

Klimaanalyse Stadt Dietzenbach

Auftraggeberin

Kreisstadt Dietzenbach

Stabstelle Klimaschutz
Europaplatz 1
63128 Dietzenbach



Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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



November 2023



Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VII
GLOSSAR	IX
ZUSAMMENFASSUNG	1
1. HINTERGRUND UND ANLASS	2
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	3
2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	3
2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE	7
2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK	10
3. BEARBEITUNGS- UND BETEILIGUNGSPROZESS	16
4. KLIMA UND KLIMAWANDEL IM RAUM DIETZENBACH	19
4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN	19
4.2 KLIMA DER GEGENWART UND VERGANGENHEIT	23
4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN	29
4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN	29
5. ANALYSEMETHODEN – NUMERISCHE MODELLIERUNG	40
5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D	40
5.2 SZENARIENENTWICKLUNG	44
5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN	49
5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN	52
5.5 MODELLAUSGABEBEGRÜßEN	54
5.6 QUALITÄTSSICHERUNG	56
5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN	57
6. ANALYSEERGEBNISSE – NUMERISCHE MODELLIERUNG	61
6.1 NACHTSITUATION	61
6.2 TAGSITUATION	77
7. KLIMAANALYSEKARTEN	88
8. BEWERTUNGSKARTEN UND PLANUNGSHINWEISKARTE	97
8.1 GRUNDLAGEN	97
8.2 GEOMETRISCHE BASIS	98
8.3 BEWERTUNGSKARTEN	99
8.4 SENSITIVITÄTSANALYSE	116
8.5 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA	122
8.6 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN	131



8.7	STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM	152
	QUELLENVERZEICHNIS	159
	ANHANG I: KLIMAWANDEL IN DIETZENBACH	168



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 2020) 3

ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018)..... 4

ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN, S., HIETE, M. UND BECK, C. 2021) 5

ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ UND SETT 2019). 6

ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION ZWISCHEN 2001 UND 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019) 7

ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)). 8

ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) 11

ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) 12

ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLUNG 2022) 13

ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE 16

ABBILDUNG 11: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB (RF = RADIATIVE FORCING) DER VERSCHIEDENEN IPCC-KLIMASZENARIEN (DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE; CUBASCH ET AL. 2013). 21

ABBILDUNG 12: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS 23

ABBILDUNG 13: KLIMADIAGRAMM DER STATION FRANKFURT-MAIN-WESTEND (NÄCHSTGELEGENE STATION ZU DIETZENBACH) FÜR DEN REFERENZZEITRAUM 1991 – 2020 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B). 23

ABBILDUNG 14: ENTWICKLUNG DER MITTELTEMPERATUR IN DIETZENBACH IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2022 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B). 25

ABBILDUNG 15: JAHRESWERTE DES TROCKENHEITSINDEX (DE MARTONNE) IN DIETZENBACH FÜR DEN ZEITRAUM 1970 BIS 2022 26

ABBILDUNG 16: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{MAX} \geq 30 \text{ °C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN DIETZENBACH (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023) 26

ABBILDUNG 17: SAISONMITTELWERTE DER BODENFEUCHTE (IN % NFK) IN DIETZENBACH IM ZEITRAUM 1991 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023)..... 27

ABBILDUNG 18: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN DIETZENBACH FÜR DEN ZEITRAUM 1981 – 2021, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION DIETZENBACHS (FRANKFURT AM MAIN) (DWD 2022A). 28

ABBILDUNG 19: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JÄHRLICHEN ANZAHL AN TAGEN MIT EINEM NIEDERSCHLAG > 30 MM IN DIETZENBACH (NACH DWD 2023). 28

ABBILDUNG 20: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN DIETZENBACH (73,4 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1981 - 2022, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION FRANKFURT-MAIN (DWD 2022A). 29

ABBILDUNG 21: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN DIETZENBACH (ALLE RCP-SZENARIEN). 31



ABBILDUNG 22: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN DIETZENBACH (RCP 8.5).
 32

ABBILDUNG 23: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN
 DIETZENBACH (RCP 8.5). 36

ABBILDUNG 24: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN PRO JAHR MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG ($N \geq 20$
 MM/D) IN DIETZENBACH (ALLE SZENARIEN). 38

ABBILDUNG 25: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 30$ MM/D
 INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN DIETZENBACH (RCP 8.5). 39

ABBILDUNG 26: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN (TSURF = „SURFACE TEMPERATURE“)
 FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D..... 43

ABBILDUNG 27: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR (TSURF = „SURFACE TEMPERATURE“)
 SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR (T2M = TEMPERATUR AUF 2 M Ü. GR.) VON BZW. ÜBER ASPHALT
 SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND
 EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES 44

ABBILDUNG 28. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE) 46

ABBILDUNG 29: RÄUMLICHE LAGE DER 73 ENTWICKLUNGSFLÄCHEN (BLAUE FLÄCHEN) MIT FORTLAUFENDER
 NUMMERIERUNG..... 48

ABBILDUNG 30: GELÄNDEHÖHEN IN DIETZENBACH UND DER NÄHEREN UMGEBUNG..... 49

ABBILDUNG 31: ANWENDUNG DES MISCHPIXELANSATZES FÜR PRÜFFLÄCHEN IN DER ZUKUNFTSMODELLIERUNG..... 52

ABBILDUNG 32: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND
 VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN
 (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992) 52

ABBILDUNG 33: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION (BLAUE KURVE) SOWIE FÜR
 DAS SZENARIO „SCHWACHER“ KLIMAWANDEL (KLIMADELTA = 1,0 K) UND „STARKER“ KLIMAWANDEL
 (KLIMADELTA = 2,8 K). 53

ABBILDUNG 34: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS
 DIETZENBACHER STADTGEBIET..... 64

ABBILDUNG 35: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD (04 UHR) DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS IM
 ZUKUNFTSSZENARIO (SCHWACHER KLIMAWANDEL) FÜR DAS ZIELJAHR 2045..... 65

ABBILDUNG 36: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD (04 UHR) DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS IM
 ZUKUNFTSSZENARIO (STARKER KLIMAWANDEL) FÜR DAS ZIELJAHR 2045. 66

ABBILDUNG 37: PRINZIPSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM. 67

ABBILDUNG 38: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS
 DIETZENBACHER STADTGEBIET..... 70

ABBILDUNG 39: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE (04 UHR) IM BEREICH VON
 SIEDLUNGSENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM DIETZENBACHER STADTGEBIET (LINKS: STATUS QUO; RECHTS:
 ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“) 71

ABBILDUNG 40: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS DIETZENBACHER
 STADTGEBIET. 73

ABBILDUNG 41: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD (04 UHR) IM BEREICH VON
 SIEDLUNGSENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM DIETZENBACHER STADTGEBIET (LINKS: STATUS QUO; RECHTS:
 ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“) 74

ABBILDUNG 42: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS
 DIETZENBACHER STADTGEBIET..... 76



ABBILDUNG 43: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE (04 UHR) IM BEREICH VON SIEDLUNGSENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM DIETZENBACHER STADTGEBIET (LINKS: STATUS QUO; RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“) 77

ABBILDUNG 44: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM IST-ZUSTAND FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 79

ABBILDUNG 45: WÄRMEBELASTUNG AM TAGE (14 UHR) DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS IM ZUKUNFTSSZENARIO (SCHWACHER KLIMAWANDEL) FÜR DAS ZIELJAHR 2045. 80

ABBILDUNG 46: WÄRMEBELASTUNG AM TAGE (14 UHR) DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS IM ZUKUNFTSSZENARIO (STARKER KLIMAWANDEL) FÜR DAS ZIELJAHR 2045. 81

ABBILDUNG 47: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN. ZUKÜNFTIG EINGESCHRÄNKT ODER GEFÄHRDETE KALTLUFTLEITBAHNEN SIND IN DER KLIMAANALYSEKARTE DER SZENARIEN MIT EINER VIOLETTEN PFEILSIGNATUR DARGESTELLT. 89

ABBILDUNG 48: DREI IDENTIFIZIERTE KALTLUFTLEITBAHNEN IM DIETZENBACHER STADTGEBIET. IM HINTERGRUND WIRD DIE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTER $[M^3/(M*S)]$ ABGEBILDET. 91

ABBILDUNG 49: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTAND FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 93

ABBILDUNG 50: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“ 2045 FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 95

ABBILDUNG 51: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ 2045 FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 96

ABBILDUNG 52: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE (BEISPIEL NICHT AUS DIETZENBACH). 98

ABBILDUNG 53: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) 100

ABBILDUNG 54: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN FÜR DEN SIEDLUNGSRAUM IN DER NACHTSITUATION. 102

ABBILDUNG 55: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM. 103

ABBILDUNG 56: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM IST-ZUSTANDES DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 107

ABBILDUNG 57: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“ FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 108

ABBILDUNG 58: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 109

ABBILDUNG 59: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTANDES FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 113

ABBILDUNG 60: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“ FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 114

ABBILDUNG 61: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“ FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 115

ABBILDUNG 62: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON HOCHALTRIGEN (OBEN), SENIOREN (MITTE) UND KLEINKINDERN (UNTEN) IN EINEM AUSSCHNITT DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS..... 118

ABBILDUNG 63: SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE DES DIETZENBACHER STADTGEBIETS. 120

ABBILDUNG 64: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHNRAUM SOWIE GEWERBE- UND STRAßENRAUM. 122



ABBILDUNG 65: PHK-LEGENDE MIT SIGNATUREN ZUR KENNZEICHNUNG DER GEBIETE MIT SENSITIVEN BEVÖLKERUNGSANTEILEN ANHAND DER BEVÖLKERUNGSDICHTE. 123

ABBILDUNG 66: PHK-SYMBOLLOGIE FÜR SIEDLUNGSRÄUME MIT KALTLUFTFUNKTION. 123

ABBILDUNG 67: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM. 124

ABBILDUNG 68: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DAS DIETZENBACHER STADTGEBIET. 127

ABBILDUNG 69: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. FOKUSRAUM "ALTSTADT" MIT NUMMERIERTEN BEISPIELFLÄCHEN. 146

ABBILDUNG 70: BEWERTUNGSKARTE TAG, FOKUSRAUM "ALTSTADT" 147

ABBILDUNG 71: BEWERTUNGSKARTE NACHT, FOKUSRAUM "ALTSTADT" 147

ABBILDUNG 72: PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR AM TAGE (PET) FÜR DEN FOKUSRAUM "ALTSTADT". 148

ABBILDUNG 73: KLIMAANALYSEKARTE (KAK) FÜR DEN FOKUSRAUM "NEUSTADT" 148

ABBILDUNG 74: NUTZUNGSRASTER FÜR DEN FOKUSRAUM "ALTSTADT" 149

ABBILDUNG 75: LUFTBILD FÜR DEN FOKUSRAUM "ALTSTADT". 149

ABBILDUNG 76: NÄCHTLICHES WINDFELD (KALTLUFTSTRÖMUNG) FÜR DIE BEISPIELFLÄCHE 1 150

ABBILDUNG 77: NÄCHTLICHES WINDFELD (KALTLUFTSTRÖMUNG) FÜR DIE BEISPIELFLÄCHE 4 152

ABBILDUNG 78: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“. 153



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN ... 15

TABELLE 2: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN DIETZENBACH (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 32

TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN DIETZENBACH (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)..... 33

TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER MITTL. NIEDERSCHLAGSSUMME IN DIETZENBACH (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)..... 34

TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M..... 42

TABELLE 6: ZUKUNFTS-SZENARIEN ZUR ABBILDUNG DES DIETZENBACHER STADTKLIMAS 2045 UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE. 47

TABELLE 7: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS IN DIETZENBACH ALS BASIS FÜR DIE REFERENZSITUATION SOWIE DER ZUKUNFTSSZENARIEN 50

TABELLE 8: AUFLISTUNG DER VON FITNAH-3D ANWENDBAREN NUTZUNGSKLASSEN (MODELLEINGANGSDATEN). FÜR DIETZENBACH GENUTZTE KLASSEN SIND FARBIG HINTERLEGT. 50

TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER. 54

TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT. 56

TABELLE 11: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004) 77

TABELLE 12: MITTELWERTE DER ENTWICKLUNGSFLÄCHEN SOWIE DIFFERENZEN „ZUKUNFT MINUS IST“ FÜR P1 (RCP 4.5) UND P2 (RCP 8.5) DER WINDGESCHWINDIGKEIT „WG“, DER KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE „KVSD“, DER KALTLUFTPRODUKTIONSRATE „KPR“, DER NÄCHTLICHEN TEMPERATUR „T04“ UND DER PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTEN TEMPERATUR AM TAGE „PET“. FÜR JEDEN PARAMETER IST JEWEILS DER FLÄCHENMITTELWERT AUFGETRAGEN..... 84

TABELLE 13: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN 90

TABELLE 14: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP..... 100

TABELLE 15: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP..... 103

TABELLE 16: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND UND IN ZUKUNFTSSZENARIEN. 106

TABELLE 17: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG. 119

TABELLE 18: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE HANDLUNGSPRIORITÄTEN FÜR DEN WIRKRAUM. 123

TABELLE 19: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE SCHUTZBEDARFE FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM..... 124

TABELLE 20: FLÄCHENANTEILE DER HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE. 125

TABELLE 21: FLÄCHENANTEILE DER SCHUTZBEDARFE IM AUSGLEICHSRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE. 126



TABELLE 22: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG DER ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM AUßEN- UND INNENRAUM.	130
TABELLE 23: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT DIETZENBACH.....	135
TABELLE 24: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004).	150
TABELLE 25: METADATENSATZ ZUM VEKTORDATENSATZ (PHK, BEWERTUNGSKARTEN).	154



Glossar

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

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

Ausgleichsraum: **Grüngeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen** → *Wirkraum* 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.

GRZ: Die Grundflächenzahl (GRZ) bezeichnet die maximal zulässige Gebäudegrundfläche pro Grundstücksfläche und wird als Dezimalzahl bis höchstens 1 (= vollständig überbaute Grundstücksfläche) angegeben.

IPCC: Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bezeichnet den zwischenstaatlichen Sachverständigenrat für **Klimaänderungen („Weltklimarat“)**. **Dieses wissenschaftliche Gremium sammelt und bewertet aktuelle Informationen der weltweiten Klimaforschung und präsentiert regelmäßige Stellungnahmen und Einschätzungen zu den Folgen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft, Wirtschaft sowie Lösungsansätze und Strategien als Reaktion.** Unter der Federführung des IPCC wurden etwa die RCP-Szenarien entwickelt (→ *RCP-Szenarien*).

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die



Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungsflächen (Wohn- und Gewerbeflächen), die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.

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

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

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

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

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

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 4.5 („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.

Strahlungsantrieb (engl. "radiative forcing"): Die Änderung der Nettostrahlung (Differenz aus Ein- und Ausstrahlung in der Einheit W/m^2) an der Oberseite der Atmosphäre aufgrund der Änderungen eines Klimawandeltreibers (z.B. Änderung der CO_2 -Konzentration oder der von der Sonne abgegebenen Energie).

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.



Wirkraum: Bebaute 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.



Zusammenfassung



1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Klimaanalyse Dietzenbach 2023“ ist eine gesamtstädtische Klimaanalyse nach dem heutigen Stand der Technik. Neben dem Status quo soll zudem in zwei Szenarien-Rechnungen das zukünftige Stadtklima in Dietzenbach untersucht werden. Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die eine Stadtklimamodellierung anraten:

- Mit den Klima-Novellen des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 sowie des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) im Jahr 2017 haben sich die für die Stadtklimatologie relevanten Rechtsnormen noch deutlicher als zuvor für stadtklimatische Fragen mit Blick auf das Schutzgut der menschlichen Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse geöffnet. Mit diesen Entwicklungen sind die Ansprüche an die inhaltliche Aussagetiefe und räumliche Aussagegenauigkeit der benötigten Analysen noch einmal deutlich gestiegen.
- Die für Stadtklimaanalysen maßgebliche VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ ist heutzutage ein umweltmeteorologischer Standard, der zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde (VDI 2015).
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeinseleffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenarienbasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmaßnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegende Klimaanalyse das übergeordnete Ziel einer Detaillierung und Konkretisierung der vorangegangenen Analysen hinsichtlich Wärmeinsel und thermischer Komfort abgeleitet. In der Umsetzung bedeutet dies eine computermodellgestützte analytische Fokussierung auf den städtischen Kaltlufthaushalt und die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der Planungshinweiskarte soll weiterhin die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.



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 (Kapitel 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kapitel 4) über stadtklimatisch relevanten meteorologisch-physikalischen Prozessen im urbanen Umfeld (Kapitel 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten (u.a. Kapitel 3). Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

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

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

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

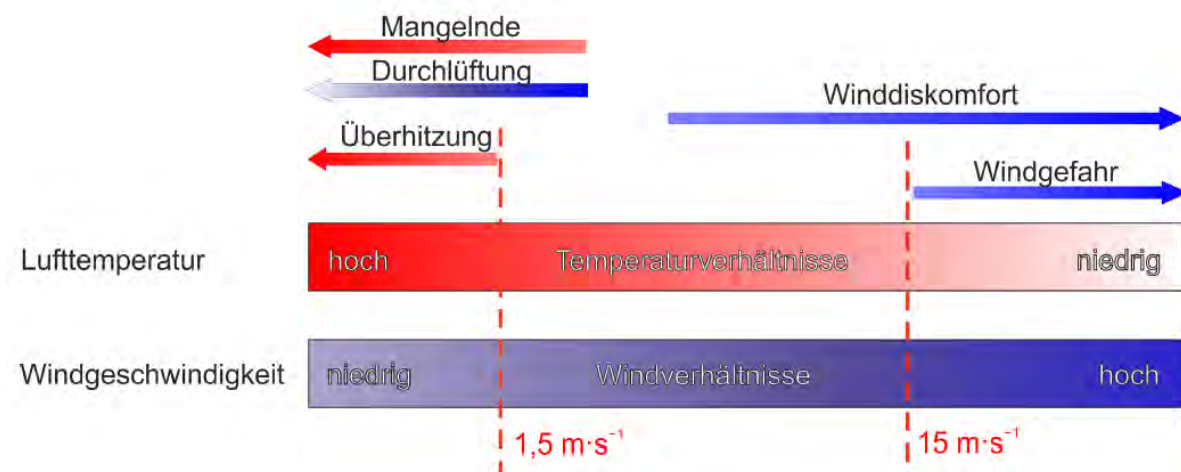


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 2020)



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 hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen wie die Auftretshäufigkeit 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.

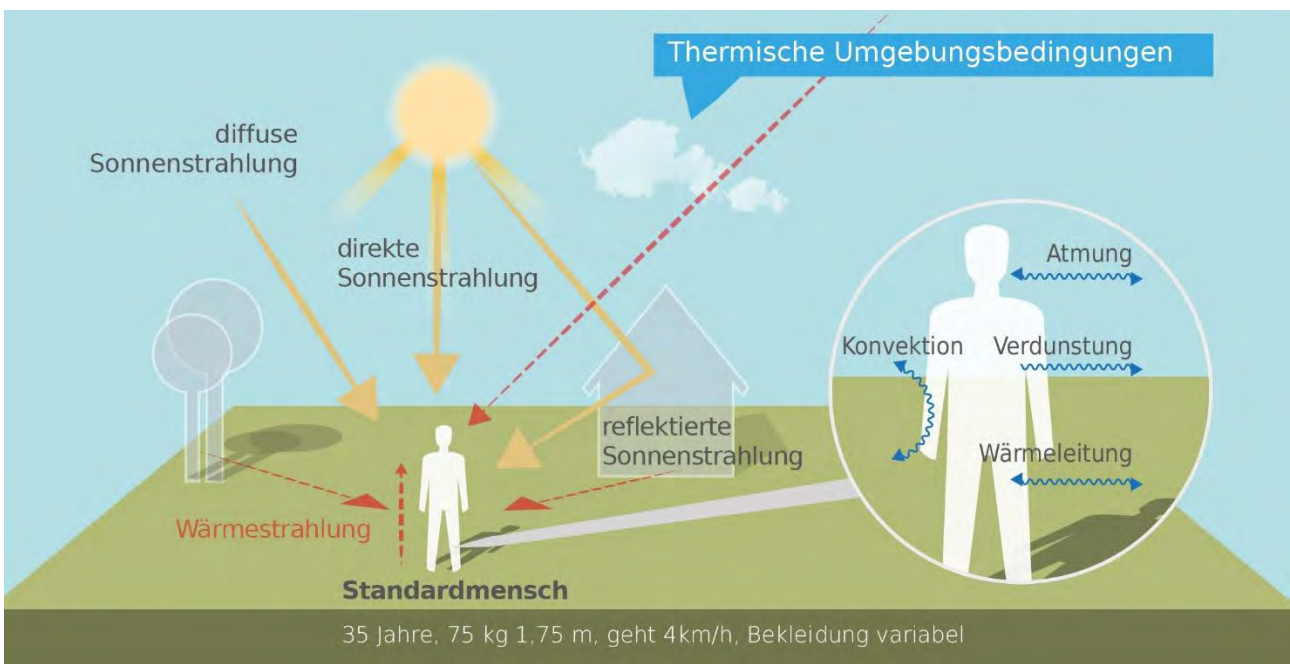


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

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 gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal $+26^{\circ}\text{C}$ 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 aber nicht ableiten.

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 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 (s. 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 annähernd oder sogar über 30 °C; Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

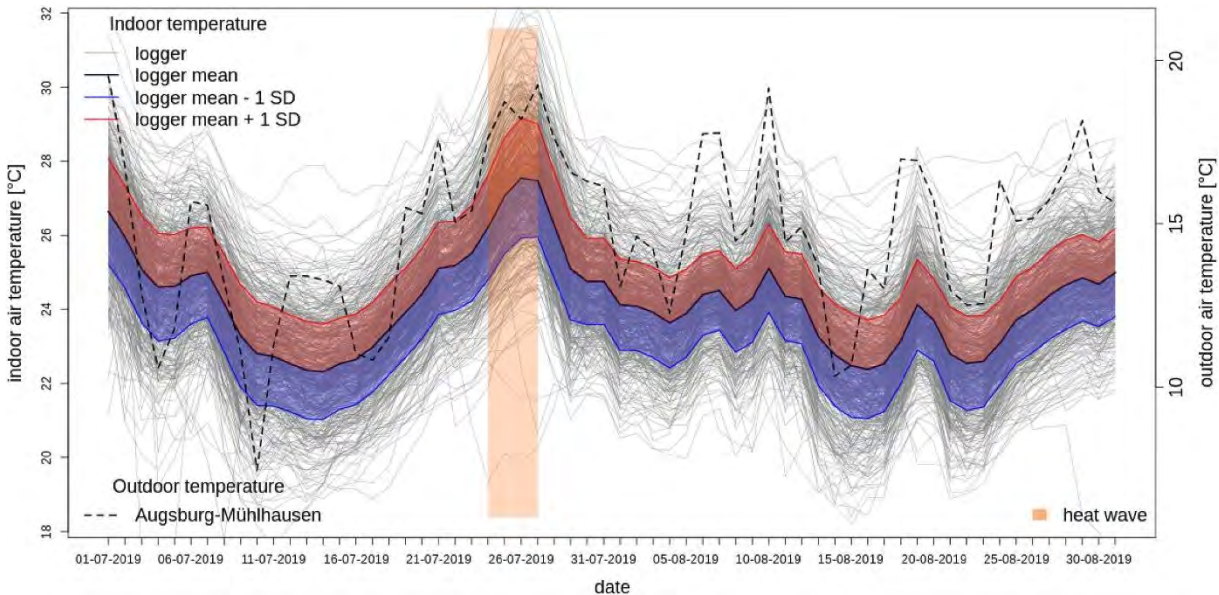


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule) ab. Wie stark diese Abnahme ist, ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt bei moderater körperlicher Arbeit die Leistungsfähigkeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30°C in Kombination mit 50% Luftfeuchtigkeit, dies entspricht einer Wet



Bulb Globe Temperature¹ von 29°C) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 Prozent ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst aber 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 zum einen Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie zum anderen ältere Menschen ab 65 Jahren und vor allem über 80 Jahre (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis eine Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem differenzierteren Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte SeniorInnen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen, und Single-/Pärchenhaushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten vergleichsweise seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

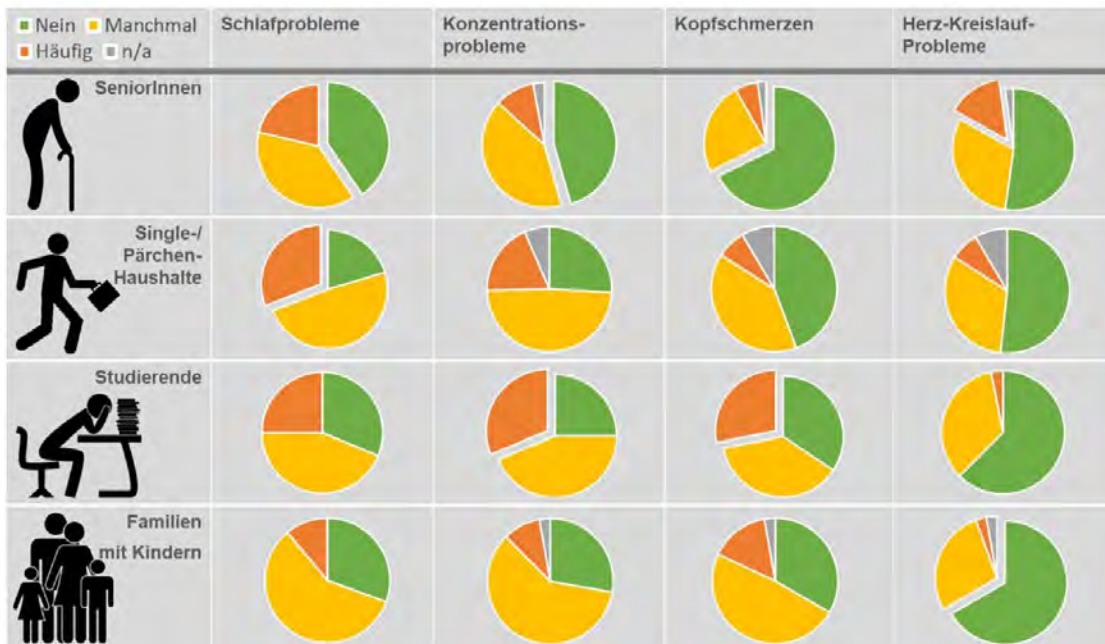


Abbildung 4: Gesundheitsliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz und Sett 2019).

¹ Wet Bulb Globe Temperature: Sog. Kühlgrenztemperatur. Sie bezeichnet die niedrigste Temperatur, die sich durch direkte Verdunstungskühlung in einer Umgebung erreichen lässt, wobei die Wasserabgabe einer feuchten Oberfläche mit der Wasseraufnahme der Umgebungsluft im Gleichgewicht steht.



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

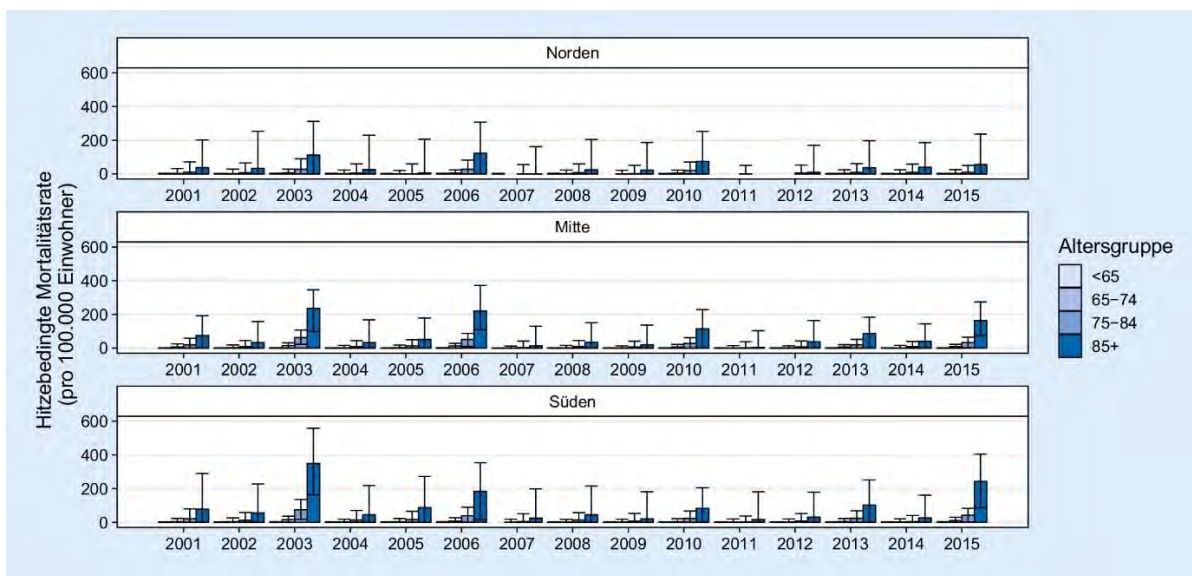


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region zwischen 2001 und 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden, was zu einem Abbau der Wärmebelastung des Menschen führen kann. 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 2012).

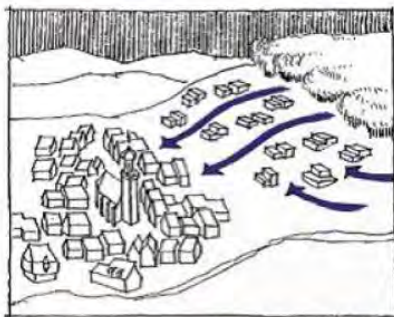
Als wichtige Prämisse für die vorliegende Analyse sollen die relevanten Prozesse und Zusammenhänge im Folgenden noch einmal überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet werden. Wie Abbildung 6 zeigt, sind hier insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit Inversionsneigung auftreten. Eine Inversion ist die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs, der adiabatischen Luftschichtung, in eine mehr oder weniger mächtige, stabile Schichtung der Atmosphäre. Inversionen können



durch großräumige Advektion von Warmluft oder durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert. Inversionen wirken in der Atmosphäre somit stabilisierend. In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.



Berg-/Talwindsystem
(sehr hohe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)



Flächenhafter Kaltluftabfluss am Hang
(hohe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)



Wärmeineleffekt mit Flurwinden
(geringe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)

Gleichzeitiges Auftreten und räumliche Überlagerung

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

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmeffluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht.



Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und auch innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit relativ geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10-)Metern verbunden sind, können Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssysteme in Abhängigkeit der Reliefenergie tal-/hangabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/s sowie Kaltluftpakete von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windssysteme und damit eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata. 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, so dass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind. Speziell für Dietzenbach sind Berg-/Talwindssysteme jedoch nicht relevant.

Diese komplexen Prozesse können in ihrer z.T. räumlichen und zeitlichen Überlagerung ausschließlich mit numerischen Modellen hinreichend gut abgebildet werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund entscheidend, dass alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden können.

Mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels ist von entscheidender Bedeutung, dass konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, bisher nicht eingeführt sind (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). Dasselbe gilt in der Konsequenz auch für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen. Selbstverständlich ist die Kaltluft im Klimawandel aber tendenziell wärmer als gegenwärtig und trägt damit auch weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen bei. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnungen zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes festzumachen.



2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

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

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

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



Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte

Gemäß VDI 3787 Bl.1 entsteht als erstes wichtiges Zwischenprodukt einer Stadtklimaanalyse die Klimaanalysekarte (KAK). Sie hat die Aufgabe, „...die räumlichen Klimateigenschaften 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 Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss (Abbildung 7).

Klimateigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Klimatepe		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau
Freilandklima		190/232/255 hellblau
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb
Stadttrandklima		254/220/0 hellorange
Stadtklima		255/165/0 orange
Innenstadtklima		255/127/127 hellrot
Gewerbe-, Industrieklima		210/210/210 hellgrau

Klimateigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Luftaustausch		
Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
Talabwind, klimatisch und/ oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Hindernis für den Kalt- luftabfluss (Barriere)		34/74/126 blau
Kaltlufteinzugsgebiet		43/75/155 hellblau

Abbildung 7: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Klimaanalysekarte gemäß VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015)

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015,13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen.

Dies erfolgt im Rahmen der Erstellung einer Planungshinweiskarte (PHK) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse. Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte (hier auch bei den Bewertungskarten) 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 also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die Menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung.










Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck	Raumspezifische Hinweise		
Grün- und Freiflächen			Begrünung im Stadt- raum und in Wohnge- bieten		15/95/44 dunkelgrün
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün	Hauptverkehrsstraße mit Potenzial für hohe bis extreme Schadstoffbelastun- gen, DTV > 10000		255/0/0 rot
Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung		174/241/176 grün			
Ausgleichsraum geringer Bedeutung		211/255/190 hellgrün			
Siedlungsflächen					
Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klima- relevanter Funktion		255/255/225 gelb			
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange			
Bebautes Gebiet mit bedeutender klima- relevanter Funktion		255/127/127 rot			
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygieni- schen Nachteilen		138/43/226 violett			

Abbildung 8: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Klimaanalysekarte gemäß VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015)

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



Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D-GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Abbildung 9). In der Praxis existieren zum einen auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt im Übrigen keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um eben dieser Herausforderung zu begegnen).

