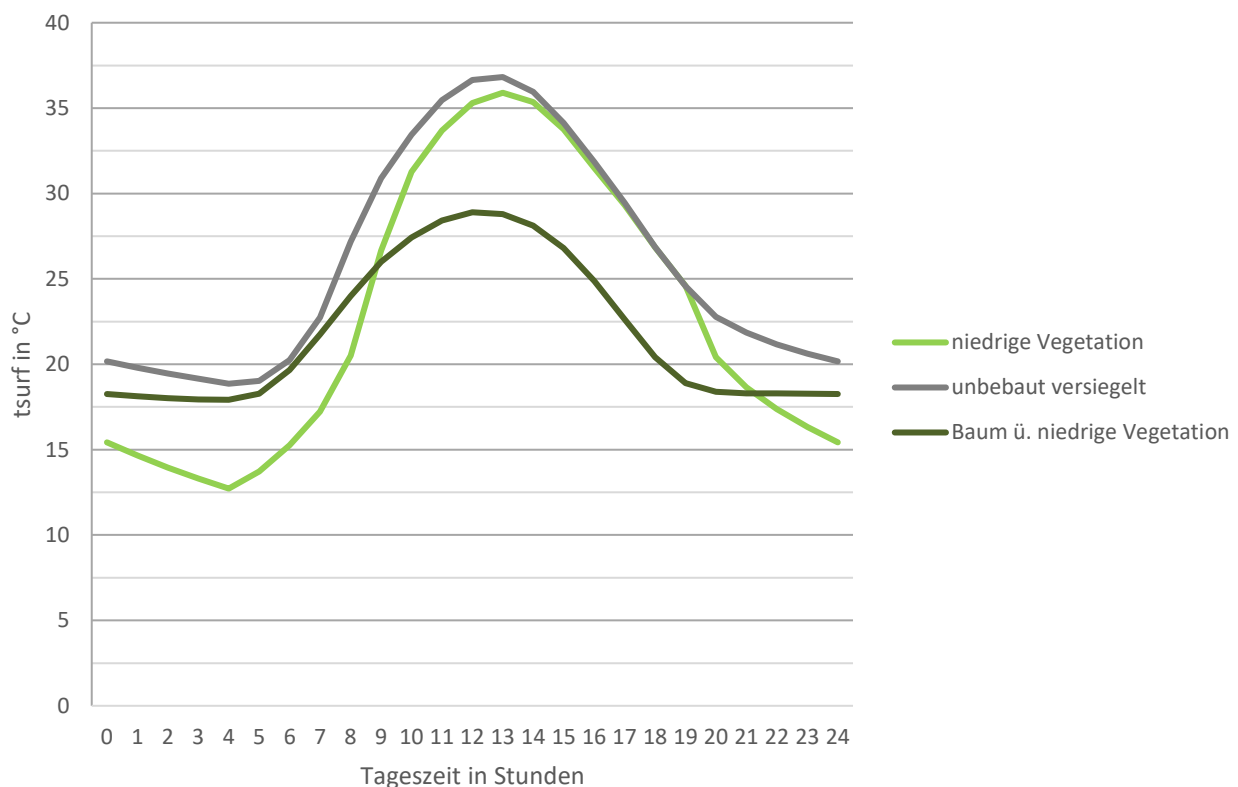


Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

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

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

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

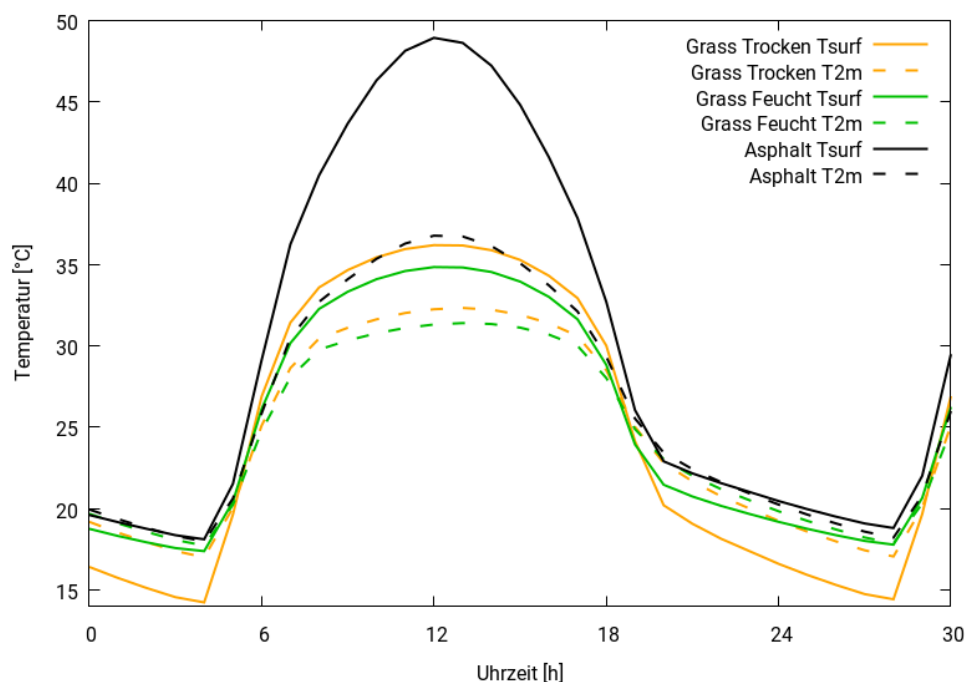


Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

4.1.1 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.

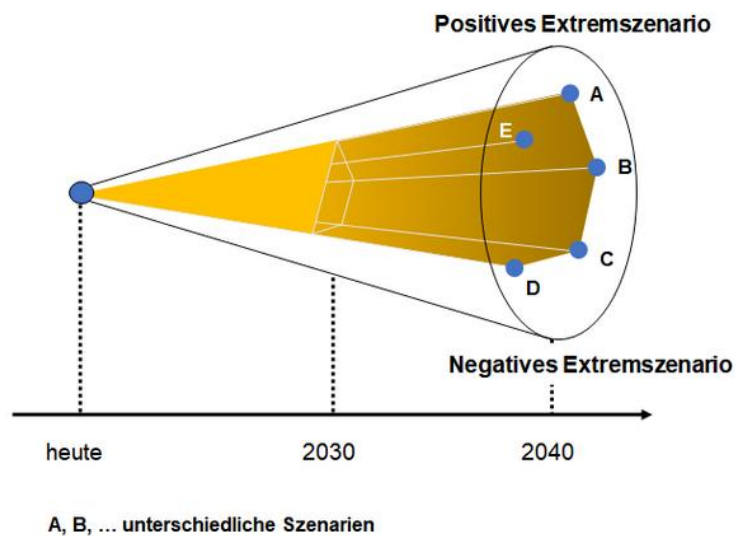


Abbildung 18: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont ist die Periode 2021 – 2050 basierend auf dem 50. Perzentil des RCP-Szenarios 4.5. Das zweite Zukunftsszenario umfasst die Modellierung für die Periode 2071-2100 im gleichen RCP-Szenario 4.5. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum aktuellen Referenzzeitraum 1991 – 2020 (Grundlage für die Modellierung der Gegenwart) wurde auf die Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+1,1 °C bis 2021-2050 bzw. + 1,8 °C bis 2071-2100). Die Werte weichen damit von jenen in Tabelle 3 ab, da für einen realitätsnäheren „Ist-Zustand“ als Referenzszenario, der bereits beobachtete Klimawandel zwischen den Perioden 1971-2000 und 1991 bis 2020 herausgerechnet wurde.

Für die Klimawandel-Szenarien wurden zusätzlich die Auswirkungen einer zunehmenden abnehmenden Bodenfeuchte berücksichtigt (vgl. Kap 3.2). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde im RCP-Szenario 4,5 auf 30 % gesetzt.

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

Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress / Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher nicht abgebildet werden, da diese Daten bisher nicht flächendeckend erhoben werden und nicht für zukünftige Veränderungen und Einflüsse des Klimawandels auf die Vegetation vorliegen.

4.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten

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

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

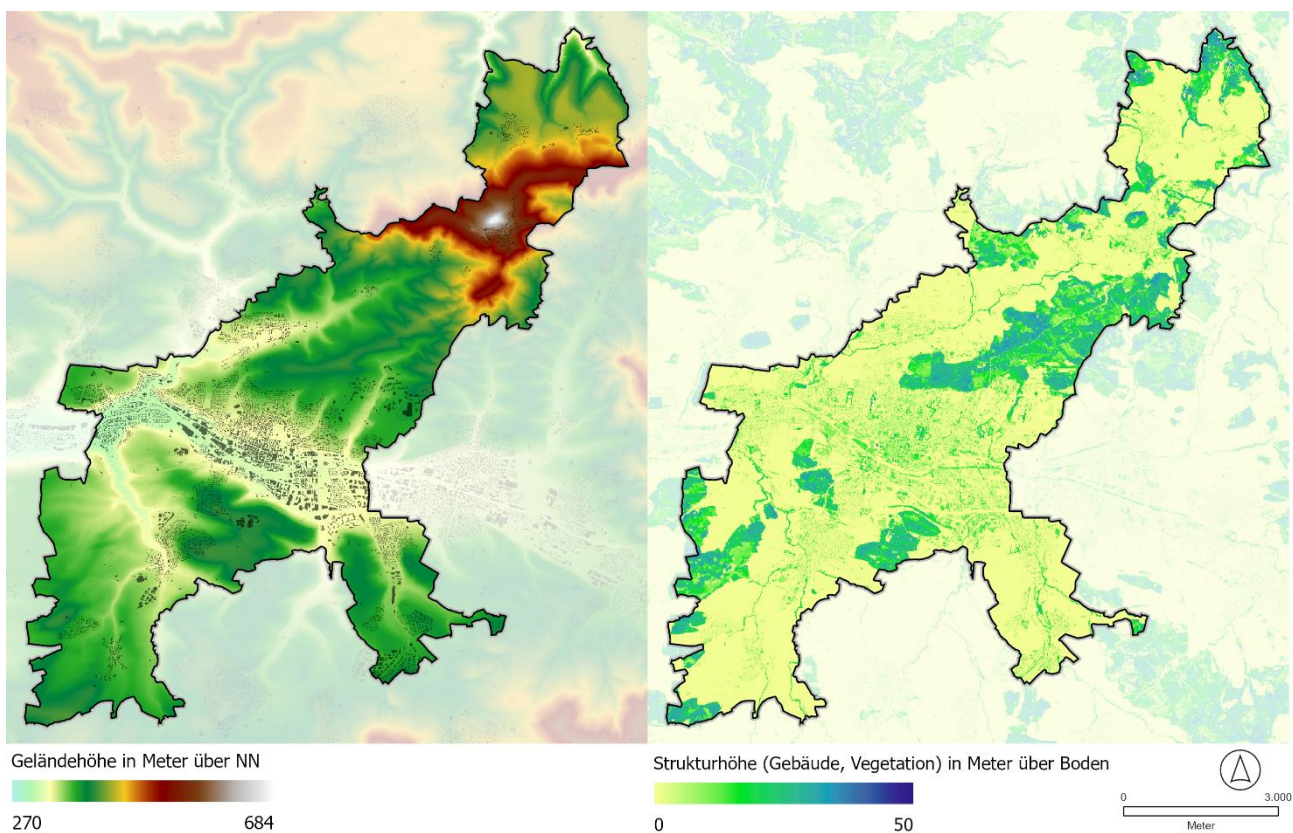


Abbildung 19: Digitales Geländemodell mit Gebäudekulisse (links) und Strukturhöhe (rechts) für das Untersuchungsgebiet

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadt- bzw. Gemeindegebiet sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 179 km² (Abbildung 19), weist also einen etwa dreifach so großen Flächeninhalt auf wie das Gemeindegebiete selbst (59,2 km²). Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor.

Das Stadtgebiet von Göppingen ist durch das hügelige Relief zwischen dem Tal der Fils mit dem niedrigsten Punkt um 270 m ü. NN am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes und dem Hohenstaufen im Norden mit einer Höhe von 684 m ü. NN geprägt. Die hieraus entstehenden Kaltluftabflüsse an den Hängen und die

weitgehend ländliche und naturnahe Bodennutzung mit landwirtschaftlichen Flächen und Wäldern ergeben für das Stadtgebiet prinzipiell relativ günstige Ausgangsbedingungen für dynamische Luftaustauschprozesse.

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

Tabelle 6: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters

Datenquelle	Aktualität	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhenmodell (DGM)	2021	ASCII-Punkt-wolke „XYZ“	1 m	direkt Verwendung
ALKIS-Nutzung	2021	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs-klassen
CIR/RBGI-Luftbilder	2021	TIFF	20 cm	Berechnung NDVI für Vegetations-maske und versiegelte Flächen
Oberflächenmodell (DOM)	2021	ASCII-Punkt-wolke „XYZ“	1 m	Berechnung eines normalisierten Oberflächenmodells (DOM minus DGM), Verschneidung mit NDVI für Vegetationshöhen und mit Gebäude-umrissen für Gebäudehöhen
3-D Gebäudemodell (LoD2)	2021	City-GML	-	Gebäudehöhe und -umriss

Für die Vegetationsbestimmung lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2019 und 2021 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von „0“ war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe aus dem normalisierten Oberflächenmodell konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden. 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 10 m x 10 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

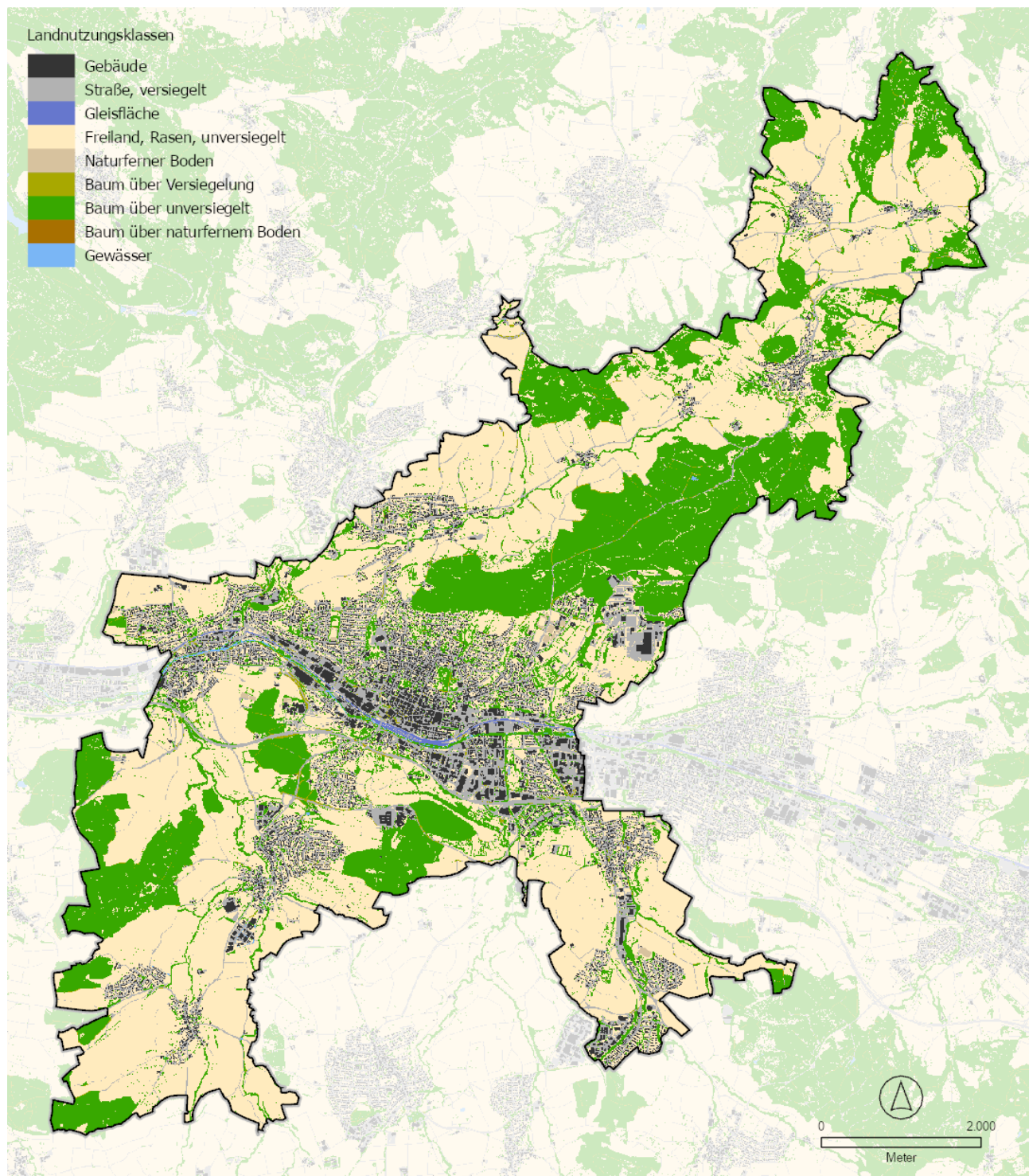


Abbildung 20: Klassifizierte Landnutzung im 10 m Modell-Raster für die Gegenwart

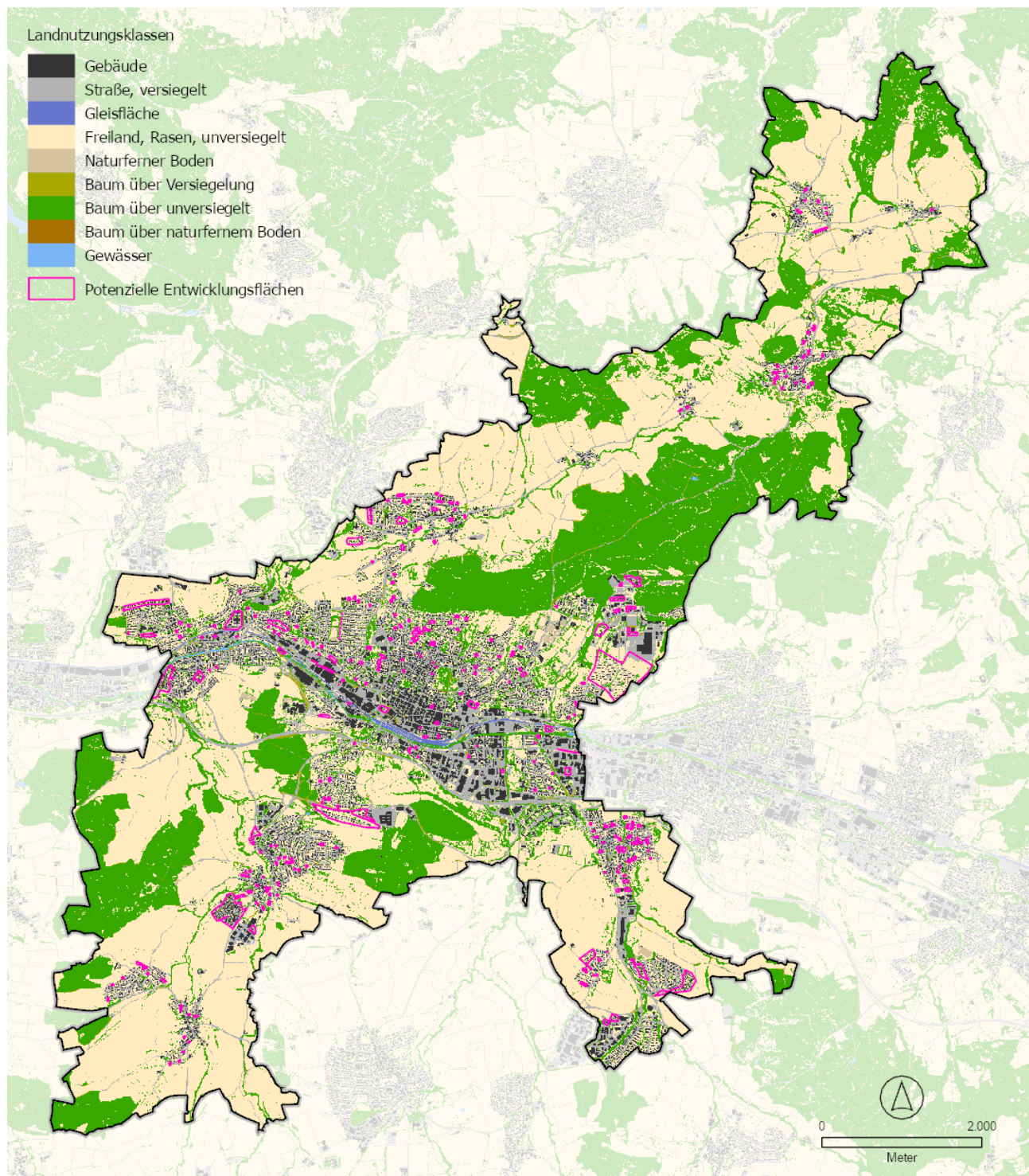


Abbildung 21: Klassifizierte Landnutzung im 10 m Modell-Raster für das Zukunftsszenario RCP 4.5 für den Zeitraum 2021-2050

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Göppingen repräsentieren. Schon im Bau befindliche Baustrukturen wurden größtenteils in die Modelleingangsdaten eingearbeitet. Für das Zukunftsszenario wurden bereits vorliegende Bebauungspläne, bzw. Planentwürfe berücksichtigt und in die Eingangsdaten für das Zukunftsszenario mit Bezugszeitraum 2021-2050 eingearbeitet (Tabelle 7). Abbildung 20 und 21 zeigen die in das Modell eingeflossenen Landnutzungsklassen im gesamten Untersuchungsgebiet für die Gegenwart und das Zukunftsszenario.



Tabelle 7: In die Modelleingangsdaten eingeflossene Flächen für geplante Bauvorhaben

Entwicklungsfläche	Standort	Einarbeitung
Marbachweg / Furtweg / Mühlenweg, Wohnen	Mühlenweg, Bartenbach	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Syrisch-orthodoxe Kirche, Gemeinbedarf	Filsstraße, Faurndau	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Im Freihof, Wohnen	Im Freihof, Faurndau	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Ehemaliges Kleemann-Areal, Wohnen, gemischte Nutzung	Kleemannweg, Faurndau	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Telekom, Gewerbe & Wohnen	Salamanderstraße, Faurndau	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Opelstraße, Wohnen	Opelstraße, Faurndau	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Bergfeldtrauf, Wohnen	Eichertstraße, Göppingen	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Kindertagesstätte, ASS, Gemeinbedarf	Nördliche Ringstraße, Göppingen	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Frauenstraße, Wohnen	Frauenstraße, Göppingen	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Schulcampus, Gemeinbedarf	Hohenstaufenstraße, Göppingen	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Quartier am Fischbergele, gemischte Nutzung, Gemeinbedarf	Am Fischbergele, Göppingen	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Stauferpark, Wohnen, gemischte Nutzung	Am Golfpark, Göppingen	Grobentwurf (klimaoptimiert) auf Basis Planungen von 2018
Karl-Weber-/Hofstraße, Wohnen	Karl-Weber-Straße, Holzheim	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Manzen Höhenweg, Gemeinbedarf und Wohnen	Höhenweg (Manzen), Holzheim	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Wiesäcker II, Wohnen	Wiesäcker (St. Gotthardt), Holzheim	Einarbeitung Planunterlagen in Zukunftsszenario 2021-2050
Ortsrand Jebenhausen	Boller Straße, Jebenhausen	Einarbeitung als Mischpixel in Zukunftsszenario 2021-2050
Aqua-Römer, Gewerbe	Im Bühl, Jebenhausen	Einarbeitung als Mischpixel in Zukunftsszenario 2021-2050
Weitere potenzielle Plangebiete	Gesamtstadt	Einarbeitung als Mischpixel in Zukunftsszenario 2021-2050
Bestehende Baulücken und weitere potenzielle Plangebiete	Per Zufall 50% ausgewählte Flächen	Einarbeitung als Mischpixel in Zukunftsszenario 2021-2050

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

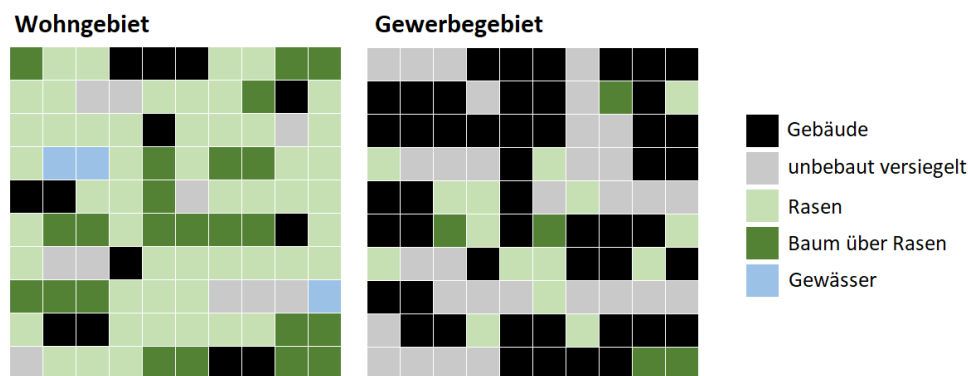


Abbildung 22: Prinzipskizze des Mischpixelansatzes. Verteilungsbeispiel für eine als Wohngebiet (links) und als Gewerbegebiet (rechts) umgesetzte Entwicklungsfläche.

4.2.1 Rahmen- und Randbedingungen

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

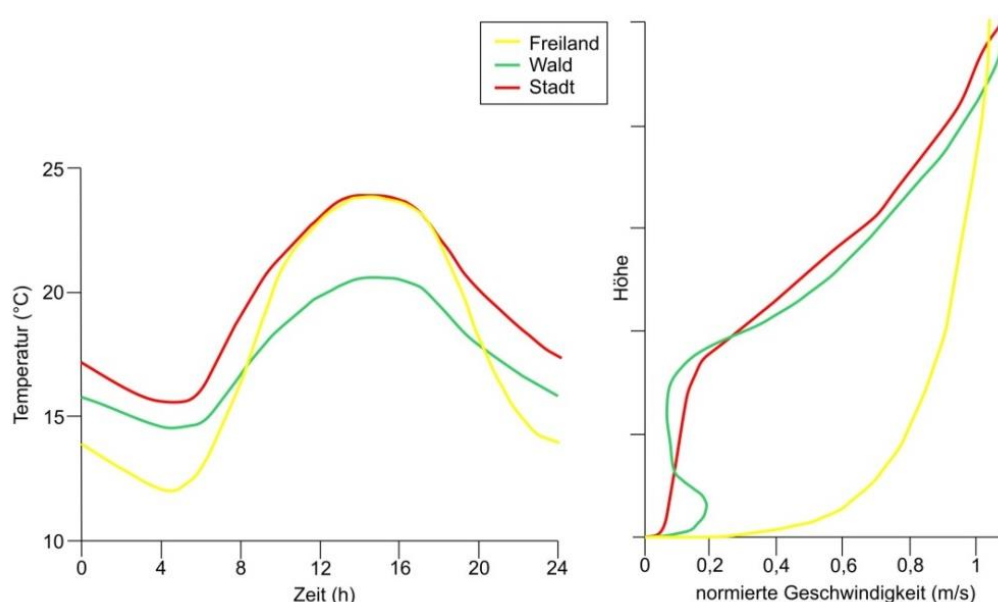


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

In **Abbildung 23** sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

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

am Boden 20,7 °C in der Ist-Situation (Gegenwart) bzw. 21,8 °C (Klimaszenario RCP 4.5, 2021-2050) sowie 22,5 °C für den Zeitraum 2071 -2100.

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch im Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wurde die Bodenfeuchte im RCP-Szenario 4.5 entsprechend auf 30 % nFK gesetzt, welches dem Welkepunkt entspricht. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt.

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

4.2.2 Modellausgabegrößen

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 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 die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie 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]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potenzielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten „post-processing“-Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und von Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 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 bioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesgangs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.



Tabelle 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
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s*m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr

4.2.3 Qualitätssicherung

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

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

4.2.4 Unsicherheiten und Herausforderungen

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

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

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

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere

dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 °C pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

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

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

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

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Da ein städtischer Geodatenatz i.d.R. und auch

hinsichtlich dieser Analyse nicht verfügbar ist, können diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

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

Kapitel 4.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Aus dem Jahre 2021 stammen das Geländehöhenmodell und das Oberflächenmodell. Während sich die Geländehöhe seitdem nicht (oder zumindest nicht in relevanter Größenordnung) verändert hat, bestimmt das Oberflächenmodell die Vegetations- und teilweise Gebäudehöhen. Die Vegetationshöhen der öffentlichen Baumbestände in Göppingen wurden allerdings mit Informationen aus 2021 ergänzt. Die Infrarot-Luftbilder (RGBI/CIR), welche (neben der Festlegung der versiegelten Flächen) die Verortung von Vegetation definiert, sind aus 2021 und damit relativ aktuell. Die Datensätze zu Gebäuden und deren Höhen (LoD2), sowie der ALKIS-Nutzung stammen aus 2021 und somit damit ausreichend aktuell. Die geplanten Bauvorhaben auf den Entwicklungsflächen wurden bis Oktober 2024 berücksichtigt.

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

5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 4.2.1). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse werden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten an die Auftraggeber übergeben.

5.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion

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

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

Die höchsten nächtlichen Belastungen (um 20 °C in der Ist-Situation, und bis über 21 °C im RCP-Szenario 4.5 treten vorwiegend in der Göppinger Innenstadt, sowie in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (z.B. Gewerbegebiet im Bereich südlich der Jahnstraße), aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen (z. B. Stuttgarter Straße) auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den ansonsten überwiegend aufgelockerten Siedlungsbereichen als auch in den dörflichen Gemeindeteilen angrenzend an landwirtschaftliche Flächen (ca. 15 – 16 °C bzw. 17 bis 18 °C im RCP-Szenario 4.5 zu finden. Als nachts besonders kühle Siedlungsbereiche sind beispielsweise das Wohngebiet Hailing angrenzend an das Oberholz oder der südlich der Bundesstraße liegende Stadtteil Berg zu nennen. Beide Quartiere zeichnen sich derzeit durch eine relativ hohe Durchgrünung aus.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland - vor allem die landwirtschaftlichen Flächen um die Stadtteile außerhalb der Kernstadt – kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 13 - 15 °C (bzw. 15 – 16 °C im Klimawandel-Szenario RCP 4.5 auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen in den Waldgebieten Oberholz oder Eichert liegen bei etwa 15,5 – 18 °C (bzw. im Klimawandel-Szenario RCP 4.5 bis zu 19 °C) in der Nacht, wobei die Werte hangaufwärts deutlich abnehmen. Auch wenn sie teilweise höhere Temperaturen aufweisen, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach ausbilden.

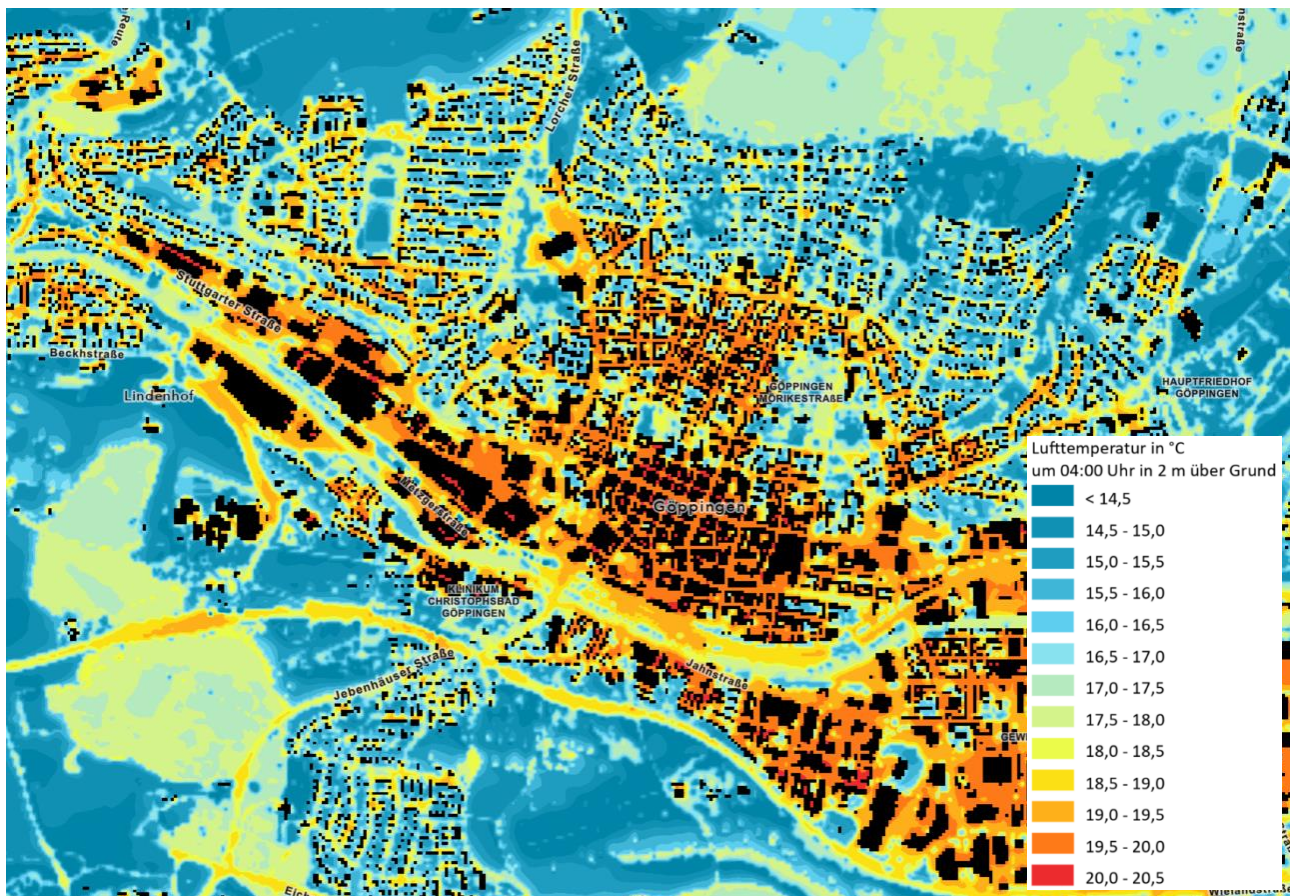


Abbildung 24: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).

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

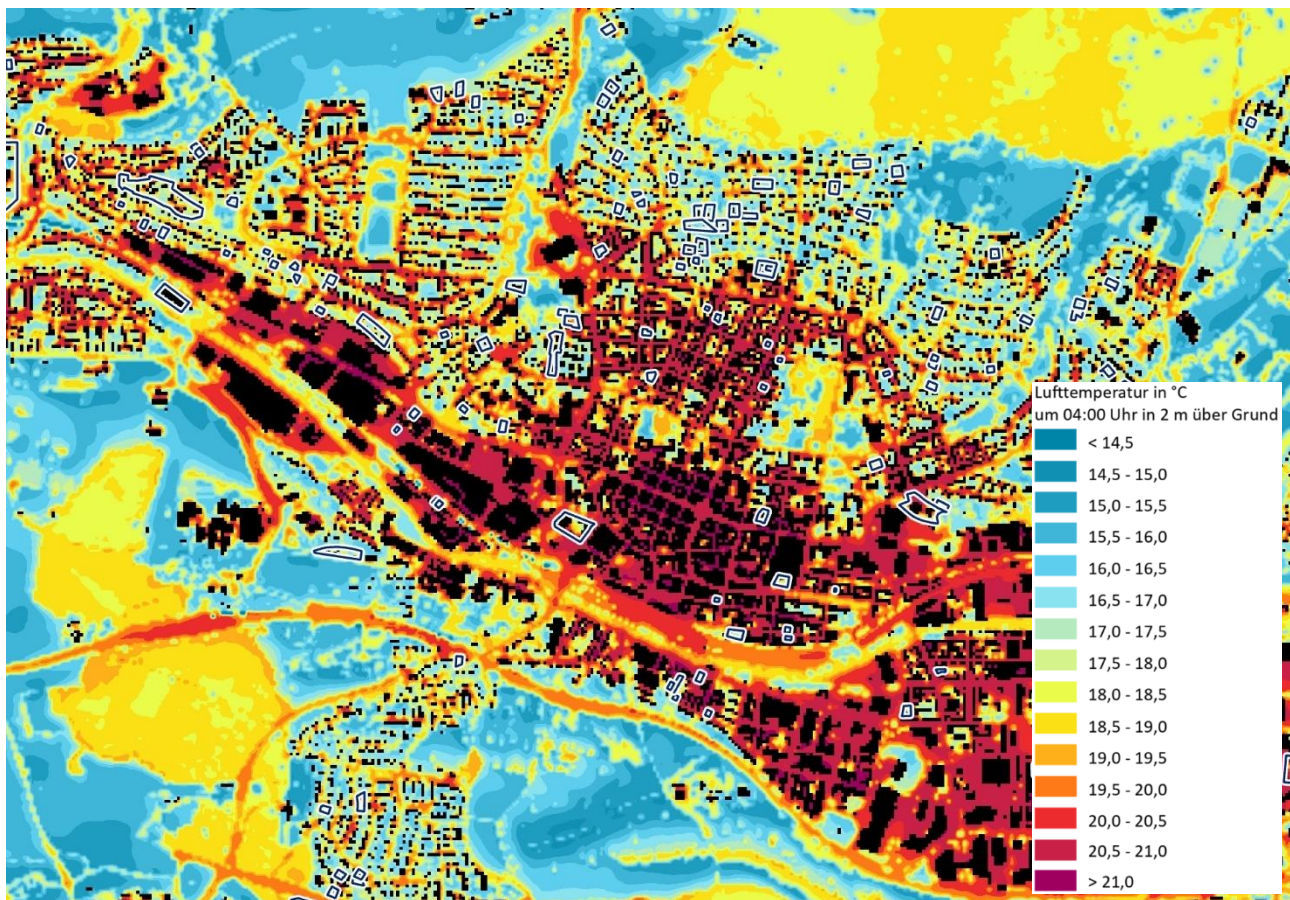


Abbildung 25: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Klimaszenario RCP 4.5 (2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen blau umrandet).