Darüber hinaus stellen selbstverständlich auch Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bis Weilen aber auch als reine messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden auch KI-basierte Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der anderen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimateigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere/große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen.
Erforderliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und 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

Abbildung 9: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022)

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 (reinen GIS-Modellierungen, Messungen) den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Diese Felder können im sog. postprocessing verwendet werden, um die stadtklimatisch relevanten Kenngrößen (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes) in ihrer quantitativen Ausprägung abzuleiten. 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.

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft sind eine ganze Reihe von numerischen Modellen zum Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen verfügbar. Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über solche Modelle, die gegenwärtig vorrangig im Einsatz sind. 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 über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung, gleichzeitig aber auch die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Bspw. werden Modelle der Kategorie 3 zurzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet und für ihre Verwendung wird aufgrund ihres hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt.

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



Tabelle 1: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen

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

3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Oktober 2022 und November 2023. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der dortigen Projektleitung des Klimaschutzmanagements sowie dem Fachbereich für Stadtplanung und Stadtentwicklung angegangen.

 Stufe III: Planerische Inwertsetzung der Modellergebnisse und weitere Informationen (Werteebene)

Planungshinweiskarte
 Mit Maßnahmenkatalog und ausführlichem Bericht

Bewertungskarten
 Tag /Nacht, Status quo und Prognosen

 Stufe II: Visualisierung und Synthese der Modellergebnisse (Sachebene)

3 Synthetische Klimaanalysekarten
 Nacht-Situation für Status quo sowie die Zukunftsrechnungen

Einzelkarten der Klimaparameter
 Bodennahes Temperatur- und Windfeld, Kaltluftvolumenstrom und -produktionsrate (Nacht), Gefühlte Temperatur (Tag)

 Stufe I: Vorbereitung und Durchführung der Modellierung (Analyseebene)

3 Hochauflösende Modellrechnungen
 Status quo und zwei Zukunftsrechnungen (Berücksichtigung von Stadtentwicklung und Klimawandel)

Abbildung 10: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Im stadt- und umweltschutzplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Rahmen eines möglichst vollständig



operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst und Scholles 2008). Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

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

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

Aus diesen Prämissen wurde für das vorliegende Projekt ein Bearbeitungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäß den Ansprüchen und Wertmaßstäben der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (PAG) andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie 3787 Bl. 1 ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.



Folgende Institutionen der Kreisstadt Dietzenbach waren regelmäßiges Mitglied der begleitenden Arbeitsgruppe zur Planungshinweiskarte Stadtklima:

- Klimaschutzmanagement
- Stadtplanung und Stadtentwicklung

Außer einem Kickoff-Termin und der Abstimmung über die Zukunftsszenarien fanden noch drei weitere digitale Termine zur Präsentation von (Zwischen-)Ergebnissen sowie für weitere Absprachen statt.

- Kickoff (digital) am 24.01.2022
- Abstimmung über Zukunftsszenarien am 14.04.2022
- Methodik der Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsanalyse am 19.07.2023
- Vorstellung der Modellergebnisse (Klimaanalysekarte, PET) sowie der Bewertungskarten Tag und Nacht am 18.09.2023
- Vorstellung der Planungshinweiskarte am 20.10.2023



4. Klima und Klimawandel im Raum Dietzenbach

4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN

Die folgende Beschreibung **der vergangenen klimatischen Entwicklung** in Dietzenbach basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; 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.

Anhand der Stadtgrenze Dietzenbachs 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 Messgenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen eines jüngeren Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Die Analyse **zukünftiger klimatischer Änderungen** stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009, IPCC 2013). 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) bereitgestellt.

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

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Dietzenbach ein Modellensemble bestehend aus 19 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tab. A 1 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).

Räumliche und Zeitliche Auflöschung

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 Dietzenbach 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).

RCP-Szenarien

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 4.5, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways), die seit dem fünften IPCC-Bericht die SRES-Szenarien abgelöst haben (Special Report on Emissions Scenarios). Die Zahl in der Bezeichnung der 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 11):

- Das RCP-Szenario 4.5 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2045 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 4.5 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. 4,8 °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. Aktuell befinden 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. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 4.5 und 4.5 finden sich jeweils im Anhang.

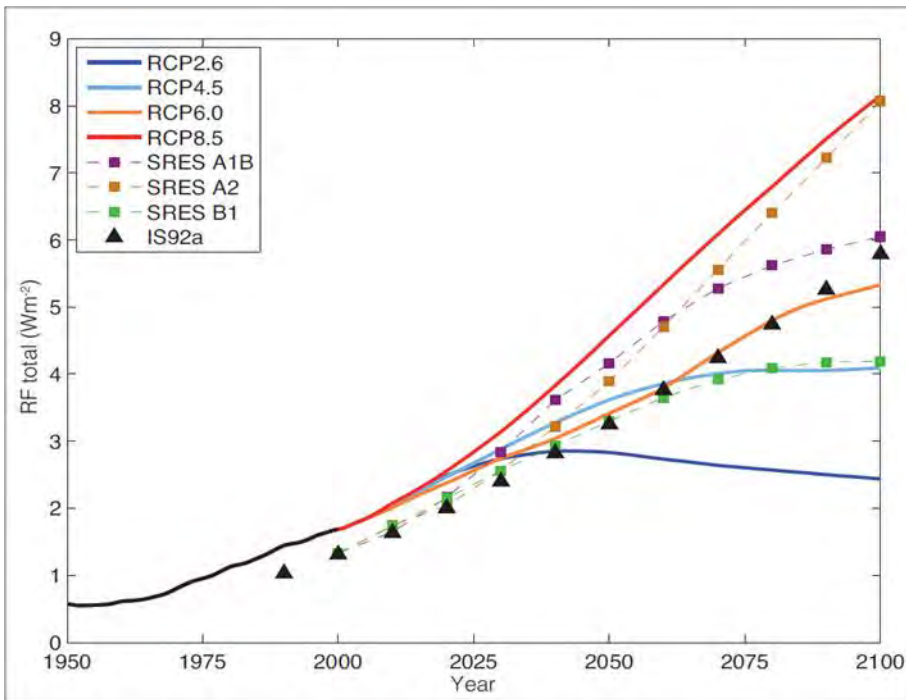


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb (RF = Radiative Forcing) der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013).

Meteorologische Kenntage

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 Dietzenbach wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

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

Bei der 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 (vgl. Abb. A 1 im Anhang). Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.



Statistische Auswertung

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1991 – 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 (vgl. Tab. A 2 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 und der Zeitraum bereits mehrere Jahrzehnte zurückliegt, wurde hier der Zeitraum von 1991 – 2020 als Referenzperiode festgelegt.

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

- Referenzperiode: 1991 – 2020
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2031 – 2060
- 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. Linke et al. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraums 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 (vgl. Abbildung 12).

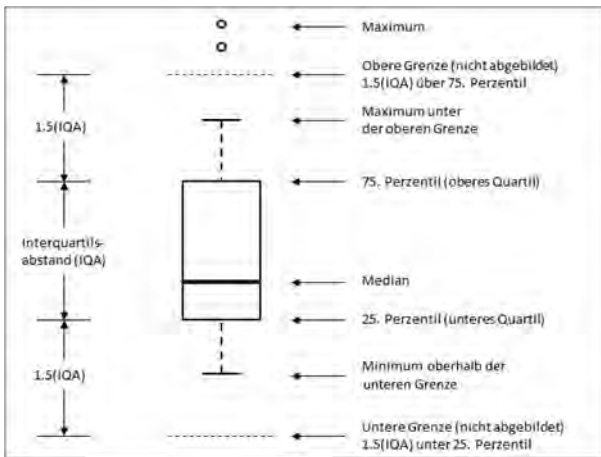


Abbildung 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

4.2 KLIMA DER GEGENWART UND VERGANGENHEIT

Hessen weist zwei unterschiedliche Klimate auf, der nördliche Teil (u.a. Marburg, Fulda, Baunatal) ist durch feuchtes und warmes Kontinentalklima geprägt, wohingegen der südliche Teil (u.a. Frankfurt am Main, Wiesbaden, Kassel), dem auch Dietzenbach zugeordnet wird, ein warm gemäßigtes Ozeanklima mit ganzjähriger Humidität aufweist (Klassifikation nach Köppen-Geiger: Cfb). Die Abbildung 13 zeigt das Klimadiagramm der Dietzenbach nächstgelegenen Klimastation. Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) ist Dietzenbach durch eine langjährige Mitteltemperatur von 10,7 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von ca. 688 mm/Jahr gekennzeichnet. Damit weist Dietzenbach eine höhere Mitteltemperatur als im deutschlandweiten Durchschnitt (9,3 °C; UBA 2022a), jedoch eine geringere jährliche Niederschlagsmenge auf (gesamtdeutscher Mittelwert 790 mm/Jahr; UBA 2022b).

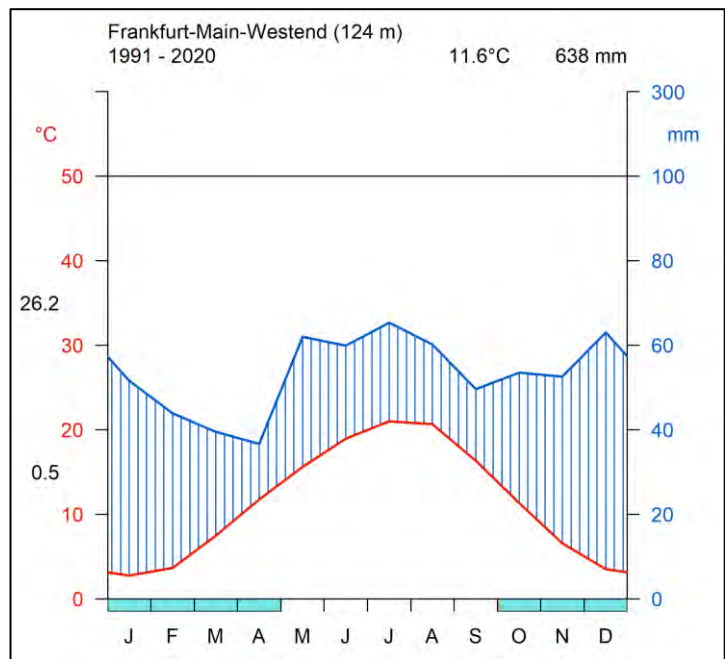


Abbildung 13: Klimadiagramm der Station Frankfurt-Main-Westend (nächstgelegene Station zu Dietzenbach) für den Referenzzeitraum 1991 – 2020 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Dietzenbach – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Jahresmitteltemperatur im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 bereits um 0,8 °C und seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen sogar um 1,7 °C gestiegen (bezogen auf die Periode 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 14).



Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) und insbesondere Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Dietzenbach zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 44 auf 57 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 10 auf 15 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 16).

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein mögliches Maß für die Trockenheit ist der Trockenheitsindex nach de Martonne, der sich aus dem Jahresniederschlag und der Jahresmitteltemperatur ergibt (Gavrilov et al. 2019). Der Trockenheitsindex unterliegt in Dietzenbach deutlichen Schwankungen, zeigt seit den 2000er Jahren insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (vermehrte Trockenheit), wobei der Grenzwert zur (semi-)Aridität bislang selbst in den extremen Trockenjahren nicht unterschritten wurde (Abbildung 15). Die Abnahme des Trockenheitsindex ist nicht der einzige, aber ein wesentlicher Faktor für die Bodenfeuchte, die in Dietzenbach über die letzten 20 Jahre gesehen ebenfalls signifikant abnimmt (Abbildung 17). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30 , dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind (mwvlw rlp 2023). Erwartungsgemäß fällt die Bodenfeuchte im Sommer (orange Balken in der Abbildung 17) deutlich geringer aus als in den anderen Jahreszeiten (graue Balken). Vereinzelt gab es in Dietzenbach bereits Sommer, die im Mittel keine optimale Wasserversorgung der Pflanzen boten und es ist davon auszugehen, dass es mindestens lokal in Dietzenbach Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

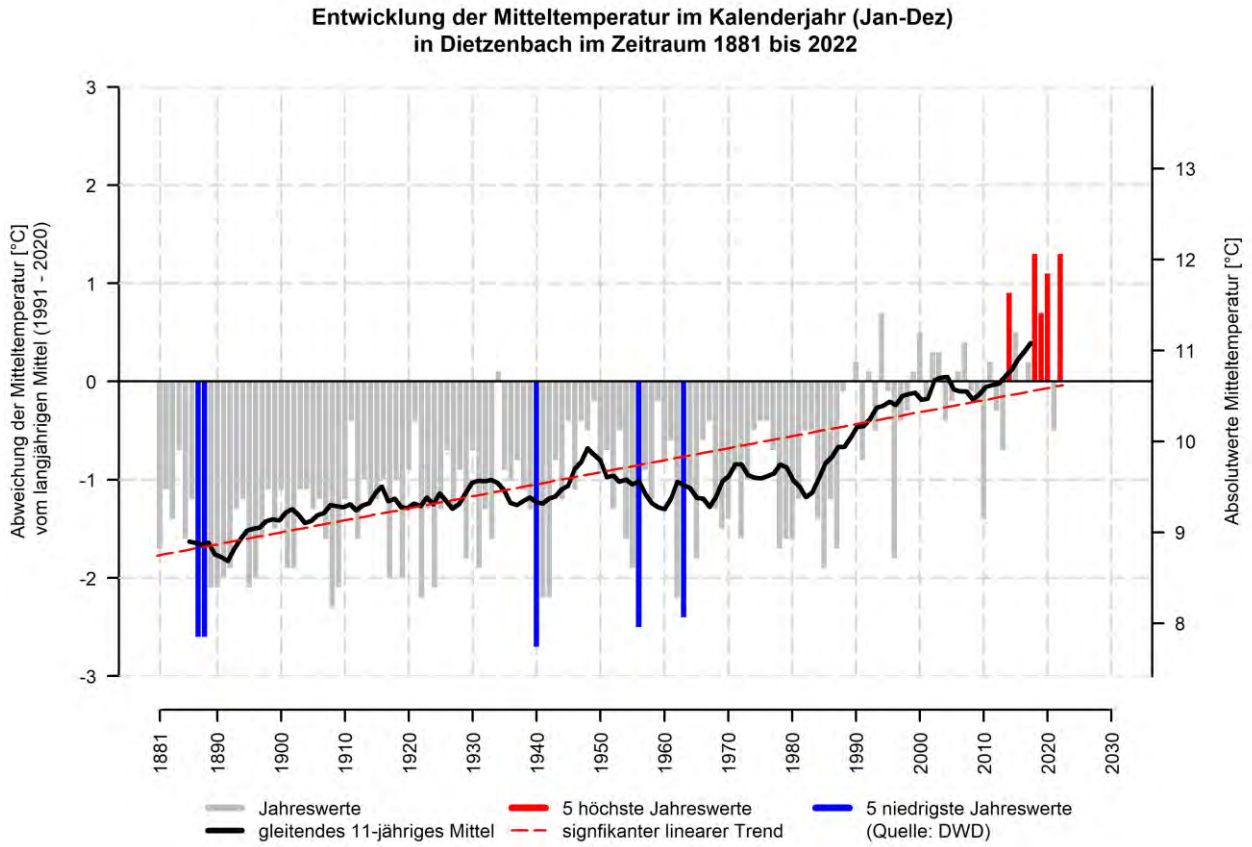


Abbildung 14: Entwicklung der Mitteltemperatur in Dietzenbach im Zeitraum von 1881 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).



Entwicklung der Anzahl an heißen Tagen in Dietzenbach

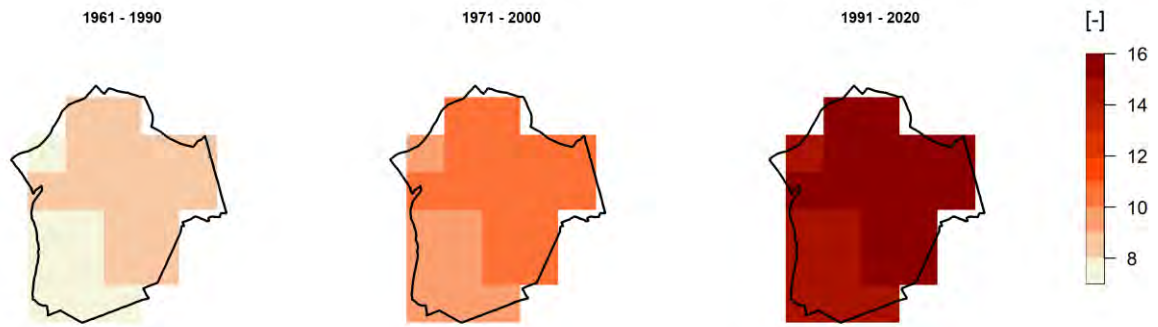
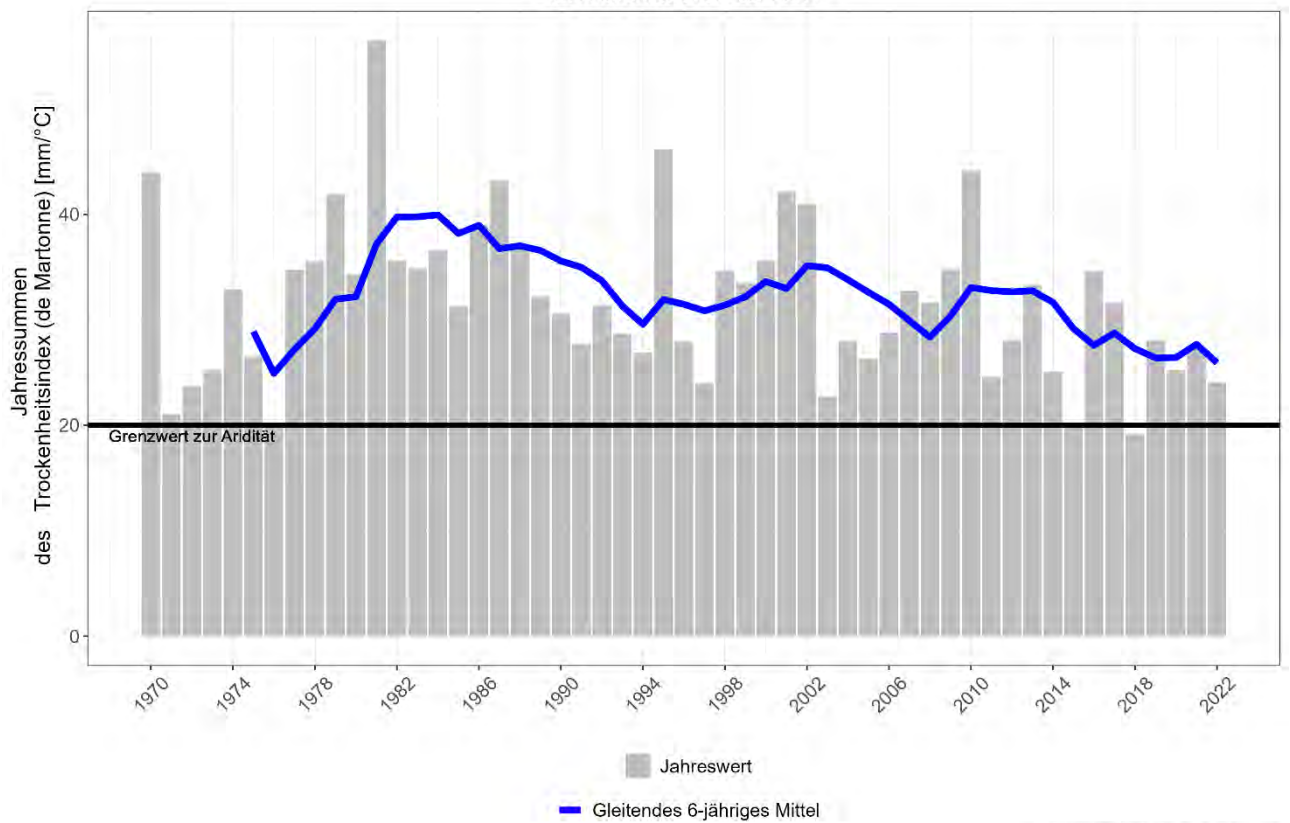


Abbildung 16: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$) in verschiedenen Perioden in Dietzenbach (eigene Berechnung nach DWD 2023)

aufsummierte Jahreswerte des Trockenheitsindex (de Martonne) in Dietzenbach im Zeitraum 1970 bis 2022



(Quelle: DWD 1x1km Raster)

Abbildung 15: Jahreswerte des Trockenheitsindex (de Martonne) in Dietzenbach für den Zeitraum 1970 bis 2022

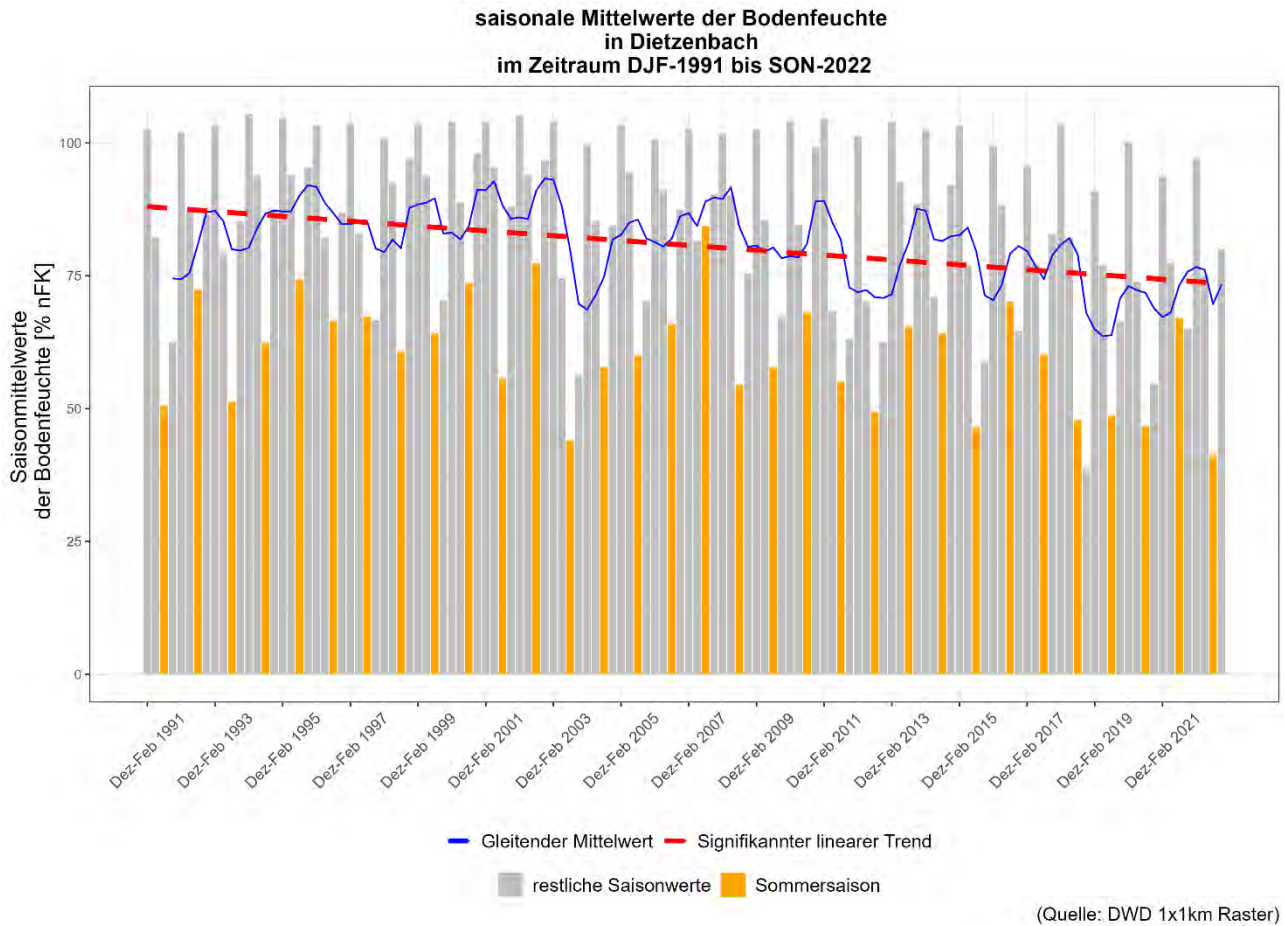


Abbildung 17: Saisonmittelwerte der Bodenfeuchte (in % nFK) in Dietzenbach im Zeitraum 1991 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2023)

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Frankfurt am Main dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Dietzenbach. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 3,2 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leichte Brise). Sowohl in den Nachtstunden als auch am Tag häufen sich Südwestwinde gefolgt von sekundären Maxima aus nordöstlichen (in der Nacht stärker ausgeprägt; Abbildung 18) – gerade in Bezug auf die Windrichtung sind die Ergebnisse aus Frankfurt am Main nur bedingt auf Dietzenbach übertragbar, da sich Dietzenbach auf einer höheren Geländeebene befindet. Auf das im Rahmen der Stadtklimaanalyse modellierte kleinräumige Windfeld übt die übergeordnete Windrichtung hingegen nur einen geringen Einfluss aus, stattdessen werden die örtlich entwickelten, landschaftsgesteuerten Luftaustauschprozesse während einer windschwachen, sommerlichen, autochthonen Wetterlage aufgezeigt.

Mit der zunehmenden Erwärmung steigt das Potenzial für Starkniederschläge, die statistisch schwer zu erfassen sind, da sie eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität besitzen und oftmals nur lokal auftreten. Eine flächendeckende Erfassung solcher Ereignisse mittels Radar ist erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts möglich (Radar-Online-Aneichung; vgl. DWD 2022c). Diese Zeitreihen sind jedoch noch zu kurz, um gesicherte klimatische Aussagen treffen zu können. Längere Zeitreihen liegen für Tageswerte des Niederschlags vor. Dabei können nur Häufigkeiten von Niederschlägen über einem bestimmten Schwellenwert ausgewertet werden (bspw. Tage > 10 mm Niederschlag), eine Kombination mit der Dauer des zugehörigen Ereignisses ist nicht möglich.



Windrichtungsverteilung 1/1981 - 12/2021
Station: 1420 Frankfurt-Main

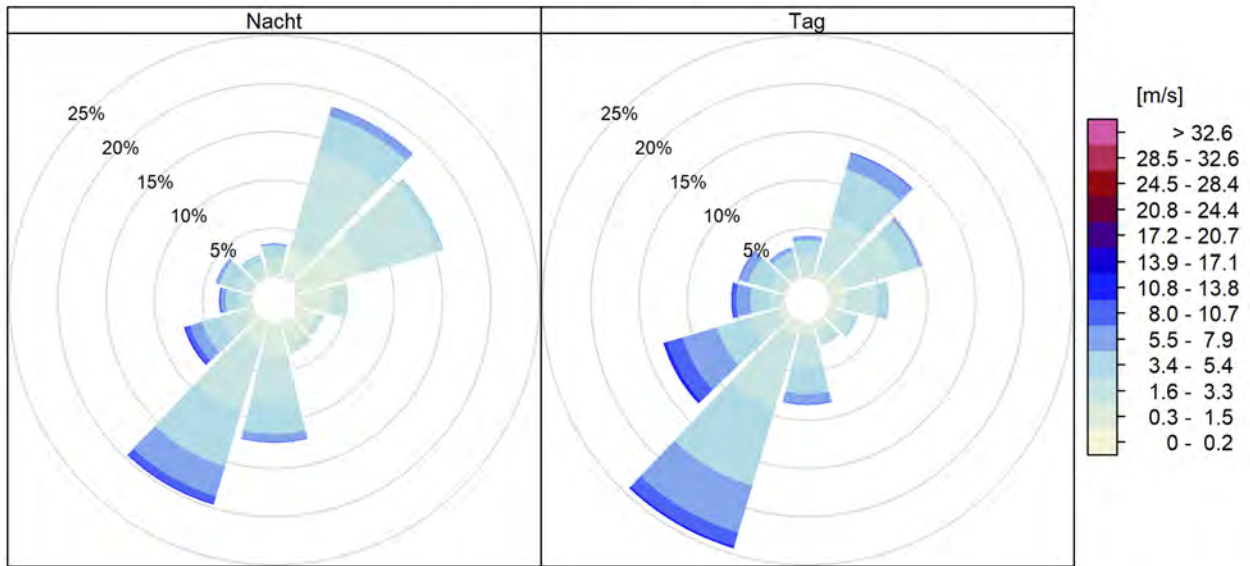


Abbildung 18: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Dietzenbach für den Zeitraum 1981 – 2021, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Dietzenbachs (Frankfurt am Main) (DWD 2022a).

Entwicklung der Anzahl an Tagen mit Niederschlag ≥ 30 mm in Dietzenbach

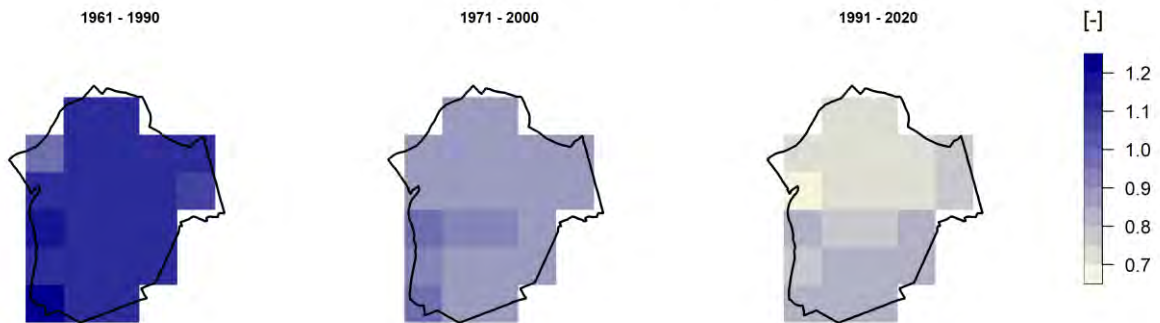


Abbildung 19: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Dietzenbach (nach DWD 2023).

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in Dietzenbach keine signifikanten Änderungen an Tagesniederschlägen von mehr als 10, 20 bzw. 30 mm zu erkennen (s. Tabelle 4). Für die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 30 mm deutet sich eine leicht abnehmende Häufigkeit an (vgl. Abbildung 19), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.



4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

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

In Dietzenbach traten in den letzten 35 Jahren im Mittel 73,4 windschwache Strahlungs-nächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 20). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel rund 23 windschwache Strahlungs-nächte beobachtet, was einem Anteil von 25 % entspricht – jede vierte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

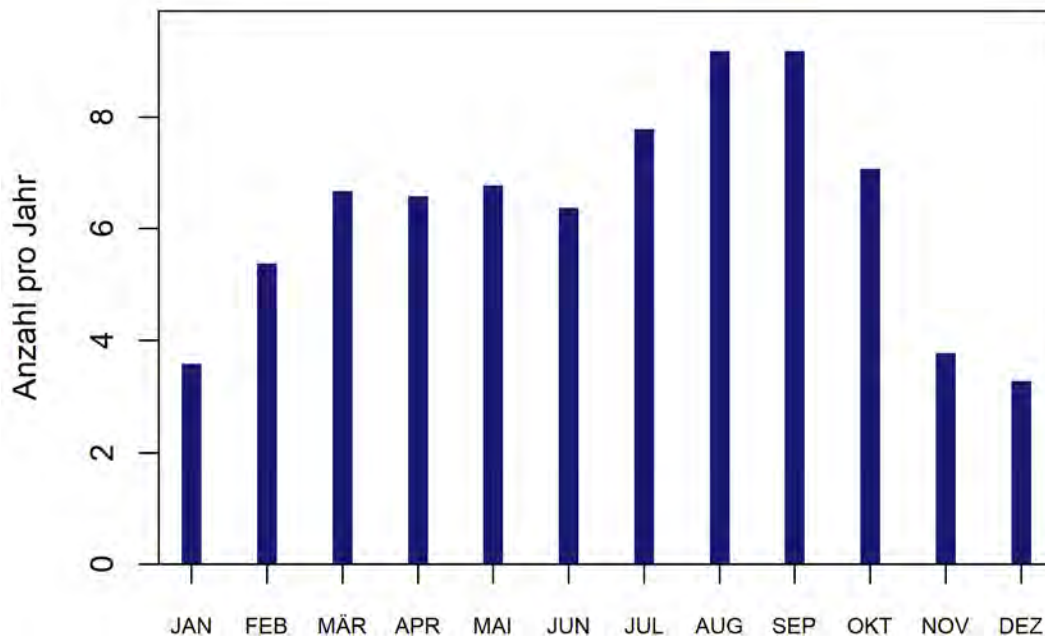


Abbildung 20: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungs-nächten in Dietzenbach (73,4 pro Jahr) für den Zeitraum 1981 - 2022, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Frankfurt-Main (DWD 2022a).

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

4.4.1 TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Dietzenbach bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 21 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 Minimumtemperaturen (Tabelle 2).



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 4.5 wird ein moderater Temperaturanstieg und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts eine Stagnation erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 4.5 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 21 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1991 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

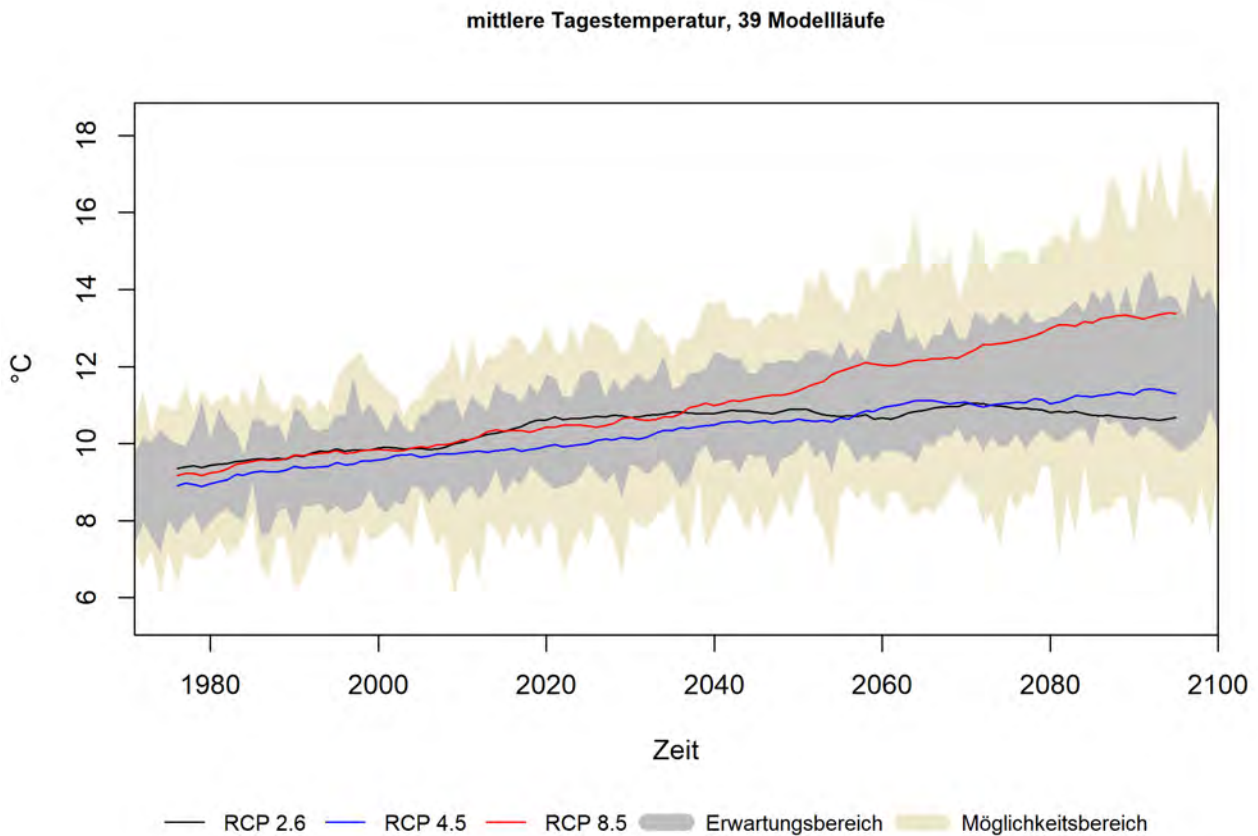


Abbildung 21: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Dietzenbach (alle RCP-Szenarien).

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst (Abbildung 22). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien (vgl. Abbildung A 3 im Anhang), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen in Abbildung 22).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2026 – 2055			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P15	P50	P85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 4.5	0,8	1,2	1,5	0,8	1,4	1,7	0,8	1,2	1,6
	RCP 4.5	0,8	1,4	1,9	0,8	1,6	2,3	1,4	2,1	2,7
	RCP 8.5	1,3	1,9	2,4	1,7	2,4	2,9	2,7	3,7	4,5



Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 4.5	1,5	2,8	3,7	1,9	2,5	3,6	2,1	2,7	4
	RCP 4.5	1,8	3,9	5,7	2,2	4,7	7	3,7	4,7	6,9
	RCP 8.5	2,8	4,7	6,4	3,4	5,7	7,2	5,7	8,1	9,9
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 4.5	0,8	1,1	2,6	0,6	1,6	2,7	0,7	1,9	2,7
	RCP 4.5	1	1,8	2,8	1,1	2	3,4	1,6	2,5	4,2
	RCP 8.5	1,6	2,6	3,4	2,3	3,3	4,6	4,1	5,4	8,3

Tabelle 2: Langjährige Änderung der Temperatur in Dietzenbach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

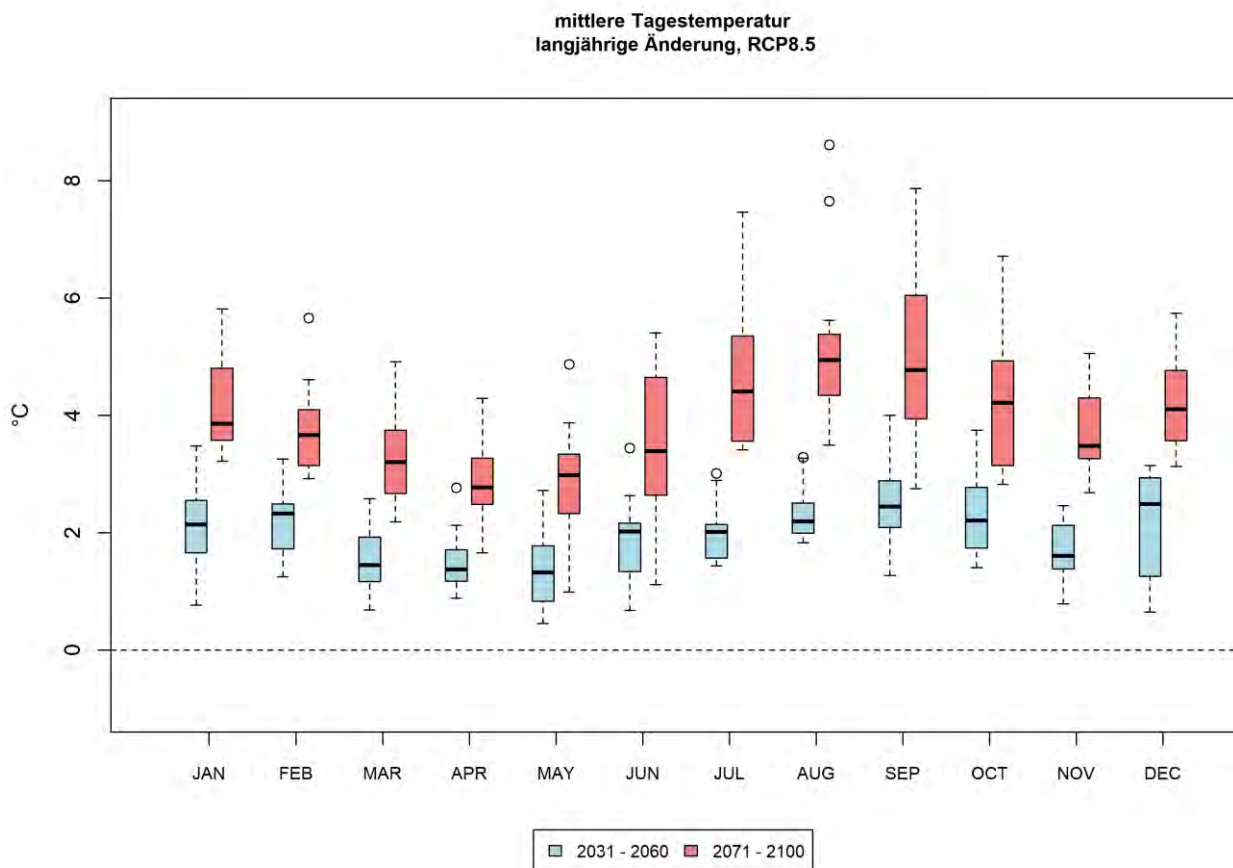


Abbildung 22: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Dietzenbach (RCP 8.5).

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 3). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit knapp 30 Heißen Tagen mehr pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur 12-mal jährlich auftraten (s. Tabelle 3).



Tropennächte treten in Dietzenbach derzeit so gut wie nie auf (im Mittel 1 Tropennächte pro Jahr²). In der nahen Zukunft (2031 – 2060) erhöht sich die Zahl der Tropennächte pro Jahr kaum (Tabelle 3), wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. Erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 4.5 weiter stagniert, prognostiziert das RCP 8.5 für den Zeitraum bis 2070 eine Zunahme um 2,1 Nächte dieser Art. In der 3. Zukunftsperiode steigt die Änderung im stärksten Szenario gar bis auf knapp 30 zusätzliche Tropennächte pro Jahr in Dietzenbach an. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen ist eine noch höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen.

Die Zunahme der heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für **Hitzeperioden** gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Dietzenbach zukünftig länger andauern. Je nach Szenario verdoppelt sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts (die durchschnittliche Länge im Zustand von 1991-2020 beträgt 4 Tage).

Tabelle 3: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Dietzenbach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 4.5	10,3	14,5	19,5	11,2	13,3	21,6	9,9	12,7	20,5
	RCP 4.5	10,2	15,3	23,1	11,3	21,2	31	17,4	22,3	29
	RCP 8.5	16,9	21,6	26,4	21,5	28,4	36,4	41,4	47,8	61,2
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 4.5	3,3	5,8	11,2	4,1	5,6	12,1	4,9	7	11,4
	RCP 4.5	5,7	8,3	12,2	6,8	11,2	15,4	9,8	12,4	17,1
	RCP 8.5	8,8	12,4	18,7	11,6	14,9	24	24,2	29,7	44
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 4.5	1,4	3,4	6,1	1,2	3,9	5,5	3	4,5	6,2
	RCP 4.5	3,9	5	6,9	5,2	6,6	9,2	6,3	9,2	12,1
	RCP 8.5	6,2	7,8	10,9	7,9	12,1	14,7	19	29,3	31,2

² für den Zeitraum 1971-2000 an der Station Offenbach-Main



4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG UND TROCKENHEIT

4.4.2.1 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

In Bezug auf die **Jahresniederschlagssumme** sind in Dietzenbach unterschiedliche Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 leicht steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert, während folglich des RCP 4.5 langfristig keine relevanten Änderungen zu erwarten sind (Tabelle 4, auch Abbildung A 5 im Anhang). Mit Blick auf den Erwartungsbereich zeigt sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen lassen – der zukünftige mittlere Jahresniederschlag weicht maximal um 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Insgesamt kann für Dietzenbach eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden, die aufgrund der geringen Änderungen jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet entscheidend u.a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Der Blick auf den Jahresgang offenbart saisonale Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags. In allen RCP-Szenarien ist eine Tendenz geringerer Niederschläge im Sommer und leicht höherer Werte in den übrigen Monaten zu erkennen. Am stärksten treten diese Effekte bei langfristiger Betrachtung bis Ende des Jahrhunderts und im RCP-Szenario 8.5 auf, das gerade für den Juli und August, teils noch für September, deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 23). Die RCP-Szenarien 4.5 und RCP 4.5 weisen, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf (Abbildung A 6 im Anhang). Die in den Abbildungen wahrnehmbare **Niederschlagsverschiebung** mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Tabelle 4: Langjährige Änderung der mittl. Niederschlagssumme in Dietzenbach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 4.5	-11	32	51	-22,1	1,2	44,2	-4	5,6	28,3
	RCP 4.5	10,6	45	57,9	7,6	36,1	70,2	19,9	40,2	92
	RCP 8.5	6,9	34,8	94,4	11,7	31,7	101,1	-0,2	63,3	141,5
starker Niederschlag [n/Jahr] (N > 10mm/d)	RCP 4.5	-0,6	1	3,3	-0,5	0	3,1	0,3	1,1	2,8
	RCP 4.5	0,6	3	3,8	0,4	3	4,8	1,6	3,2	5,2
	RCP 8.5	1,1	2,9	5,6	1,6	2,9	6,4	2,4	4,4	8,8
stärkerer Niederschlag [n/Jahr] (N > 20mm/d)	RCP 4.5	0,2	1	1,9	-0,2	1,1	2	0,1	1	1,4
	RCP 4.5	0	0,7	1,8	0,1	1	2,4	0,6	1,4	2,9



	RCP 8.5	0,7	1,7	2,7	0,8	1,6	3	1,4	2,7	4,8
Starkniederschlag [n/Jahr] (N > 30mm/d)	RCP 4.5	0	0,5	0,8	0	0,4	0,7	0	0,3	0,8
	RCP 4.5	0,3	0,4	0,9	0,1	0,6	0,9	0,4	1	1,7
	RCP 8.5	0,2	0,6	1,5	0,2	0,7	1,8	0,7	1,1	2,6

4.4.2.1 TROCKENHEIT

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 Auftretshäufigkeit 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 potentieller Verdunstung herangezogen werden. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend (leicht) positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, sind im RCP 8.5 in den Monaten Juni bis September Abnahmen erkennbar (Abbildung 23). Die saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz gilt für beide Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 4.5 und 4.5 vergleichbare Muster (Abbildung A 7 im Anhang), doch muss berücksichtigt werden, dass die genannten Ergebnisse wiederum mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Variabilität des Niederschlags mitentscheidend für die klimatische Wasserbilanz wirkt.

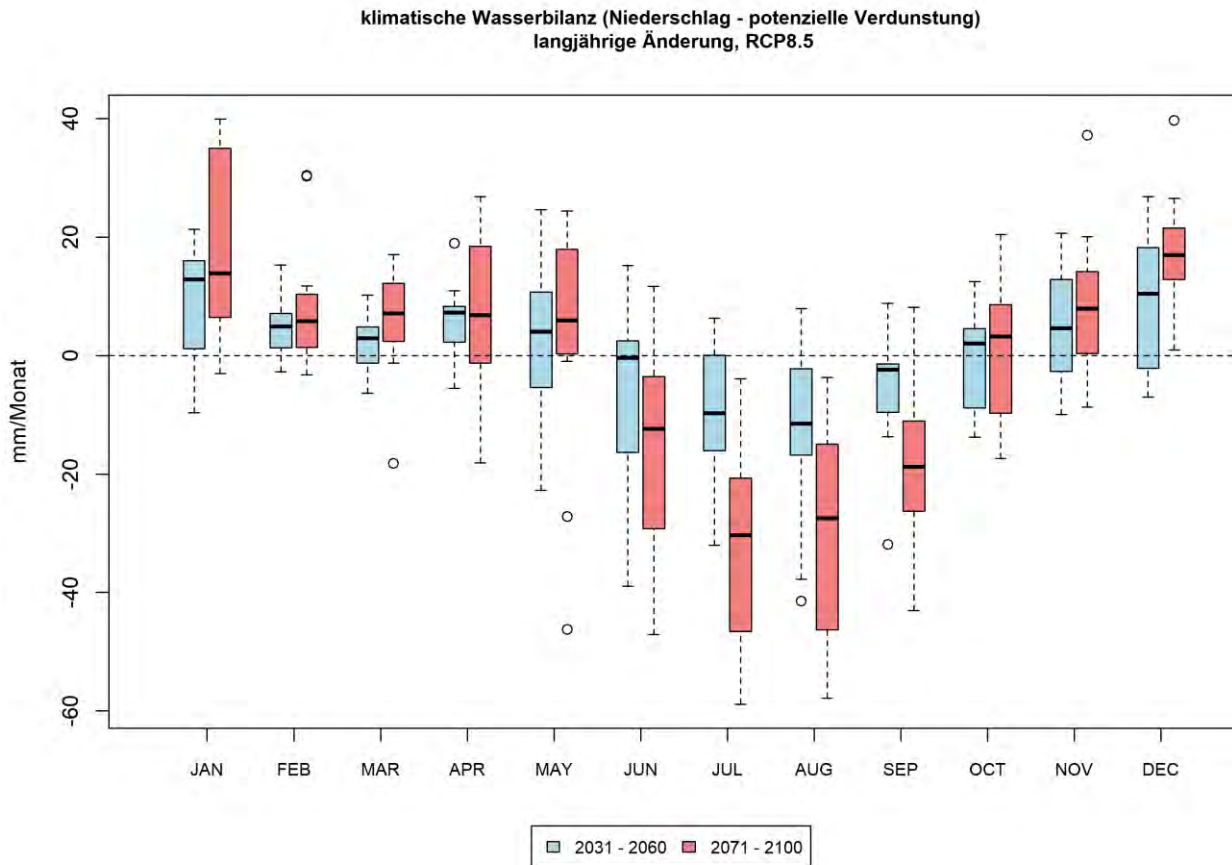


Abbildung 23: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Dietzenbach (RCP 8.5).

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist besonders für Städte und Gemeinden die Frage der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit haben gezeigt, dass diese ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen.

Als Starkniederschläge (synonym: Starkregen) werden Niederschläge bezeichnet, die eine hohe Intensität, d.h. eine im Verhältnis zu ihrer Dauer große Niederschlagssumme aufweisen. Starkregenereignisse können dabei sowohl Niederschläge kurzer Dauer als auch mehrerer Stunden oder über Tage anhaltende Niederschläge sein (Rauthe et al. 2014). Neben der Dauer eines solchen Ereignisses ist die Größe der betroffenen Fläche wesentlich.

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h (Unwetterwarnung; DWD 2022d). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Dabei werden Schwellenwerte festgelegt (z.B. $N \geq 20$ mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zu deren Bestimmung existieren. In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:



- Starker Niederschlag: $N \geq 10 \text{ mm/d}$
- Stärkerer Niederschlag: $N \geq 20 \text{ mm/d}$
- Starkniederschlag: $N \geq 30 \text{ mm/d}$

Starkregenereignisse treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge ($N \geq 20 \text{ mm/d}$) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abbildung 24).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse $N \geq 10 \text{ mm/d}$ und $N \geq 20 \text{ mm/d}$ überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind.

Starkniederschläge $\geq 30 \text{ mm/d}$ treten momentan statistisch betrachtet nicht auf (im Mittel 0 Ereignisse pro Jahr). Valide Prognosen für die zukünftige Entwicklung sind derzeit kaum möglich, da Starkregenereignisse eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität haben. Langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit einem zusätzlichen Starkniederschlagsereignis pro Jahr gerechnet (Abbildung 25).

Angesichts kaum veränderter oder gar zunehmender Jahresniederschlagssummen muss im Mittel die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag bei zunehmender **Niederschlagsintensität** abnehmen. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist daher mit einer Abnahme von Tagen mit Niederschlägen $< 10 \text{ mm/d}$ verbunden. Das bedeutet: Es regnet weniger, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

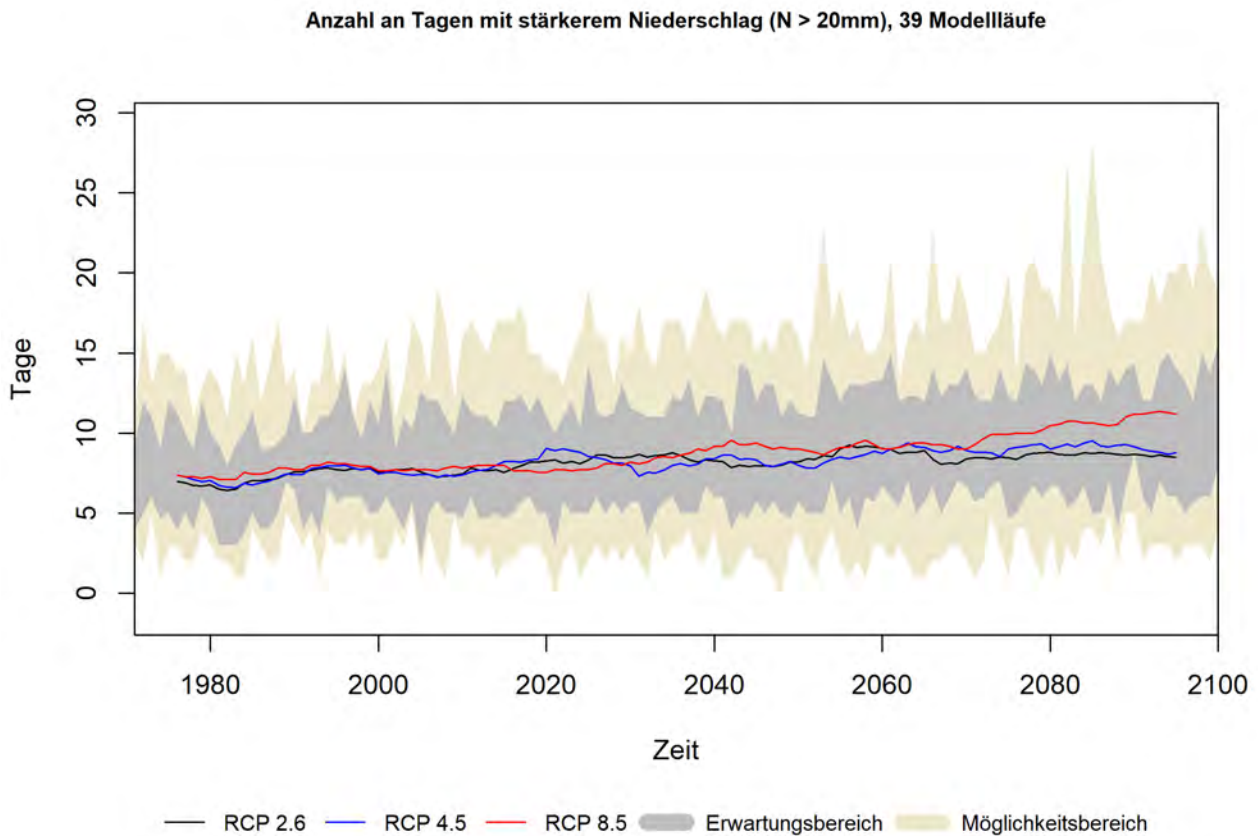


Abbildung 24: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20\text{ mm/d}$) in Dietzenbach (alle Szenarien).

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insb. extremen) Niederschläge ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass Starkregenereignisse oftmals kleinräumig auftreten und somit von den obgleich relativ hoch aufgelösten Regionalklimamodellen nicht erfasst und potenziell unterschätzt werden (DWD 2020a). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (vgl. ZAMG 2020). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insb. langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.

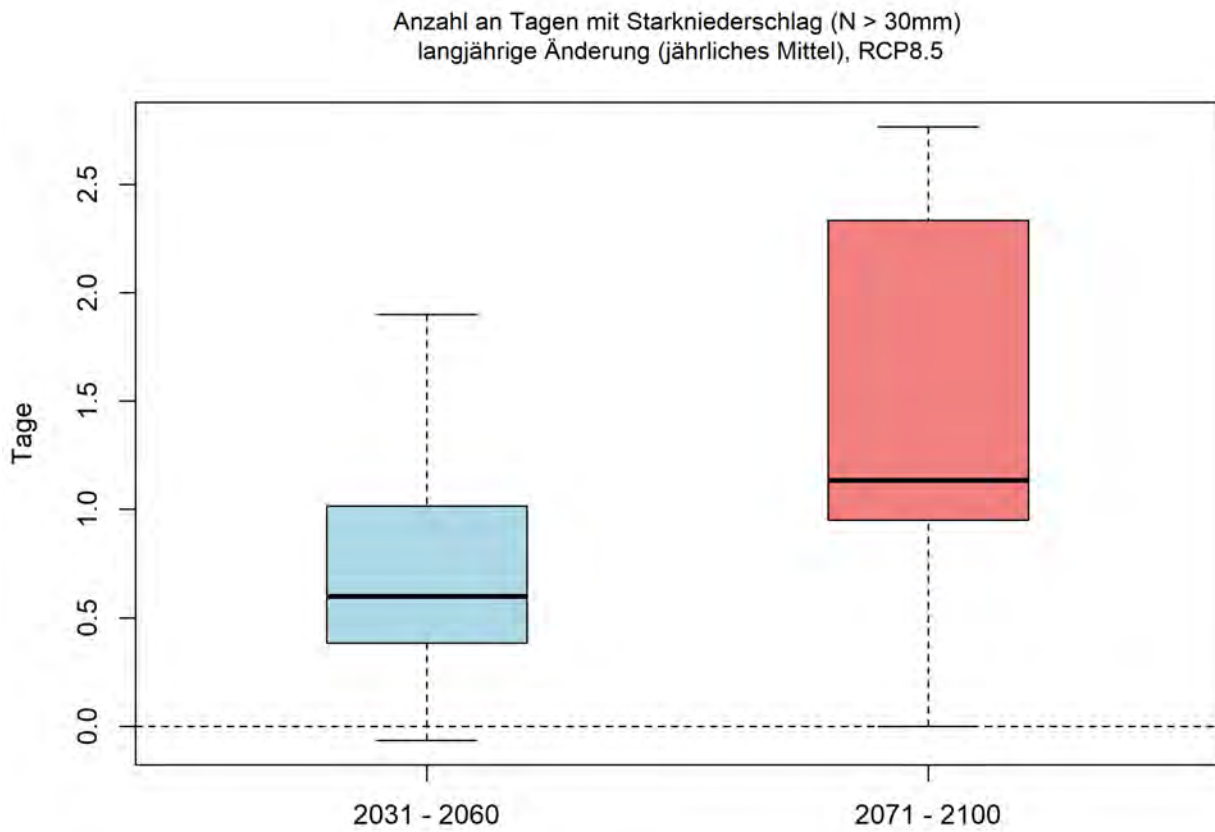


Abbildung 25: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30 \text{ mm/d}$ innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Dietzenbach (RCP 8.5).



5. Analysemethoden – Numerische Modellierung

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Modellrechnungen für das vorliegende Projekt wurden mit dem etablierten hochaufgelösten Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt. 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 2017, Gross 2013, Gross 2012, Gross 2012a, Gross 2002, Gross et al. 2002).

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

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen in realem Gelände müssen neben der Orographie insbesondere auch 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- und Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1989).

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

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom



jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2017) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale/kantonale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind auch 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 Dietzenbach und angrenzendes Umland rund 2,64 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

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



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

Beschreibung	Strukturhöhe [m]
Gebäude	individuell
Gebäude mit Gründach	individuell
unbebaut versiegelt	0
Gewässer	0
Gleis	0
niedrige Vegetation	0,5
niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
Baum über Versiegelung	individuell
Baum über Rasen	individuell
Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	individuell
Photovoltaik	0

Abbildung 26 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. Alle drei ausgewählten Nutzungsklassen zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, so dass die Temperatur mehrere Kelvin über derjenigen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin unter derjenigen 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 (ganz) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

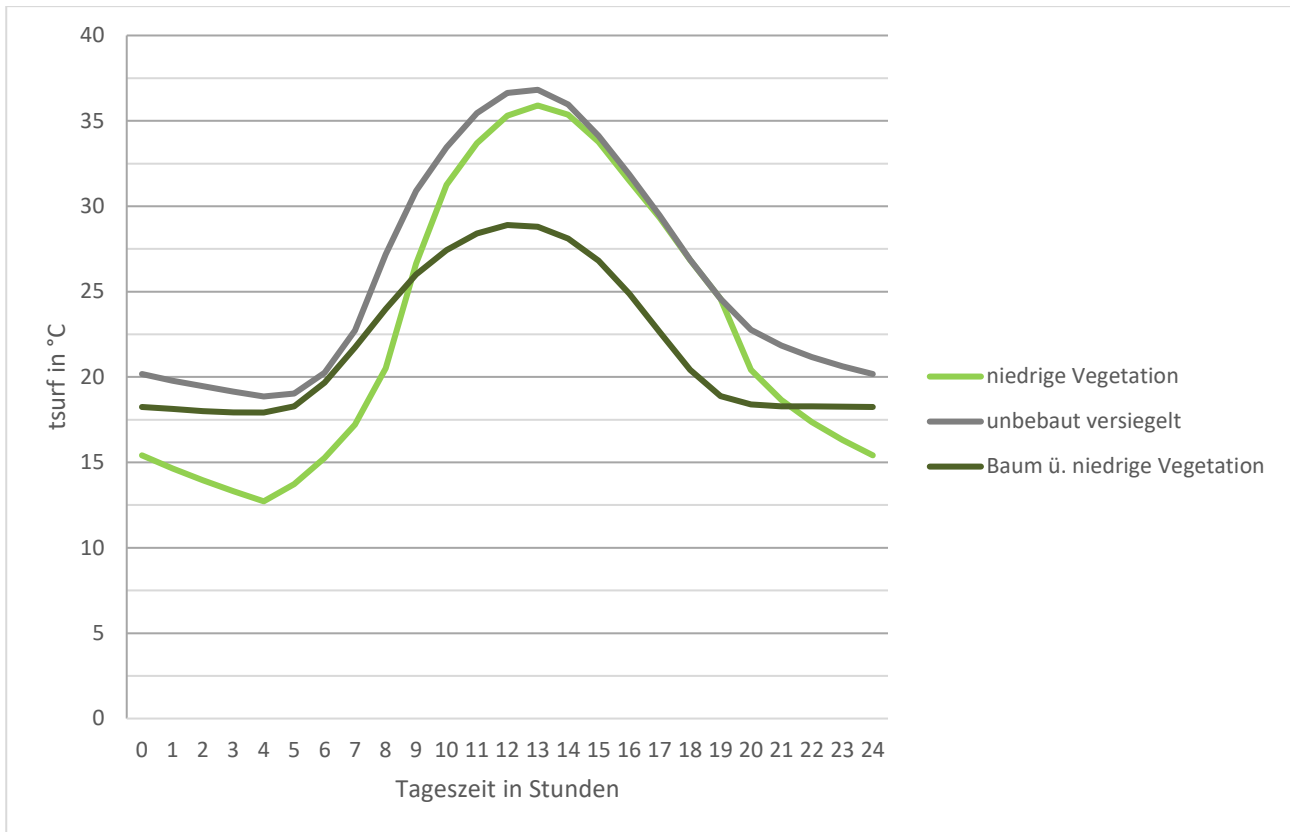


Abbildung 26: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen (tsurf = „surface temperature“) für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D

Analog gilt dies auch mit Blick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten. Diese stellen sich in der Realität über längere Zeiträume ein, reagieren also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen als dies für die Lufttemperatur gilt. 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 27 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung macht aber auch deutlich, 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 6-7 K. Die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der grasbewachsenen Flächen.



Abbildung 27: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (tsurf = „surface temperature“) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m = Temperatur auf 2 m ü. Gr.) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume / bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt auch für das vertikale Stadtgrün, dass deren Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte hier zudem lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellt. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarienbetrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll. Eine solche variable Parametrisierung des vertikalen Bestandsgrüns wurde für Dietzenbach nicht betrachtet, lediglich eine Anpassung der Bodenfeuchte fand modellseitig statt (s. Tabelle 6).

5.2 SZENARIENENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit den numerischen



Modellen FITNAH-3D und ASMUS_green. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge / urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (vgl. LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (vgl. Stadt Karlsruhe 2015, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

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

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

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

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

Ausgangspunkt der Deltamethode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu prognostizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Gegenwart und Zukunft aufmerksam zu machen. Neben der Darstellung, wie eine hypothetische Situation in der Zukunft zustande kommen kann, werden Varianten und Alternativen dargestellt (Abbildung 28, Wilms 2006).



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

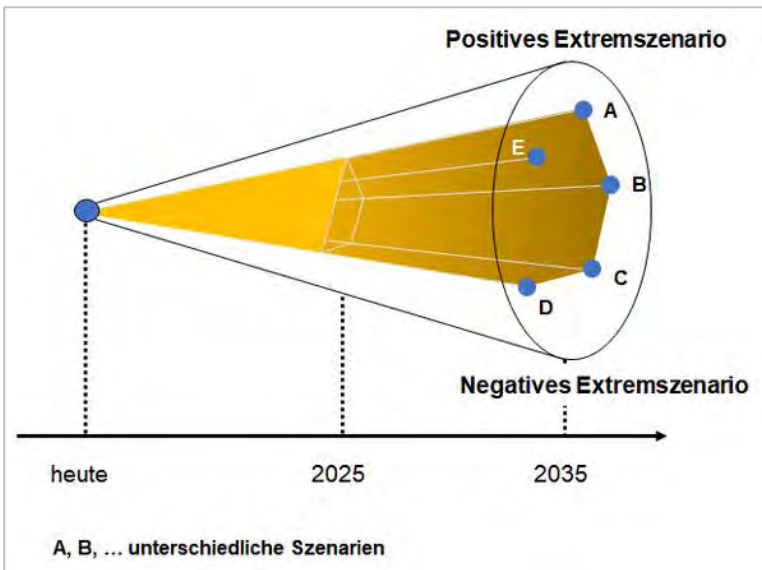


Abbildung 28. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das **zukünftige Dietzenbacher Stadtklima im Jahr 2045** (Mitte der betrachteten Zeitspanne von 2031-2060) in zwei verschiedenen Szenarien simuliert (Tabelle 6).