Die Modellergebnisse des Zukunftsszenarios zeigt entsprechend ihres Temperatursignals von +0,8 °C ein entsprechend erhöhtes Temperaturniveau. Die Temperaturzunahmen finden dabei weitestgehend gleichmäßig über alle Landnutzungsklassen hinweg statt. Größere Unterschiede sind lediglich im Bereich der Entwicklungsflächen zu beobachten, was auf das zusätzliche Bauvolumen und die erhöhte Oberflächenversiegelung zurückzuführen ist. Insgesamt führen die verschiedenen angenommenen Entwicklungsvorhaben zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung benachbarter Siedlungsflächen und auch das Temperaturniveau fügt sich grundsätzlich in jenes der bestehenden Wohn- bzw. Gewerbeflächen ein. Eine detailliertere Bewertung der Entwicklungsvorhaben findet in Kapitel 6.3.3 statt.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m³ pro m² pro Stunde. In Abbildung 26 und 27 wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für den Großteil der Siedlungsflächen und ihr direktes Umfeld dargestellt. Über versiegelten Flächen findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über den landwirtschaftlichen Freiflächen produziert, aber auch an den Hängen südlich und nördlich oberhalb der Fils. Innerhalb der Siedlungsquartiere ist zudem eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion (z.B. Mörikeanlagen und Schlosswäldchen) zu erkennen. Mit Bäumen bestandene Flächen sowie auch die Waldflächen zeigen oft eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate, obwohl diese Flächen noch deutlich mehr Kaltluft produzieren als versiegelte oder stark bebaute Flächen.

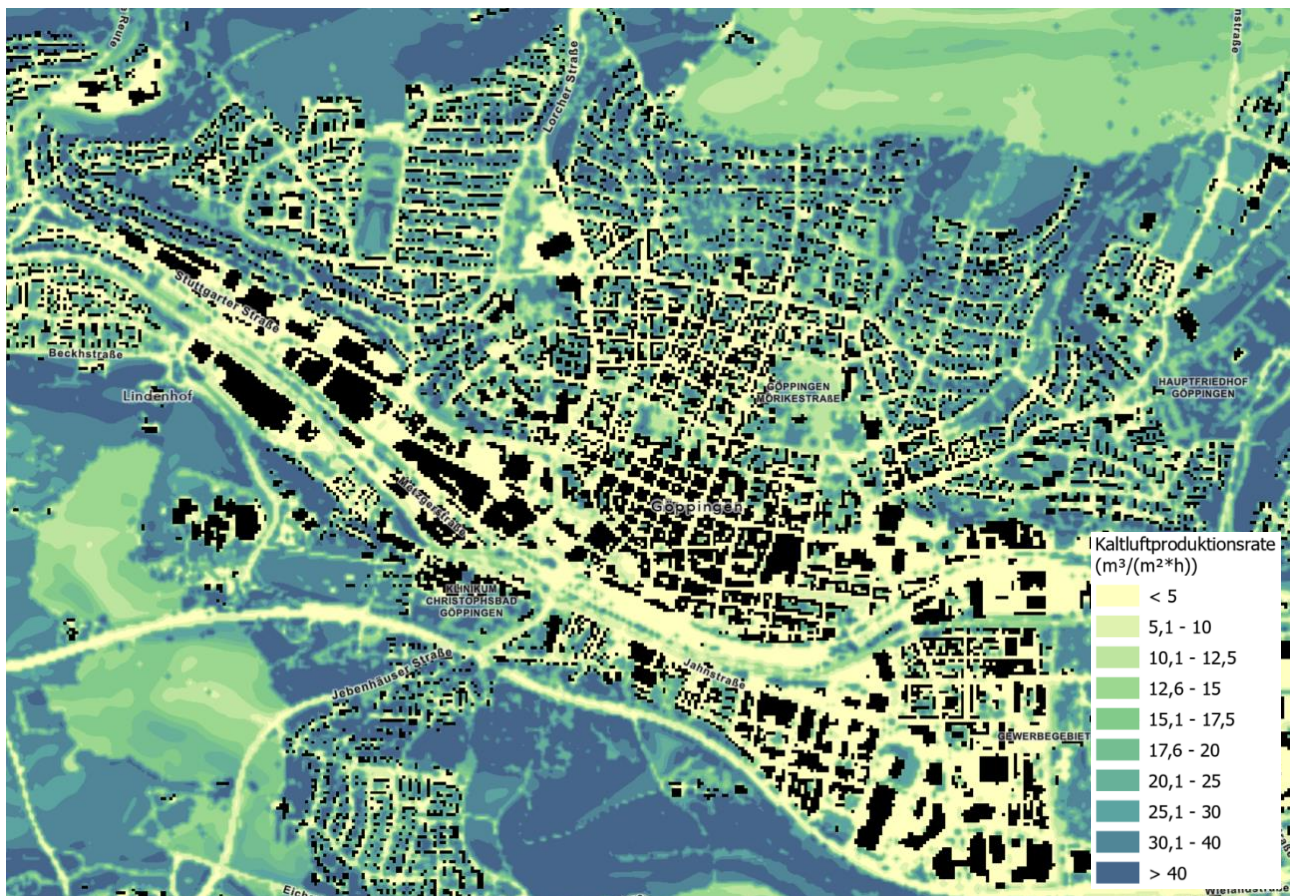


Abbildung 26: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).

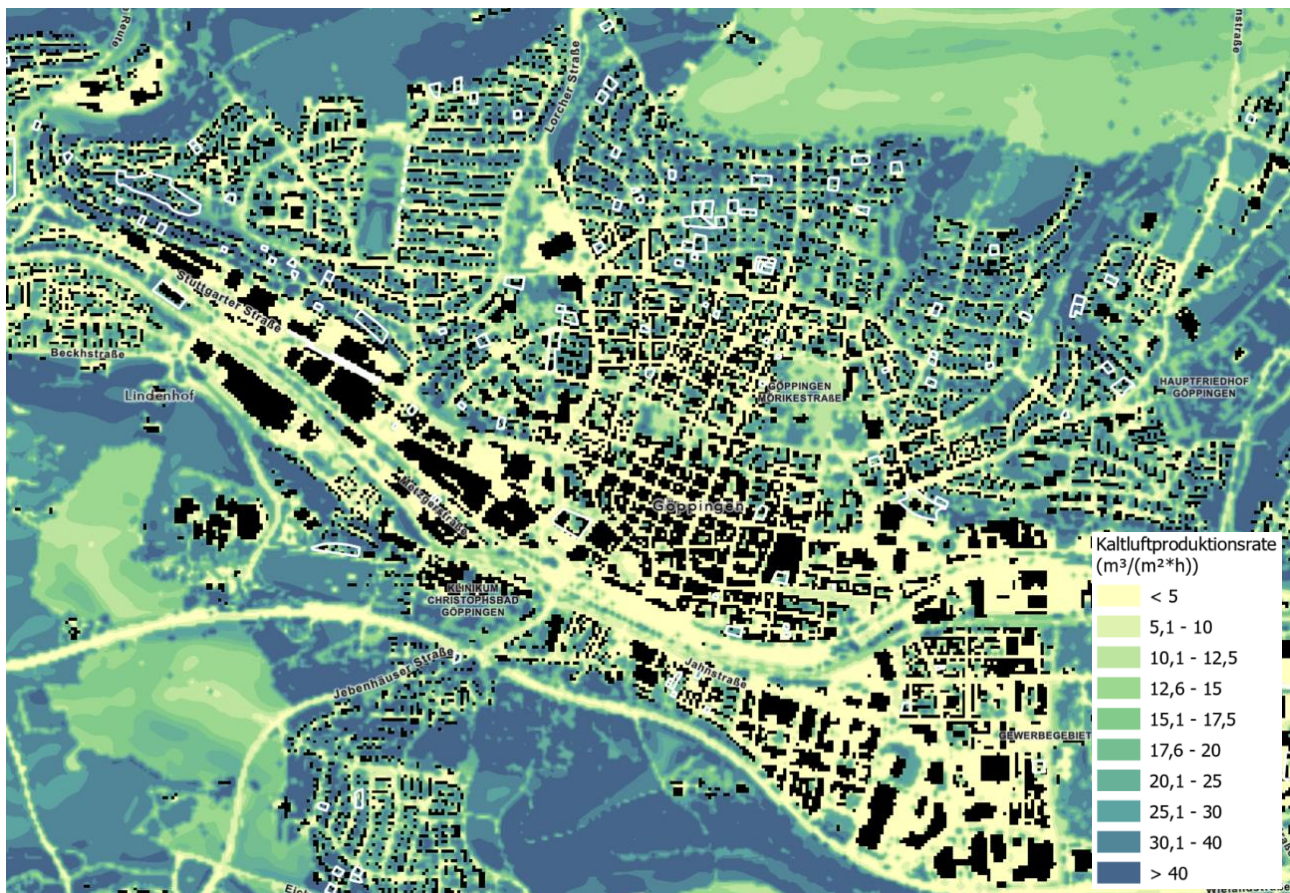


Abbildung 27: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen weiß umrandet).

Im Zukunftsszenario kommt es gegenüber dem Ist-Zustand abgesehen von den Entwicklungsflächen zu keinen wesentlichen Veränderungen der Kaltluftproduktion. Innerhalb der Entwicklungsflächen ist dagegen entsprechend der angenommenen Neubebauung eine Reduktion der Kaltluftproduktion zu erwarten, wobei die insgesamt moderaten Abnahmen im Allgemeinen nicht dazu führen, dass benachbarte Siedlungsflächen negativ beeinflusst werden. Bei zukünftiger Entsiegelung, wie etwa im Bereich der Klinik am Eicherts geplant, verbessert sich die Kaltluftentstehung deutlich.

5.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt je nach Standort eine große Variabilität. An den Hängen nördlich und südlich oberhalb der Stadt werden lokal hohe Werte von bis zu ca. 50 m³ pro Meter und Sekunde erreicht – so zum Beispiel in dem kleinen Kerbtal nördlich der Klinik am Eichert. Die höchsten Werte für den Kaltluftvolumenstrom im Untersuchungsgebiet treten in den Hanglagen im nördlichen Stadtgebiet in der Nähe des Hohenstaufen mit lokal über 80 m³/m/s auf. Treffen die Kaltluftmassen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei und versorgen alle Ortschaften und Stadtrandgebiete mit der Ausnahme stark versiegelter und bebauter Gewerbegebiete mit Frischluft. Insbesondere die quer zur Strömungsrichtung ausgelegte Gewerbebebauung nördlich und südlich der Fils verhindert ein stärkeres Einstromen von Kaltluft tiefer in den Siedlungskörper. Insbesondere die Innenstadt, aber auch der nördlich angrenzende Stadtteil bis zur nördlichen Ringstraße, sowie einzelne Gewerbegebiete südöstlich der Fils zeigen durch die Ferne zu größeren Kaltluftproduktionsgebieten und der dichten Bebauung eine relativ geringe Kaltdurchströmung auf.

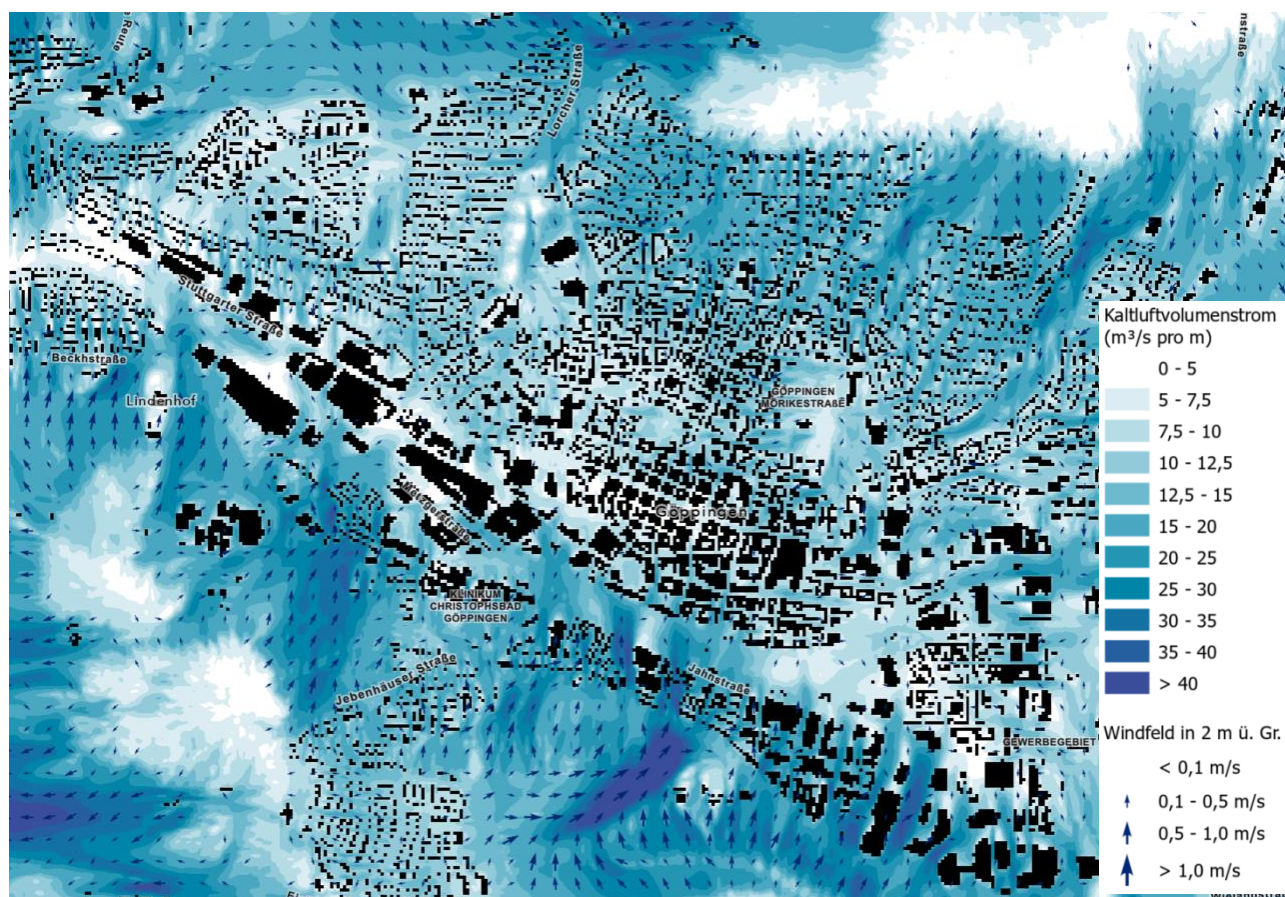


Abbildung 28: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).

Im Zukunftsszenario bleibt aufgrund der gleichbleibenden Reliefsituation und Temperaturgegensätze zwischen dem Siedlungsraum und dem landwirtschaftlich geprägten Umland das Kaltluftprozessgeschehen grundsätzlich unverändert. Lediglich die angenommene Bebauung der Entwicklungsflächen führt lokal zu einer Modifikation der Kaltluftströmung. Die Auswirkungen auf die jeweils umliegenden Siedlungsflächen sind dabei insgesamt als gering einzustufen.

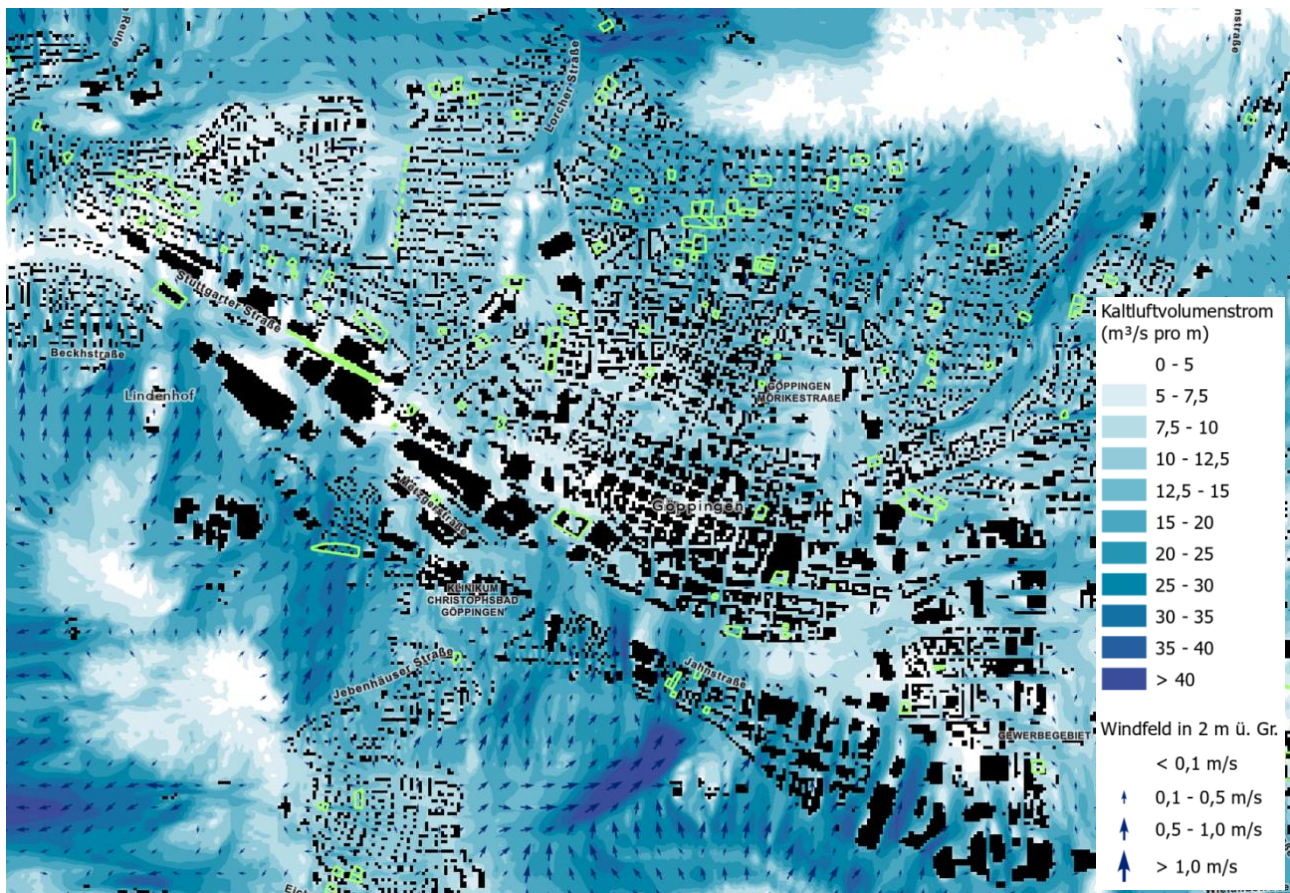


Abbildung 29: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen grün umrandet).

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter Strömungsgeschwindigkeit herangezogen. In den Abbildungen 30 und 31 ist für einen Ausschnitt des Siedlungsgebietes die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt, in Original-Auflösung von 10 m.

Es wird deutlich, dass die Kaltluft bodennah je nach Bebauungsdichte unterschiedlich stark gebremst wird. So zeigt sich insbesondere im Windschatten der Gewerbebebauung am südlichen Filsufer eine vergleichsweise geringe bodennahe Windgeschwindigkeit und ein Umströmen der Gebäudeblöcke, wohingegen auf Grund geringerer Gebäudegrößen und vermehrten Grünflächen die Siedlungsgebiete am Südrand des Oberholzes deutlich besser durchströmt werden. Straßen und Plätze sowie Parks können in diesem Zusammenhang als wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein (z.B. Mörikeanlagen, Roßbach-, Brühlbach-, Österbach-, Kerbtal nordöstlich von Bergfeld).