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für Dietzenbach Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt. Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Aus diesem Grund wird für das zukünftige Stadtklima in Dietzenbach 2045 in zwei verschiedene **Szenarien „Schwacher Klimawandel“** und **„Starker Klimawandel“** unterschieden. Die beiden Szenarien können als *best case-* bzw. *worst case-*Varianten verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass sich die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in Dietzenbach innerhalb der beiden Szenarien bewegen. Im „schwachen Klimawandel“ wird die Lufttemperatur zu Beginn der Modellrechnung um 1,0 °C, im „starken Klimawandel“ um 2,8 °C erhöht³. Diese Aufprägung des Temperatursignals basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen

³ Die Ergebnisse zum erwarteten Klimawandel stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das die RCP-Szenarien des Weltklimarates (IPCC) als verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt (vgl. Kap. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).



Ansatz (Schär et al. 1996). Zur Berücksichtigung der Auswirkungen einer zukünftigen Sommertrockenheit in Dietzenbach wurde die Bodenfeuchte in der Zukunftsmodellierung auf 30 % herabgesenkt (eine gute Wasserversorgung, wie im Status quo modelliert, entspräche 60 %).

Von Seiten der Stadt Dietzenbach wurde die Lage und Höhe von insgesamt 19 Gebäuden übermittelt, deren Planung bereits so weit vorangeschritten ist, dass diese in der Eingangsdatenaufbereitung der Modellierung des Istzustandes berücksichtigt wurden. Zusammen mit dem Auftraggeber wurden zudem insgesamt 73 Stadtentwicklungsflächen identifiziert, dessen Planungsstand bisher weniger weit fortgeschritten ist, sodass diese als Blockflächen in der Modellierung der Zukunftskulisse berücksichtigt wurden (s. Tabelle 6 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Abbildung 29). Für die Entwicklungsflächen wurde eine Modellübersetzung anhand des sog. Mischpixelansatzes umgesetzt, wobei sogenannte „Zwillingsflächen“ als Referenz zur Ermittlung des prozentualen Anteils der Nutzungsklassen dienen (s. Kapitel 0). Tabelle 6 fasst die wichtigsten Merkmale der Zukunftsszenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 6: Zukunfts-Szenarien zur Abbildung des Dietzenbacher Stadtklimas 2045 und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in Dietzenbach (Stand 2022) + 19 geplante Gebäude ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 21,7 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 1 (RCP 4.5) Schwacher Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (73 Mischpixelflächen) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,7 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 %
Szenario 2 (RCP 8.5) Starker Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (analog Szenario 1) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 24,4 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 % (analog Szenario 1)

Das für die Modellierung verwendete Klimaänderungssignal der Temperatur ergibt sich als Differenz der sommerlichen Temperaturen zwischen der Zukunftsperiode 2031-2060 (Bezugsjahr 2045) und der Referenzperiode 1971-2000. Für den „schwachen Klimawandel“ beruht das Änderungssignal auf dem 15. Perzentil aller Modellläufe des RCP 4.5, für den „starken Klimawandel“ auf dem 85. Perzentil des RCP 8.5.

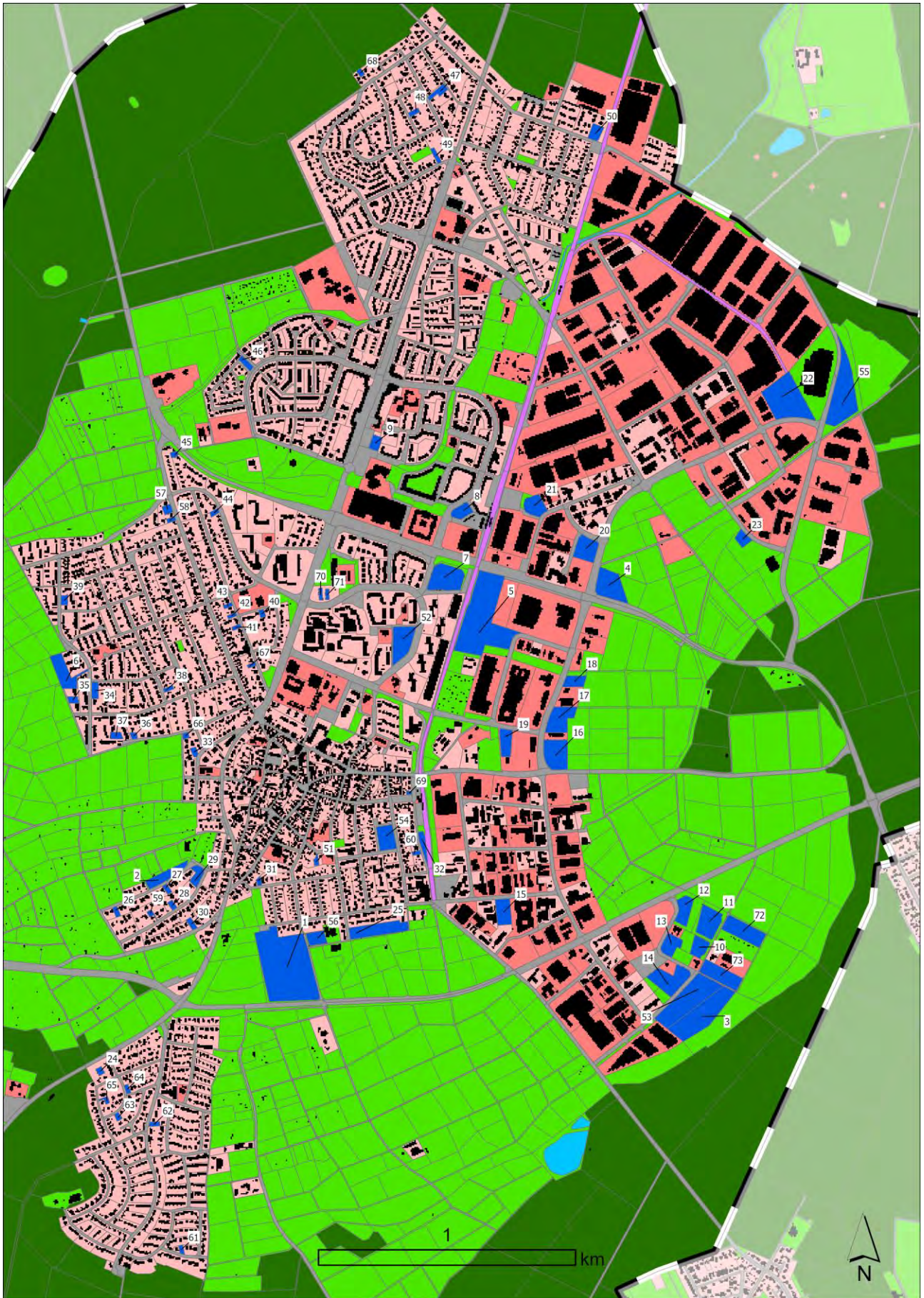


Abbildung 29: Räumliche Lage der 73 Entwicklungsflächen (blaue Flächen) mit fortlaufender Nummerierung.



5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen, gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Wie in Kap. 5.1 beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung

Strukturhöhe Das Modellgebiet ist dabei für alle durchgeführten Modellläufe identisch. Es beinhaltet das gesamte Stadtgebiet sowie das angrenzende Dietzenbacher Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 70 km² (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

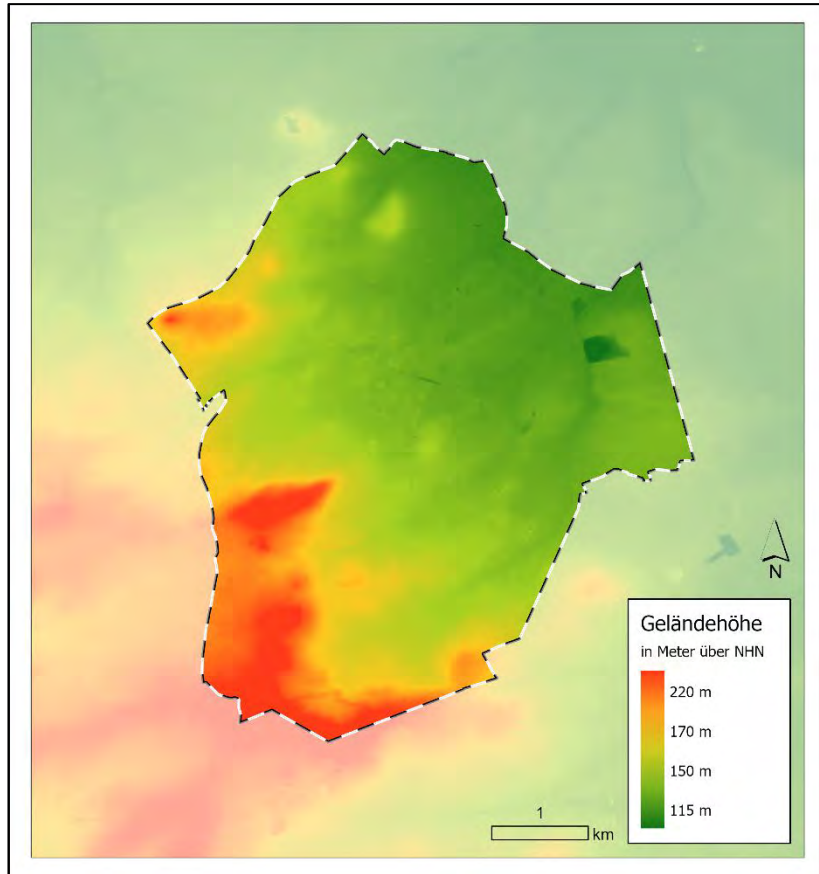


Abbildung 30: Geländehöhen in Dietzenbach und der näheren Umgebung

Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert und dabei auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Referenzsituation und dem Zukunftsszenario eingegangen.

Da sich relevante Hebungen und Senkungen der Landmassen in geologischen Zeitskalen und nicht in Jahrzehnten abspielen, konnte für alle Modellrechnungen dasselbe Geländemodell zugrunde gelegt werden. Dieses stammt aus flugzeuggestützten nativen Lasermessungen, die für Dietzenbach im Jahr 2016 durchgeführt wurden. Die Abbildung 30 zeigt das Relief von Dietzenbach in einer grafischen Überhöhung. Innerhalb des Untersuchungsgebietes liegt eine Gefälleneigung von Südwest nach Nordost vor. Die höchsten Erhebungen (etwa bis 200 m ü. NHN) sind im südlichen und westlichen Teil des Stadtgebiets vorzufinden. Die flachste Stelle (etwa 125 m ü. NHN) bildet die Willersinnsche Grube im Osten des Stadtgebiets (Landkreis Offenbach). Der Norden und Osten des Stadtgebiet weist großflächig Geländehöhen zwischen etwa 130 und 150 Meter über NHN auf.



Im Gegensatz zu den Geländehöhen unterscheidet sich der Eingangsdatensatz zur Stadtstruktur in den Modellrechnungen voneinander. Die bereits in Tabelle 5 eingeführten FITNAH-Nutzungsklassen wurden aus verschiedenen Geodaten verschnitten. Tabelle 7 zeigt eine Auflistung hierfür genutzter Geodatenätze.

Tabelle 7: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters in Dietzenbach als Basis für die Referenzsituation sowie der Zukunftsszenarien

Datenquelle	Erfassungsjahr Referenzsituation	Erfassungsjahr Zukunftsszenario	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhe	2016 (identisch für alle Modellierungen)		Raster „DGM“	1 m	Direkt (DGM ⁴)
Gebäude/-höhen	2021 / 2022	2021	Grundrisse/ Flächenvektoren mit Höhenabgabe	LOD2	Direkt
Vegetation	2019 / 2020	2019 / 2020	CIR20 / Grünflächenkataster / Baumkataster	0,2 m	Grundlage zur Berechnung des NDVI ⁵
Strukturhöhe	2016	2016	Raster „DOM“, Raster „DGM“	1 m	Ermittelt aus Differenz von DOM ⁶ und DGM
Versiegelung	2022 / 2020/ 2019	2022 / 2020 / 2019	ALKIS-Flächenvektoren / Versiegelungskataster / CIR20	- / 0,2 m	Verschneidung versiegelter Areale aus dem ALKIS ⁷ mit NDVI-Informationen
Straßennetz	2022	2022	ALKIS-Flächenvektoren	-	Extraktion der Straßenflächen aus dem ALKIS

Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen. Bei den Gebäuden konnte mithilfe der vorliegenden Gründächer-Kartierung und deren manueller Erweiterung und Aktualisierung mithilfe des Luftbilds zwischen normalen Gebäuden und Gebäuden mit Gründach unterschieden werden. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 2,5 m Wuchshöhe werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden also Bäume über Versiegelung (z.B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) und Bäume über naturfernem Boden (z.B. Bäume neben Gleisanlagen oder Sportplätzen) ausdifferenziert. Die Auswertung von CIR-Luftbildern ermöglichte zudem eine Unterscheidung von Kunstrasen und echtem Rasen. Diese Unterscheidung soll u.a. verhindern, dass die nächtliche Kaltluftproduktivität von Sportplätzen mit Kunstrasen überschätzt wird.

Tabelle 8: Auflistung der von FITNAH-3D anwendbaren Nutzungsklassen (Modelleingangsdaten). Für Dietzenbach genutzte Klassen sind farbig hinterlegt.

Klasse	Nutzung	Klasse	Nutzung
7	Gleisfläche	24	Baum über Versiegelung
9	Freiland, Rasen	25	Baum über Rasen
14	Gewässer	26	Baum über naturfernem Boden
16	Fels	27	Solarpanele
17	Gletscher	28	Sand
20	Gebäude	30	Gebäude mit Fassadenbegrünung

⁴ DGM = Digitales Geländemodell

⁵ NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

⁶ DOM = Digitales Oberflächenmodell

⁷ ALKIS = Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem



21	Gebäude mit Dachbegrünung	32	Gebäude mit Dach- und Fassadenbegrünung
22	unbebaut versiegelt	33	Straße mit hoher Albedo
23	naturferner Boden		

Für die Stadt Dietzenbach lag eine gesamtstädtische Baumkartierung vor, zusätzlich wurden hochaufgelöste CIR-Luftbilder aus dem Jahr 2019 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm genutzt und in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt. Ein NDVI-Schwellenwert von 0,001 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu unterscheiden. In Kombination mit der Strukturhöhe 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. Jedoch war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

Der **Landnutzung für die Zukunftssituation** liegt an erster Stelle die Nutzung der Referenzsituation zugrunde. Hinzu kommt, dass für die angenommenen Zukunftsszenarien, welche sich auf die nahe Zukunft mit dem Zieljahr 2045 beziehen, in Dietzenbach mit einer großen Zahl an Flächenentwicklungen gerechnet wird (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In Abstimmung mit der Stadt Dietzenbach wurden daher für die Szenarien insgesamt 73 Entwicklungsflächen definiert, welche als Mischpixelflächen in die Zukunftsmodellierung integriert wurden (s. Tabelle 8**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Mischpixelflächen umfassen die Klassen „Freifläche“, „Gebäude“ und „ebenerdig versiegelt“, die jeweiligen prozentualen Anteile dieser Klassen stammen aus „Zwillingsflächen“ aus der unmittelbaren Umgebung. Im Zukunftsmodelllauf greift das FITNAH-Modul „Randomisator“ auf die Nutzungsverteilungen der Prüfflächen zu und füllt diese rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften herkömmlichen FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen auf (s. Abbildung 31). Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen.





Abbildung 31: Anwendung des Mischpixelansatzes für Prüfflächen in der Zukunftsmodellierung.
 Links: Status quo, rechts: Zukunftskulisse

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

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

In Abbildung 32 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

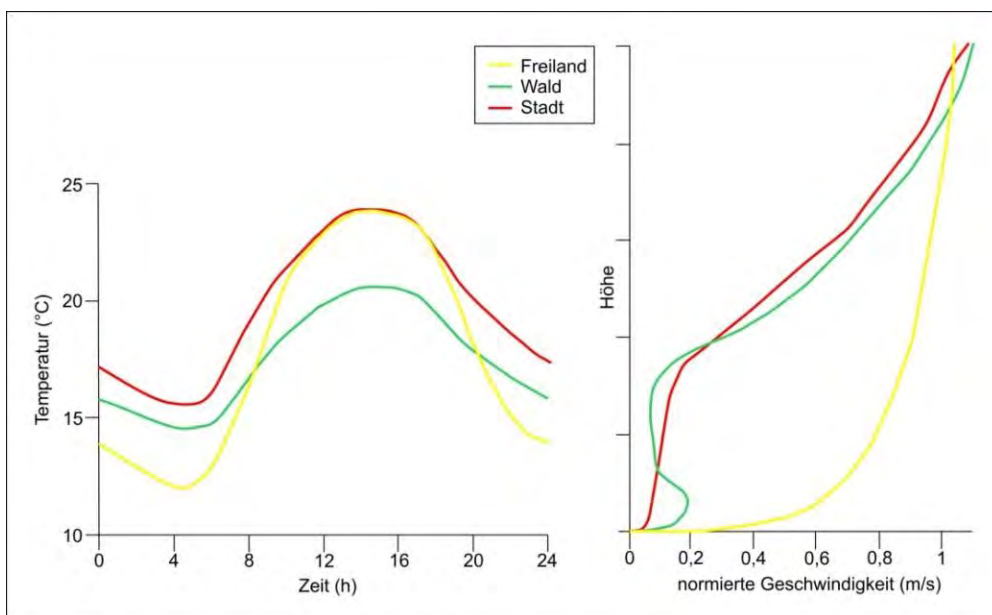


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Um das Prozessgeschehen von außen zu berücksichtigen, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus der Deutschlandrechnung in einer Auflösung von 200 Metern (GEO-NET). Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsgeschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Dietzenbacher Klimaanalyse weitergegeben.

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels im Modelllauf für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen erfolgte auf der Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes (Schär et al. 1996). Demnach wurde für die Modellsimulation der Zukunft mit schwachem Klimawandelsignal ein einheitliches Delta von +1,0 K ermittelt (entspricht dem 15. Perzentil des verwendeten Ensembles zum RCP 4.5 für die Sommermonate Juni-August). Für die Modellsimulation der Zukunft mit Annahme eines starken Klimawandels wurde ein Delta von +2,8 K ermittelt (entspricht dem 85. Perzentil des verwendeten Ensembles zum RCP 8.5 für die Sommermonate Juni-August). Das jeweilige Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert (s. Abbildung 33). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21,7 °C bzw. 22,7 °C (schwacher Klimawandel) und 24,4 °C (starker Klimawandel).

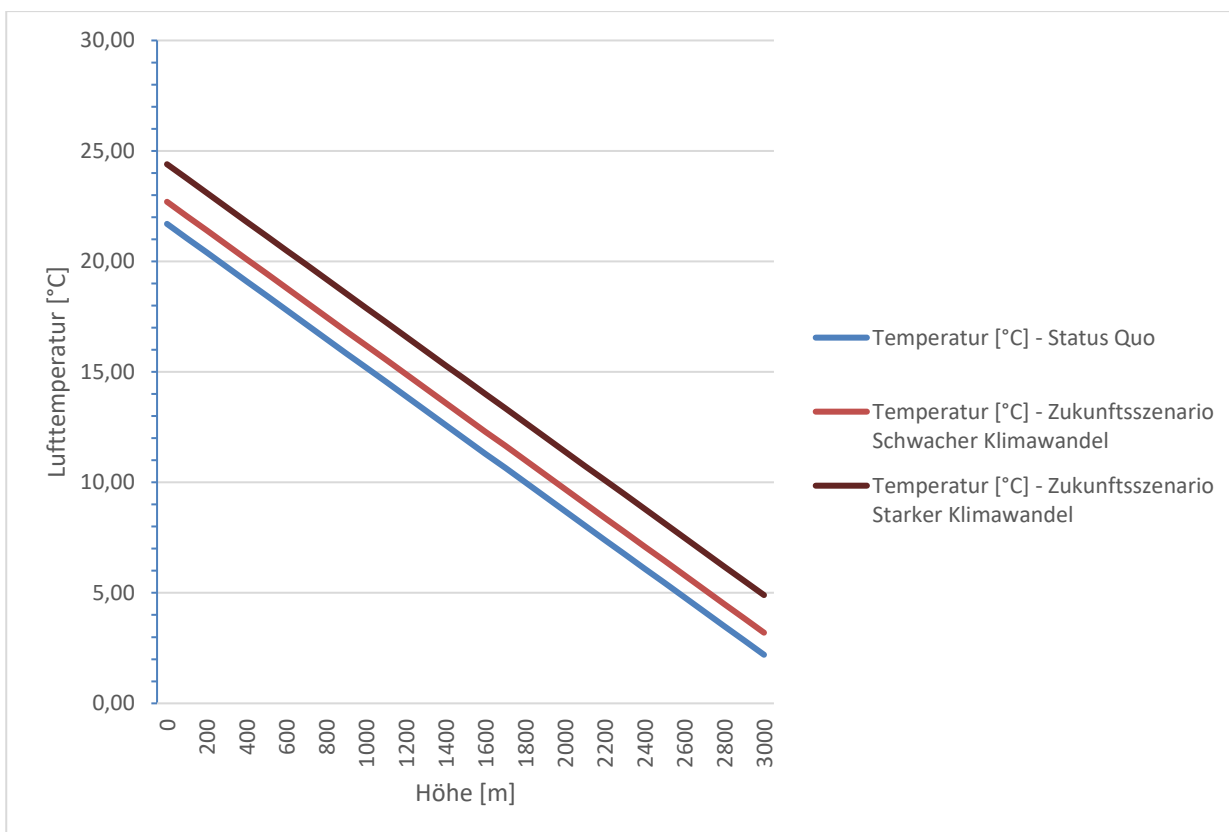


Abbildung 33: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation (blaue Kurve) sowie für das Szenario „schwacher“ Klimawandel (Klimadelta = 1,0 K) und „starker“ Klimawandel (Klimadelta = 2,8 K).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich aber auch in den Erdboden fort und daraus resultieren auch höhere Erdbodentemperaturen. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas



schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese Effekte wurden bei der Modellrechnung für die Zukunft durch eine Absenkung der Bodenfeuchte auf 30 % berücksichtigt. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation wie Rasen können dann nicht mehr verdunsten, so dass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte in der Referenzsituation bei 60 %, wobei auch Nutzungsklassen mit höherer Vegetation durch Verdunstungskühlung zur Entlastung am Tag beitragen.

Die vorgesehenen Startbedingungen repräsentieren ganz bewusst eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen (s. Kapitel 8.6). Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv um alleine auf Basis der in klassischen Stadtklimaanalysen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden zu können.

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

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

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

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

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 sog. post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (



Tabelle 10).

In der Maximalvariante handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Im vorliegenden Projekt lag der Schwerpunkt auf den thermischen Parametern für die Tag- und Nachtsituation als Grundlage des Zwischenprodukts Klimaanalysekarte (Kapitel 7), aus welchem die Bewertungskarten (Kapitel 8.3) und die Planungshinweiskarte (Kapitel 8.4) erarbeitet wurden.



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

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

5.6 QUALITÄTSSICHERUNG

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

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den beiden Modellläufen, wobei im Zukunftsszenario insbesondere auch die angenommene Änderung der Stadtstruktur im Wirkgefüge mit dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde.



5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

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

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

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses lediglich 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 auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. 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 aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E⁸-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „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 Szenarienrechnungen enthält – also z.B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmenzenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 - 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie, 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.

⁸ Forschung und Entwicklung



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

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

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

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich u.a. auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell mit standardisierter Dachform (LOD 2) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Für Dietzenbach wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten



nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.

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

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und dem Zukunftsszenario differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 0 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation kann eine überwiegend aktuelle Datengrundlage aus den Jahren 2021 oder 2022 und folglich eine geringe Unsicherheit attestiert werden.

Für Dietzenbach existiert keine groß- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Das Zukunftsszenario enthält zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten ca. 20 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen auch Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher.

Zusammenfassend kann also 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 auch deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden



Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

6. Analyseergebnisse – Numerische Modellierung

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als ArcGIS 10.8 Kartenpaket visualisiert und inkl. Legenden sowie als hochauflösende .pdf- und .png-Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten rasterbasierter Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 5.4). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Die Klassenschritte in der Farblegende wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

6.1 NACHTSITUATION

NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

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

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Dietzenbacher Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur Minimalwerten von rd. 14 °C über siedlungsfernen Freiflächen und Maximalwerten von rd. 20 °C in hochversiegelten Bereichen eine Spannweite von 6 °C. Die mittlere Temperatur des städtischen Siedlungsgebiets liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,2 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den bereits in den Grundlagen benannten Wärmeinseleffekt (Kapitel 2.2) und erlaubt darüber hinaus eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Altstadt Dietzenbachs und in den östlich gelegenen Industrie- und Gewerbegebieten sind die höchsten Bebauungsdichten vorzufinden, was sich in der größten nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (s. Abbildung 34). Insbesondere am Rand der großen Industrie-



und Gewerbehallen, welche sich östlich der Bahngleise und der Stationen „Dietzenbach Bahnhof“ und „Dietzenbach-Steinberg“ befinden, aber auch in der Altstadt im Bereich von Parkplätzen sowie entlang einiger hochversiegelter Straßenzüge (u.a. Bahnhofstraße, Rathenaustraße, Babenhäuser Straße) werden flächenhaft rd. 19 °C registriert. In dem nordöstlichen Gewerbegebiet liegen die nächtlichen Temperaturen teils bei über 19 bis 20 °C. Mit steigender Entfernung zum Zentrum nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Stadtteilen Steinberg, Westend oder Hexenberg liegt die Temperatur im Straßenraum bei über 17 bis 19 °C und in den Wohnblöcken bei 15 bis 17 °C. Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden mit rund 15 °C in der Siedlung Hexenberg erreicht.

Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Agrargebiete im Umland des Dietzenbacher Siedlungsgebiets mit teils unter 15 °C zu den kältesten Bereichen der Stadt. Acker- und auch Rasenflächen kühlen sich nachts am stärksten ab, weshalb diese Orte in der Regel Temperaturen von rd. 15 °C oder weniger aufzeigen und auch eine Gunstwirkung auf umliegende Bebauung bedingen können. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 15 bis 17 °C ein etwas höheres Wertespektrum auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 15 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. entlang der Bieber ca. 16 bis 17 °C). Größere vegetationsgeprägte Grünareale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potenzielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar. Die Freiflächen im Stadtpark von Dietzenbach kühlen sich in der Nacht bis auf unter 15 °C ab. Der Friedhof Dietzenbach (< 15° C), die vorhandenen Kleingärten (< 16° C), aber auch auf Naturrasen basierte Sportplätze (< 16° C) verfügen über ähnliche Eigenschaften wie Parks und sind gleichermaßen mit Kaltluftentstehungsprozessen assoziiert.

In Wäldern aber auch flächig baumbestandenen Parkarealen dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und verhindert damit eine stärkere Abnahme der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 17 - 18 °C erreicht werden (z.B. Ebertsberg, Willersinnsche Grube, südlich von Hexenberg). Nachts fällt hier daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduzenten ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

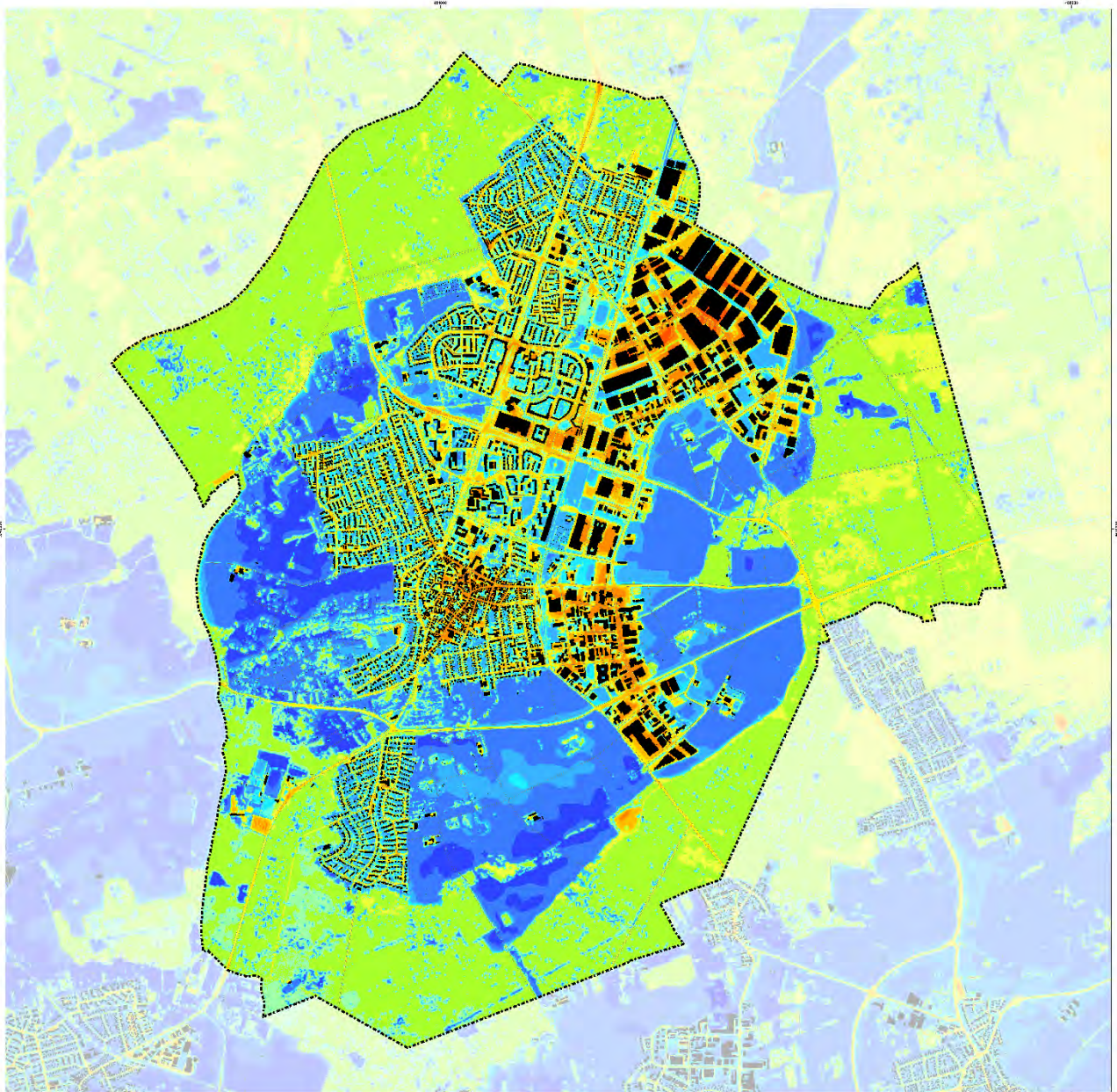
Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen geringen Tagesgang der Wassertemperatur. Dieser beeinflusst folglich auch die darüberliegende 2 m-Lufttemperatur des Modells die sich am Tage und in der Nacht vergleichsweise konstant verhält. So erscheinen die Wasserflächen an der Bieber, nachts bei Temperaturen von 17 °C bis 19 °C, ähnlich überwärmt wie weite Teile des Siedlungsraumes.

Aufgrund des Klimawandels ist im optimistischen Szenario in naher Zukunft (Zieljahr 2045) mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von durchschnittlich 1,0 K gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) zu rechnen (RCP-Szenario 4.5, s. Abbildung 35), wohingegen im RCP-Szenario 8.5 für selbiges Zieljahr von einer Temperaturzunahme um 2,8 K ausgegangen wird (s. Abbildung 36). Mit dem Klimawandel erwärmen sich die Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen ähnlich stark wie die Grün- und Freiflächen, wodurch der Wärmeineffekt von 6,0 K unverändert bestehen bleibt (bei einem Minimum der Temperatur von 13,9 °C im Umland und einem Temperaturmaximum im Zentrum/Gewerbe von 19,9 °C). Ungleichmäßiger zeigen sich die Temperaturänderungen im Bereich der Prüfflächen (s. Tabelle 12).

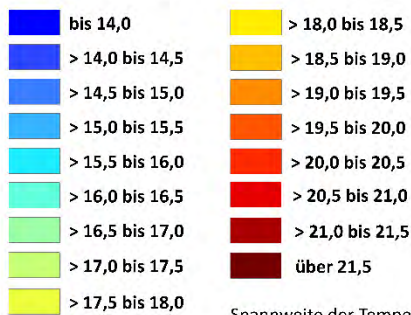


Bei allen Entwicklungsflächen (s. auch Tabelle 12), die als Mischpixelklassen parametrisiert wurden, ist im Vergleich zum Ist-Zustand im Mittel mit einer Erhöhung der nächtlichen Temperatur zu rechnen. Lediglich drei der Entwicklungsflächen (Nr. 41, 50, 68) liegen dabei unterhalb des Klimawandelsignals⁹ von im Mittel 1,0 K bzw. 2,8 K. Die Planung sieht für diese Flächen eine Nutzung als Wohngebiet vor. Alle anderen Prüfflächen werden sich dagegen zukünftig zum nächtlichen Zeitpunkt von 4 Uhr stärker erwärmen, als es das Klimawandelsignal vorgibt. Ausschlaggebend hierfür ist die Nutzungsänderung im Vergleich zum Ist-Zustand auf den betrachteten Flächen. Jegliche im Vergleich zur heutigen Situation stattfindende ebenerdige Versiegelung oder Überbauung wird lokal mit einer Temperaturzunahme verbunden sein. Entsiegelung setzt dagegen Kaltluftproduktionsprozesse in Gang und ist mit lokaler Abkühlung assoziiert. Bei der Prüffläche Nr. 4 ist im Mittel die größte nächtliche Temperaturzunahme von 4,5 K (RCP 4.5) resp. 6,3 K (RCP 8.5) im Vergleich zum Ist-Zustand zu erwarten. Die heutige Agrarfläche wird im Zuge einer Gewerbeentwicklung zu hohen Anteilen versiegelt und bebaut und damit die Wärmekapazität der Fläche drastisch erhöht. Im Mittel nehmen die Prüfflächen in der Zukunftsmodellierung um 2,16 K (RCP 4.5) bzw. um 3,95 K (RCP 8.5) zu. Die Mischpixel-Wohngebiete sind dabei durchschnittlich um 1,0 K kühler als geplante Mischpixel-Gewerbegebiete. Bei einem besonders hohen Gebäudeanteil zeigt sich die Annäherung durch den Mischpixelansatz jedoch teils fehleranfällig. Da Gebäudepixel zufällig verteilt werden, entstehen teils unrealistische Pixellücken in Industrie- und Gewerbehallen, an deren Rändern tagsüber zusätzlich Strahlung absorbiert und nachts an die Umgebung abgegeben wird. Diese nicht überbauten Lücken weisen ggf. höhere Temperaturwerte auf als in der Realität, weshalb davon auszugehen ist, dass in solchen Bebauungsszenarien die Temperatur im Vergleich zu einem realen Bauszenario etwas überschätzt sein könnte.

⁹ Hier: Synonym für die im Modelllauf der Zukunftsszenarien aus dem RCP 4.5 bzw. RCP-Szenario 8.5 abgeleitete Temperaturerhöhung um 1,0 K bzw. 2,8 K bis 2045.



TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE [°C]



Spannweite der Temperatur
im Status quo:
12,8 °C bis 20,0 °C

SONSTIGES

- STADTGEBIET DIETZENBACH
- GEBÄUDE
- STRASSEN/PLÄTZE

PROJEKTZIEL
KLIMAANALYSE
FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH

KARTENTITEL
TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE
(4.00 UHR NÄCHTSTITUATION)

PROJEKTLEITER
REINHOLD (18.05.2023)

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

VEREINBARTE ABGABESCHICHTENAUFLÖSUNG
5 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.09. (SONNENHÖCHSTSTAND)

MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 18:00 FOLGEBTAG

STARTTEMPERATUR: 21,7°C IN 2m HÖHE

ROBINGENAUIGKEIT: 60%

WETTERLAGE: AUFGEGANG (D/R BEWÖLKUNGS)

MASSSTAB: 1 : 8.500

0 250 500 750 1000 Meter

KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 (ETRS89)

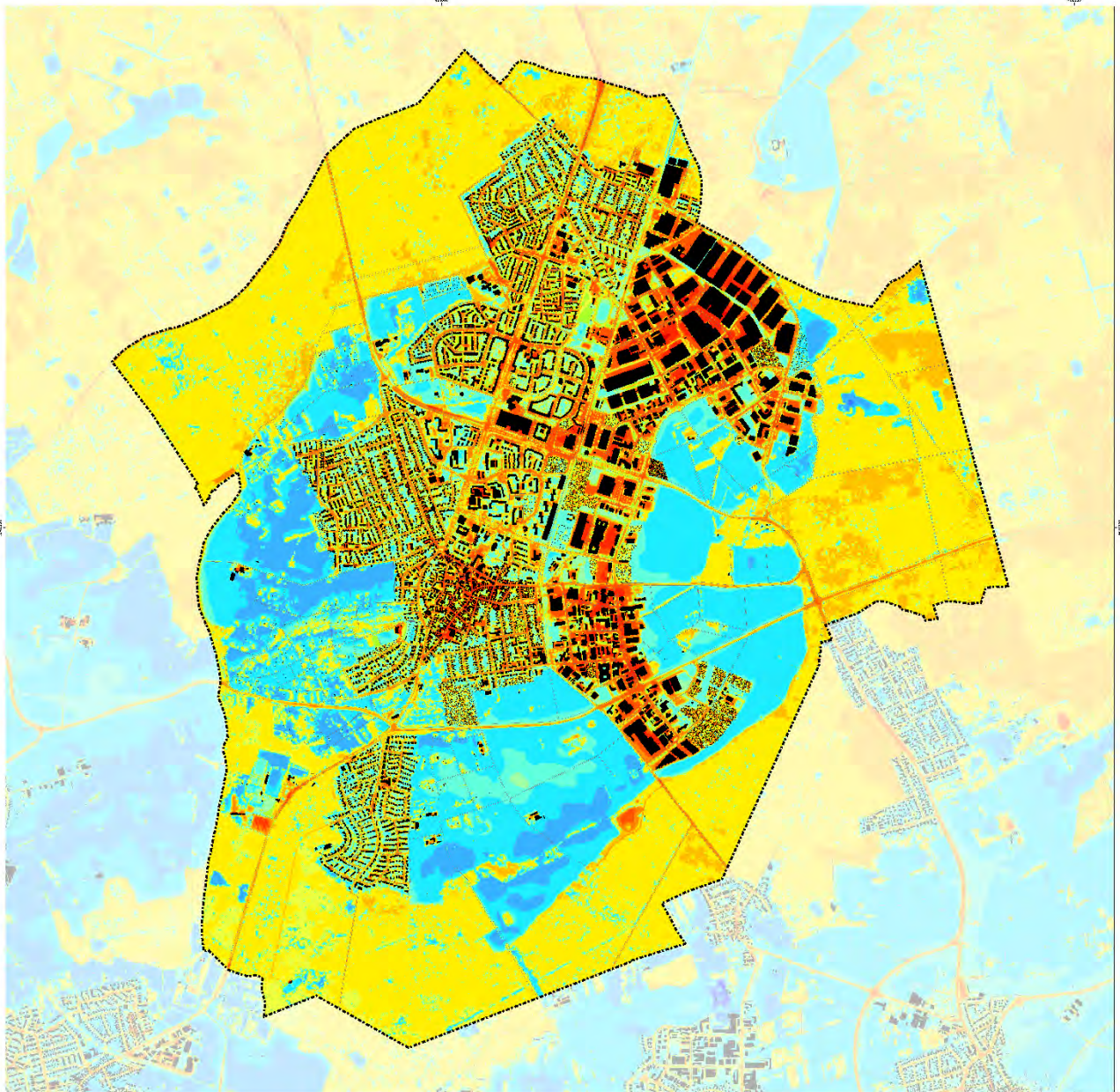
GIS-NET UMBELEGENDUNG DURCH
DANIEL FRIEDLICH
SOBES PAUL
AND SOE BIR
MANGELKUMMELER

IN AUFGABE VON
KREISTADT DIETZENBACH
LEBENDIGKEITSPROJEKT
EUROPA PLATZ
MILIA DIETZENBACH

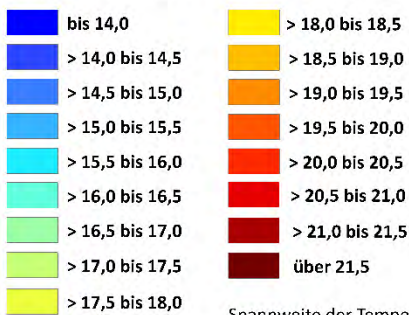
GEO-NET

DIETZENBACH

Abbildung 34: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Dietzenbacher Stadtgebiet.






TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE [°C]



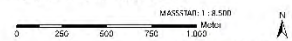
Spannweite der Temperatur
im schwachen Klimawandelszenario:
13,8 °C bis 22,0 °C

SONSTIGES

-  STADTGEBIET DIETZENBACH
-  GEBÄUDE
-  STRASSEN/PLÄTZE

ZUKUNFTSSZENARIO (schwacher Klimawandel)
Zeitraum: 2024 bis 2050
ICM-Szenario: R2.5
Klimadelta: +1,0 K
Statistik: 15. Perzentil

PROJEKT:
KLIMAAANALYSE
FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH
KARTENMÄSSIG
TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE
(4.00 UHR NÄCHTSTLAGE)
BREMEN
REVISIT 18.05.2023
VERWENDETES MODELL:
FITNAH-3D
HÖHENWERT: 5m
METEOROLOGISCHE KONDITIONEN (JAHRES-
SICHERSTUNDE: 21.00 (SONNENHÖCHSTSTAND))
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGEND
STARTTEMPERATUR: 22,7°C IN 2m HÖHE
BEWEGLICHKEIT: 10%
WETTERLAGE: AUFGEGANG (D/R BEWÖLKUNGS)



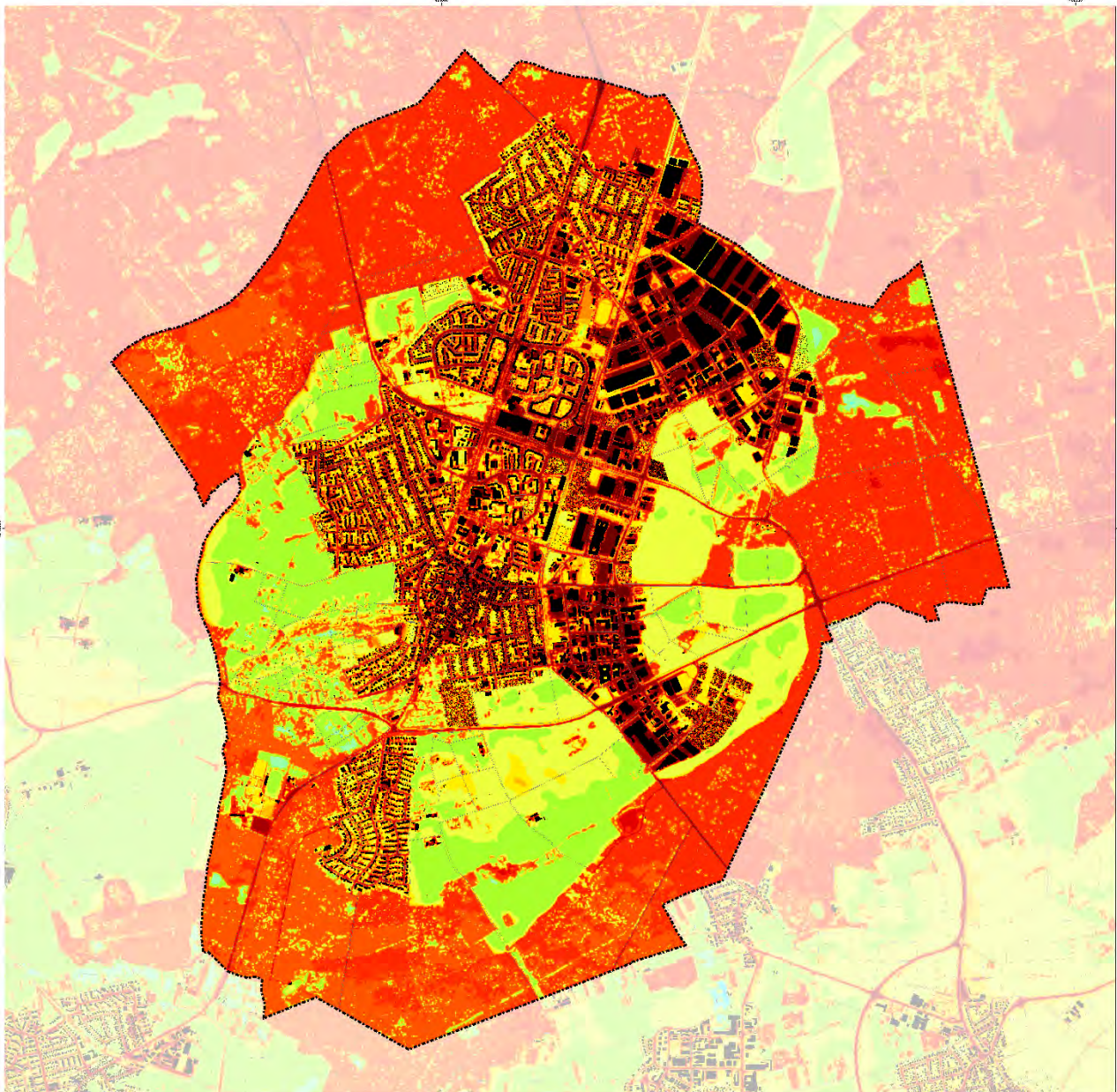
0 250 500 750 1000
METER

KOORDINATENSYSTEM: UTM (ETRS2011)

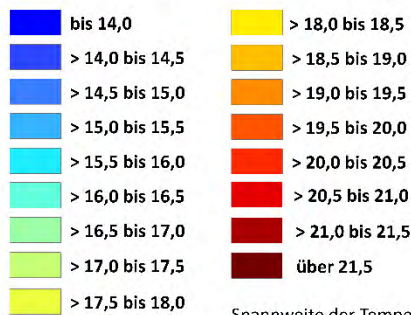
GIS-NET UMBEGRIFFENUNG DURCH
DIE UNIVERSITÄT
DUISBURG ESSEN
UND DIE UNIVERSITÄT
DUISBURG ESSEN

IN AUFGABE
KREISTAG DIETZENBACH
LEBENDIGES UMBWELT-
UND KLIMASCHUTZ
GEBIET DIETZENBACH
M. DIETZENBACH

Abbildung 35: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld (04 Uhr) des Dietzenbacher Stadtgebiets im Zukunftsszenario (schwacher Klimawandel) für das Zieljahr 2045.



TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE [°C]



Spannweite der Temperatur
im starken Klimawandelszenario:
15,6 °C bis 23,8 °C

SONSTIGES

- STADTGEBIET DIETZENBACH
- GEBÄUDE
- STRASSEN/PLÄTZE

ZUKUNFTSSZENARIO II (starker Klimawandel)
Zeitraum: 2021 bis 2050
WCSzenario: 2.5
Klimadelta: +2,8K
Statistik: 05_Peram_II

PHOTOMETRISCH
KLIMAAANALYSE
FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH
KASTENNUMM. 1
TEMPERATURFELD IN 2M HÖHE
(5:00 UHR NACHTSITUATION)
REVISIONSNUMM. 01
VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D
HÖHENWERT: BRÜCKENHÖHE NACHTRAGUNG
5 m
METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISSTUFE: 21.0°C (SONNENHÖCHSTSTAND)
MODELLIERUNGSZEIT: 21:30 bis 14:00 FOLGEND
SOMMERTEMPERATUR: 24,4°C IN 2M HÖHE
BEDECKUNGSGR. 30%
WETTERLAGE: AUTOCHTHON (D/R BEWÖLKUNGS)



GIS-ART (UMWELTCONCEPTS GMBH)
ANALYSE UND VISUALISIERUNG
GEO-INFO SYSTEME
MILITÄRSTRASSE 10
69126 HEIDELBERG
www.geo-art.de

GEONET

VERTRAGSGEMEINSCHAFT
KREISTEIL DIETZENBACH
UMWELTLEBENSQUALITÄT
UND KLIMASCHUTZ
IN DIETZENBACH

Abbildung 36: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld (04 Uhr) des Dietzenbacher Stadtgebiets im Zukunftsszenario (starker Klimawandel) für das Zieljahr 2045.



KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung des Stadtkörpers herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 37).

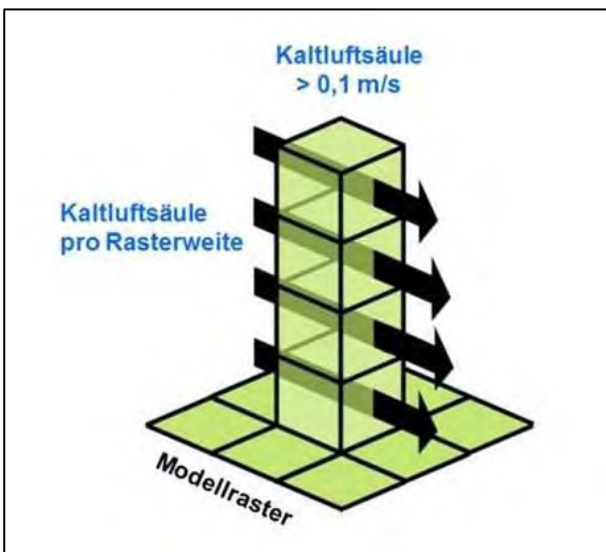


Abbildung 37: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit m^3/s) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $m^3/(s*m)$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ synonym verwendet.¹⁰

¹⁰ Der Kaltluftvolumenstrom in m^3/s beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 5 m breit) fließt. Um Ergebnisse verschiedener Modellauflösungen miteinander vergleichbar zu machen, bietet sich der Kaltluftvolumenstrom als Dichte (in $m^3/(s*m)$) an, da seine Intensität nicht von der Rasterzellenbreite abhängt.



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

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig¹¹ markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee¹² zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt in der Stadt eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von über $35 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Dietzenbacher Stadtgebiet liegt bei $10,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Im Umland der Stadt entstandene Kaltluftvolumenströme folgen zum einen dem Gefälle und werden zum anderen von den wärmeren Siedlungsflächen angezogen (Abbildung 38). Im westlichen und südlichen Stadtgebiet sind reliefbedingt größere Kaltluftvolumenströme vorhanden, welche bspw. in den Siedlungsbereich Westend hineinfließen. Im östlichen, flacheren Teil des Stadtgebiets wird die Kaltluft hauptsächlich aufgrund von Druckdifferenzen zwischen dem kühleren Umland und den überwärmten Gewerbe- und Industriegebieten angezogen. Diese Art thermisch bedingter Winde werden Flurwinde genannt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem solche, auf das Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse.

Die eher lockere Bebauung am Stadtrand Dietzenbachs begünstigt ein relativ weites Vordringen der durch Hangab- und Flurwinde induzierten Kaltluft. In Richtung Stadtzentrum nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung in der Folge ab, jedoch bilden auch größere, innerstädtische Grünflächen aufgrund der Temperaturunterschiede zur Umgebung ihr eigenes Windsystem aus (z.B. der Stadtpark, Kleingartenanlagen, Brachflächen).

Rauigkeitsarme Strukturen wie Bahntrassen, breite Straßen oder breite Gewässerläufe sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüneprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen). So besteht entlang der Velizystraße (B 459) zwar ein Kaltluftvolumenstrom, dieser transportiert jedoch im westlichen Abschnitt der B 459 aufgrund der angrenzenden dichten Bebauung wärmere Luft (Nachttemperatur rd. $18-19 \text{ }^\circ\text{C}$) als im östlichen Abschnitt, wo angrenzende Freiflächen vorhanden sind (Nachttemperatur $16-18 \text{ }^\circ\text{C}$).

Die Kaltluftdynamik in der nahen Zukunft verändert sich im Zuge des Klimawandels gegenüber der heutigen Situation nur moderat– eine flächendeckende KVSD-Änderung analog zur nächtlichen Temperatur ist bei diesem Parameter nicht zu beobachten. Änderungen im Kaltluftströmungsfeld ergeben sich vorrangig im Umfeld

¹¹ dem Wind zugewandte Seite

¹² dem Wind abgewandte Seite



der Entwicklungsflächen (Abbildung 39), da neu errichtete Gebäude oder Bäume als Strömungshindernisse fungieren und damit die Winde abbremsen bzw. umlenken.

Bei fast allen durch den Mischpixelansatz approximierten Entwicklungsflächen (s. auch Tabelle 12) erfolgt eine Abnahme des Kaltluftvolumenstroms, bei lediglich fünf (RCP 4.5) bzw. drei Flächen (RCP 8.5) (Nr. 8, 28, 44, 50, 58) wurde eine geringe Zunahme registriert. Die Fläche Nr. 3 ist mit einer Verringerung des mittleren Kaltluftvolumenstroms um $7,90 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ im RCP 4.5 bzw. $7,93 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ im RCP 8.5 diejenige Entwicklungsfläche mit dem größten negativen Änderungssignal. Hierbei wird die heutzutage überströmbare Freifläche nahezu vollständig mit Gebäuden und versiegelten Bereichen überplant und auf diese Weise die Rauigkeit auf der Fläche um ein Vielfaches erhöht, was das Kaltluftgeschehen größtenteils zum Erliegen bringt. Die Auswirkungen auf die KVSD können sich, anders als auf das Temperaturfeld, nicht nur auf die Baufelder selbst beziehen, sondern auch überörtlichen Einfluss erzeugen. Aus diesem Grund ist bei der Flächenentwicklung dringend auf die Stellung der Baukörper zum Strömungsgeschehen zu achten, um diese Effekte möglichst gering zu halten.

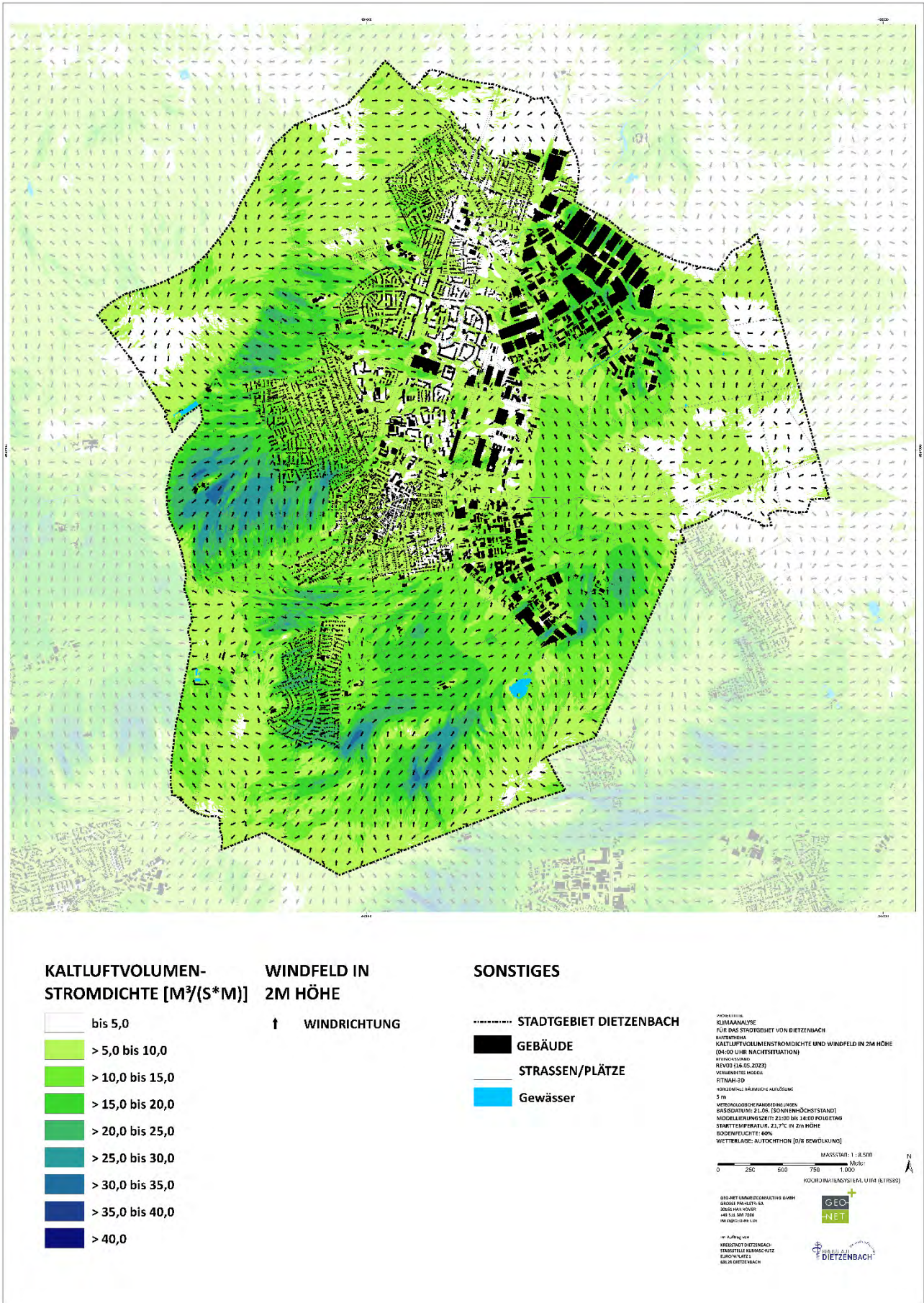


Abbildung 38: Nächtlliche Kaltluftvolumenstromdichte von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Dietzenbacher Stadtgebiet.

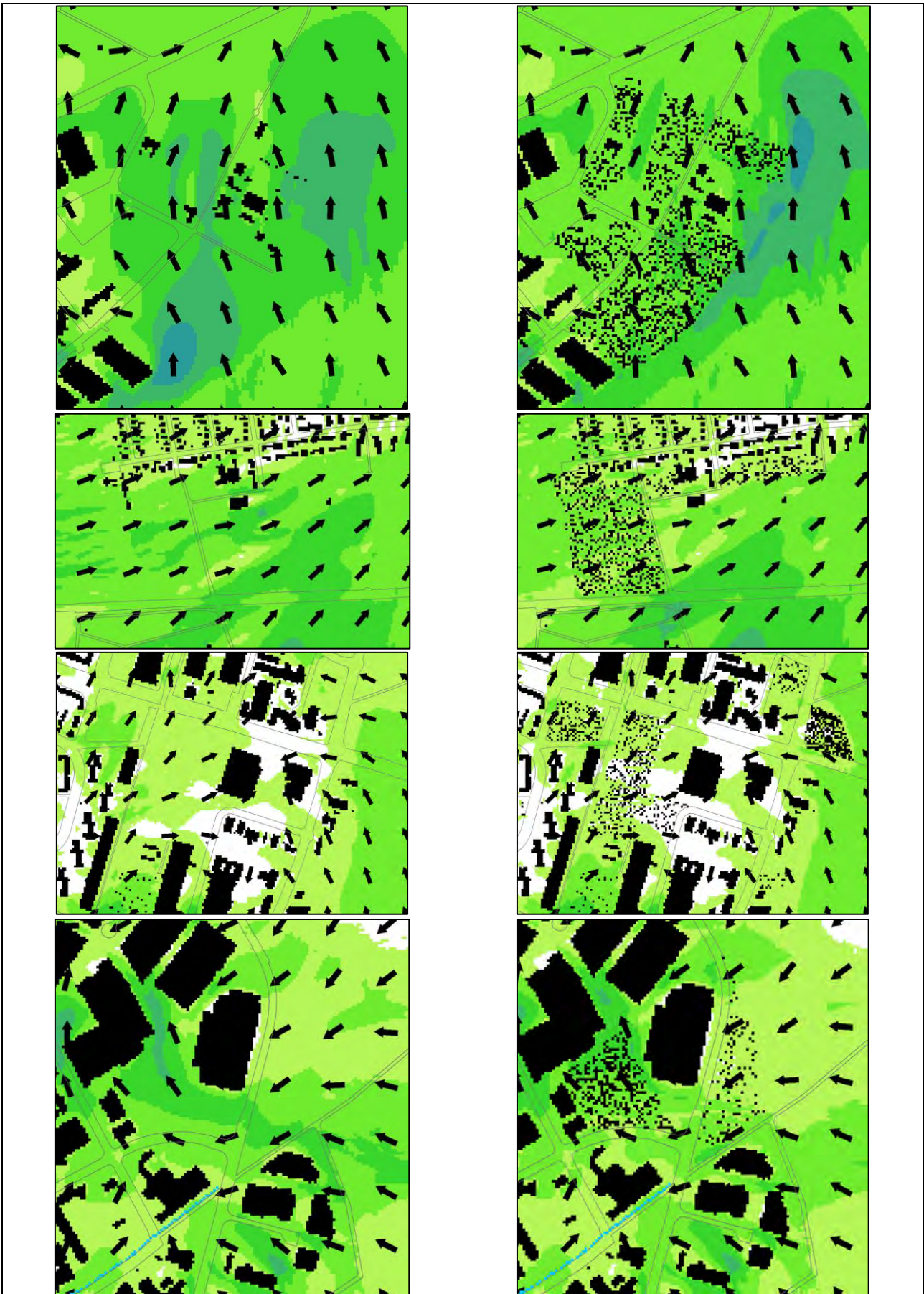


Abbildung 39: Nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte (04 Uhr) im Bereich von Siedlungsentwicklungsflächen im Dietzenbacher Stadtgebiet (links: Status quo; rechts: Zukunftsszenario „Starker Klimawandel“)

Abbildung 40 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur¹³) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen. Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeld folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Dietzenbacher Stadtgebiet treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten (über 0,5 m/s) an den Hängen auf, wo die schwere Kaltluft dem Relief folgend abfließt. Westlich der Altstadt und Westend sowie östlich von Hexenberg werden die ruhigkeitsarmen Ausgleichsflächen von der Kaltluft gut durchströmt. Bodennahe (in 2 m ü. Gr.) tritt jedoch die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass einige Bereiche des Stadtkerns keine wirksame Durchlüftung erfahren. Der mittlere Wind beträgt innerhalb der Stadtgrenzen 0,18 m/s.

Kleinere Grünflächen können lokal für Entlastung sorgen, indem die umliegende Bebauung von deren Kaltluftproduktion und einsetzenden kleinräumigen Strömung profitiert. Diese ist in begrünten Gärten und Innenhöfen zu erkennen, insbesondere wenn diese im Umfeld stark überwärmter (Gewerbe-)Flächen liegen.

Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Straßenraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).

Die Abbildung 41 zeigt das nächtliche bodennahe Windfeld der nahen Zukunft (Zieljahr 2045). Analog zur Kaltluftvolumenstromdichte ist bei Geschwindigkeiten von mittleren 0,2 m/s und einem Maximum von 1,3 m/s im Stadtgebiet keine flächendeckende Änderung der Windgeschwindigkeit im Vergleich zur heutigen Situation zu beobachten. Vornehmlich baulich bedingte Abnahmen des Strömungsgeschehens sind abermals lokal auf den Entwicklungsflächen anzutreffen (s. auch Tabelle 12), wirken sich aber wie bei der KVSD je nach Größe der entwickelten Fläche auch auf die (unmittelbare) Umgebung aus. Auf allen Entwicklungsflächen findet im Mittel eine Abnahme der Windgeschwindigkeit statt, die maximal bis zu 0,37 m/s und im Mittel 0,14 m/s beträgt.

Ähnlich dem zukünftigen nächtlichen Temperatur- und Kaltluftvolumenstromfeld sind die teils recht hohen Abnahmen der Windgeschwindigkeiten auf den Prüfflächen auf eine Überschätzung infolge der zufälligen Gebäude- und Baumverteilung des Mischpixelansatzes zurückzuführen.