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen, die auch unabhängig vom Relief auch innerhalb des Stadtgebietes auftreten können, wie zum Beispiel die Grünflächen der Mörikeanlagen, die in Form eines Parkwindsystems eigene Kaltluft produziert und die umliegenden Siedlungsflächen mit Frischluft versorgt.

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in Wäldern sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt. Auch der Kaltluftvolumenstrom ist im

Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern.

In Zukunft wird sich zwar das Temperaturfeld verändern, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen werden aber im Allgemeinen keine signifikanten Veränderungen erfahren. Das Strömungsfeld der Austauschprozesse und die Menge der strömenden Kaltluft unterscheidet sich daher im Vergleich zwischen Ausgangssituation und Zukunftsszenarien nicht signifikant. Wie bei den zuvor beschriebenen Klimaparametern sind bei kleineren Bauvorhaben hauptsächlich innerhalb und im direkten Umfeld der städtebaulichen Entwicklungsflächen Modifikationen der bodennahen Kaltluftströmung zu erwarten. Bei größeren Umwandlungen von Grünflächen zu Siedlungsflächen, wie etwa im Bereich des Bergfeldtraufs und des Stauferparks, die sich im Bereich wichtiger Kaltluftleitbahnen mit hohen Kaltluftvolumina befinden, ist eine signifikante Verringerung der nächtlichen Kaltluftversorgung auf weiter unterhalb gelegene Siedlungsgebiete zu erwarten (siehe komplette Karte im Anhang).

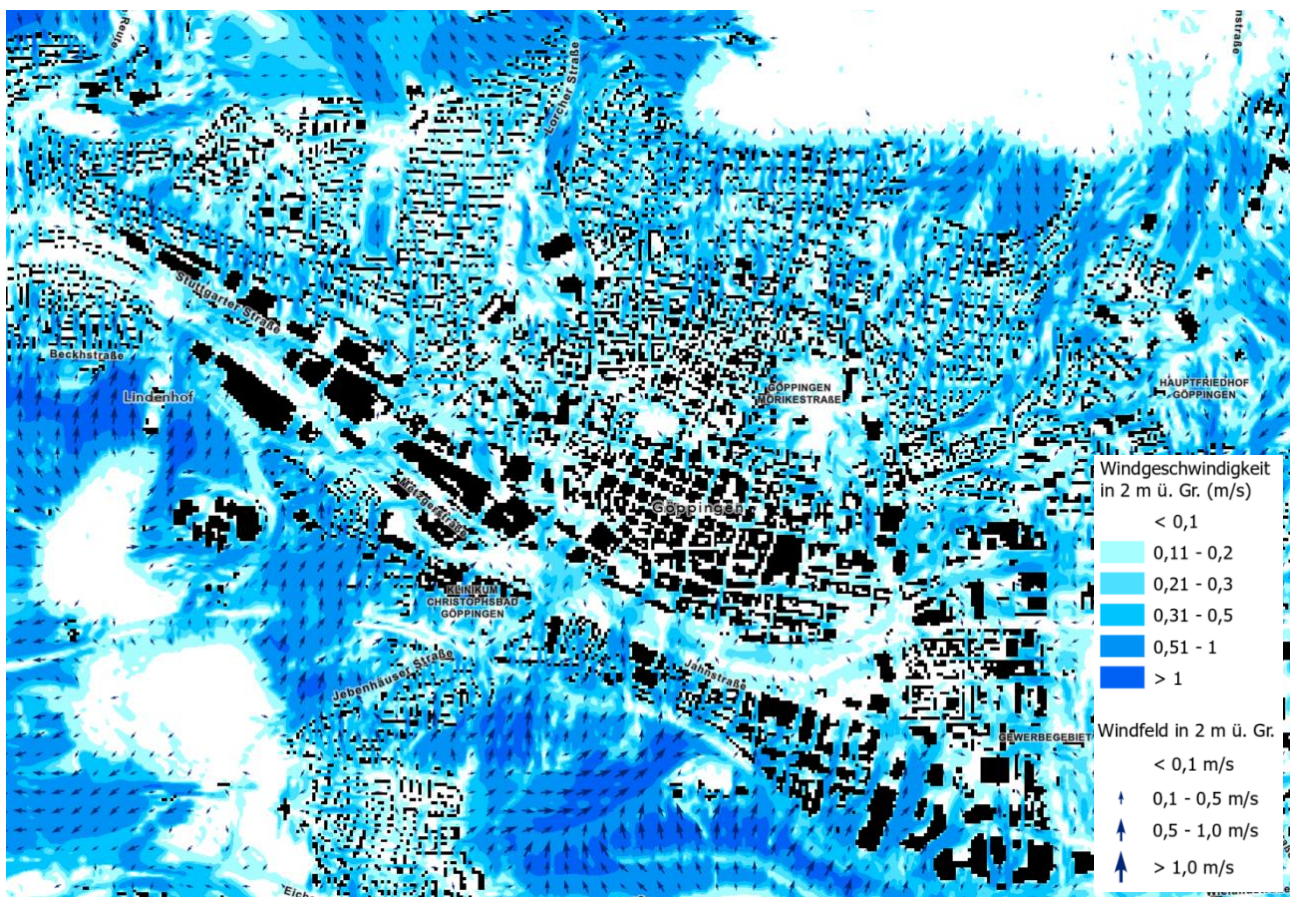


Abbildung 30: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende).

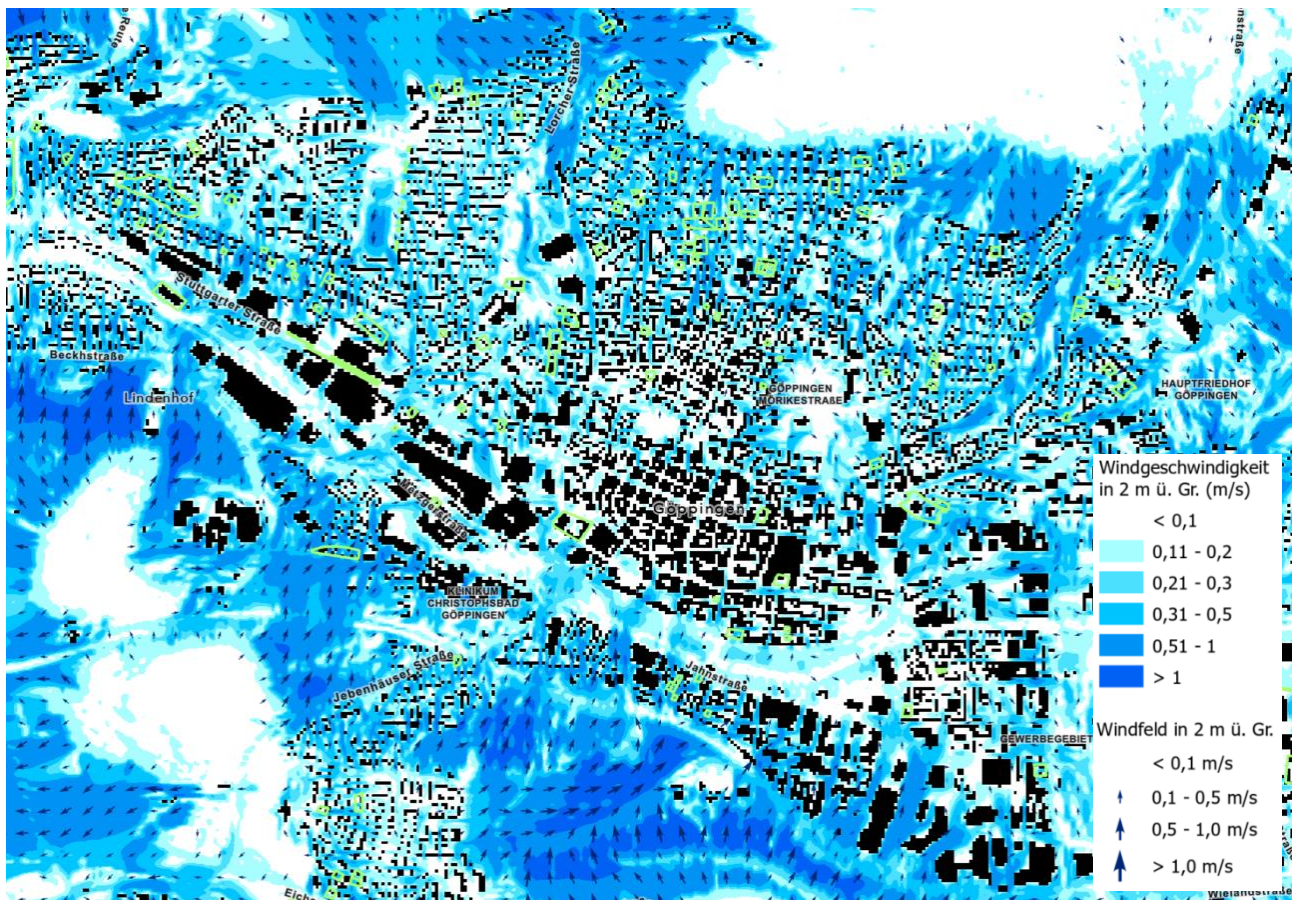


Abbildung 31: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, potenzielle Entwicklungsflächen grün umrandet).

5.3 Klimaanalysekarten

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap.6). Mit diesem Verständnis wurden für Göppingen folgende Klimaanalysekarten erstellt (Abbildungen 33 und 34):

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation (Gegenwart)
- Klimaanalysekarte für das Klimaszenario RCP 4.5 (Zukunft: 2021-2050)

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 32). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁷ (10 m x 10 m). Im Wirkraum ist der sogenannte Wärmeinseleffekt für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf dem ALKIS-Datensatz. Die Entwicklungsflächen wurden wie bei den Darstellungen der Einzelparameter wie die übrigen Siedlungsflächen rasterbasiert dargestellt.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 10). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 70 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte lediglich anhand der definierten Kaltlufteinwirkbereiche dargestellt. Hierbei handelt es sich um Bereiche, welche hinsichtlich des Kaltluftvolumenstroms ein überdurchschnittliches Niveau und/oder eine bodennahe

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

Windgeschwindigkeit von mindestens 0,2 m/s aufweisen. Ist mindestens eines der beiden Kriterien erfüllt kann von einer effektiven Kaltluftversorgung der jeweiligen Fläche ausgegangen werden.

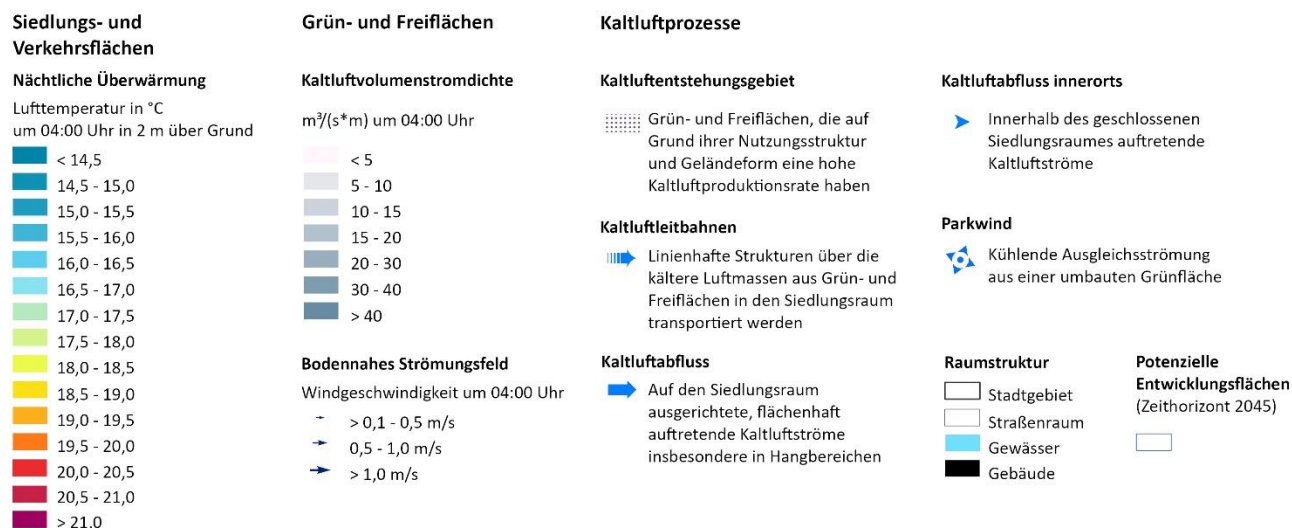


Abbildung 32: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten

Die als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen $> 100 \text{ m}^2$ mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Zu beachten ist, dass grundsätzlich alle Grünflächen eine im Vergleich zum Siedlungsraum erhöhte Kaltluftproduktion aufweisen. Die hervorgehobenen Flächen stellen in diesem Zusammenhang lediglich die besonders wertvollen Flächen dar.

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

Tabelle 10: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ab 100 m^2
Kaltluftleitbahn (linear) in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

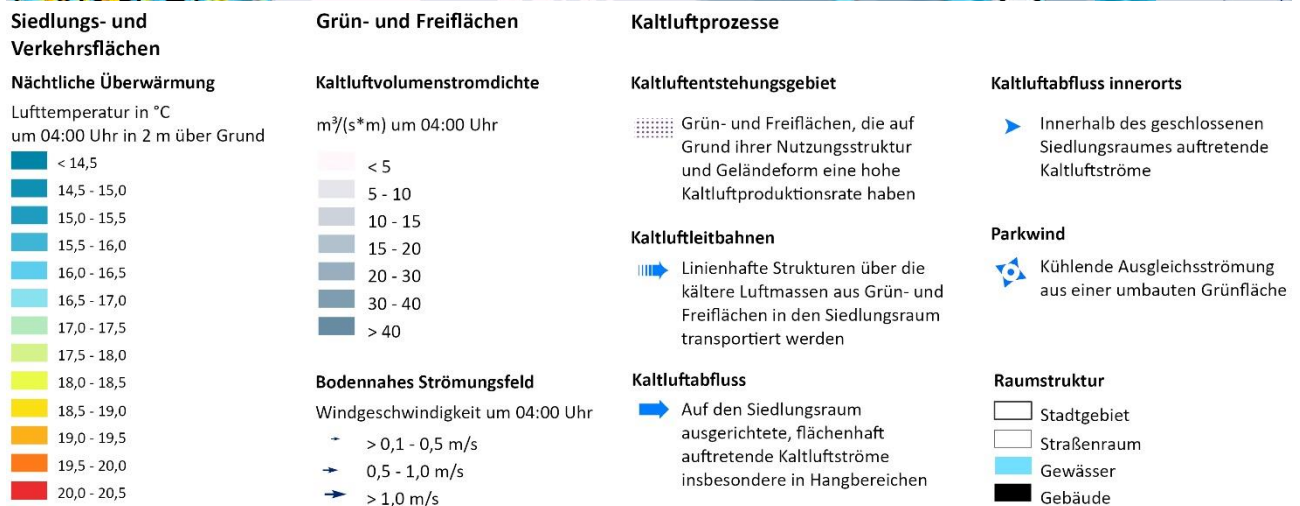
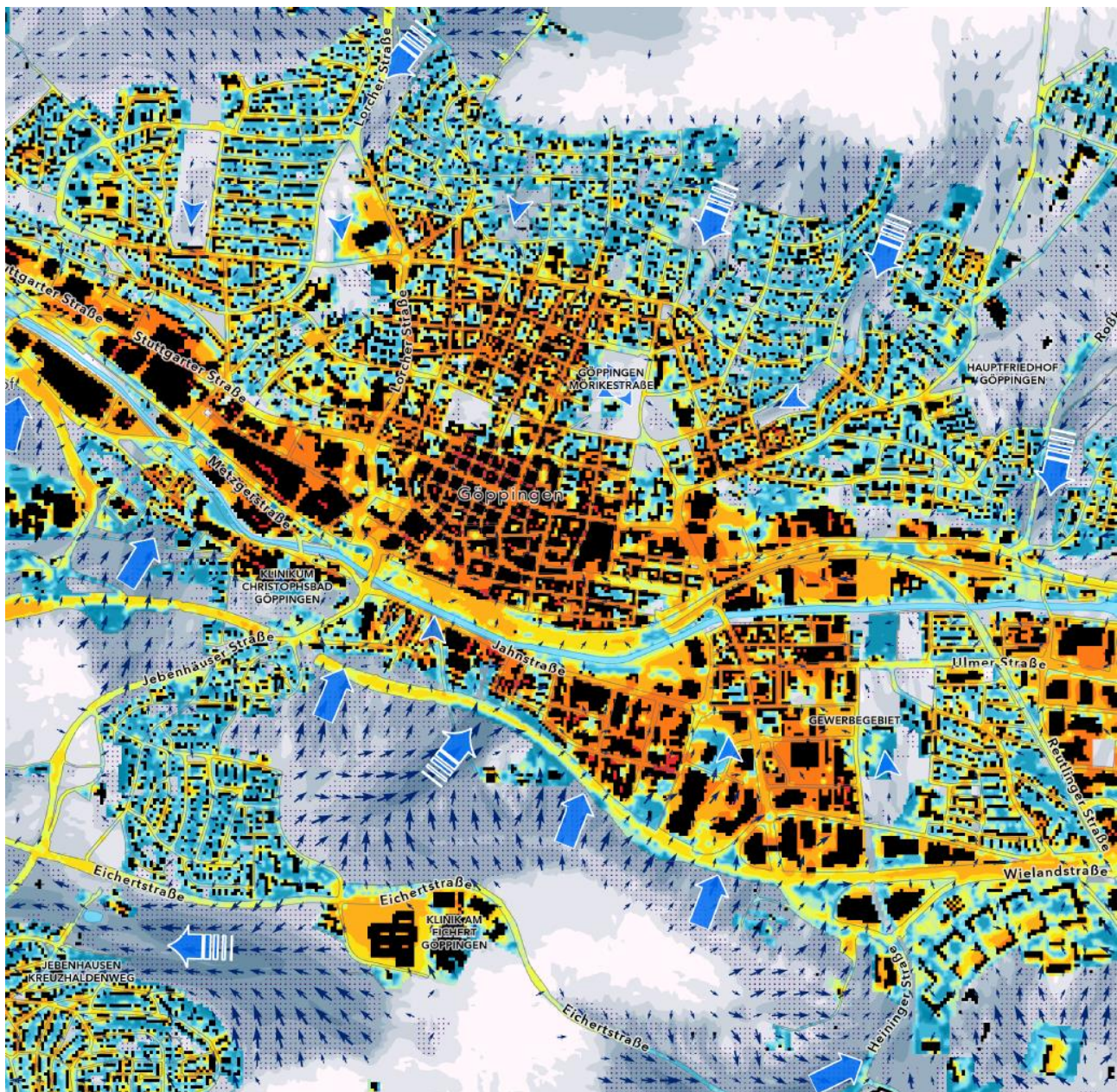
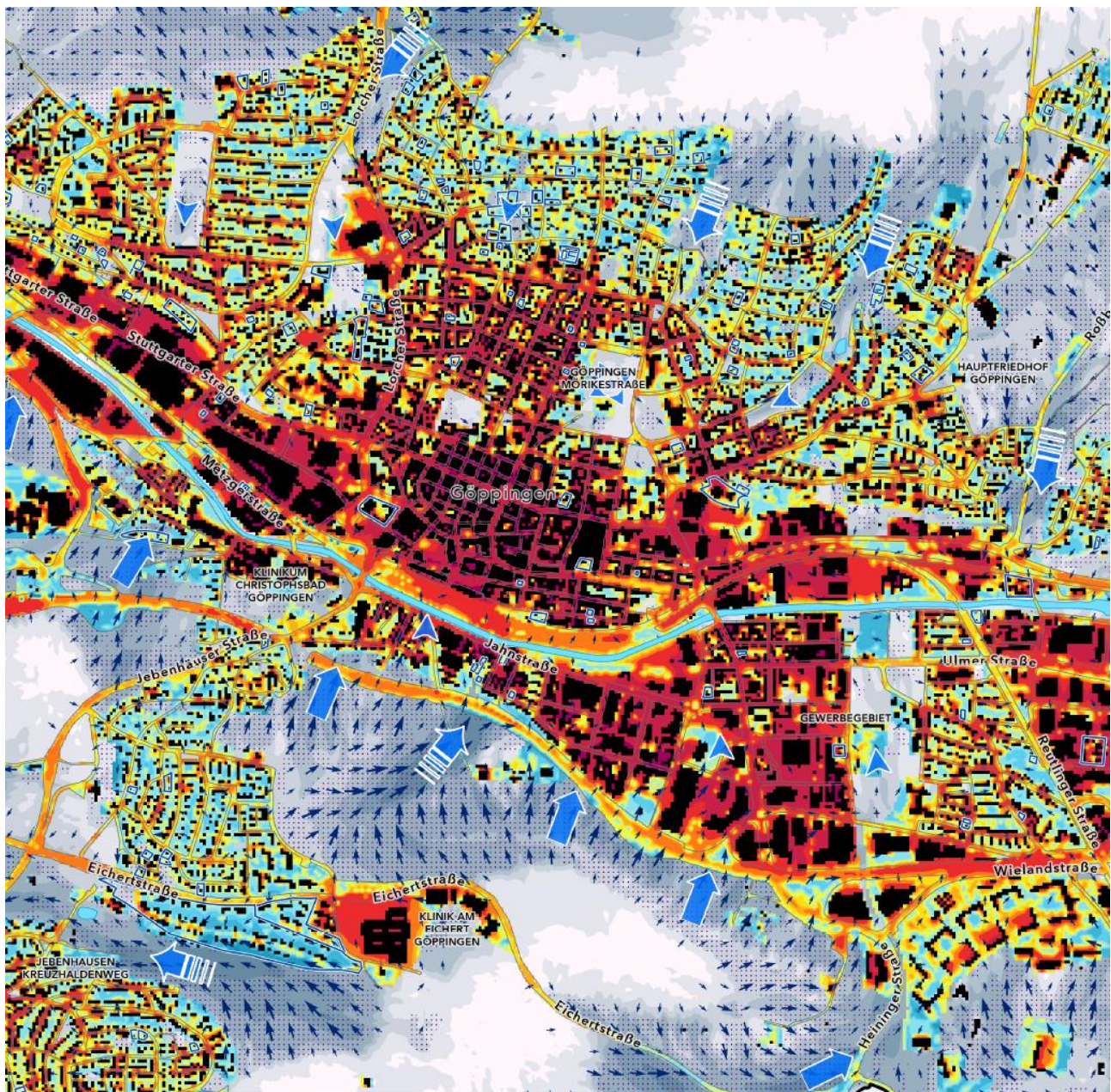


Abbildung 33: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Gegenwart

Die Ausweisung der Leitbahnen und Kaltluftabflüsse erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und flächenhafte Kaltluftabflüsse angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

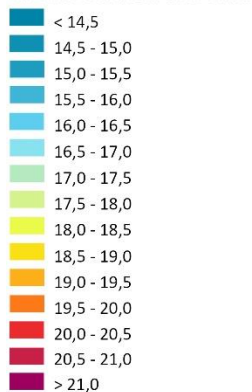
Für den gesamten Untersuchungsraum wurden mehrere Bereiche mit Kaltluftleitbahnen identifiziert, welche in der Regel von den Grünflächen an den Hängen auf den Siedlungskörper ausgerichtet sind. Besonders hervorzuheben sind die Kaltluftleitbahnen südlich und nordöstlich des Stadtteils Bergfeld über die hohe Kaltluftvolumina entlang der Talstrukturen auf die Siedlungskörper von Jebenhausen, bzw. der Göppinger Innenstadt ausgerichtet sind. Weiterhin befinden sich wichtige Kaltluftleitbahnen im Bereich des Storzenbaches, des Brühlbaches, des Österbaches und des Roßbaches, welche hohe Kaltluftmengen entlang der linienhaften Strukturen weiter in den Siedlungskörper transportieren. Bedeutenden Kaltluftabflüsse sind auch an den höheren Hanglagen der umliegenden Hügel in Richtung des Tals der Fils und somit auch in Richtung dichter Siedlungsgebiete, zu finden. Auch innerstädtisch sind wichtige Kaltluftflüsse vorhanden, wie insbesondere das Parkwindssystem der Grünflächen der Mörikeanlagen, welches das umliegende Siedlungsgebiet mit Kaltluft versorgt.



Siedlungs- und Verkehrsflächen

Nächtliche Überwärmung

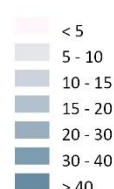
Lufttemperatur in °C
um 04:00 Uhr in 2 m über Grund



Grün- und Freiflächen

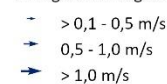
Kaltluftvolumenstromdichte

$m^3/(s \cdot m)$ um 04:00 Uhr



Bodennahes Strömungsfeld

Windgeschwindigkeit um 04:00 Uhr



Kaltluftprozesse

Kaltluftentstehungsgebiet

Grün- und Freiflächen, die auf Grund ihrer Nutzungsstruktur und Geländeform eine hohe Kaltluftproduktionsrate haben

Kaltluftleitbahnen

Linienhafte Strukturen über die kältere Luftmassen aus Grün- und Freiflächen in den Siedlungsraum transportiert werden

Kaltluftabfluss

Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme insbesondere in Hangbereichen

Kaltluftabfluss innerorts

Innerhalb des geschlossenen Siedlungsraumes auftretende Kaltluftströme

Parkwind

Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Raumstruktur

Stadtgebiet
Straßenraum
Gewässer
Gebäude

Potenzielle Entwicklungsflächen (Zeithorizont 2045)

Abbildung 34: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050).



Die Klimaanalysekarten des Zukunftsszenarios zeigt ein weitestgehend ähnliches Bild im Vergleich zum Ist-Zustand. Dies liegt daran, dass wie bereits zuvor beschrieben die Temperaturgegensätze in ihrer Ausprägung prinzipiell konstant bleiben, wodurch es zu keiner grundsätzlichen Modifikation der räumlichen Verteilung des Wärmeinseleffektes sowie der Kaltluftströmungen kommt. Es ist durch die weiter zunehmenden Temperaturen zu erwarten, dass Wetterlagen mit hoher Wärmebelastung häufiger werden und die erreichten Höchstwerte in Zukunft ansteigen, was insbesondere in den Sommermonaten eine Ausweitung der Flächen mit hoher Wärmebelastung zur Folge hat (siehe auch Bewertungskarten in Kapitel 6). Insbesondere im Bereich großflächiger Bauvorhaben in der Nähe von Kaltluftleitbahnen (bspw. Bergfeldtrauf, Stauferpark) sind Veränderungen der Strömungen in Menge, Richtung und Geschwindigkeit zu beobachten, die auch negative Auswirkungen auf weiter unterhalb liegende Siedlungsflächen haben. Hier ist bei Flächenentwicklung auf eine strömungsoptimierte Ausrichtung der Gebäudestrukturen zu achten, oder gegebenenfalls stellenweise auf eine Bebauung zu verzichten. Im Bereich stadtklimatisch wichtiger Kaltluftprozesse ist eine detaillierte Prüfung in jedem Fall empfehlenswert.

5.4 Wärmebelastung am Tage

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von meist unter 26 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Legende in Abbildung 35). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass die Wälder im Göppinger Umland und andere kleinere Waldgebiete als Rückzugsorte dienen können. Auch die Fils, Bäche und die wenigen Stillgewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die direkt angrenzenden Flächen überwiegend eine schwache bis mäßige Wärmebelastung aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.

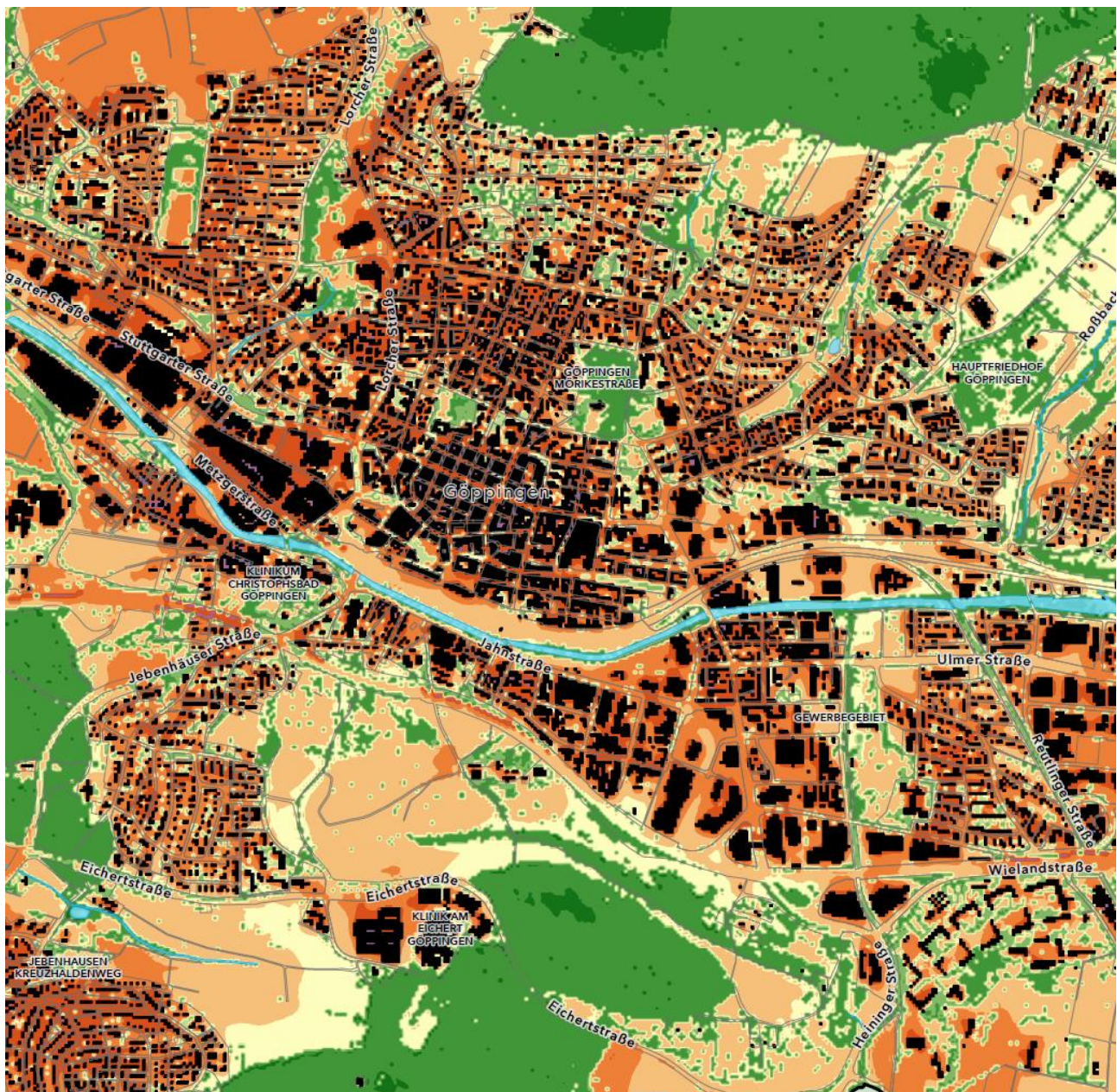
Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen und Straßen ohne Verschattung auf (ca. 41 bis 44 °C PET in der Ist-Situation, bzw. > 44 °C PET im Zukunftsszenario RCP 4.5). Auf der Nord- bis Nordost-Seite von hohen Gebäuden ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr entsprechend der PET Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. Je nach Bebauungsdicht, Versiegelungsgrad und Schatten durch Bäume oder Gebäude zeigen sich relativ kleinräumige Veränderungen der Wärmebelastung am Tag mit Unterschieden in der PET von deutlich über 10 °C innerhalb kurzer Entfernungen. Hier zeigen sich im Innenstadtbereich einerseits die negativen Auswirkungen der dichten Bebauung und hohen Versiegelung im Zusammenspiel mit der auch am Tag schlechten Durchlüftung. Andererseits zeigen insbesondere auch kleinere städtische Grünflächen, wie beispielsweise der Synagogenplatz einen deutlichen Kühleffekt durch Verschattung und Verdunstungskühle der Vegetation. Nördlich der Nördlichen Ringstraße sorgt die höhere Durchgrünung und weniger dichte Bebauungsstruktur für eine deutlich geringere Wärmebelastung am Tag. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Ortsbezirken. Die Wohngebiete bieten zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten häufig einen geringen Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 10 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnern von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Außenraum zeigen zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um 41 °C (Ist-Situation) bzw. um 44 °C (Zukunftsszenario RCP 4.5). Aufgrund der modellierten reduzierten Bodenfeuchte ist auf Grün- und Freiflächen für die Zukunft die höchste Zunahme der Hitzebelastung am Tage dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung nicht vorrangig die absolute Zunahme der Temperatur, sondern vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 3.3) entscheidend ist.

Als Bereiche relativ hoher Aufenthaltsqualität (um 24 - 29 °C PET in der Ist-Situation, bzw. rund 2 - 3 °C PET wärmer im RCP-Szenario 4.5) stellen sich zum Beispiel die Mörikeanlagen, die Uferbereiche der Fils, der Schlosspark, der Hauptfriedhof und die baumbestandenen Bachtäler dar.

Durch die im Modell berücksichtigten Entwicklungsflächen kommt es zu lokalen Erhöhungen und Reduktionen der PET. Die Art der Modifikationen hängt dabei im Wesentlichen davon ab, ob durch die Planvorhaben der Baumbestand reduziert wird oder nicht. Das zusätzliche Bauvolumen kann sich bei weitestgehend gleichbleibendem Baumbestand aufgrund des zusätzlichen Gebäudeschattens sogar positiv auf die PET auswirken. Bei

zusätzlicher Planung neuer Baumstandorte können sich Entwicklungsflächen auch noch deutlicher von unverschatteten Freiflächen abheben und zu einer Verbesserung der bioklimatischen Situation am Tage beitragen.



Wärmebelastung am Tag

14:00 Uhr nachmittags

Physiologisch Äquivalente
Temperatur PET (°C)
in 1,1 m über Grund

Keine Belastung

< 23

Schwache Belastung

23 - 26

26 - 29

Mäßige Belastung

29 - 32

32 - 35

Starke Belastung

35 - 38

38 - 41

Extreme Belastung

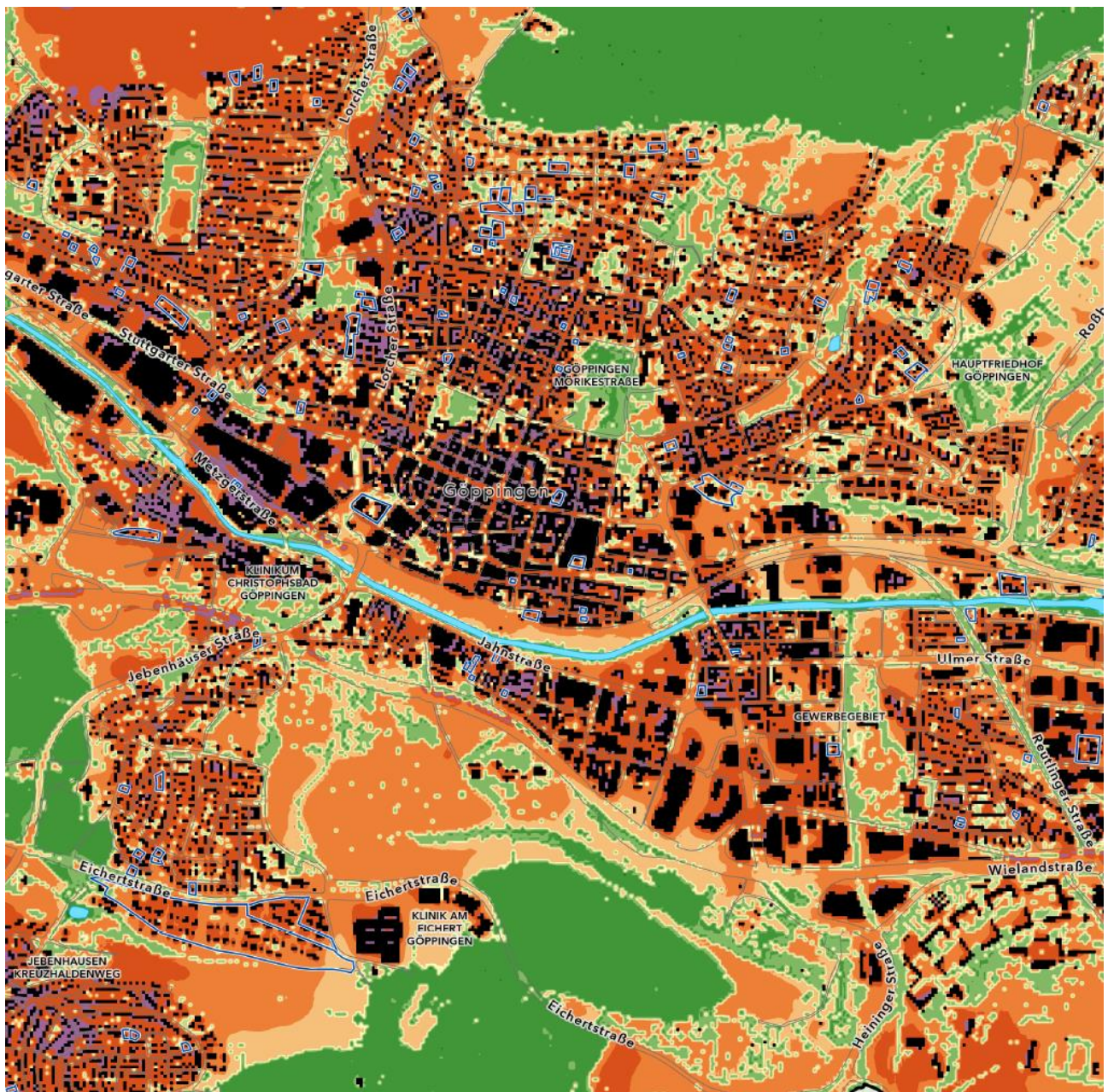
41 - 44

> 44

Raumstruktur

- Stadtgebiet
- Straßenraum
- Gewässer
- Gebäude

Abbildung 35: Wärmebelastung am Tag (PET) im Ist-Zustand in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, Wärmebelastung gemäß VDI 3787 Blatt 9).