¹³ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung von 100 m abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

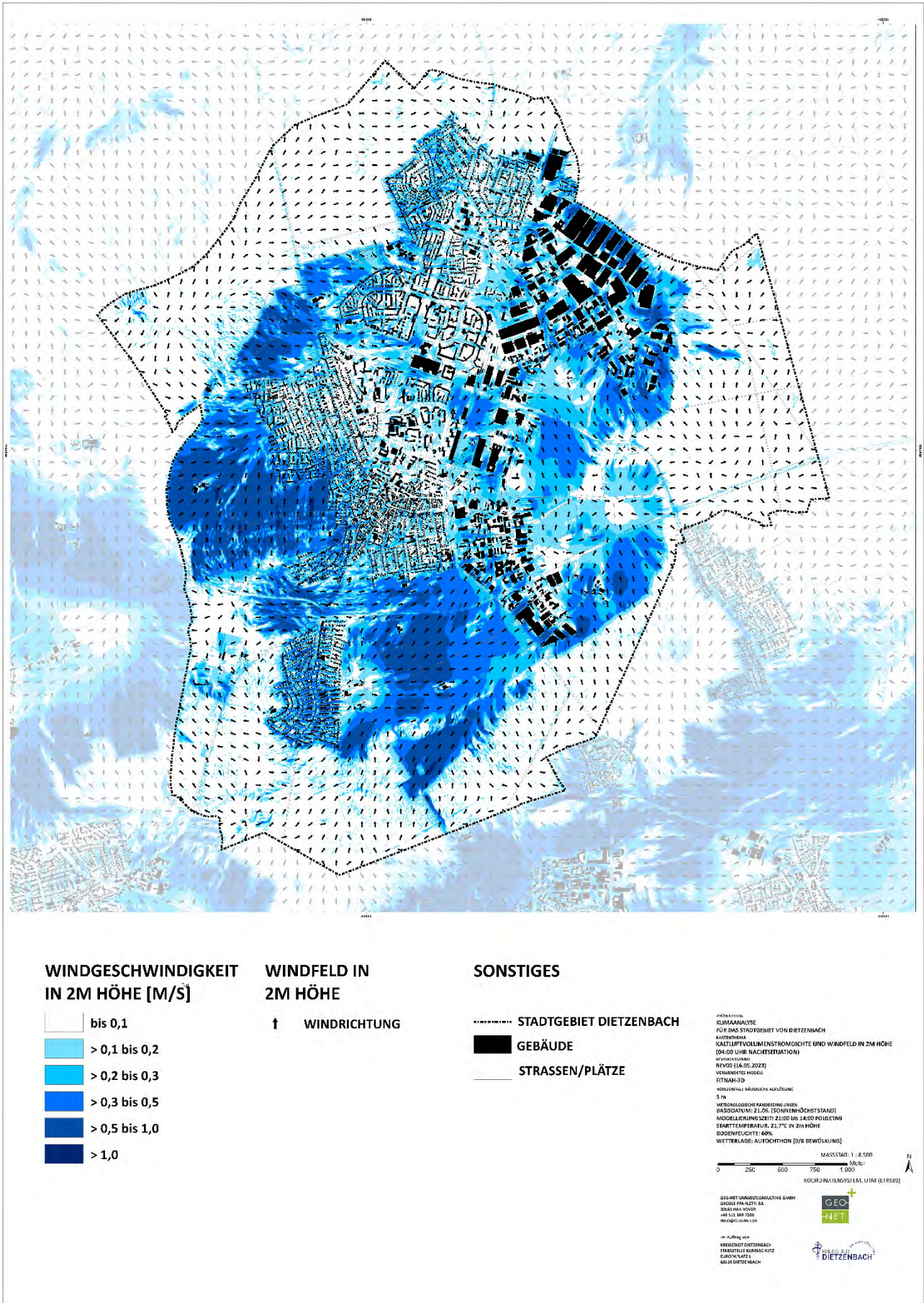


Abbildung 40: Nächtliches bodennahes Windfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Dietzenbacher Stadtgebiet.

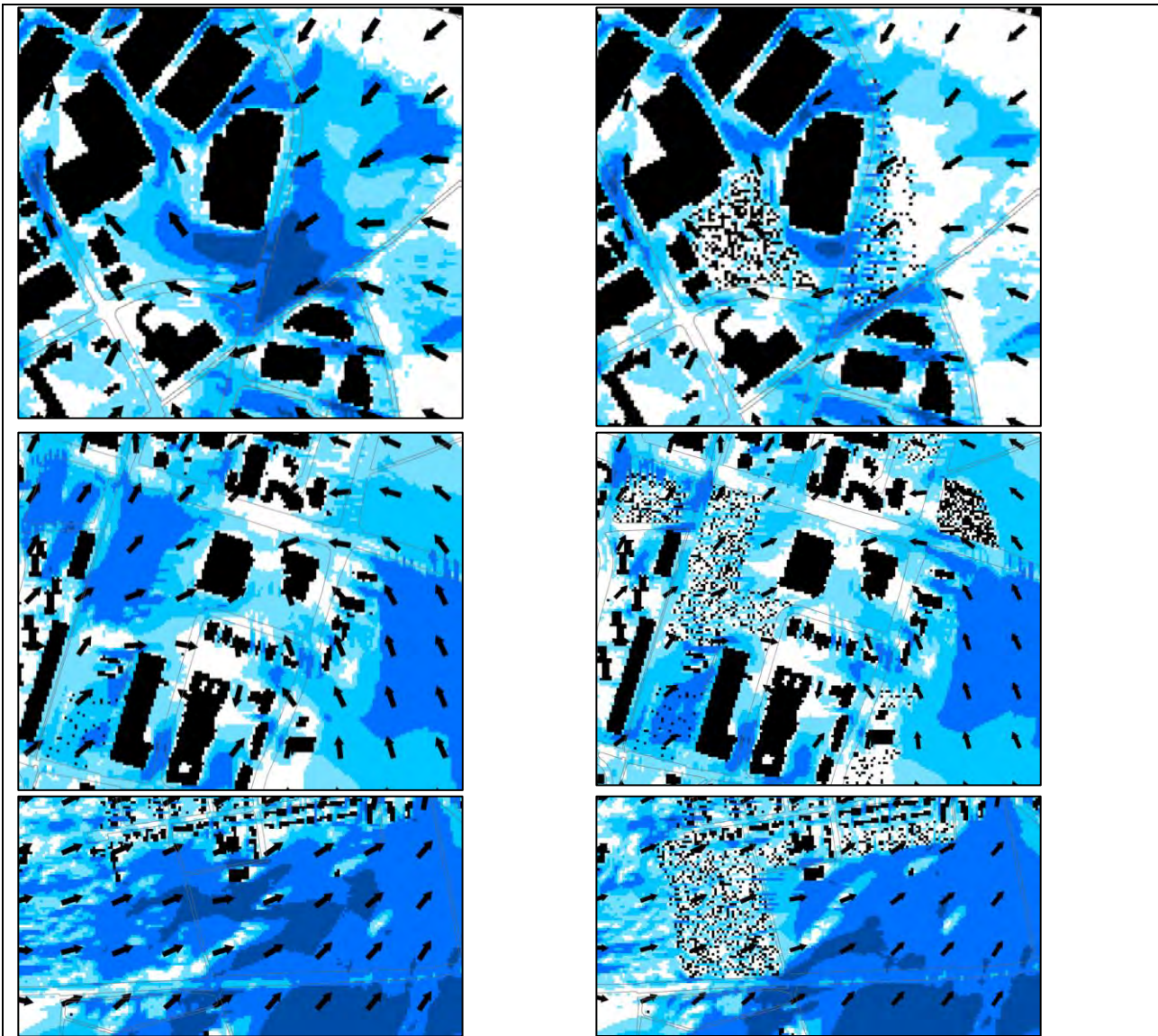


Abbildung 41: Nächtliches bodennahe Windfeld (04 Uhr) im Bereich von Siedlungsentwicklungsflächen im Dietzenbacher Stadtgebiet (links: Status quo; rechts: Zukunftsszenario „Starker Klimawandel“)

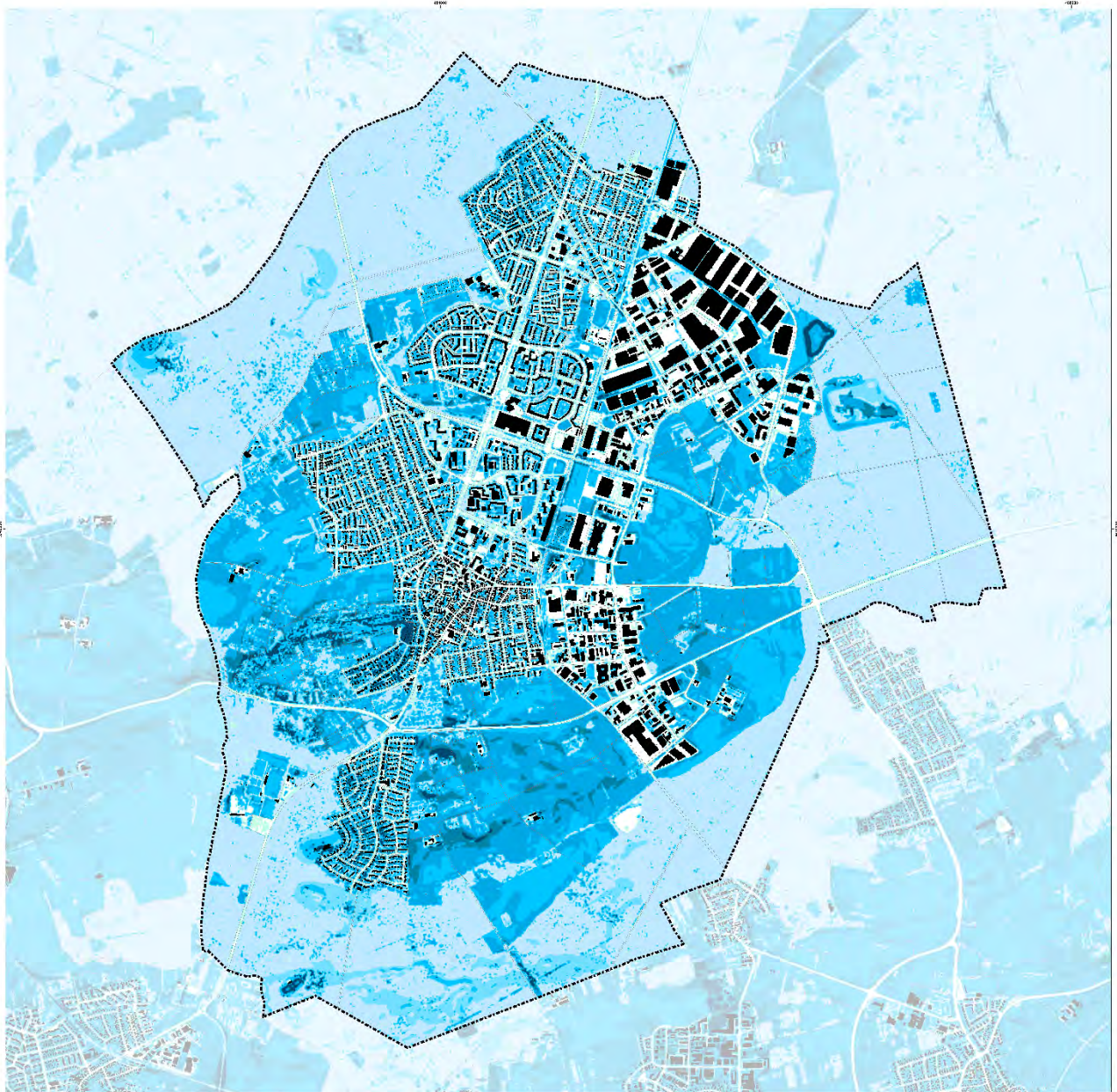
Neben Gebäuden stellen Bäume und insbesondere Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis für die bodennahe Strömung dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den umliegenden Waldrändern her auch bodennahe Ausgleichsströmungen Richtung Stadtgebiet einsetzen. Oftmals sind Wälder jedoch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



Anhand der Flächen hoher Kaltluftproduktionsrate an Böschungen und Hängen wird bei KPR-Werten von über $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ersichtlich, dass die Geländeneigung die bestimmende Größe für Kaltluftentstehung darstellt (Mittelwert innerhalb der Stadgrenze: $18,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$). Zusätzlich ist die Landnutzung die zweite entscheidende Größe zur Beeinflussung der Kaltluftproduktion – je versiegelungsärmer der Untergrund, desto größer die Kaltluftproduktionsrate. So weisen die geneigten Agrarflächen südlich von Westend mitunter die höchsten Werte von über $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ auf. Auch im Siedlungsbereich sind Grünflächen wie Sportplätze (bspw. Sportplatz Steinberg), der Stadtpark, Kleingartenanlagen oder innerstädtische Brachflächen auszumachen, die mit KPR-Werten zwischen 30 und $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ einen wichtigen innerstädtischen Abkühlungsfaktor darstellen. Dies gilt auch für begrünte Innenhöfe im Stadtzentrum (bspw. am Bieberbach) oder Hausgärten am Stadtrand (bspw. an der Friedrich-Ebert-Straße), die sich teils in einem ähnlich hohen Wertespektrum befinden und noch einmal zu einer deutlichen Temperaturreduktion im stark urbanisierten Raum beitragen können. Stark versiegelte Areale wie große Teile des Straßenraums (bspw. Offenbacher Str.) oder die Gleisflächen (S-Bahn Trasse) sind hingegen mit Werten unter $5 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ nicht mit Kaltluftproduktionsprozessen assoziiert.

Da der Modellierung von Kaltluftproduktionsraten ein empirisches Verfahren zugrunde liegt, das neben dem Gefälle wie oben erläutert größtenteils auf Landnutzungen und Landnutzungsänderungen basiert, sind zukünftige Änderungen der Kaltluftproduktionsrate im Vergleich zur heutigen Situation nur an jenen Orten sichtbar, an denen eine Nutzungsänderung von unversiegelt zu versiegelt oder umgekehrt stattgefunden hat (s. Abbildung 42 und Tabelle 12). Ein Klimaänderungssignal ähnlich jenem der nächtlichen Temperatur wird für Kaltluftentstehungsprozesse nicht vorausgesetzt.

Die mittlere Kaltluftproduktionsrate nimmt auf fast allen Entwicklungsflächen ab (s. auch Tabelle 12), was aus der zusätzlichen Versiegelung und Bebauung auf diesen Flächen resultiert. Die größte mittlere Abnahme der KPR sind auf der Fläche Nr. 12 mit $-22,87 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ festzustellen, auf der eine durchlässige Ackerfläche nahezu vollständig bebaut und versiegelt wird. Eine geringe Zunahme der Kaltluftproduktion von bis zu $+2,32 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ erfolgt auf der Fläche Nr. 68, welche in der derzeitigen Nutzung nahezu vollständig mit Bäumen bestanden ist, dessen Kronendach die Kaltluftproduktion herabsetzt und in der Planung über einen höheren Anteil an abkühlender Freifläche verfügt.



KALTLUFTPRODUKTIONSRATE [M³/(M²*H)]

- bis 5,0
- > 5,0 bis 10,0
- > 10,0 bis 15,0
- > 15,0 bis 20,0
- > 20,0 bis 30,0
- > 30,0 bis 35,0
- > 35,0 bis 40,0
- > 40,0

SONSTIGES

- STADTGEBIET DIETZENBACH
- GEBÄUDE
- STRASSEN/PLÄTZE

PROJEKT
KLIMAAANALYSE
FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH
KARTENNEMA

KALTLUFTPRODUKTIONSRATE (4:00 UHR NACHTSITUATION)
BREMENKUNDE
REVIZIÖN: 18.05.2023
VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D
HÖRERZEUGUNG: BRUNNENGE AUFLOSUNG
5 m
METEOROLOGISCHE KONDITIONEN JAHRES
SICKSITUATION: 21.09. (SONNENHÖCHSTSTAND)
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 BIS 14:00 FOLGEBTAG
STARTTEMPERATUR: 21,7°C IN 2m HÖHE
KORREKTURFÄHIGKEIT: 60%
WETTERLAGE: AUFGLEICHUNG (D/R BEWÖLKUNGS)

MASSSTAB: 1 : 2.500
0 250 500 750 1000
METER

KOORDINATENKODIERUNG: UTM (ETRS2011)

GIS-DATEN: UTM-KOORDINATEN
GEO-REFERENZIERUNG
GEO-REFERENZIERUNG
GEO-REFERENZIERUNG
GEO-REFERENZIERUNG

IN AUFGABE VON
KREISTAG DIETZENBACH
UMWELTLEBENSQUALITÄT
GEBIETSDIETZENBACH
KREIS DIETZENBACH

GEO-
NET

DIETZENBACH

Abbildung 42: Nächtlche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Dietzenbacher Stadtgebiet.

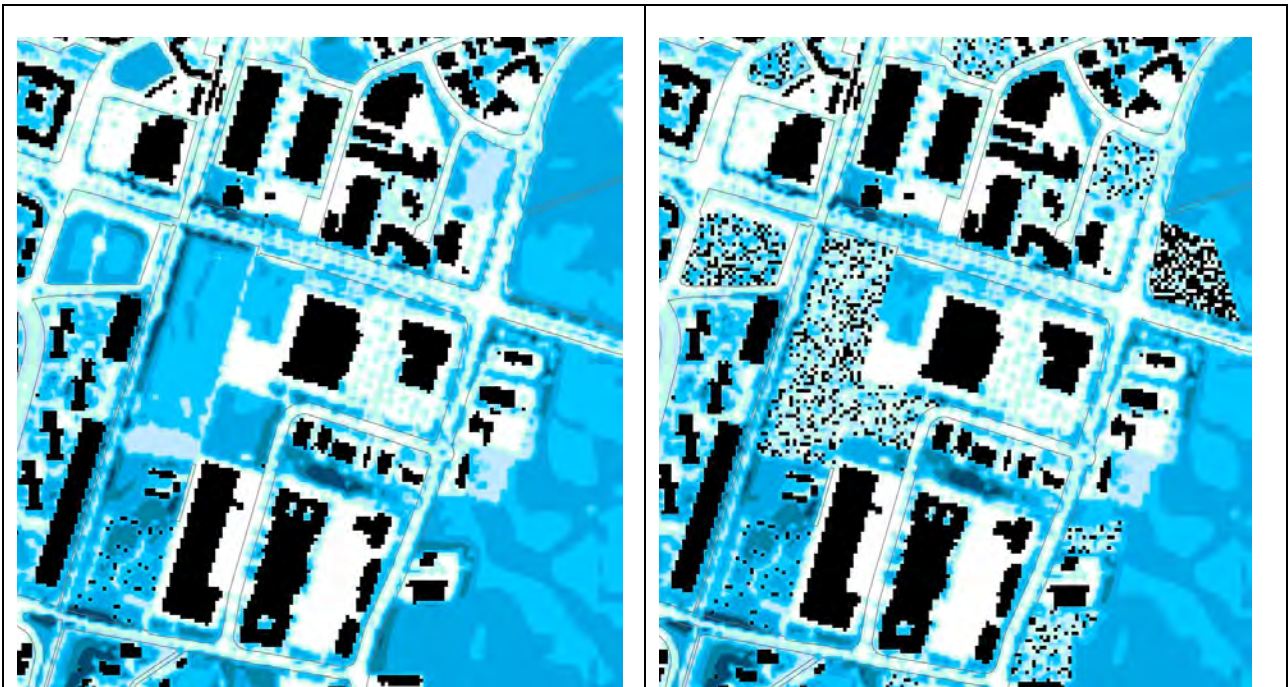


Abbildung 43: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate (04 Uhr) im Bereich von Siedlungsentwicklungsflächen im Dietzenbacher Stadtgebiet (links: Status quo; rechts: Zukunftsszenario „Starker Klimawandel“)

6.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹⁴.

Tabelle 11: 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

¹⁴ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. JENDRITZKY 1990).



In der vorliegenden Analyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; MATZARAKIS & MAYER 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit intuitiver nachvollzogen werden zu können¹⁵. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (KUTTLER 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tabelle 11).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET mit einer Spannbreite von 28,1 °C größere Unterschiede in der Stadt auf und reicht von 16,9 bis 45,0 °C. Die geringsten Werte sind in den umliegenden Waldgebieten zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 26 °C, oftmals gar unter 23 °C (keine bis schwache Wärmebelastung), eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung induzieren (Abbildung 44).

¹⁵ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

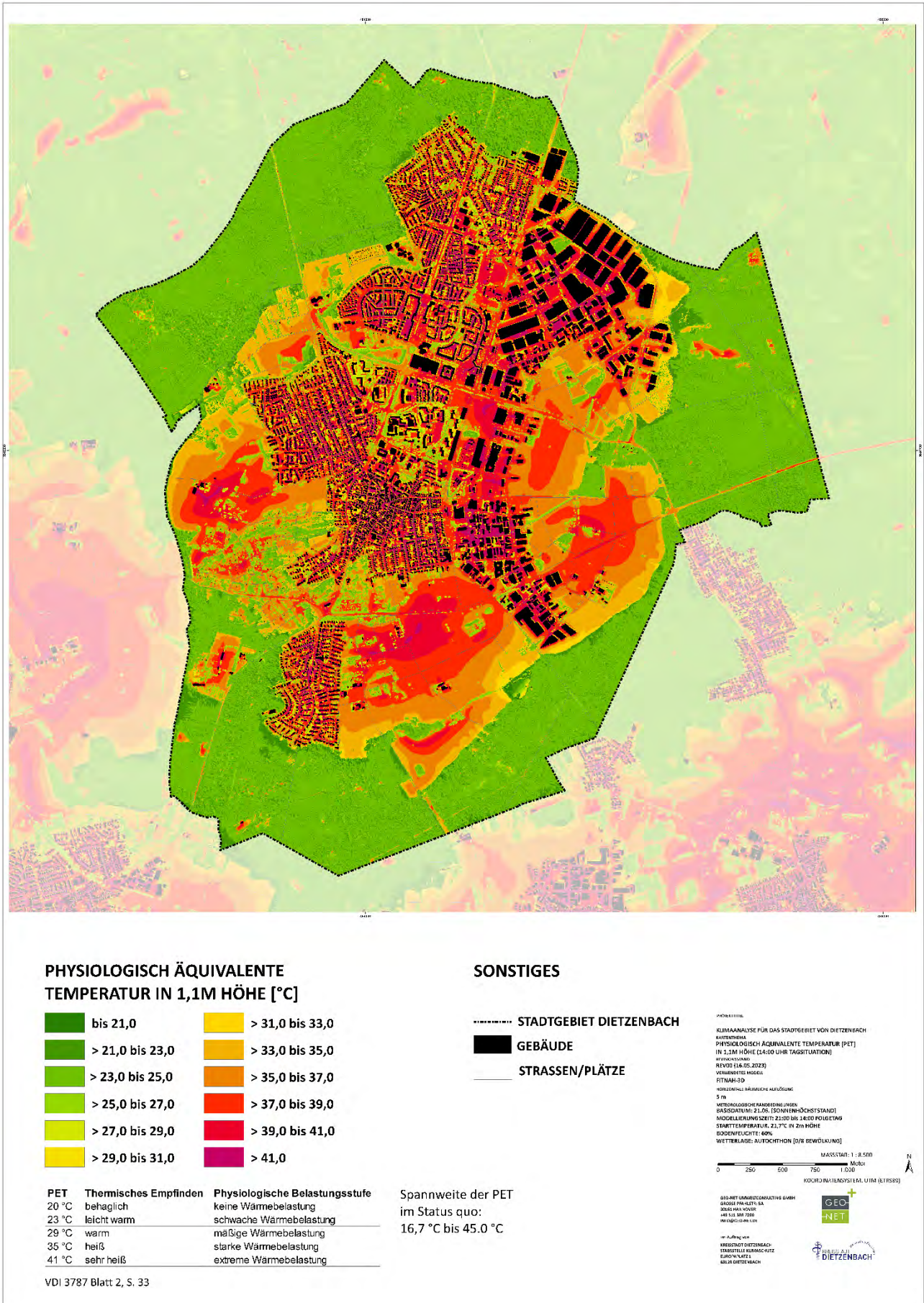


Abbildung 44: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Ist-Zustand für das Dietzenbacher Stadtgebiet.

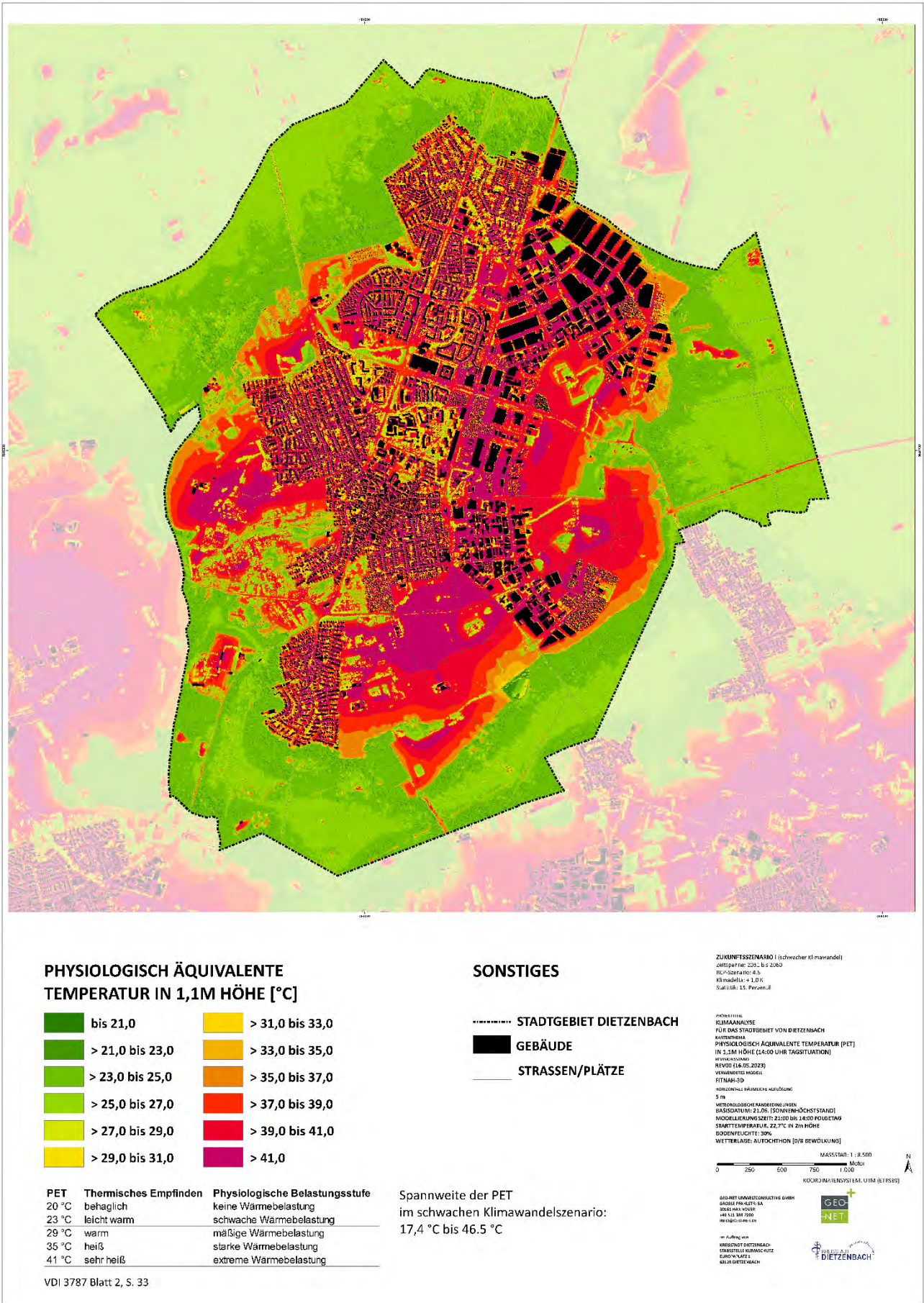


Abbildung 45: Wärmebelastung am Tage (14 Uhr) des Dietzenbacher Stadtgebiets im Zukunftsszenario (schwacher Klimawandel) für das Zieljahr 2045.

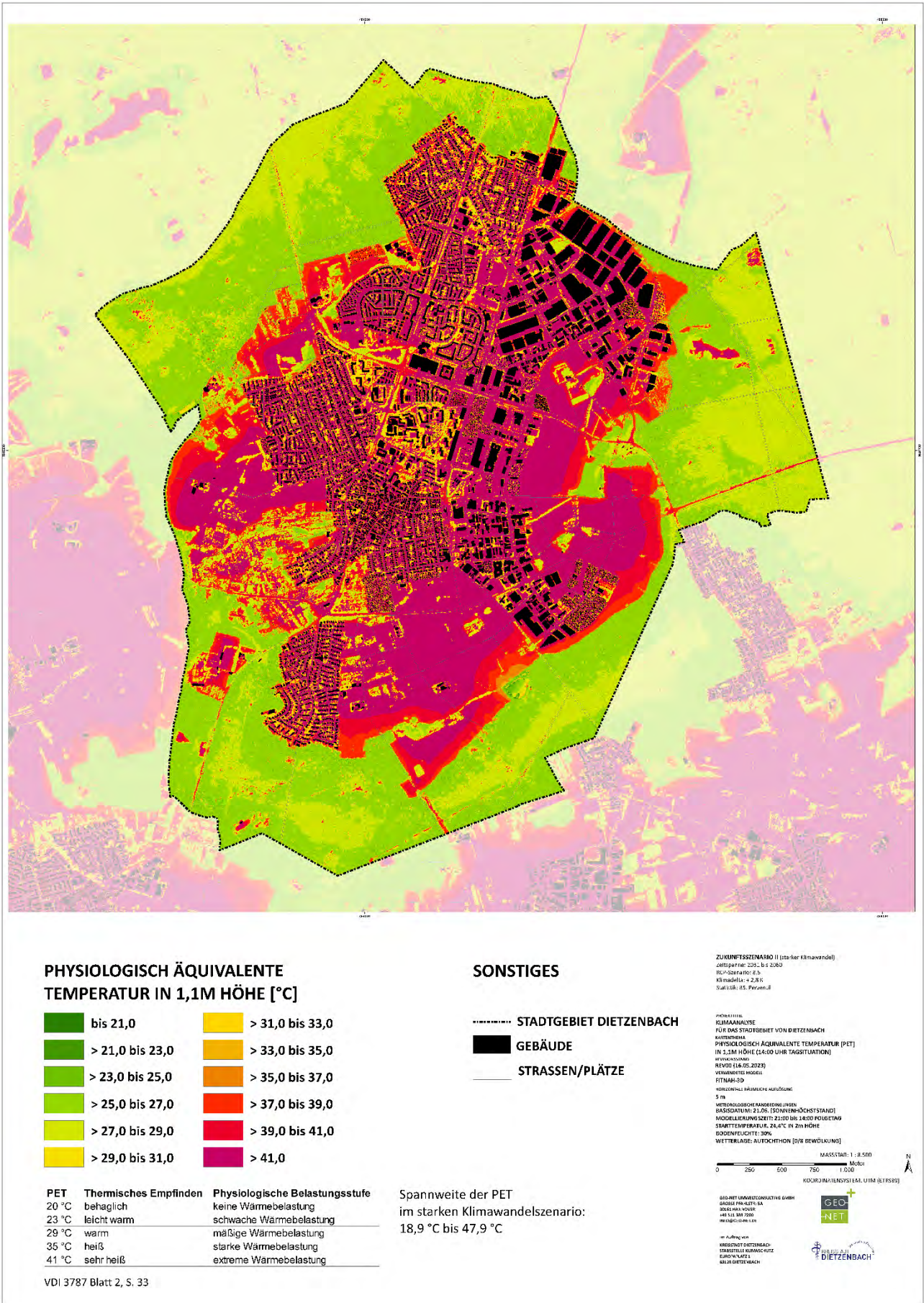


Abbildung 46: Wärmebelastung am Tage (14 Uhr) des Dietzenbacher Stadtgebiets im Zukunftsszenario (starker Klimawandel) für das Zieljahr 2045.



Auch in Parks (z.B. Stadtpark), auf Friedhöfen (z.B. Friedhof Dietzenbach) oder entlang der beschatteten Uferzone der Bieber herrschen unter größeren Baumgruppen überwiegend PET-Werte von unter 26 °C vor. Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder und Baumgruppen auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt). Besonders wertvoll zeigen sich all jene Flächen, die die Schattenwirkung von Bäumen und die an Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse kombinieren, wie beispielhaft am Dietzenbacher Angelsee, an dessen Ufer teils großflächig baumbestandene Bereiche mit PET-Werten von unter 21 °C vorliegen, ähnlich niedrige Temperaturen bestehen an den Waldrändern.

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine mäßige Wärmebelastung auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer starken Wärmebelastung betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten im Osten der Stadt und im versiegelten und unverschatteten Straßenraum zu finden (mehr als 42 °C PET; extreme Wärmebelastung). Auch die Kernstadt ist mit einer extremen Wärmebelastung assoziiert. So wurden in der Altstadt und im Westend durch die starke Überbauung und die verschattungsarme, ebenerdige Versiegelung oftmals ebenfalls mehr als 43 °C modelliert. Im Bereich Steinberg (bspw. Nibelungenstraße, Schulhof der Astrid-Lindgren-Schule) liegen ebenfalls stark überwärmte innerstädtische Flächen vor. Einige Straßenabschnitte profitieren zum Modellausgabezeitpunkt jedoch bereits von der sichtbaren Schattenwirkung der angrenzenden Gebäude, die die PET hier auf teils 32 °C absenken kann (Bahnhofstraße, Hügelstraße). Die Schattenwirkung als vornehmlich PET-steuernder Parameter wird auch auf den Ackerflächen im Umland deutlich. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen fast ähnlich hohe Werte wie in der unverschatteten Innenstadt, die PET liegt im unverschatteten Umland flächendeckend bei über 37 °C.