Wärmebelastung am Tag

14:00 Uhr nachmittags

Physiologisch Äquivalente
Temperatur PET (°C)
in 1,1 m über Grund

Keine Belastung

< 23

Schwache Belastung

23 - 26

26 - 29

Mäßige Belastung

29 - 32

32 - 35

Starke Belastung

35 - 38

38 - 41

Extreme Belastung

41 - 44

> 44

Raumstruktur

- Stadtgebiet
- Straßenraum
- Gewässer
- Gebäude

Potenzielle Entwicklungsflächen (Zeithorizont 2045)



Abbildung 36: Wärmebelastung am Tag (PET) für das Klimaszenario RCP 4.5 (Zeitraum 2021-2050) in Göppingen (vergrößerte Ansicht, verkürzte Legende, Wärmebelastung gemäß VDI 3787 Blatt 9).

6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

6.1 Grundlagen

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

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

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

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zum Ist- und Zukunftsszenario in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelegt sog. Bewertungskarten zu erstellen. In den vier Bewertungskarten wurde getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die Gegenwart und das Klimaszenario RCP 4.5 (2021-2050) vorgenommen. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse dieser vier Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Göppingen Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

6.2 Geometrische Basis

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

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

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

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor; zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 100 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 37).

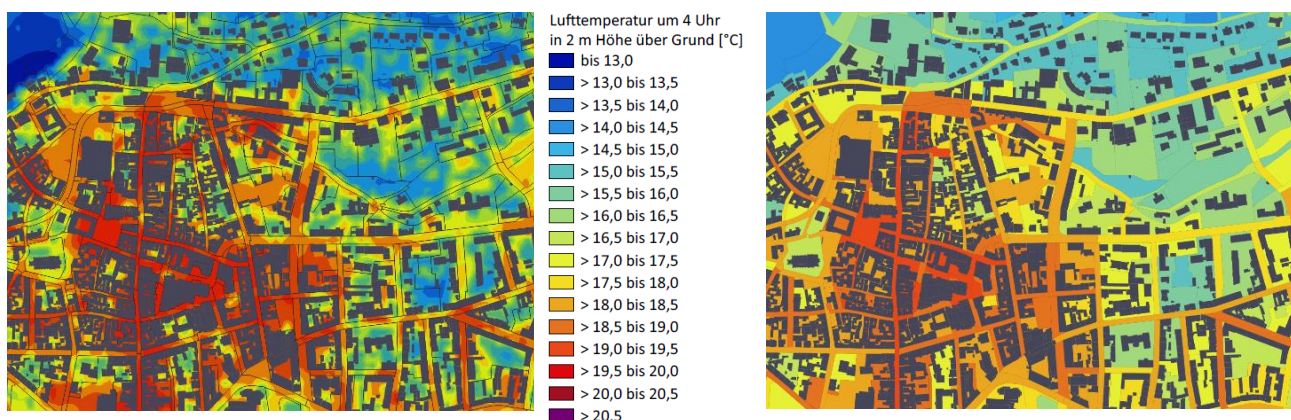


Abbildung 37: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (Musterdarstellung).

6.3 Bewertungskarten

6.3.1 Wirkraum

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

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die 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 vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 38).

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

Dabei ist

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

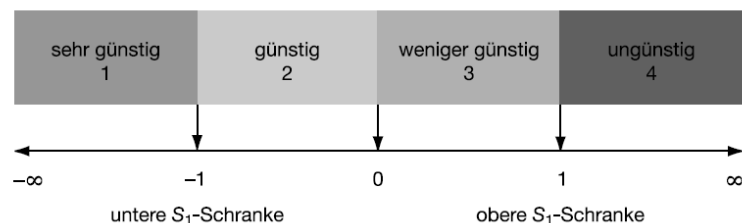


Abbildung 38: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008).

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

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo der Gegenwart). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die zwei Modellrechnungen (Status quo der Gegenwart und das Klimaszenario RCP 4.5 für den Zeitraum 2021-2050) 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 RCP-Szenarios 4.5 (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁸:






- Lufttemperatur in der Nacht (Siedlungsflächen im Wirkraum):
Mittelwert = 17,1 °C Standardabweichung = 1,6 °C
- Wärmebelastung am Tag (Siedlungsflächen im Wirkraum):
Mittelwert = 37,5 °C PET Standardabweichung = 4,9 °C PET

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

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 38) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeren Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr günstig* – *günstig* – *mittel* – *ungünstig* – *sehr ungünstig* bioklimatische Situation eingeteilt (Tabelle 11). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert ($z = 0$) schwankenden Klassen.

Tabelle 11: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.






	Bioklimatische Situation am Tag	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	Sehr günstig	$z \leq -0,7$	$PET \leq 34,9$
	Günstig	$-0,7 < z \leq -0,2$	$34,9 < PET \leq 37,4$
	Mittel	$-0,2 < z \leq 0,3$	$37,4 < PET \leq 39,9$
	Ungünstig	$0,3 < z \leq 0,8$	$39,9 < PET \leq 42,4$
	Sehr ungünstig	$z > 0,8$	$PET > 42,4$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Sie wird dennoch zusätzlich beleuchtet, da sich die Durchlüftung einer Fläche positiv auf angrenzende Flächen auswirken kann. Dazu wurden zunächst Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte ($\geq 16,4 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) oder erhöhten bodennahen Windgeschwindigkeit

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

($\geq 0,3$ m/s) als sogenannter Kaltlufteinwirkbereich definiert. Liegt eine Fläche wertetechnisch hinsichtlich mindestens eines Parameters im definierten Bereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell eine Gunstwirkung für die angrenzenden Flächen haben kann. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, sie sind über eine Punktur in der Bewertungskarte (Nacht) sichtbar und fließen als Kriterium für die stadtklimatische Handlungspriorität in die Planungshinweiskarte ein (Tabelle 12).

Tabelle 12: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht.

Bioklimatische Situation in der Nacht		Grenzen der z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C]
	Sehr günstig	$z \leq -0,8$	$T04 \leq 16,3$
	Günstig	$-0,8 < z \leq -0,2$	$16,3 < T04 \leq 17,3$
	Mittel	$-0,2 < z \leq 0,3$	$17,3 < T04 \leq 18,1$
	Ungünstig	$0,3 < z \leq 1,0$	$18,1 < T04 \leq 19,3$
	Sehr ungünstig	$z > 1,0$	$T04 > 19,3$

6.3.2 Ausgleichsraum

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

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

Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die folgende Abbildung 39 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- ‚Hohe Kaltluftfunktion‘: mindestens zwei der drei Werte: Kaltluftvolumenstrom / Kaltluftproduktion / Windgeschwindigkeit sind größer als der jeweilige Mittelwert/Schwellenwert ($23,0 \text{ m}^3/(\text{s m})$ bzw. $\geq 31,9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ bzw. $\geq 0,5 \text{ m/s}$)
- ‚Angrenzend an Wohngebiete‘: Entfernung bis 30 m Luftlinie
- ‚Agglomeration‘: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
- ‚Siedlungsbezug‘: Entfernung bis 500 m Luftlinie



Abbildung 39: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht.

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

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

6.3.3 Ergebnisse der Bewertungskarten

Abbildung 40 zeigt Ausschnitte aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation. Während in der Ist-Situation die Flächen mit hoher bis sehr hoher Belastung nur vereinzelt und vorrangig in den hoch verdichteten Siedlungskernen und nur sehr vereinzelt in den weiter außen liegenden Stadtteilen und Ortsbezirken zu lokalisieren sind, zeigt sich im RCP-Szenario 4.5 bereits ein deutlicher anteiliger Anstieg derselben Kategorien. Tabelle 13 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien.

Grundsätzlich unterliegen die Siedlungsgebiete am Rand von größeren Grünflächen den günstigsten bioklimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet. Dies zeigt sich u.a. in den Hangbereichen am nördlich und südlich Stadtrand und im Bereich der wichtigen Kaltluftleitbahnen. Auffällig ist der sehr hohe Anteil an Flächen in der Belastungsstufe 2 (Ist-Zustand) bzw. 3 und 4 im Zukunfts-Szenario. Dies ist auf die insgesamt homogene und vergleichsweise lockere Bebauungsstruktur zurückzuführen. So sind dicht bebaute bzw. stark versiegelte Siedlungsflächen fast ausschließlich im Innenstadtbereich sowie Gewerbegebieten zu finden.

Die Grün- und Freiflächen variieren in den zwei Szenarien weniger in ihrer Bedeutung in der Nacht. Das Bewertungsschema basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden Wohnsiedlungsflächen (vgl. Abbildung 39). Folglich liegen die Flächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen, direkt angrenzend an die Wohnsiedlungsflächen oder sind Flächen mit einer in der Ist-Situation und in Zukunft sehr hohen Kaltluftvolumendichte.

Obwohl in der Modellierung des Zukunftsszenarios durch die Entwicklungsflächen Modifikationen der städtebaulichen Struktur eingeflossen sind, bleiben das Strömungsfeld und die Kaltluftaustauschprozesse prinzipiell weitgehend unverändert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Entwicklungsflächen zum einen in Bezug auf die Kaltluftaustauschprozesse in relativ unkritischen Bereichen verortet sind und es sich zudem überwiegend um relativ kleinteilige Nachverdichtungsflächen (Baulücken) handelt. Die größten negativen Beeinträchtigungen sind durch die Einschränkung der Kaltluftleitbahn der großflächigen Bauvorhaben Bergfeldtrauf und den Stauferpark zu erwarten. Positiv hervorzuheben ist demgegenüber der teilweise Rückbau der Klinik am Eichert, wo durch die Entstehung neuer Freiflächen die nächtlichen Kaltluftprozesse an dieser Stelle deutlich verbessert werden können.

Lediglich der Anteil von Flächen mit hoher bzw. sehr hoher Bedeutung ändert sich aufgrund der Zunahme von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen (Tabelle 13). Bei den Freiflächen mit geringer oder sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima in den Wohnsiedlungen handelt es sich um die (meist) großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche (ausgenommen Einzelhöfe als Siedlungssplitterflächen) von mindestens einigen Hundertmetern.

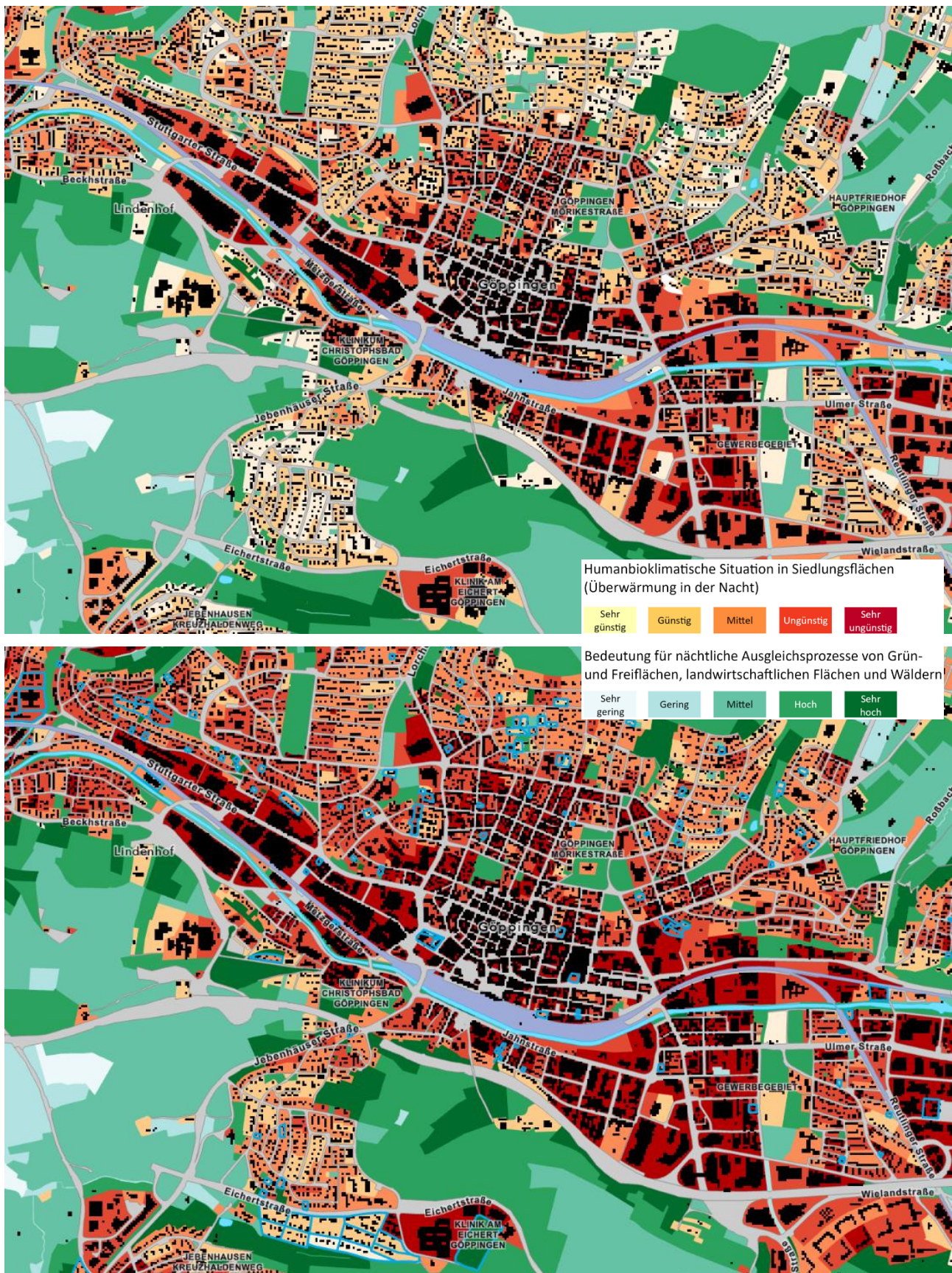


Abbildung 40: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben Ist-Situation, unten Klimaszenario RCP 4.5, Zeitraum 2021-2050). Verkürzte Legende.

Tabelle 13: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario.

Bioklimatische Situation in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Klimaszenario RCP 4.5 Zeitraum 2021-2050
Sehr günstig	24,8%	3,3%
Günstig	35,8%	17,9%
Mittel	20,3%	28,9%
Ungünstig	15,0%	31,0%
Sehr ungünstig	4,1%	18,8%

Tabelle 14: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario.

Kaltluftprozesse / bioklimatische Bedeutung in warmen Nächten	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Klimaszenario RCP 4.5 Zeitraum 2021-2050
Sehr gering	17,5%	17,4%
Gering	14,2%	14,1%
Mittel	44,9%	43,4%
Hoch	21,3%	16,9%
Sehr hoch	2,2%	8,1%

Auch die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten vergrößert auf die zentralen Ortsteile von Göppingen in Abbildung 41 dargestellt. Grundsätzlich verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, meist abhängig von Verschattungsgrad von Bäumen und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Ebenso wie in der Nacht sind die Wohngebiete am Bergfeld oder nördlich der Nördlichen Ringstraße mit der geringsten Hitzebelastung belegt. Dagegen sind ebenso wie in der Nacht auch am Tag in der Innenstadt auf Grund geringer Verschattung durch Bäume Flächen mit einer besonders hohen Hitzebelastung zu finden. Eine mittlere bis sehr hohe Hitzebelastung findet sich auch im Großteil der Gewerbegebiete.

Tabelle 15 zeigt, dass sich in der Ist-Situation 22,9 % der Siedlungsflächen in der Belastungsklasse „ungünstig“ befinden, während es im RCP-Szenario 4.5 bereits 36,7 % sind. Die Klasse „sehr ungünstige bioklimatische Situation“ wird erst im Klimaszenario RCP 4.5 nennenswert mit 17 % der Flächen gefüllt, während es in der Gegenwart lediglich 3,4 % der Flächen sind. Bei den neuen Flächen dieser Klasse handelt es sich hauptsächlich mit nur mittlerem bis geringem Baumbestand im Umfeld stark versiegelter Bereiche, wie z. B. im Wohngebiet nördlich der Innenstadt oder im Stadtteil Reusch.

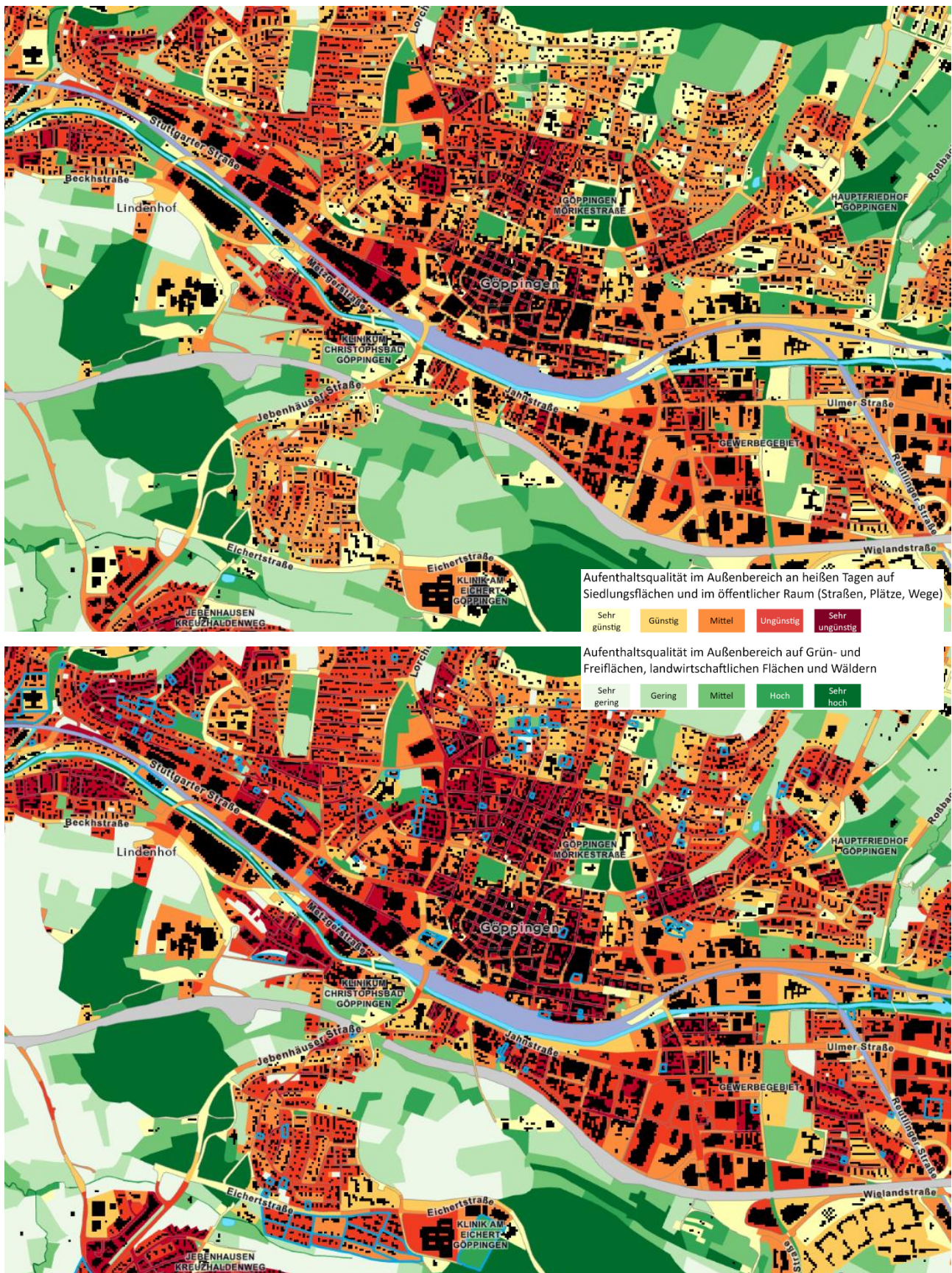


Abbildung 41: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben Ist-Situation, unten Klimaszenario RCP 4.5, Zeitraum 2021-2050). Verkürzte Legende.



Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte im Zukunftsszenario an Erholungsfunktion für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation wird fast ein Drittel der Grünflächen mit einer hohen oder sehr hohen bioklimatischen Bedeutung eingestuft, wobei es sich ausnahmslos um Wald bzw. Flächen mit hohem Baumbestand handelt. Im Zukunftsszenario RCP 4.5 belegen noch rund 28 % eine der beiden höchsten Einstufungen. Die baumlosen Freiflächen mit niedriger Vegetation verlieren aufgrund der im Zukunftsszenario RCP 4.5 modellierten reduzierten Bodenfeuchte am deutlichsten an Erholungsfunktion, da sie der stärksten Zunahme von PET-Werten unterliegen. Über 60 % der Grün- und Freiflächen wird im RCP-Szenario 4.5 nur noch eine geringe oder sehr geringe bioklimatische Bedeutung zugeordnet (Ist-Situation: 43 %).

Tabelle 15: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Situation am Tag		Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Klimaszenario RCP 4.5 Zeitraum 2021-2050
	Sehr günstig	18,1%	10,0%
	Günstig	21,7%	10,7%
	Mittel	34,0%	25,6%
	Ungünstig	22,9%	36,7%
	Sehr ungünstig	3,4%	17,0%

Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung am Tage in Bezug auf den Siedlungsraum, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen		Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Klimaszenario RCP 4.5 Zeitraum 2021-2050
	Sehr gering	9,4%	36,6%
	Gering	34,3%	27,3%
	Mittel	23,1%	8,5%
	Hoch	7,7%	3,9%
	Sehr hoch	25,5%	23,7%



6.4 Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der vier Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Göppingen Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten, bzw. wo die Bevölkerung am stärksten von Hitze betroffen ist. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar.

Als Ziele der Planungshinweiskarte wurden definiert:

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

6.4.1 Stadtklimatische Belastungssituation im Wirkraum

In den Wohn- und Gewerbeflächen sowie im öffentlichen Raum wird die stadtklimatische Belastungssituation dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) und in unbewohnten Gebieten sowie im Straßenraum und auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum; Tabelle 17).

Tabelle 17: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den Bewertungskarten Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.

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

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

Beispielsweise wird einem Wohngebiet, welches in der Nacht sehr hoch belastet ist (5), in Kombination mit mittlerer Belastung (3) am Tage eine Gesamt-Wärmebelastung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 17, linke Seite). Ein Gewerbegebiet mit sehr geringer Belastung (1) in der Nacht und sehr hoher Belastung (5) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Wärmebelastung bewertet (vgl. Tabelle 17, rechte Seite).



Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute in der Gegenwart eine hohe bioklimatische Belastung durch Wärme aufweisen. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen die Siedlungsflächen, die in der Gegenwart eine hohe Wärmebelastung, während die Klasse „Handlungspriorität 3“ durch eine in Zukunft sehr hohe bioklimatische Belastung definiert wird. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 18 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist. Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen mit der geringsten „Handlungspriorität 7“ behalten auch unter der Annahme eines zukünftigen Klimawandels eine höchstens mittlere Wärmebelastung. Sie können als robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der dreidimensionalen Matrix aus Bestandssituation und RCP-Szenario 4.5 einer der Belastungsstufen zugeordnet werden.

Tabelle 18: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Flächenanteil
Handlungspriorität 1	Flächen, die in der Gegenwart eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen.	3,8%
Handlungspriorität 2	Flächen, die in der Gegenwart eine hohe Wärmebelastung aufweisen.	11,8%
Handlungspriorität 3	Flächen, die in der Gegenwart eine hohe oder im Zukunfts-Szenario eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen.	6,2%
Handlungspriorität 4	Flächen, die in der Gegenwart eine mittlere Wärmebelastung aufweisen.	23,8%
Handlungspriorität 5	Flächen, die in der Gegenwart eine mittlere oder im Zukunfts-Szenario eine hohe Wärmebelastung aufweisen.	6,4%
Handlungspriorität 6	Flächen, die in der Gegenwart eine geringe oder im Zukunfts-Szenario eine mittlere Wärmebelastung aufweisen.	26,9%
Handlungspriorität 7	Flächen, die weder in der Gegenwart noch im Zukunfts-Szenario eine besondere Wärmebelastung aufweisen.	21,1%

Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 17

Ein Großteil der Siedlungsflächen in der Göppinger Innenstadt sowie viele Gewerbeflächen sind mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt, ebenso wie ein Großteil der Gewerbeflächen. Zusätzlich befinden sich, vorwiegend auf Grund der Verschlechterung der Tag-Situation durch den Klimawandel, Flächen der obersten zwei Handlungsprioritäten auch innerhalb der Wohngebiete nördlich der Innenstadt bis zur Nördlichen Ringstraße.

Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 19 mit allgemeinen stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der

Handlungsprioritäten 3 und 4, die in Göppingen ca. 30 % (vgl. Tabelle 18) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende klimaökologische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höchsten Handlungsprioritäten 1 und 2 (15,6 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv Anpassungsmaßnahmen zur klimaökologischen Verbesserung im Bestand umgesetzt werden können. In ca. der Hälfte des Siedlungsraums besteht eine mittlere bis geringe stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung klimaökologischer Standards zum Erhalt der klimaökologischen Funktionen bei Entwicklungen empfohlen wird.

Es ist hervorzuheben, dass an Orten, wo sich in Bezug auf Hitze besonders vulnerable Bevölkerung aufhält (Pflegeeinrichtungen, Krankenhäuser, Kindertagesstätten, Schulen, ...) erhöhte Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zugeteilt werden, welche bei Hitze den Aufenthalt im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend gestalten. So ergibt sich auch ein direkter Nutzen der Planungshinweiskarte für den Hitzeaktionsplan der Stadt Göppingen.

Hinsichtlich einer ersten Bewertung der Entwicklungsflächen (Zukunfts-Szenarien) wurde in der Planungshinweiskarte eine Einteilung in die Kategorien „ohne weitere Maßnahmen stadtklimaverträglich möglich“ und „mit optimierenden Maßnahmen stadtklimaverträglich möglich“ erstellt, welche jeweils in zwei weitere Unterkategorien mit Empfehlungen zur Umsetzung des Bauvorhabens unterteilt wurden. Die Entwicklungsflächen sind in der Karte (Abbildung 42) durch die entsprechende Farbsignaturen gekennzeichnet.

Tabelle 19: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
Handlungspriorität 1 und 2	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zur deutlichen Verbesserung der klimaökologischen Situation umzusetzen.
Handlungspriorität 3 und 4	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zur Verbesserung der klimaökologischen Situation umzusetzen.
Handlungspriorität 5 und 6	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zum Erhalt der klimaökologischen Funktionen zu berücksichtigen.
Handlungspriorität 7	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind die klimaökologischen Funktionen zu beachten.

Klimaökologisch optimierende Maßnahmen:

Verringerung/Minimierung der Versiegelung, Freihalten von Durchlüftungssachsen, Erhöhung der Durchlüftung, Schaffung (öffentlicher) kühler Aufenthaltsorte, Dach und Fassadenbegrünung, Sonnensegel, klimagerechte Gebäudekühlung, angepasste Baumaterialien, Dachbegrünung auf niedrigen Gebäuden mit Flachdach, ausreichender Wurzelraum für Bäume

Klimaökologische Funktionen:

Kaltluftprozesse: Kaltluftentstehung, Kaltluftabflüsse, Luftmassenaustausch. Kühlende Prozesse am Tag: Verdunstungskühlung durch Vegetation und Wasserflächen, Verschattung

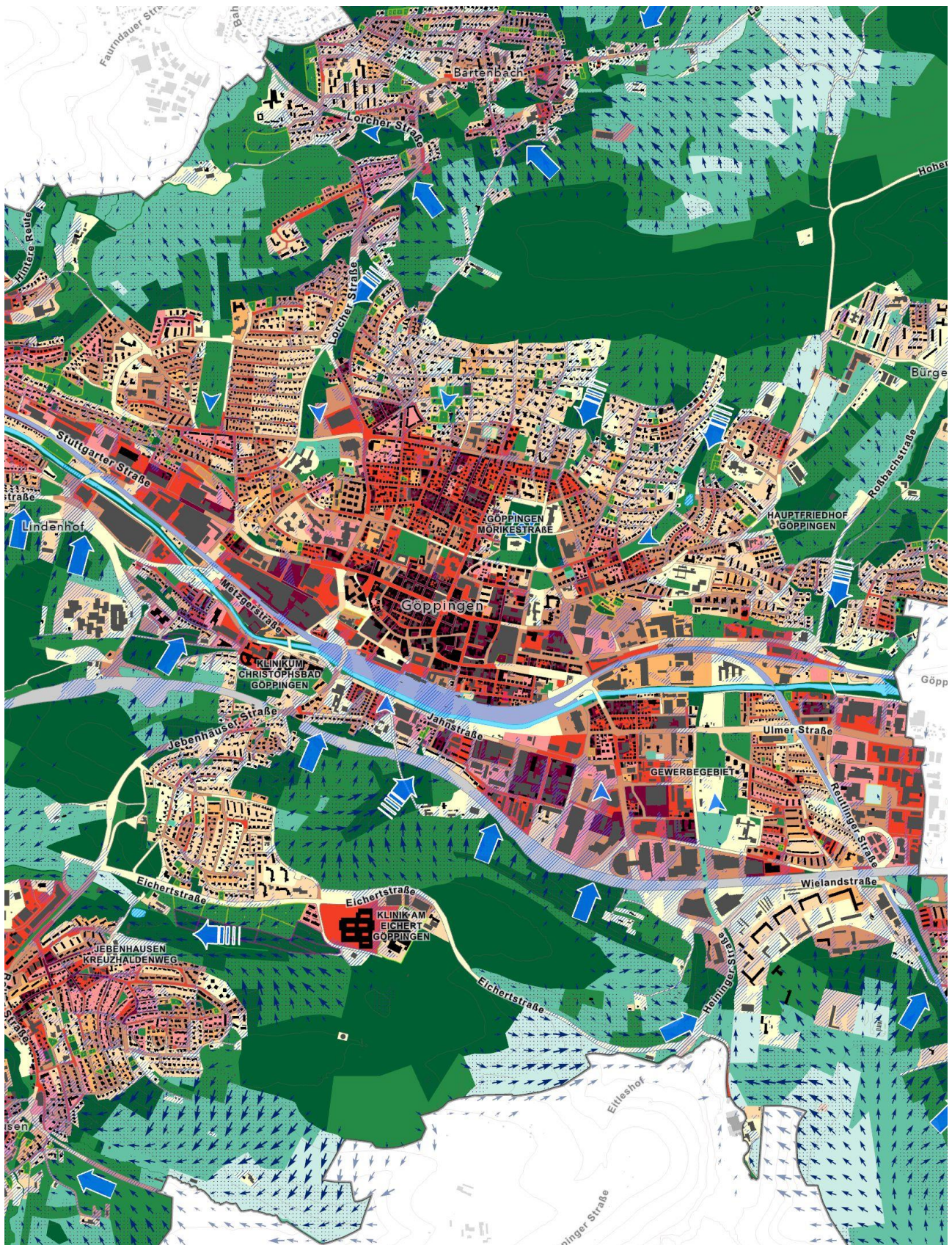


Abbildung 42: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima (Legende auf der nächsten Seite).



Wirkraum:

Siedlungsflächen und öffentlicher Raum

Stadtklimatische Handlungspriorität

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten (Nutzung in der Nacht) hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (Ausmaß natürlicher Überwärmung), in unbewohnten Gebieten (Nutzung vorwiegend tagsüber) vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Daraus ergibt sich keine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen.

	Handlungspriorität 1	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zur deutlichen Verbesserung der klimaabkühlenden Situation umzusetzen.
	Handlungspriorität 2	
	Handlungspriorität 3	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zur Verbesserung der klimaabkühlenden Situation umzusetzen.
	Handlungspriorität 4	
	Handlungspriorität 5	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind Maßnahmen zum Erhalt der klimaabkühlenden Funktionen zu berücksichtigen.
	Handlungspriorität 6	
	Handlungspriorität 7	Bei allen Bauvorhaben (Hochbau und Tiefbau, Freiflächengestaltung) sind die klimaabkühlenden Funktionen zu beachten.

Kaltluftprozesse

Kaltluftentstehungsgebiet

Grün- und Freiflächen, die auf Grund ihrer Nutzungsstruktur und Geländeform eine hohe Kaltluftproduktionsrate haben

Kaltluftleitbahnen

Linienhafte Strukturen über die kältere Luftmassen aus Grün- und Freiflächen in den Siedlungsraum transportiert werden

Parkwind

Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Kaltluftprozesse im Wirkraum

Kaltluftwirkebereich im Siedlungsraum (Siedlungs- und Verkehrsflächen mit überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenströmung und/oder Windgeschwindigkeit

Kaltluftabfluss

Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme insbesondere in Hangbereichen

Kaltluftabfluss innerorts

Innerhalb des geschlossenen Siedlungsraumes auftretende Kaltluftströme

Bodennahes Strömungsfeld

Windgeschwindigkeit um 04:00 Uhr
 → > 0,1 - 0,5 m/s
 → 0,5 - 1,0 m/s
 → > 1,0 m/s

Stadtgebiet

Straßenraum

Gewässer

Konturlinie (10 m)

Gebäude mit wichtiger Nutzung in der Nacht (Wohngebäude, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen, ...)

Gebäude mit wichtiger Nutzung am Tag (Gewerbe, Bildungseinrichtungen, Tagesbetreuung, ...)

Ausgleichsraum:

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen, Waldflächen

Stadtklimatischer Schutzbedarf

In die Bewertung fließen sowohl die Kaltluftentstehung und Kaltluftströmungen auf den Flächen in der Nacht, als auch deren Funktion als öffentlich zugängliche Rückzugsräume an heißen Tagen ein. In der Nacht ist zusätzlich zu den Kaltluftereigenschaften einer Fläche die Nähe zu besonders stark belasteten Gebieten mit Wohnnutzung von Bedeutung.

Sehr hoher Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Fläche ist die stadtklimatische Bedeutung auf Grundlage der jeweiligen klimaabkühlenden Funktionen zu erhalten. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten.

Hoher Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Fläche soll die Bedeutung auf Grundlage der stadtklimatischen Funktionen erhalten werden. Bauliche Maßnahmen sollten klimafachlich begleitet werden.

Erhöhter Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Fläche sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen zu beachten. Bei großflächigen baulichen Entwicklungen sollte eine klimafachliche Begleitung angestrebt werden.

Geringer Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Fläche ist die Berücksichtigung der jeweiligen stadtklimatischen Funktionen empfehlenswert.

Stadtklimatische Bewertung der potenziellen städtebaulichen Entwicklungsflächen

Entwicklung unter Beachtung klimaabkühlender Standards möglich

Entwicklung führt zu einer Verbesserung der Bestandssituation. Keine zusätzlichen klimaabkühlenden Maßnahmen erforderlich.

Entwicklung ohne weitere Maßnahmen stadtklimatisch verträglich. Berücksichtigung klimaabkühlender Standards empfohlen.

Entwicklung mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich

Entwicklung großflächiger Vorhaben auf Freiflächen (Potenzialflächen) mit optimierenden Maßnahmen für das Stadtklima möglich (Planungsprozess stadtklimatisch begleiten, Berücksichtigung klimaabkühlender Standards). Entwicklung von Baulücken unter Berücksichtigung klimaabkühlender Standards möglich (optimierende Maßnahmen empfohlen).

Entwicklung nur mit optimierenden Maßnahmen zum Erhalt der Kaltluftfunktion in der Nacht und der Ausgleichsfunktion am Tag empfehlenswert (Berücksichtigung klimaabkühlender Standards, Planung zur stadtklimatischen Optimierung begleiten).

Klimaabkühlende Standards:

Verringerung/Minimierung der Versiegelung, Freihalten von Durchlüftungssachsen, Erhöhung der Durchlüftung, Schaffung (öffentlicher) kühler Aufenthaltsorte, Dach und Fassadenbegrünung, Sonnensegel, klimagerechte Gebäudekühlung, angepasste Baumaterialien, Dachbegrünung auf niedrigen Gebäuden mit Flachdach, ausreichender Wurzelraum für Bäume.

Klimaabkühlende Funktionen:

Kaltluftprozesse: Kaltluftentstehung, Kaltluftabflüsse, Luftmassenaustausch. Kühlende Prozesse am Tag: Verdunstungskühlung durch Vegetation und Wasserflächen, Verschattung

Stadtklimatische Begleitung Planungsprozess:

Klimafachliche Begleitung der Planung von Vorhaben in wertvollen Frei- und Grünräumen oder Entwicklungen in thermisch belasteten Flächen durch eine städtische Fachstelle oder bei Bedarf externe Expertise.



6.4.2 Stadtklimatischer Schutzbedarf im Ausgleichsraum

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert (Tabelle 20). Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass eine Fläche, die am Tag oder in der Nacht die höchste Bedeutung aufweist, auch einen mindestens hohen Schutzbedarf zugeschrieben bekommt.

Tabelle 20: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den Bewertungskarten Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum.

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

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

Beispielsweise wird einer Grünfläche, welche am Tage eine sehr hohe Bedeutung (1) aufweist, in Kombination mit sehr geringer Bedeutung (5) in der Nacht eine Gesamt-Bedeutung von 2 = hoch zugeordnet (vgl. Tabelle 20). Eine im Umland liegende Freifläche mit hoher Bedeutung (2) in der Nacht und geringer Bedeutung (4) am Tage wird insgesamt mit einer mittleren (3) Bedeutung bewertet (vgl. Tabelle 20).

Tabelle 21: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Flächenanteil
Sehr hoher Schutzbedarf	Flächen, die in der Gegenwart oder im Zukunfts-Szenario eine sehr hohe stadtklimatische Bedeutung aufweisen.	18,4%
Hoher Schutzbedarf	Flächen, die in der Gegenwart oder im Zukunfts-Szenario eine hohe stadtklimatische Bedeutung aufweisen.	34,8%
Mittlerer Schutzbedarf	Flächen, die in der Gegenwart oder im Zukunfts-Szenario eine mittlere stadtklimatische Bedeutung aufweisen.	32,6%
Geringer Schutzbedarf	Übrige Flächen	14,2%



Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung. Flächen, die in mindestens einem der zwei Szenarien (Gegenwart, Zukunftsszenario RCP 4.5) in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 21). Der hohe Anteil von Flächen mit hohem oder sehr hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (53,2 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Waldflächen zurück, die am Tag eine (sehr) hohe Bedeutung aufweisen. Aber auch einige landwirtschaftliche Flächen und Grünflächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit hohem oder sehr hohem Schutzbedarf.