Analog zur Nachtsituation erzielen begrünte Innenhöfe in der Stadt, beispielsweise im Spessartviertel, auch tagsüber eine starke Kühlwirkung (PET < 29°C). Auch die Grünräume zwischen den Einfamilienhäusern (Steinberg, Hexenberg) wirken sich positiv auf die PET aus. Dass Schatten spendende Bäumen die Klimasituation am Tag wesentlich verbessern können, wird auch in den Straßenräumen sichtbar. So erscheinen baumbestandene Straßenzüge wie die Hauptstraße oder die Laufacher Straße mit PET-Werten unter 27 °C deutlich kühler als die stark versiegelten und nur geringfügig verschatteten Siedlungsbereiche. Neben den bereits genannten innerstädtischen Straßenräumen bilden die Siedlungsräume Altstadt (bspw. Rathenaustraße) oder entlang der Grenzstraße negative Gegenbeispiele, die sich durch ihren geringen oder kleinkronigen Baumbestand zumeist im Bereich starker, oftmals gar extremer Wärmebelastung befinden (PET > 41 °C).

Wie bereits bei der Lufttemperatur (vgl. Kapitel 6.1) nimmt auch die PET am Tag in der nahen Zukunft nicht gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt zu (Abbildung 45 und Abbildung 46). Die Veränderung der PET gegenüber der heutigen Situation reicht je nach durchgeführter Nutzungsänderung auf den Entwicklungsflächen im Mittel von -4,87 °C (RCP 4.5) bis +12,56 °C (RCP 8.5) (s. auch Tabelle 12). Auf fünf Flächen nimmt die PET im Mittel durch die Siedlungsentwicklung ab, da auf den bisherigen innerstädtischen Freiflächen ein größerer Beschattungsanteil durch die geplanten Gebäude und Bäume entsteht. In Räumen, in denen keine Nutzungsänderung durchgeführt wurde, lag die PET-Änderung ungefähr im Bereich des Klimaänderungssignals von 1,0 K (RCP 4.5) bzw. 2,8 K (RCP 8.5).



Auf allen anderen Entwicklungsflächen erhöht sich die PET im Mittel aufgrund der steigenden Lufttemperaturen und der Zunahme des Versiegelungsgrades gegenüber der heutigen Situation. Auf der Fläche Nr. 20 zeigen sich die größten mittleren Erwärmungen (+10,6 K resp. +12,6 K). Gegenwärtig ist diese Fläche mit Bäumen und Büschen bestanden, weswegen sie im Status quo eine recht geringe PET von 28,5 °C aufweist, die Planung sieht jedoch einen hohen Anteil an Versiegelung und Bebauung für die Fläche im Gewerbegebiet Mitte vor. Ähnlich wie bei der nächtlichen Temperatur kann jedoch auch bei der PET am Tage ein besonders hoher Gebäudeanteil durch die zufällige Verteilung der Mischpixel und der lückenhaften Struktur innerhalb größerer Industrie- und Gewerbekomplexe zu einer im Vergleich zu einem realen Bauszenario überschätzten PET führen.



Tabelle 12: Mittelwerte der Entwicklungsflächen sowie Differenzen „Zukunft minus Ist“ für P1 (RCP 4.5) und P2 (RCP 8.5) der Windgeschwindigkeit „WG“, der Kaltluftvolumenstromdichte „KVSD“, der Kaltluftproduktionsrate „KPR“, der nächtlichen Temperatur „T04“ und der physiologisch äquivalenten Temperatur am Tage „PET“. Für jeden Parameter ist jeweils der Flächenmittelwert aufgetragen.

Nr. in Karte	Nutzung (Plan)	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
1	W	-0,25	0,09	-0,25	0,09	-2,82	10,15	-2,78	10,18	-13,15	15,33	-13,15	15,33	2,63	17,89	4,43	19,69	6,44	39,64	8,20	41,40
2	W	-0,25	0,12	-0,25	0,12	-2,92	8,50	-2,86	8,56	-12,27	18,67	-12,26	18,67	2,17	17,60	3,95	19,38	4,14	36,68	6,12	38,65
3	G	-0,37	0,12	-0,37	0,12	-7,90	14,36	-7,93	14,34	-18,89	10,29	-18,90	10,28	3,74	18,52	5,55	20,33	5,41	39,26	7,28	41,13
4	G	-0,22	0,03	-0,22	0,03	-4,76	5,69	-4,79	5,66	-21,94	7,84	-21,94	7,84	4,49	19,54	6,29	21,34	4,93	41,62	6,57	43,27
5	G	-0,21	0,09	-0,21	0,09	-1,89	5,00	-1,87	5,02	-15,31	11,29	-15,31	11,29	2,69	18,45	4,48	20,24	3,64	40,43	5,37	42,15
6	W	-0,15	0,15	-0,15	0,16	-1,55	15,82	-1,50	15,87	-7,89	15,42	-7,90	15,42	1,99	17,41	3,78	19,20	7,85	40,07	9,61	41,83
7	W	-0,27	0,10	-0,27	0,10	-4,04	6,67	-4,06	6,65	-13,82	14,71	-13,82	14,71	2,11	17,86	3,90	19,65	3,82	42,07	5,37	43,63
8	W / G	0,00	0,09	0,00	0,09	0,23	4,52	0,27	4,57	-14,73	16,81	-14,75	16,79	1,68	17,83	3,46	19,61	-1,60	38,46	0,08	40,14
9	W	-0,05	0,12	-0,05	0,12	-1,51	6,89	-1,53	6,87	-15,98	18,61	-15,97	18,62	1,74	17,87	3,53	19,66	-0,68	38,15	1,03	39,87
10	G	-0,37	0,05	-0,37	0,05	-7,18	12,03	-7,21	12,01	-18,70	11,89	-18,71	11,88	3,29	18,33	5,09	20,13	2,37	40,52	4,01	42,16
11	G	-0,30	0,05	-0,30	0,06	-6,00	12,30	-6,04	12,25	-20,08	11,91	-20,08	11,91	3,52	18,32	5,32	20,12	2,45	40,27	4,08	41,90
12	G	-0,12	0,04	-0,12	0,04	-1,93	11,85	-2,00	11,79	-22,86	12,50	-22,87	12,50	3,25	18,42	5,06	20,23	2,99	40,64	4,56	42,21
13	G	-0,25	0,04	-0,25	0,04	-3,91	13,10	-3,95	13,06	-19,19	10,96	-19,19	10,96	3,17	18,59	4,97	20,38	3,62	40,45	5,15	41,98
14	G	-0,28	0,04	-0,28	0,04	-4,81	12,18	-4,84	12,14	-18,98	10,92	-18,98	10,92	3,53	18,68	5,34	20,48	5,32	40,38	6,85	41,91
15	G	-0,32	0,08	-0,32	0,08	-3,29	10,21	-3,34	10,16	-16,45	8,99	-16,45	8,99	3,22	19,14	5,01	20,93	6,77	41,78	8,30	43,31
16	G	-0,02	0,06	-0,02	0,06	-0,04	5,66	-0,04	5,66	-18,27	14,96	-18,27	14,96	2,39	17,84	4,18	19,63	3,16	39,86	5,00	41,70
17	G	-0,03	0,04	-0,03	0,04	-0,05	5,51	-0,07	5,49	-17,77	14,87	-17,77	14,87	2,56	17,71	4,34	19,49	3,10	39,81	4,96	41,66
18	G	-0,09	0,11	-0,09	0,11	-0,60	6,62	-0,60	6,61	-15,99	16,22	-15,98	16,22	2,27	17,51	4,05	19,29	3,74	39,81	5,67	41,74
19	G	-0,15	0,17	-0,15	0,17	-0,67	7,11	-0,70	7,09	-18,17	15,45	-18,17	15,45	2,29	17,86	4,08	19,66	0,42	40,68	2,08	42,35
20	G	-0,02	0,12	-0,02	0,12	-1,66	7,61	-1,69	7,59	-5,18	13,43	-5,18	13,43	1,47	17,87	3,26	19,66	10,60	39,14	12,56	41,09
21	G	-0,01	0,06	-0,01	0,06	-0,42	2,58	-0,41	2,59	-14,37	13,90	-14,37	13,90	1,95	18,07	3,74	19,86	1,66	40,82	3,37	42,54
22	G	-0,21	0,06	-0,21	0,06	-3,50	12,85	-3,59	12,76	-16,53	11,17	-16,53	11,17	3,11	18,61	4,91	20,40	5,21	39,86	6,89	41,54



Nr. in Karte	Nutzung (Plan)	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
23	G	-0,22	0,17	-0,22	0,17	-2,54	10,36	-2,50	10,40	-14,76	14,32	-14,75	14,33	2,54	17,43	4,32	19,20	3,13	39,47	5,05	41,39
24	W	-0,12	0,02	-0,12	0,03	-6,50	7,23	-6,82	6,91	-14,71	8,95	-14,71	8,95	1,22	16,81	3,05	18,64	-0,26	34,16	1,94	36,36
25	W	-0,20	0,07	-0,20	0,07	-4,26	7,26	-4,24	7,27	-14,04	14,12	-14,04	14,12	2,76	17,80	4,56	19,59	5,85	39,33	7,60	41,08
26	W	-0,17	0,17	-0,17	0,16	-1,10	8,90	-1,13	8,87	-17,29	23,34	-17,28	23,35	1,91	17,23	3,71	19,03	1,61	36,34	3,58	38,31
27	W	-0,21	0,17	-0,20	0,17	-0,94	8,59	-0,97	8,56	-14,13	20,80	-14,15	20,78	2,26	18,07	3,95	19,76	4,04	39,18	5,86	40,99
28	W	-0,08	0,22	-0,08	0,22	0,04	10,99	0,04	10,99	-3,70	25,23	-3,68	25,25	1,33	17,33	3,12	19,12	0,74	39,42	2,55	41,23
29	W	-0,19	0,23	-0,19	0,23	-1,52	9,45	-1,56	9,41	-6,98	26,82	-6,95	26,85	1,66	17,80	3,46	19,60	7,86	37,97	9,63	39,74
30	W	-0,17	0,20	-0,16	0,21	-1,20	10,88	-1,16	10,92	-18,62	20,51	-18,67	20,45	2,61	17,73	4,40	19,52	2,60	37,71	4,56	39,67
31	W	-0,08	0,07	-0,08	0,08	-0,97	8,12	-0,98	8,11	-12,94	16,55	-12,94	16,55	2,02	17,42	3,80	19,20	4,80	39,04	6,68	40,92
32	W	-0,07	0,08	-0,07	0,07	-0,56	6,02	-0,61	5,97	-14,14	18,78	-14,13	18,79	1,85	18,09	3,66	19,89	2,81	40,05	4,49	41,72
33	W	-0,06	0,18	-0,06	0,18	-0,50	14,51	-0,53	14,48	1,37	15,54	1,37	15,54	1,13	18,00	2,93	19,80	9,70	38,24	11,59	40,14
34	W	-0,09	0,08	-0,09	0,08	-0,14	14,35	-0,10	14,38	-15,22	13,74	-15,22	13,74	1,92	17,78	3,72	19,58	2,69	40,49	4,36	42,16
35	W	-0,28	0,22	-0,27	0,22	-2,63	18,41	-2,47	18,57	-12,89	16,14	-12,92	16,11	2,47	17,46	4,24	19,23	5,43	38,38	7,35	40,29
36	W	-0,22	0,25	-0,22	0,25	-2,39	20,13	-2,33	20,19	-7,38	12,67	-7,38	12,67	1,69	17,90	3,48	19,69	3,72	40,53	5,45	42,26
37	W	-0,17	0,19	-0,17	0,19	-1,20	17,23	-1,18	17,25	-8,23	13,97	-8,23	13,97	2,01	18,04	3,81	19,84	5,39	40,32	7,07	42,00
38	W	-0,10	0,19	-0,10	0,19	-0,63	13,98	-0,50	14,11	-12,55	17,67	-12,56	17,66	2,22	17,92	4,00	19,70	2,94	41,07	4,49	42,63
39	W	-0,13	0,11	-0,13	0,11	-0,90	13,86	-0,88	13,88	-11,15	15,88	-11,15	15,88	2,32	17,93	4,10	19,71	5,28	40,09	7,03	41,84
40	W	-0,01	0,04	-0,01	0,05	-0,01	7,97	-0,09	7,90	-9,87	15,84	-9,88	15,83	1,75	17,87	3,55	19,67	3,30	40,72	4,87	42,29
41	W	-0,04	0,11	-0,04	0,11	-0,10	9,49	-0,19	9,40	1,98	16,03	1,98	16,04	0,77	17,76	2,56	19,54	7,67	39,10	9,32	40,75
42	W	-0,04	0,05	-0,04	0,06	-0,55	7,66	-0,61	7,60	-6,45	13,63	-6,44	13,63	1,98	18,25	3,79	20,06	4,26	41,62	5,82	43,19
43	W	-0,05	0,04	-0,05	0,05	-0,40	7,54	-0,47	7,47	-6,46	13,03	-6,47	13,02	1,90	18,13	3,71	19,94	5,66	40,98	7,20	42,52
44	W	0,00	0,03	0,00	0,03	0,02	6,21	-0,05	6,13	-9,98	14,19	-9,99	14,18	1,81	17,70	3,60	19,49	3,88	39,58	5,62	41,33
45	W	-0,24	0,15	-0,24	0,15	-1,81	15,23	-1,65	15,39	-13,05	15,00	-13,06	14,99	2,30	17,83	4,10	19,63	1,97	39,20	3,66	40,89
46	W	-0,15	0,13	-0,14	0,13	-2,04	8,76	-2,05	8,75	-14,51	14,74	-14,52	14,73	2,45	18,27	4,25	20,06	4,24	41,44	6,07	43,27
47	W	-0,06	0,10	-0,06	0,10	-0,35	7,84	-0,30	7,89	-7,89	16,57	-7,90	16,56	1,88	17,60	3,66	19,38	3,66	36,65	5,54	38,52



Nr. in Karte	Nutzung (Plan)	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
48	W	-0,08	0,14	-0,08	0,14	-0,76	6,96	-0,79	6,93	-4,97	20,56	-4,97	20,56	1,73	17,82	3,52	19,61	6,14	37,64	7,92	39,42
49	W	-0,11	0,15	-0,12	0,15	-0,76	7,41	-0,82	7,35	-8,01	15,88	-8,00	15,89	2,02	17,87	3,79	19,64	3,69	36,29	5,63	38,23
50	W	-0,03	0,06	-0,03	0,06	0,01	5,14	-0,07	5,06	-2,81	13,77	-2,80	13,77	0,92	17,92	2,71	19,72	6,40	40,65	8,18	42,42
51	W	-0,11	0,12	-0,11	0,12	-1,14	8,03	-1,11	8,06	-9,18	14,76	-9,18	14,75	1,89	17,44	3,67	19,23	6,67	40,85	8,28	42,45
52	W	-0,05	0,08	-0,05	0,08	-0,42	5,15	-0,46	5,11	-13,25	17,10	-13,25	17,10	1,84	17,23	3,61	19,00	-4,87	34,34	-3,01	36,20
53	G	-0,29	0,07	-0,29	0,07	-5,87	12,57	-5,89	12,54	-19,39	10,14	-19,39	10,13	3,91	18,69	5,71	20,49	5,54	40,30	7,16	41,92
54	W	-0,04	0,07	-0,04	0,07	-0,70	6,08	-0,73	6,05	-4,04	12,82	-4,05	12,82	1,92	18,43	3,73	20,24	7,12	40,75	8,58	42,21
55	G	-0,31	0,14	-0,31	0,14	-3,05	8,39	-3,10	8,34	-6,21	21,69	-6,21	21,69	1,25	16,30	3,02	18,07	3,40	35,80	5,60	38,00
56	W	-0,23	0,08	-0,23	0,08	-3,43	7,63	-3,40	7,66	-14,91	13,94	-14,91	13,94	2,95	17,63	4,74	19,43	5,32	40,07	7,06	41,81
57	W	-0,12	0,11	-0,11	0,11	-1,03	9,51	-1,02	9,51	-13,15	13,30	-13,16	13,29	2,35	18,00	4,14	19,79	4,35	38,02	6,31	39,97
58	W	-0,02	0,10	-0,02	0,10	0,23	8,70	0,18	8,66	-13,97	16,06	-13,98	16,05	2,24	17,66	4,02	19,43	3,32	38,66	5,19	40,52
59	W	-0,12	0,20	-0,13	0,20	-1,07	10,55	-1,04	10,58	-10,88	28,71	-10,87	28,72	1,63	17,25	3,43	19,04	2,97	37,09	4,90	39,03
60	W	-0,06	0,09	-0,06	0,09	-0,84	5,62	-0,87	5,60	-4,56	13,75	-4,56	13,75	1,84	17,86	3,63	19,65	8,21	39,44	9,98	41,21
61	W	-0,11	0,12	-0,10	0,13	-0,72	20,70	-0,51	20,91	-11,99	16,81	-12,01	16,79	1,92	17,51	3,71	19,30	4,42	39,33	6,38	41,29
62	W	-0,26	0,20	-0,26	0,19	-2,42	19,27	-2,13	19,56	-11,66	19,28	-11,65	19,28	1,90	18,07	3,69	19,86	2,46	40,76	4,22	42,52
63	W	-0,16	0,15	-0,16	0,15	-0,75	16,69	-0,58	16,86	-16,75	20,56	-16,75	20,56	1,82	17,08	3,61	18,87	3,71	38,07	5,67	40,04
64	W	-0,25	0,19	-0,25	0,18	-1,08	17,22	-0,94	17,36	-15,35	19,45	-15,34	19,46	1,70	17,52	3,49	19,30	2,36	38,99	4,30	40,93
65	W	-0,09	0,11	-0,09	0,11	-0,62	15,21	-0,55	15,28	-4,29	22,28	-4,27	22,29	1,22	17,02	3,02	18,81	6,42	38,54	8,39	40,50
66	W	-0,28	0,32	-0,28	0,32	-2,65	24,66	-2,59	24,73	-3,26	13,64	-3,26	13,64	1,33	17,45	3,12	19,24	7,68	38,70	9,52	40,54
67	W	-0,07	0,09	-0,07	0,09	-0,77	9,98	-0,83	9,92	-9,57	14,54	-9,57	14,54	1,94	18,00	3,71	19,77	3,31	41,08	4,87	42,64
68	W	-0,03	0,09	-0,03	0,09	-0,14	9,18	-0,08	9,25	2,32	23,22	2,31	23,22	0,84	17,40	2,61	19,17	8,53	33,72	10,67	35,85
69	W	-0,04	0,04	-0,04	0,04	-0,62	8,94	-0,70	8,86	-14,33	11,70	-14,32	11,71	2,31	18,72	4,14	20,55	1,41	39,45	3,17	41,21
70	W	-0,07	0,01	-0,07	0,01	-1,76	3,47	-1,75	3,48	0,05	3,55	0,05	3,55	1,09	19,62	2,97	21,49	-0,07	36,89	1,49	38,45
71	W	-0,06	0,01	-0,06	0,02	-0,87	2,41	-0,90	2,38	-0,43	3,64	-0,43	3,64	1,18	19,66	3,00	21,48	1,09	37,73	2,68	39,33
72	G	-0,28	0,10	-0,28	0,10	-2,54	15,13	-2,53	15,14	-17,08	11,81	-17,08	11,81	3,36	18,34	5,15	20,14	3,92	39,85	5,64	41,57



Nr. in Karte	Nutzung (Plan)	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
73	G	-0,17	0,08	-0,17	0,08	-2,92	14,89	-2,93	14,88	-9,46	12,77	-9,46	12,77	2,46	18,46	4,25	20,25	5,97	39,39	7,74	41,16
Mittelwert	/	-0,14	0,11	-0,14	0,11	-1,80	10,24	-1,79	10,24	-11,74	15,29	-11,74	15,28	+2,16	17,93	+3,95	19,72	+4,08	39,23	+5,85	41,00



7. Klimaanalysekarten

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015,13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine ganz wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. 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 allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario 1 „schwacher Klimawandel (Zieljahr 2045)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario 2 „starker Klimawandel (Zieljahr 2045)“

Da das optionale Themenfeld „Luftqualität“ von der Auftraggeberin nicht beauftragt wurde, ist dieses aus dem Kartenwerk herausgelöst. Damit wurde in Teilen von den in der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 definierten Vorschlägen für die Inhalte der Klimaanalysekarte abgewichen.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 47). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 5 m unmittelbar der Modellausgabe. Im Wirkraum ist die nächtliche Temperatur für das 2 m Niveau von 04:00 Uhr flächenhaft und dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

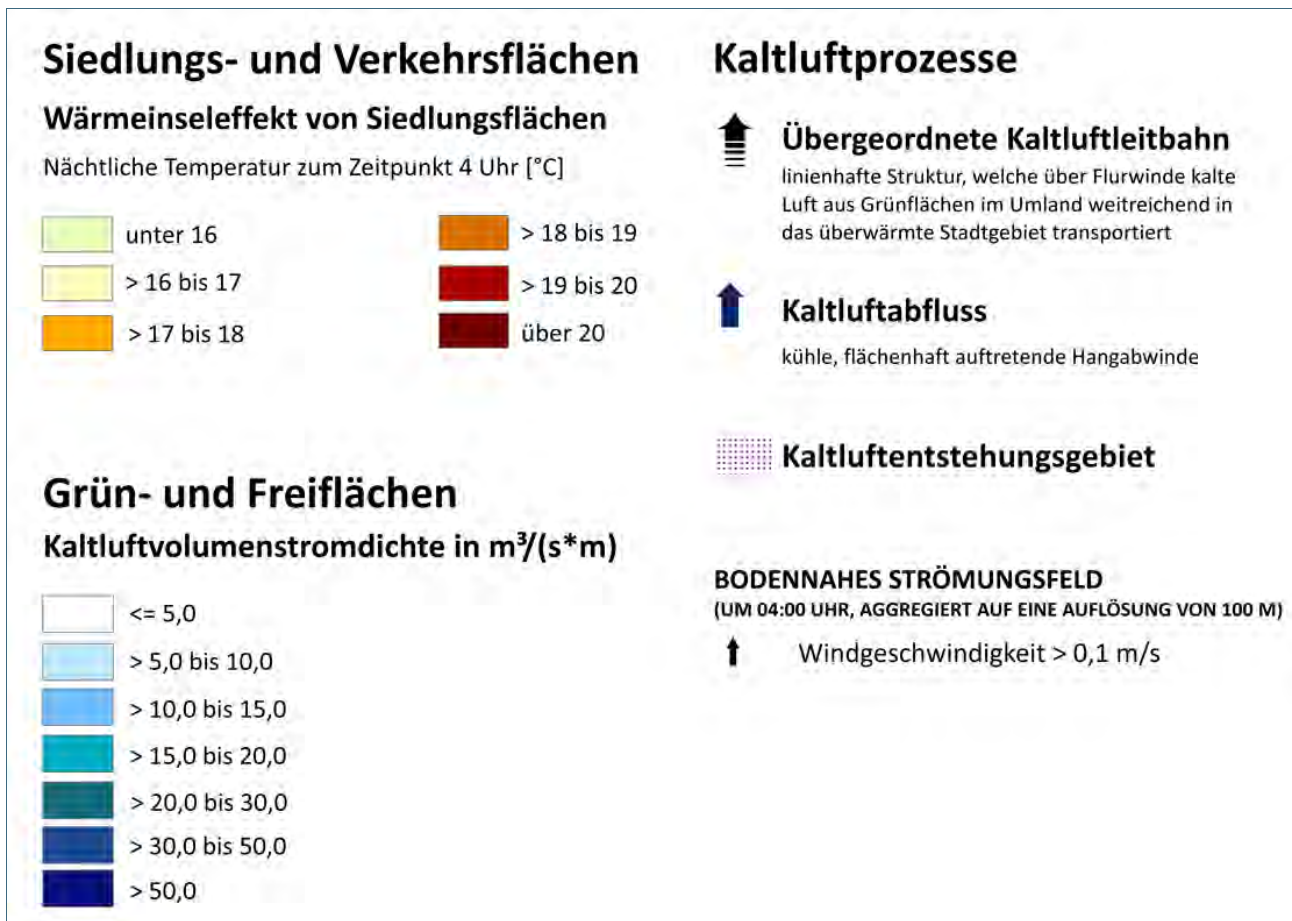


Abbildung 47: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten. Zukünftig eingeschränkt oder gefährdete Kaltluftleitbahnen sind in der Klimaanalysekarte der Szenarien mit einer violetten Pfeilsignatur dargestellt.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch zwei Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 13). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Kombination mit dem mitgelieferten GIS-basierten Ergebnisdaten in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Grün- und Freiflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 19,6 m^3/(m^2h)$.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Dietzenbach von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften Kaltluftleitbahnen. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al. 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer



Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) auch hier durchaus 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 immer auch ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. noch einmal intensiver zu prüfen ist.

Tabelle 13: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Windgeschwindigkeit- und richtung	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiete	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 19,6 m ³ /(m ² h)
Kaltluftleitbahn (linear)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen und Abflussbereiche 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 alle drei Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche (Abflüsse und Parkwinde) angewiesen sein. Eine Akzentuierung des Kaltluftprozessgeschehens fand vornehmlich im Bereich von Siedlungsräumen statt. Besonders prägnante Kaltluftprozesse wurden auch im Bereich von Gewerbegebieten durch die Ausweisung von Leitbahnen oder Abflüssen einbezogen. Eine Berücksichtigung verschiedener Nutzungsstrukturen im Wirk- und Ausgleichsraum erfolgte nachfolgend im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

Im Folgenden werden die Inhalte der Klimaanalysekarten anhand von Beispielen beschrieben. Sie fassen die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte (je für Ist-Zustand und zwei Zukunftsszenarien) zusammen und präzisieren das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen



Legendeninhalten. Für die Situation um 14 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter (vgl. Kapitel 6.2), sodass auf die Erstellung einer Klimaanalysekarte für die Tagsituation verzichtet wurde. Die Karten der PET können jedoch auch als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden.

Die Abbildung 49 zeigt die Klimaanalysekarte des Status Quo für das Dietzenbacher Stadtgebiet. Die auf Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (Wirkraum) durch die Nachttemperatur dargestellte thermische Belastungssituation zeigt sich insbesondere im Bereich der Altstadt (19 - 20 °C) und auf den Industrie- und Gewerbeflächen (insb. Gewerbegebiet Nord und Süd). Durchgrünte Siedlungsbereiche mit aufgelockerter Bebauung und der Nähe zu Grünflächen sind mit Werten von teils unter 17 °C nur wenig überwärmt (z.B. Steinberg, Westend, Hexenberg). Auch die weniger versiegelten Bereiche im Spessartviertel weisen größtenteils solch niedrige Überwärmungen auf.

Die über den Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) hinterlegte Kaltluftvolumenstromdichte deckt sich mit jener aus Abbildung 38 und ist gemeinsam mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten essenzieller Bestandteil der gutachterlich festgelegten Kaltluftleitbahnen und -abflüsse. In Dietzenbach gibt es heutzutage drei **Kaltluftleitbahnen** (s. Abbildung 48). Hierzu zählt der am westlichen Siedlungsrand gelegene Stadtpark, der die im Umland entstandene Kaltluft bis in die Kernstadt transportiert und zugleich selbst als Kaltluftentstehungsgebiet fungiert. Die zweite und dritte Leitbahn, die sich beide im Gewerbegebiet Nord befinden, bestehen aus einer freien Grünfläche am Siedlungsrand. Beide Leitbahnstrukturen weisen an deren Rändern, dem Siedlungsraum zugewandt weit überdurchschnittliche¹⁶ Kaltluftvolumenströme von teils über 20 m³/(s*m) auf, die neben der Breite von mindestens 50 m und den umliegenden bzw. vorgelagerten, durch violette Punkte ausgewiesenen Kaltluftentstehungsgebieten charakteristisch für Leitbahnstrukturen sind.

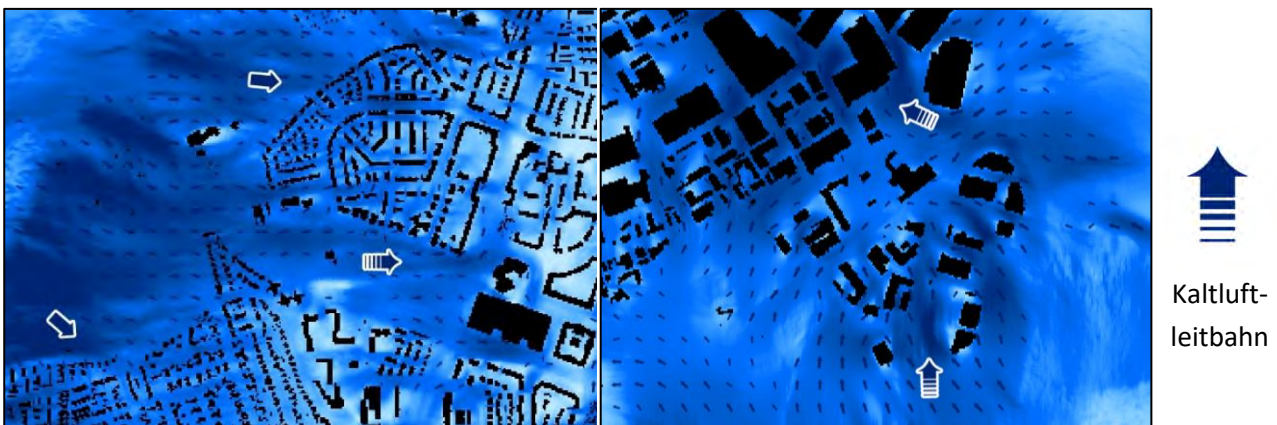


Abbildung 48: Drei identifizierte Kaltluftleitbahnen im Dietzenbacher Stadtgebiet. Im Hintergrund wird die Kaltluftvolumenstromdichte [m³/(m*s)] abgebildet.

Neben den Kaltluftleitbahnen als linienhafte Strukturen wurden für Dietzenbach auch **Kaltluftabflüsse** identifiziert, welche flächenhaft über unbebauten Hangbereichen oder rein thermisch in Form von Flurwinden auftreten. In Dietzenbach sind aufgrund der Reliefunterschiede im westlichen Stadtgebiet mehrere flächenhafte Kaltluftabflüsse vorhanden. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist

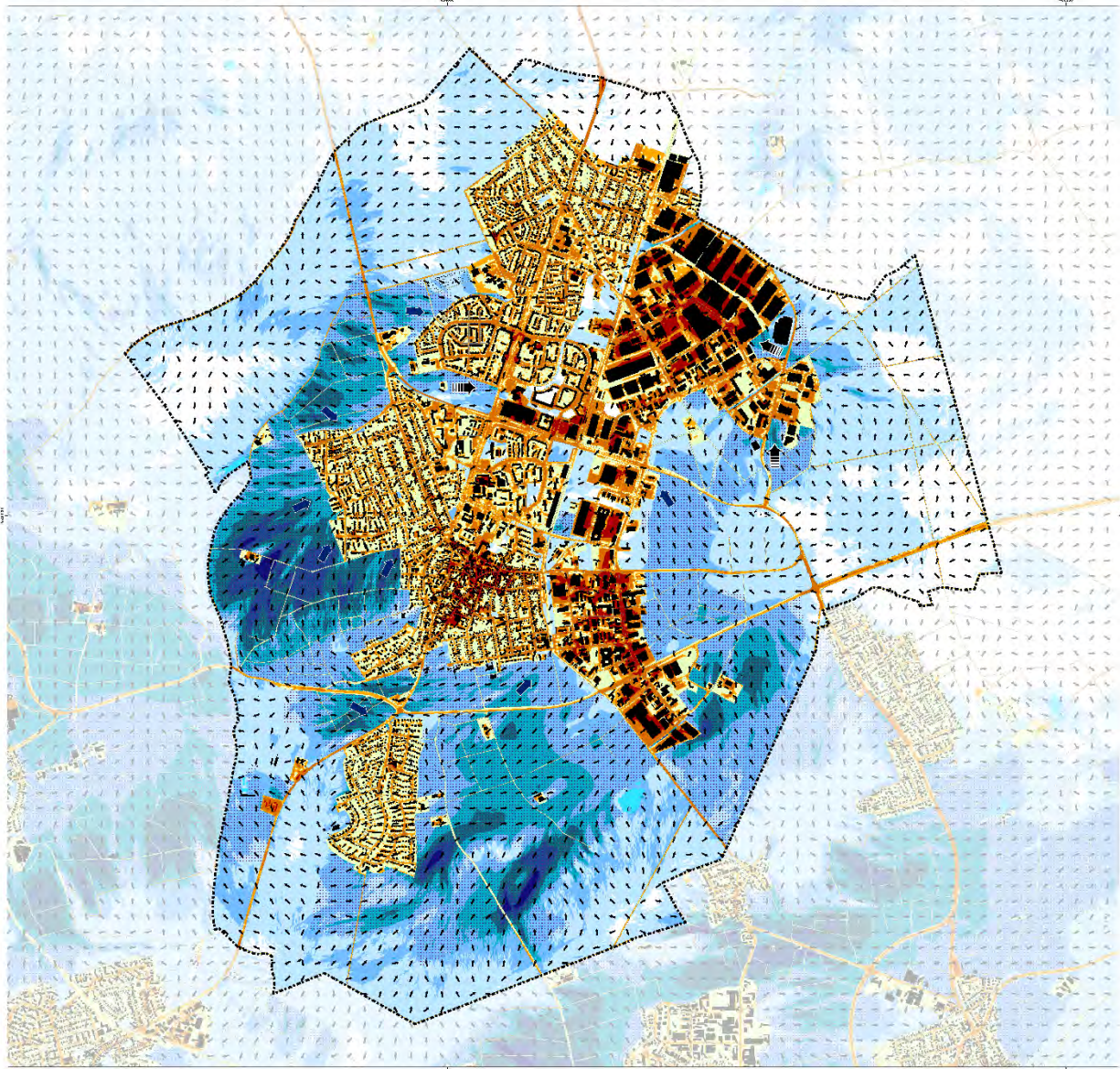
¹⁶ Die durchschnittliche KVSD liegt im Ist-Zustand auf den Grünflächen bei ca. 10,9 m³/(s*m).



höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte, orografiebedingte Kaltluftabflüsse sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und treten vornehmlich westlich vom Stadtteil Westend auf. Südwestlich von Steinberg sowie auf das Gewerbegebiet Süd und Mitte gerichtet sind ebenfalls Kaltluftabflüsse vorhanden.