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

Tabelle 22: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum		Planungshinweise
	sehr hoher Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Fläche ist die stadtklimatische Bedeutung auf Grundlage der jeweiligen klimaökologischen Funktionen zu erhalten. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten.
	hoher Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Fläche soll die Bedeutung auf Grundlage der stadtklimatischen Funktionen erhalten werden. Bauliche Maßnahmen sollten klimafachlich begleitet werden.
	mittlerer Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Fläche sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen zu beachten. Bei großflächigen baulichen Entwicklungen sollte eine klimafachliche Begleitung angestrebt werden.
	Geringer Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Fläche ist die Berücksichtigung der jeweiligen stadtklimatischen Funktionen empfehlenswert.

Klimaökologische Funktionen:

Kaltluftprozesse: Kaltluftentstehung, Kaltluftabflüsse, Luftmassenaustausch. Kühlende Prozesse am Tag: Verdunstungskühlung durch Vegetation und Wasserflächen, Verschattung

7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in Göppingen auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Göppingen wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen im Rahmen von Online-Workshops und verwaltungsintern zusammen mit den Abteilungen Stadtplanung und Stadtentwicklung, Immobilienwirtschaft, Mobilität und verkehrliche Infrastruktur und Grünflächen, der Stabstelle für Klimaschutz, den Eigenbetrieben Stadtentwässerung und Stadtwerke sowie der Energieversorgung Filstal identifiziert. Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Katalog der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität).

Die Maßnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 23 beschrieben und in drei grundlegende Zielvorgaben aufgeteilt:

- Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen
- Optimierung der Durchlüftung und der nächtlichen Kaltluftversorgung
- Verringerung der Wärmebelastung im Innenraum von Gebäuden

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

Am Tage sind viele Siedlungsbereiche in den verschiedenen Orts- bzw. Stadtteilen hitzebelastet, was vielerorts an fehlendem Schatten durch (nicht vorhandene oder noch zu niedrige) Bäume sowie relativ niedrigen Gebäude liegt. Hier kann mit den Maßnahmen M06 (→Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien), sowie an entsprechenden Stellen Entsiegelung (→ M04: Entsiegelung bzw. Versiegelungsanteil minimieren) langfristig Abkühlung bewirkt werden. **Standortgerecht gepflanzte Bäume mit ausreichend Platz für den Wurzel- und Kronenraum können in** besonders hitzebelasteten Bereichen, wie der Göppinger Innenstadt oder auch breiten Straßen, wie die Stuttgarter Straße oder der Jahnstraße auch bei einer kleinräumigen Umsetzung zu einer erheblichen Verbesserung führen. Gewerbegebiete und große Parkplatzflächen bieten großes Potenzial für die Entsiegelung und Baumpflanzungen.

Die hohe Hitzebelastung in der Innenstadt resultiert aus der hohen Bebauungsdichte sowie dem hohen Versiegelungsgrad. Es sollte im Einzelfall geprüft werden, inwiefern Entsiegelung, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung möglich ist (→ M04, M16, M17). Von der städtischen Verwaltung unterhaltene Gebäude, die demnächst saniert oder neu geplant werden sollen, können als sinnvolle Leuchtturmprojekte umgesetzt werden.

In der Fußgängerzone und im Verkehrsraum sollten Fuß- und Radwege bei starker Frequentierung flächendeckend zumindest teilverschattet gestaltet sein (→ M05 Blau-grüne Außenraumgestaltung).

In der Nacht sind die Stadtrandgebiete und außenliegende Ortschaften zumindest in den Wohngebieten relativ kühl. Hier muss die Kaltluftversorgung durch das Beibehalten von lockerer Bebauungsdichte und geringem Versiegelungsgrad bei Neubaugebieten gesichert werden. Vor allem in den Bereichen der bedeutenden Kaltluftleitbahnen und flächenhaften Kaltluftabflüsse ist es für deren Sicherstellung entscheidend, bauliche Strömungshindernisse zu vermeiden (→ M12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports).

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

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

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

Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Erhalt und Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevanten Flächen).

Bäume (und Sträucher) übernehmen neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei breiteren Straßenräumen (z.B. Stuttgarter Straßen, Jahnstraße) bieten sich Begrünungen durch Baumpflanzung an (→ M05: Blau-grüne Außenraumgestaltung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter weniger verschatten und geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben, was zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Treibhausgasemissionen führen kann. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden. Auch die Umsetzbarkeit in Bezug auf vorhandene Versorgungsleitungen im Untergrund ist vorab zu prüfen und die Umsetzung von Baumstandorte ämterübergreifend zu klären.

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

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

im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

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

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an (→ M11: Saisonale/temporäre klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume). Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren. Letztendlich ist es das Zusammenspiel zahlreicher Akteure und die Umsetzung vieler Einzelmaßnahmen, welche die Stadt Göppingen nachhaltig und langfristig an die Auswirkungen des Klimawandels anpassen.

Tabelle 23: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für Göppingen.

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

01 Begrünung von Innen- und Hinterhöfen

Kurzerläuterung

- Entsiegelung und Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts
- Erhöhung der Aufenthaltsqualität
- Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Innen- und Hinterhöfe
- Vorrangig im Bereich der Innenstadt



Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: Jan Weber-Ebnet)

02 Schaffung neuer öffentlicher Grünräume

Kurzerläuterung

- Pocket-Parks, Mikro-Parks, Piko-Parks,...
- Kleine Parks und gärtnerisch gestalteten Grünflächen im städtischen Raum, besonders auch im Wohn- und Arbeitsumfeld

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts
- Erhöhung der Aufenthaltsqualität
- Vernetzung von Grünflächen
- Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Plätze, Wege, Straßen, Baulücken, Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)



Bild: Spitalplatz Göppingen (Quelle: Sandra Teuber)

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

03 Klimatische Optimierung von Oberflächen im Außenraum

Kurzerläuterung

- Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption
- Baumaterialien, die wenig Wärme speichern

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts

Räumliche Umsetzung

- Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



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

04 Entsiegelung bzw. Versiegelungsanteil minimieren

Kurzerläuterung

- Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.)
- Niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts
- Vernetzung von Grünflächen
- Synergien zum Niederschlagswassermanagement durch erhöhte Versickerungsraten

Räumliche Umsetzung

- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe



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

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

05 Blau-grüne Außenraumgestaltung

Kurzerläuterung

- Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum
- Erhöhung des Vegetationsanteils entlang von Fuß- und Fahrradwegen (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.)
- Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbe-standenen) Grünflächen minimieren
- Unter Berücksichtigung der vorhandenen oberirdischen und unterirdischen Versorgungs- und Entwässerungsinfra-strukturen
- Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanla-gen auf Plätzen)

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber (bei Pflan-zung neuer Bäume) und nachts
- Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Plätze, Parkplätze, Straßen, Wege



Bild: Rheinallee in Ludwigshafen (Quelle: Stadt Ludwigshafen)

06 Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien

Kurzerläuterung

- Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Über-dachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)
- Sitzgelegenheiten und Verweilräume im Schatten schaffen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflan-zung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude (besonders im Wohn- und Arbeitsumfeld)

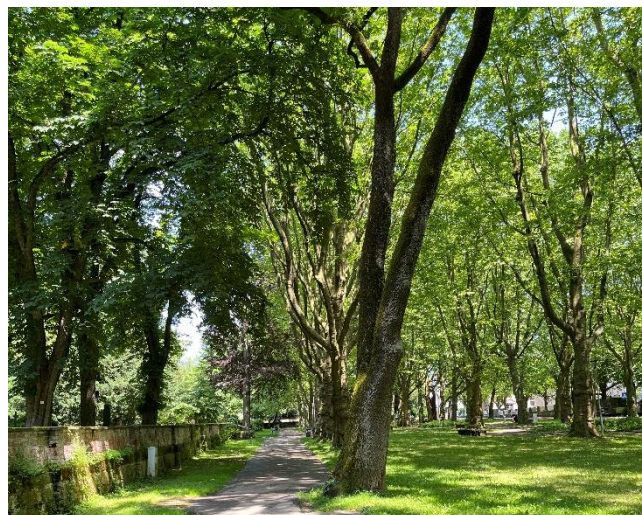


Bild: Mörikeanlagen Göppingen (Quelle: Sandra Teuber)

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

07 Entwicklung und Optimierung öffentlicher Grünflächen

Kurzerläuterung

- Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)
- Großkronige Bäume mit hoher Verschattung und Verdunstungsleistung

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts
- Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Ludwigsplatz (Quelle: Stadt Ludwigshafen)

08 Erhalt und Verbesserung bestehender Parks, Grün- und Waldflächen

Kurzerläuterung

- Schutz und Pflege von Grünflächen, die das Stadtklima besonders begünstigen
- Auszeichnung als besonders wichtiger kühlende Räume
- Schutz von Ausgleichsräumen mit einer sehr hohen Bodenkühlleistung und Aufwertung von Böden mit mittlerer bis geringer Bodenkühlleistung
- Verbesserung des Bodenaufbaus (Bodenlockerung, Bodenauftrag, usw.), Bodenschutz, Etablierung von verdunstungsstarken Pflanzen, Bewässerungsmaßnahmen, Begrünung und Entsiegelung

Wirkung

- Optimierter Kaltfluthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird
- Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)



Bild: Kriegergarten, Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hippler, GEO-NET)

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

09 Erhalt und Erweiterung von Wasserflächen

Kurzerläuterung

- Stadtklimafunktion von Fließ- und Stillgewässer, sowie sonstiger Wasserflächen
- Kleine Wasserflächen, wie Brunnenanlagen und Wasserspiele
- Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die Kalt- und Frischluft transportiert wird

Wirkung

- Während der Sommermonate und besonders bei Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks)
- Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken

Räumliche Umsetzung

- Gewässer, Grün- und Freiflächen

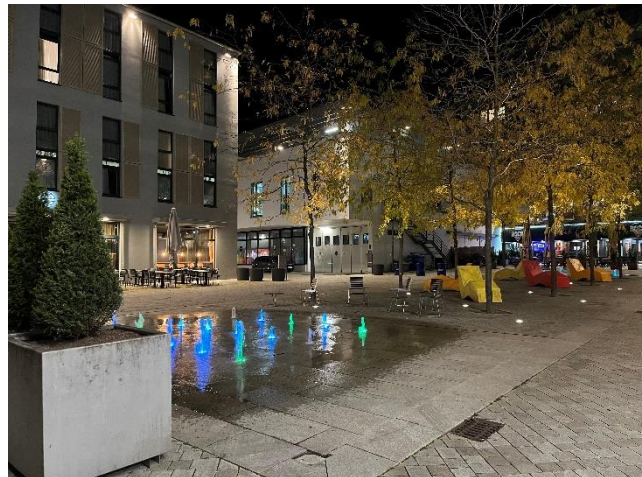


Bild: Brunnen am Kornhausplatz in Göppingen (Quelle: Sandra Teuber)

10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme

Kurzerläuterung

- Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolen-systemen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung
- Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen
- Straßen, Wege, Plätze



Bild: Regenwasserteich, Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: M. Lübbecke)

Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen im Außenbereich an heißen Tagen

11 Saisonale/temporäre klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume

Kurzerläuterung

- Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen
- Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebbarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern

Räumliche Umsetzung

- Plätze, Brachflächen
- Als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt



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

Optimierung der Durchlüftung und der nächtlichen Kaltluftversorgung

12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports

Kurzerläuterung

- Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)
- Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen

Wirkung

- Verbesserung der Kaltluftströmung von kühleren Flächen im Umland in den Stadtraum
- Reduktion des Wärmestaus in überwärmten Stadtbereichen

Räumliche Umsetzung

- Neubau
- Gebäudekomplexe
- Freiflächenentwicklung
- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

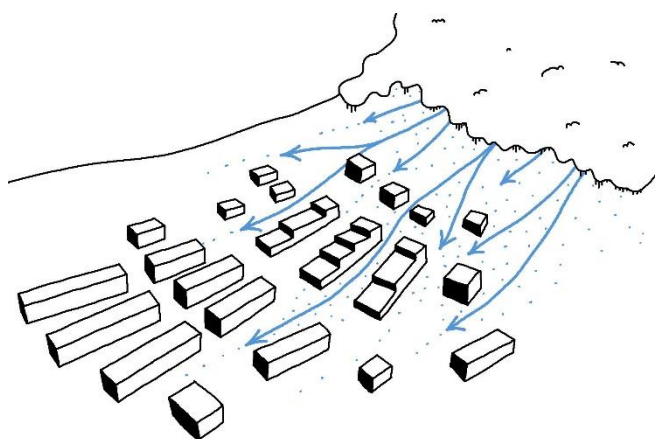


Bild: Gebäude parallel zur Kaltluftströmung (Quelle: berchtoldkrass space&options, Stadt Zürich)

Optimierung der Durchlüftung und der nächtlichen Kaltluftversorgung

13 Optimierung der Baukörperstellung und Gebäudeabstände für kleinskalige Durchlüftung

Kurzerläuterung

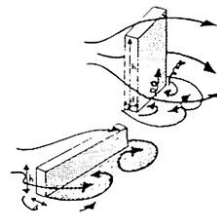
- Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)
- Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht

Wirkung

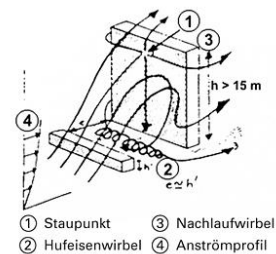
- Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme
- Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung
- Reduktion des Wärmestaus
- Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung

Räumliche Umsetzung

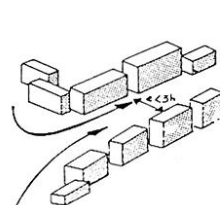
- Neubau
- Gebäudekomplexe
- Freiflächenentwicklung
- Grün- und Freiflächen im Stadtraum und Umland
- Gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen
- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



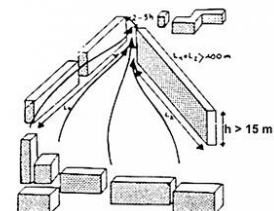
a) Bildung von Nachwirbeln



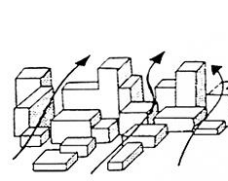
b) Frontwirbelbildung



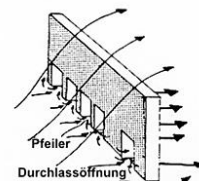
c) Kanalisierungswirkung



d) Venturiwirkung



e) Windschutzwirkung



f) Durchlasswirkung

Bild: Beeinflussung von Strömungen durch Gebäude (Quelle: Gandemer, Klimafibel)

14 Auflockerung der Bebauung bei Rückbau und Nachnutzung bebauter Flächen

Kurzerläuterung

- Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts
- Verbesserung der Durchlüftung
- Synergien zum Niederschlagswassermanagement
- Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung

Räumliche Umsetzung

- Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen sowie Garagen
- Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen
- Bahnanlagen



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

Optimierung der Durchlüftung und der nächtlichen Kaltluftversorgung

15 Erhalt und Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevanten Flächen

Kurzerläuterung

- Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen, wie Wiesen, Felder, Kleingärten und Parklandschaften (im Stadt- und Umland), die positiven Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben
- Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft

Wirkung

- Schutz vor stärkerer Überwärmung
- Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung
- Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen Stadtraum und Umland
- Wiesen und extensives Grünland



Bild: Österbach und Barbarossasee (Quelle: Stadt Göppingen)

Verringerung der Wärmebelastung im Innenraum von Gebäuden

16 Dachbegrünung

Kurzerläuterung

- Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)

Wirkung

- Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz
- Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich
- Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
- Gebäude (Neubau und Bestand, soweit rechtlich zugelassen)



Bild: Intensiv begrünter Dachgarten mit Kräuterwiesen, Hecken, Hochbeeten, Ölweiden und einem Gewächshaus, München (Quelle: Wolfgang Heidenreich 2015, Grüne-Stadt-der-Zukunft.de)

17 Fassadenbegrünung

Kurzerläuterung

- Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)

Wirkung

- Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas
- Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zulässig)



Bild: Fassadenbegrünung Kleidertreff West in Ludwigshafen (Quelle: Stadt Ludwigshafen)

Verringerung der Wärmebelastung im Innenraum von Gebäuden

18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen

Kurzerläuterung

- Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts
- Verringerter Aufheizen des Innenraumes am Tag
- Verbesserung des Innenraumklimas
- Synergien zum Klimaschutz

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Neubau und Bestand)



Bild: Außenliegende Verschattung Musikschule (Quelle: Stadt Ludwigshafen)

19 Energietechnische Sanierung und klimagerechte Kühlung von Gebäuden

Kurzerläuterung

- Dämmung von Gebäuden
- Helle Farbgebung der Baumaterialien (Erhöhung des Albedowertes)
- Geeignete Raumlüftung
- Nutzung von Prozessabwärme

Wirkung

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

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Bestand)



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

Verringerung der Wärmebelastung im Innenraum von Gebäuden

20 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

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

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

Räumliche Umsetzung

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

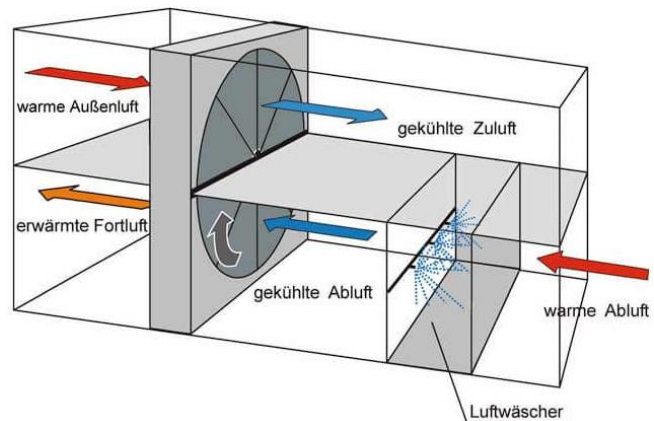


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung
(Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)

21 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes

Kurzerläuterung

- Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum)

Wirkung

- Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)

Räumliche Umsetzung

- Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Bildungseinrichtungen, Pflegeeinrichtungen, betreutem Wohnen oder in der Altenpflege)
- Vorwiegend im Neubau umsetzbar



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

Quellenverzeichnis

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

- Groß, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002)
DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg., 2019): KLIMPRAX Stadtklima. Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen -Hitze und Gesundheit-. 167 S.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* – In Vorbereitung.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.



Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf

Kaspar F., Müller-Westermeier G., Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. ADV. SCI. RES., 10, 99–106

Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Paderborn: UTB, 2. Auflage.

Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: PLOS Medicine.

Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.

Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.

Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.

Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kai-numa M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change re-search and assessment. Nature 463, 747–756.

MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.

Oke (2017): Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.

Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. Nat. Clim. Change 3, 4–6.

Piani C., Haerter J.O., Coppola E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor Appl Climatol 99:187–192

R Core Team (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REKLIES-DE (2017): REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND - NUTZERHANDBUCH.

SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Workingpaper.

Schär, Ch., Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. Geophys. Res. Lett. 23, 669-672.

Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.

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

S Jena (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.

Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung.

<https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>

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



The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). Nature 179, 299–300.
<https://doi.org/10.1038/179299a0>

Themeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. Int J Cli-matol 31(10):1530–1544.

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

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

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

UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Anhang

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

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

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

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



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

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