Klimaanalysekarte Dietzenbach (Nachtsituation)



Siedlungs- und Verkehrsflächen

Wärmeineleffekt von Siedlungsflächen

Nächtliche Temperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr [°C]



Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte in m³/(s*m)



Kaltluftprozesse



Übergeordnete Kaltluftleitbahn

Linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert



Kaltluftabfluss

Kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde



Kaltluftentstehungsgebiet

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD

(UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

↑ Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Sonstiges

----- Stadtgebiet Dietzenbach

Gewässer

Gebäude

PHOENIX KLIMAANALYSE FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH
KARTENNUMM. KLIMAANALYSEKARTE (04:00 UHR NACHTSITUATION)
BYRONKONZERN REVIZOL (18.05.2023)
VERWENDETES MODELL FITNAH-3D
HÖHENWERT: BRÄUNLICHE AUFLÖSUNG: 5 m
METEOROLOGISCHE KONDITIONEN JAHRES BASISSTUHN (21.09. [SONNENHÖCHSTSTAND])
MODELLIERUNGSEIT: 21:00 BIS 14:00 FOLGEBTAG
STARTTEMPERATUR: 21,7°C IN 2m HOHE
SOLARBELEUCHTUNG: 0,0%
WETTERLAGE: AUFGLEICHUNG (0/100 BEWÖLKUNGS)



0 250 500 750 1000
Metern
KORDK. RAUHLINEN (S. 14. UTM (ETRS2011))

GIS-ART (UMWELTKONZENTIV GMBH)
DIN EN ISO 9001:2015
DIN EN ISO 14001:2015
DIN EN ISO 45001:2018
RECHENSTRASSE 1
69126 HEIDELBERG

in Auftrag von
KREISTAG DIETZENBACH
UMWELTLICHE NACHRICHTEN
UND KLIMASCHUTZ
BÜRGERDIETZENBACH

Abbildung 49: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustand für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



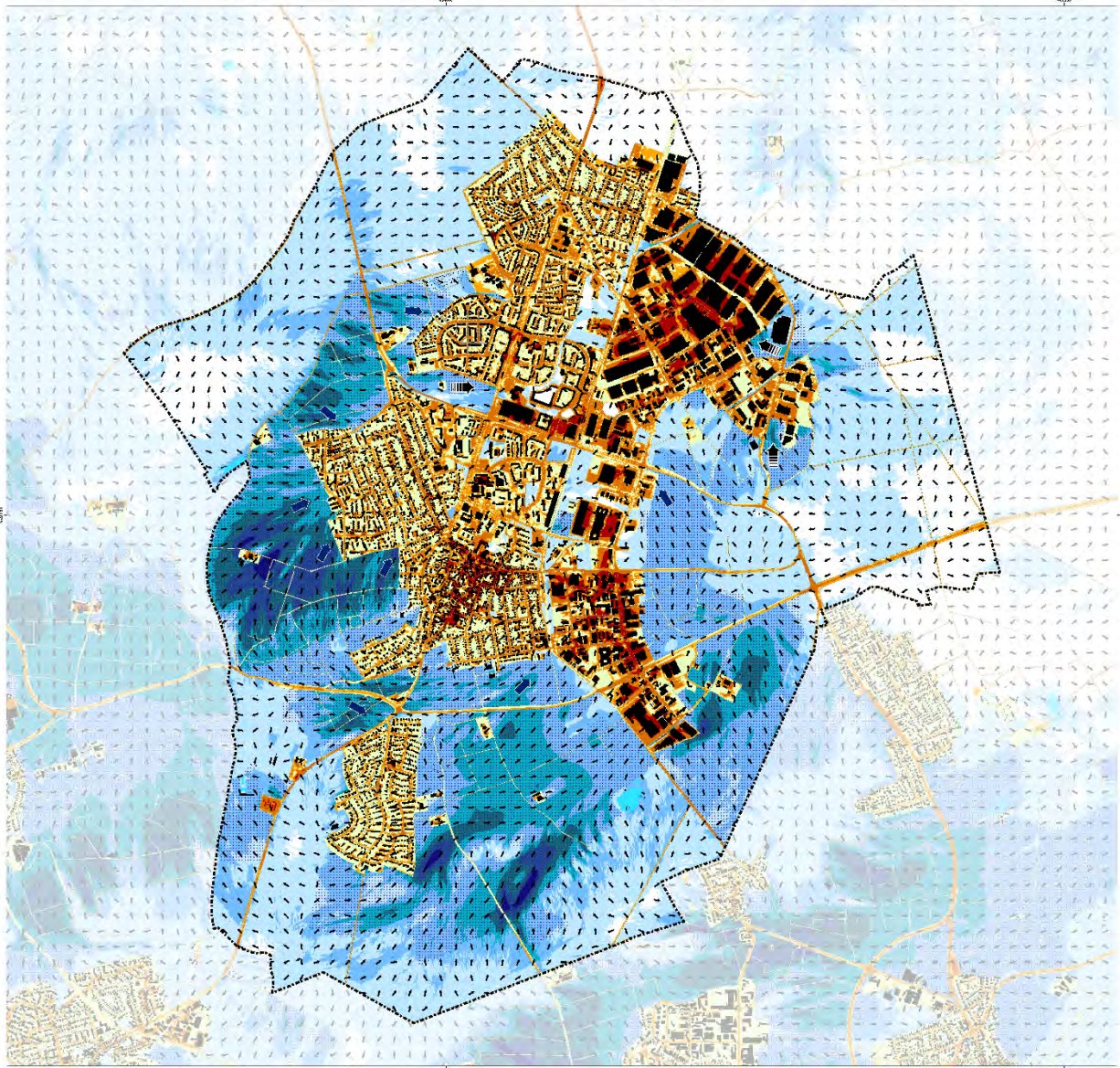
Durch die Einarbeitung des thermischen Klimawandelsignals und Prüfflächen wurde die Erstellung zweier weiterer Klimaanalysekarten für die beiden Zukunftsszenarien (schwacher / starker Klimawandel) notwendig (s. Abbildung 50 & Abbildung 51). Die hierbei angewandten Statistiken und Grenzwerte (z.B. für die Ausweisung von Kaltluftentstehungsgebieten) sind dem neuen Modelldatensatz entnommen, wobei sich die Methodik zur Berechnung dieser Schwellen von der im Ist-Zustand verwendeten nicht unterscheidet. Im Vergleich zum Ist-Zustand ist die Zahl der Wirkraumflächen erhöht, da die meisten Prüfflächen eine Änderung der Flächennutzung von einer Grün- und Freifläche zu einer Siedlungs- oder Gewerbefläche vollziehen. Die hierbei neu entstehenden Siedlungsbereiche ordnen sich im Wertespektrum vergleichbarer Siedlungsräume in Abhängigkeit zur Versiegelungs- und Bebauungsdichte ein.

Analog zum Ist-Zustand wurde die Kaltluftvolumenstromdichte der Zukunftsszenarien (s. auch Abbildung 39) über alle Grün- und Freiflächen der Klimaanalysekarte gelegt und zusammen mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten der Modellrechnung Zukunft zur gutachterlichen Festlegung der Klimaprozessräume (Kaltluftleitbahnen, -abflüsse) hinzugezogen. Hierbei zeigten sich die infolge der vollzogenen Flächenentwicklung veränderten Stadtstrukturen maßgebend für ein teils abgewandeltes Kaltluftprozessgeschehen. Mit Blick auf Leitbahnstrukturen bleiben infolge der intensiven Flächenentwicklungen in Dietzenbach zwei im Ist-Zustand genannte Kaltluftleitbahnen erhalten (Bereiche Bürgerpark und Waldstraße). Für die Leitbahn auf der Grünfläche parallel zur Gottlieb-Daimler-Straße (Gewerbegebiet Nord) wurde aufgrund der angenommenen Stadtentwicklung eine eingeschränkte bzw. gefährdete Funktion identifiziert.

Die flächenhaften Kaltluftabflüsse sind in der Zukunftsmodellierung größtenteils ähnlich stark ausgeprägt wie im Status quo. Im Bereich der geplanten Siedlungsentwicklung im Gewerbegebiet Süd (südlich der L3317) schwächt sich der Kaltluftvolumenstrom jedoch ab bzw. wird durch die Hinderniswirkung der simulierten Bebauung umgelenkt. In der Zukunftsmodellierung wirkt sich die geplante Bebauung somit auf die Entwicklungsfläche selbst, aber nur geringfügig auf die Nachbarschaft aus. Auf eine Kennzeichnung der flächenhaften Kaltluftströmung (Kaltluftabflusspfeil) wurde an dieser Stelle verzichtet, da die Fließrichtung der Kaltluft im Status quo nicht gezielt auf den Wirkungsbereich ausgerichtet ist und somit wenig Siedlungsbezug aufweist.



Klimaanalysekarte Dietzenbach (Nachtsituation)



Siedlungs- und Verkehrsflächen

Wärmeineleffekt von Siedlungsflächen

Nächtliche Temperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr [°C]



Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte in m³/(s*m)



Kaltluftprozesse



Übergeordnete Kaltluftleitbahn

Linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert



Kaltluftabfluss

Kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde



Kaltluftentstehungsgebiet

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD

(UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

↑ Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

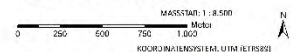
Sonstiges

----- Stadtgebiet Dietzenbach

Gewässer

Gebäude

PHYSIKALISCHES KLIMAAANALYSE FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH KARTENTITEL KLIMAAANALYSEKARTE (04:00 UHR NACHTSITUATION) HYPOKATHENE REVISION (16.05.2025) VERWENDETES MODELL FITNAH-3D HOHEAUFLÖSUNG: 5 m METEOROLOGISCHE RANDKONDITIONEN (SÜDSICHTE): 21,0°C (SONNENHÖCHSTSTAND) MODELLENTWICKLUNG: 21:00 BIS 14:00 POLYGENE STARTTEMPERATUR: 21,7°C IN 2m HOHE KONDENSATION: 60% WETTERLAGE: AUFGLEICHUNG (D/S BEWÖLKUNGS)



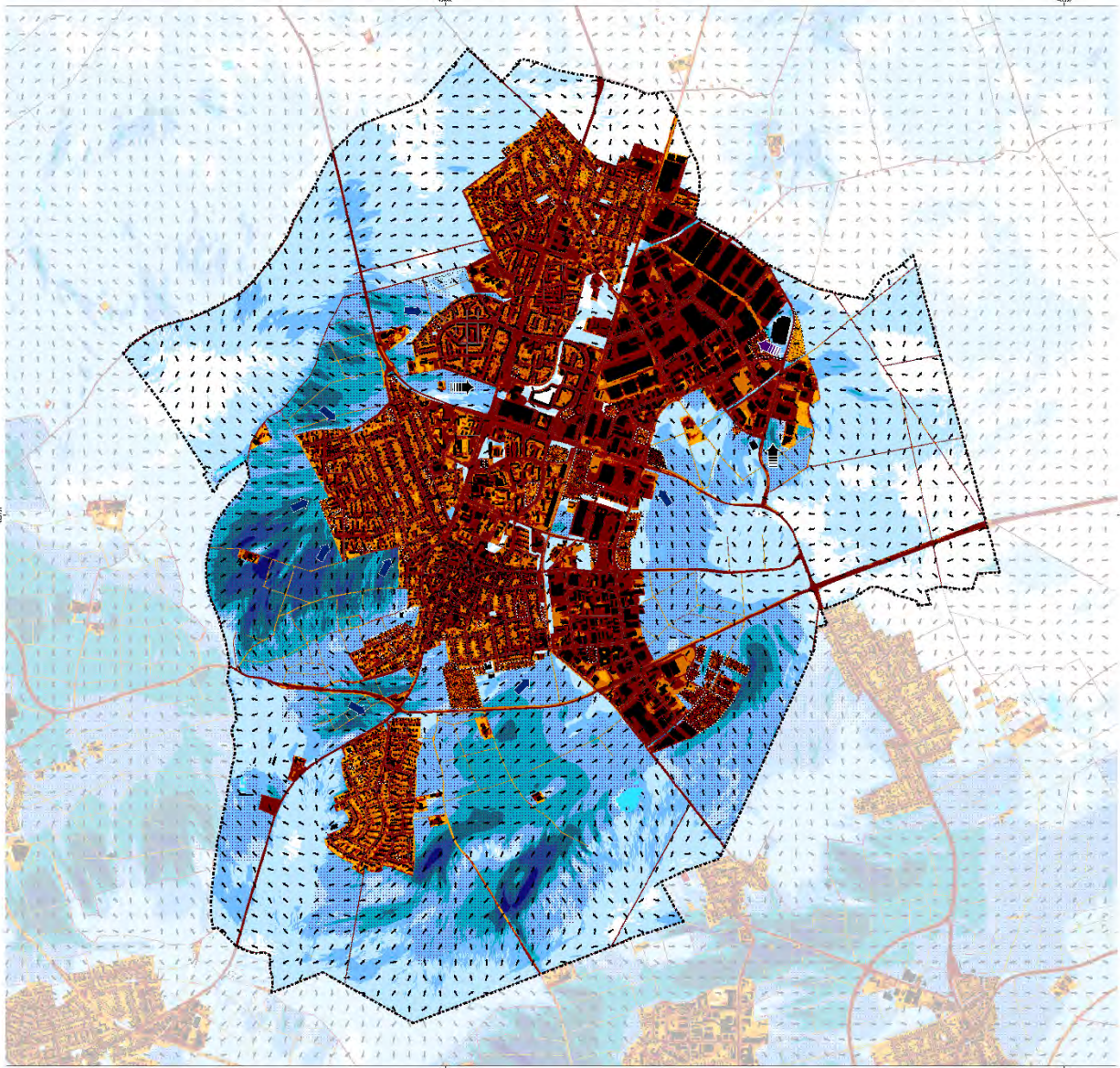
GEOMATIK UMBWELT CONSULTING GMBH
DANIEL WINDT
SABINE HALL
AND THE TEAM
www.geomatic.de

in Auftrag von
KREISTAG DIETZENBACH
LEBENDIGES UMWELTSCHUTZ
GEBIET DIETZENBACH
BUND DIETZENBACH

Abbildung 50: Klimaanalysekarte der Nacht im Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ 2045 für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



Klimaanalysekarte Dietzenbach (Nachtsituation)



Siedlungs- und Verkehrsflächen

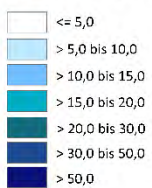
Wärmeineleffekt von Siedlungsflächen

Nächtliche Temperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr [°C]



Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s*m)$



Kaltluftprozesse



Übergeordnete Kaltluftleitbahn

Linienhafte Struktur, welche über Föhnwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert



Kaltluftabfluss

Kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde



Funktion ggf. eingeschränkt / gefährdet



Kaltluftentstehungsgebiet

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD

(UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

↑ Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Sonstiges

----- Stadtgebiet Dietzenbach

Gewässer

Gebäude

ZUKUNFTSSZENARIUM II (starker Klimawandel)

Zeitraum: 2031 bis 2050
 RCM-ENSEMBLE: 8.5
 RERAUSCH: 2.25
 STATISTIK: 85. Perzentil
 Bodenfeuchte: 50 %

PHYSIKALISCHES KLIMAMODELL

FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH

KARTENTITEL: KLIMAMODELLSITUATION

(04:00 UHR NACHTSITUATION)

INFORMATIONEN: RECHNUNG: 18.05.2023

VERWENDETE MODELLE: FITNAR-3D

VERWENDETE NÄHRGEGENSTÄNDE:

5 m

METEOROLOGISCHES STANDORTSNETZ

STANDORTSNETZ: 22.03. (SONNENHÖCHSTSTAND)

MODELLLEBENSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGEBELEG

STARTTEMPERATUR: 26,4°C IN 2m HÖHE

BEWÖLKNUNG: 30%

WETTERLAGE: ALTYOCHTUNG (0/S BEWÖLKNUNG)

MASSSTAB: 1 : 8.500

0 250 500 750 1000 Meter

KOORDINATENSYSTEM: UTM (ETRS89)

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

UND NETZUMWELTBÜRO GEM

Abbildung 51: Klimaanalysekarte der Nacht im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ 2045 für das Dietzenbacher Stadtgebiet.

8. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

8.1 GRUNDLAGEN

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte 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 also 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 dabei zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Lastraum (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 vor, gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung und schlägt auch RGB-Farbcodes vor. 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 auch keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zur Ist- und Zukunftssituation in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, gemäß der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die sechs Bewertungskarten („Nacht Ist“, „Tag Ist“, „Nacht Zukunft I“, „Nacht Zukunft II“ und „Tag Zukunft I“, „Tag Zukunft II“) bauen auf den zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarten bzw. PET-Karten des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Der Erstellung dieses Kartenwerks liegt ein mit vielen beteiligten Akteuren abgestimmter Aushandlungsprozess zugrunde (s. Kapitel 3).

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap. 6) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt- raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer möglichst 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 per se nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine gute Grundlage, die durch eine gutachterliche Tätigkeit entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betrifft dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Stadtumland bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung größerer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum). Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da bis auf wenige Ausnahmen alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer halben Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 52).

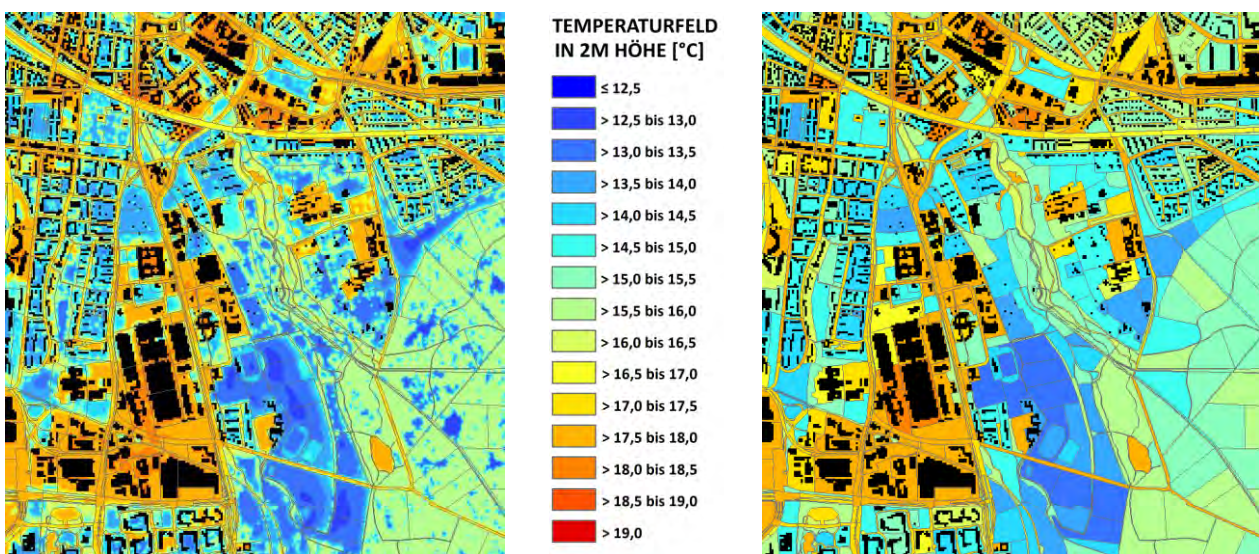


Abbildung 52: Links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (Beispiel nicht aus Dietzenbach).



8.3 BEWERTUNGSKARTEN

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

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

8.3.1 WIRKRAUM – METHODIK

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die PET um 14:00 für die Belastungssituation am Tage sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.5). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie mithilfe der in Kapitel 8.2 beschriebenen Methode aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb Temperaturniveau gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S1-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 53).



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

Dabei ist

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



Abbildung 53: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die zu betrachtenden Situationen (Ist-Situation, zwei Zukunftsszenarien) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden die Statistiken jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes und der beiden Zukunftsszenarien berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für sechs verschiedene Bewertungskarten ergaben. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für alle sechs Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Dietzenbach wurde aus Gründen der Darstellung die ursprünglich 4-stufige in eine 5-stufige Skala von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen (Tabelle 14). Der Wirkraum umfasst Wohngebiete, Industrie- und Gewerbegebiete sowie den Straßenraum und Plätze. Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.

Tabelle 14: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Betrachteter Parameter		Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Wirkraum	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr (Ist/Zukunft) bis -0,5 > -0,5 bis ≤ 0,5 > 0,5 bis ≤ 1,0 > 1,0 bis ≤ 1,5 > 1,5	PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand) bis 32,67 > 32,67 bis ≤ 38,22 > 38,22 bis ≤ 40,99 > 40,99 bis ≤ 43,76 > 43,76	PET 14:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenarien) bis 33,99 > 33,99 bis ≤ 39,77 > 39,77 bis ≤ 42,67 > 42,67 bis ≤ 45,56 > 45,56	Siedlung, Industrie/Gewerbe, Straßen, Plätze
Nachtsituation Wirkraum	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1= sehr günstig 2= günstig	T 04:00 Uhr (Ist/Zukunft) bis -1 > -1 bis ≤ -0,3	T 04:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand) bis 15,97 > 15,97 bis ≤ 16,84	T 04:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario) bis 16,48 > 16,48 bis ≤ 17,65	Siedlung, Industrie/Gewerbe



	3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	> -0,3 bis ≤ 0,3 > 0,3 bis ≤ 1 > 1	> 16,84 bis ≤ 17,59 > 17,59 bis ≤ 18,46 > 18,46	> 17,65 bis ≤ 18,66 > 18,66 bis ≤ 19,84 > 19,84	werbe, Straßen, Plätze
--	--	--	---	---	------------------------

8.3.2 AUSGLEICHSPAUM - METHODIK

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

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

Die folgende Abbildung 54 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Klimafunktion:
 - überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 10,91 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ($\geq 10,84 \text{ m}^3/[\text{s} \cdot \text{m}]$ im Zukunftsszenario II) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $\geq 0,19 \text{ m/s}$ ($\geq 0,18 \text{ m/s}$ im Zukunftsszenario II) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 19,58 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($19,37 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ im Zukunftsszenario II)
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹⁷

¹⁷ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).



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

- Die Fläche weist eine Kaltluftfunktion auf (hohe Kaltluftströmung / -entstehung) → Sie besitzt eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung.
- Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf → Sie besitzt eine mittlere bioklimatische Bedeutung.

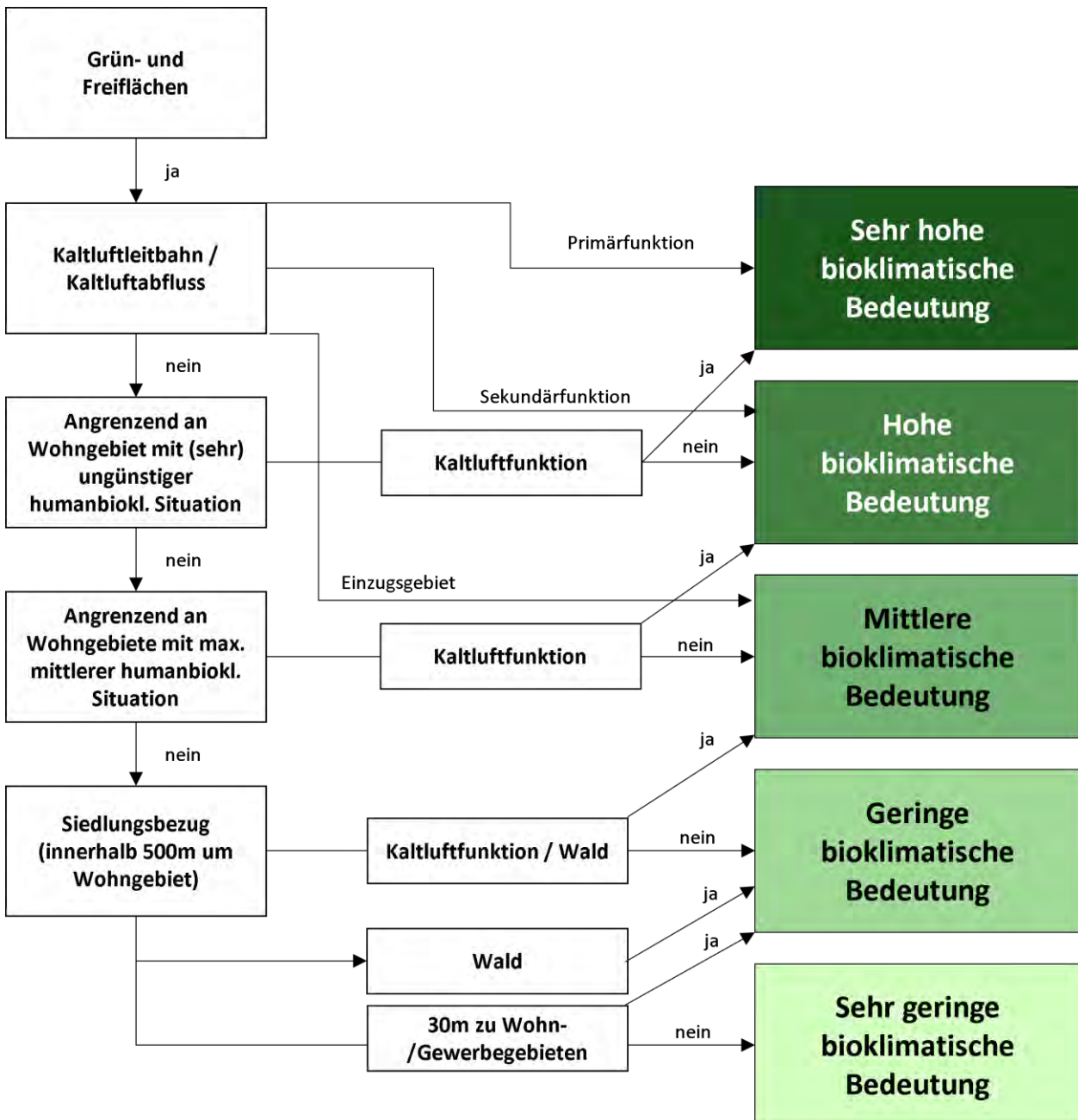


Abbildung 54: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen für den Siedlungsraum in der Nachtsituation.

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



Tabelle 15 listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario für alle Ausgleichsflächen im Dietzenbacher Stadtgebiet auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.

Tabelle 15: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Betrachteter Parameter		Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Ausgleichsraum	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i> 5= sehr hoch 4= hoch 3= mittel 2= gering 1= sehr gering	<i>PET 14:00 Uhr (Ist/Zukunft)</i> bis -1,5 > -1,5 bis ≤ -0,75 > -0,75 bis ≤ 0,0 > 0,0 bis ≤ 0,5 > 0,5	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand)</i> bis 19,13 > 19,13 bis ≤ 23,68 > 23,68 bis ≤ 28,23 > 28,23 bis ≤ 31,26 > 31,26	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario)</i> bis 19,42 > 19,42 bis ≤ 24,44 > 24,44 bis ≤ 29,46 > 29,46 bis ≤ 32,80 > 32,80	Grün-/Freiflächen, Wald

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 49 und Abbildung 50) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen und -abflüsse aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum eine weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Die Karten zeigen anhand des Kaltlufteinwirkungsbereichs in hellblauer, rasterbasierter Schraffur an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (s. Abbildung 55).



Abbildung 55: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von 10,91 m³/(s*m) (Zukunft II: 10,84 m³/(s*m)) oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von 0,19 m/s (Zukunft II: 0,18 m/s) erreichen oder überschreiten.



8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON IST-ZUSTAND UND ZUKUNFTSSZENARIO

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 56 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Dietzenbach im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 32 % der Wohngebiete und 7 % der Gewerbegebiete sind durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen am Stadtrand von Westend, Steinberg, der südlichen Altstadt und große Teile von Hexenberg dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte bereits am Tage dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann.

U.a. große Teile von Steinberg, Westend und der äußere Altstadtgürtel zählen mit 58 % zu den Wirkungsräumen mit einer günstigen thermischen Situation von Wohngebieten. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen. Gewerbeflächen mit umgebenden Grünflächen fallen zu 32 % in diese Klasse.

33 % der Wohn- und 46 % der Gewerbeflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad oder zentrumsnahe. Beispielhaft sind hierfür das Spessartviertel, die Altstadt sowie die Flächen im Gewerbegebiet zu nennen.

Nur sehr wenige Flächen der Wohngebiete (0,4 %) und 15 % der Gewerbegebiete fallen in die Klasse der ungünstigen thermischen Situation. Darunter entfällt neben einigen Wohnblöcken in der Altstadt der Großteil dieser Flächenkategorie auf die zahlreichen Industrie- und Gewerbegebiete Dietzenbachs, darunter vor allem im Gewerbegebiet Nord und Süd. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Oftmals stehen in unmittelbarer Umgebung darüber hinaus nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

Im Status quo gehören noch keine Wohn- oder Gewerbeflächen der schlechtesten Klasse - einer sehr ungünstigen thermischen Situation - an. Im Zukunftsszenario mit starkem Klimawandelsignal kommen diese ungünstigen Bedingungen insbesondere bei einem hohen Versiegelungsgrad, großen Baukörpern und zum Teil auch bei einer geringen Kaltluftzufuhr vor.



Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 7,1 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen und der Kaltluftabflüsse. Zusätzlich gehören einige weitere innerstädtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, z.B. die Grünflächen des Stadtparks sowie Kleingärten und Brachflächen entlang der Gleisflächen.

Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 42,7 % innerhalb der Dietzenbacher Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse. Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze (z.B. Sportplatz Steinberg) oder an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen (z.B. angrenzend an Westend).

36 % aller Ausgleichflächen entfallen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen im Umland der Stadt in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit geringer human-bioklimatischer Bedeutung nimmt 9,0 % aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen vor allem Waldbereiche (im Westen, Osten und Südem der Stadt), die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen.

Den kleinsten Anteil der Ausgleichsflächen bilden mit lediglich 5,5 % all jene Grün- und Freiflächen, die keinen nennenswerten Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten. Hierzu zählen siedlungsferne Agrarflächen, deren Kaltluftströmung keinen Siedlungsbezug ausweist.

Für den Ausgleichsraum sind die größten Unterschiede im Vergleich zum Ist-Zustand in der nächtlichen Bewertungskarte der Zukunftsszenarien weniger durch das Klimawandelsignal als vielmehr durch die modellbasierte Einarbeitung von Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen zu beobachten (s. Abbildung 57, Abbildung 58). Im Wirkraum verschlechtert sich die Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen hingegen deutlich und durch die Flächenentwicklung bis 2045 erhöht sich zudem die Größe des bebauten Areals von ca. 567 ha auf 598 ha. Diese neuen Wirkraumflächen erhielten im Rahmen der nächtlichen Bewertungskarten der Zukunft nun ebenfalls eine Beurteilung, wobei die Flächen im Szenario „schwacher Klimawandel“ eher in die günstigere bis mittlere Bewertungsklasse und im Szenario „starker Klimawandel“ in die ungünstigen bis sehr ungünstige Bewertungsklasse fallen.

Anders als im Wirkraum haben sich zukünftig im Ausgleichsraum auch einige Bestandsflächen im Vergleich zum Ist-Zustand verändert, da deren Funktionen eng mit der Nähe zum (belasteten) Siedlungsraum verwohen sind. So entsteht nach der Erweiterung des Innovationsparks zwischen diesem und dem Stadtteil Göggingen eine Verschmälerung der hier positionierten Agrarflächen, die in Zukunft als Leitbahnstruktur mit

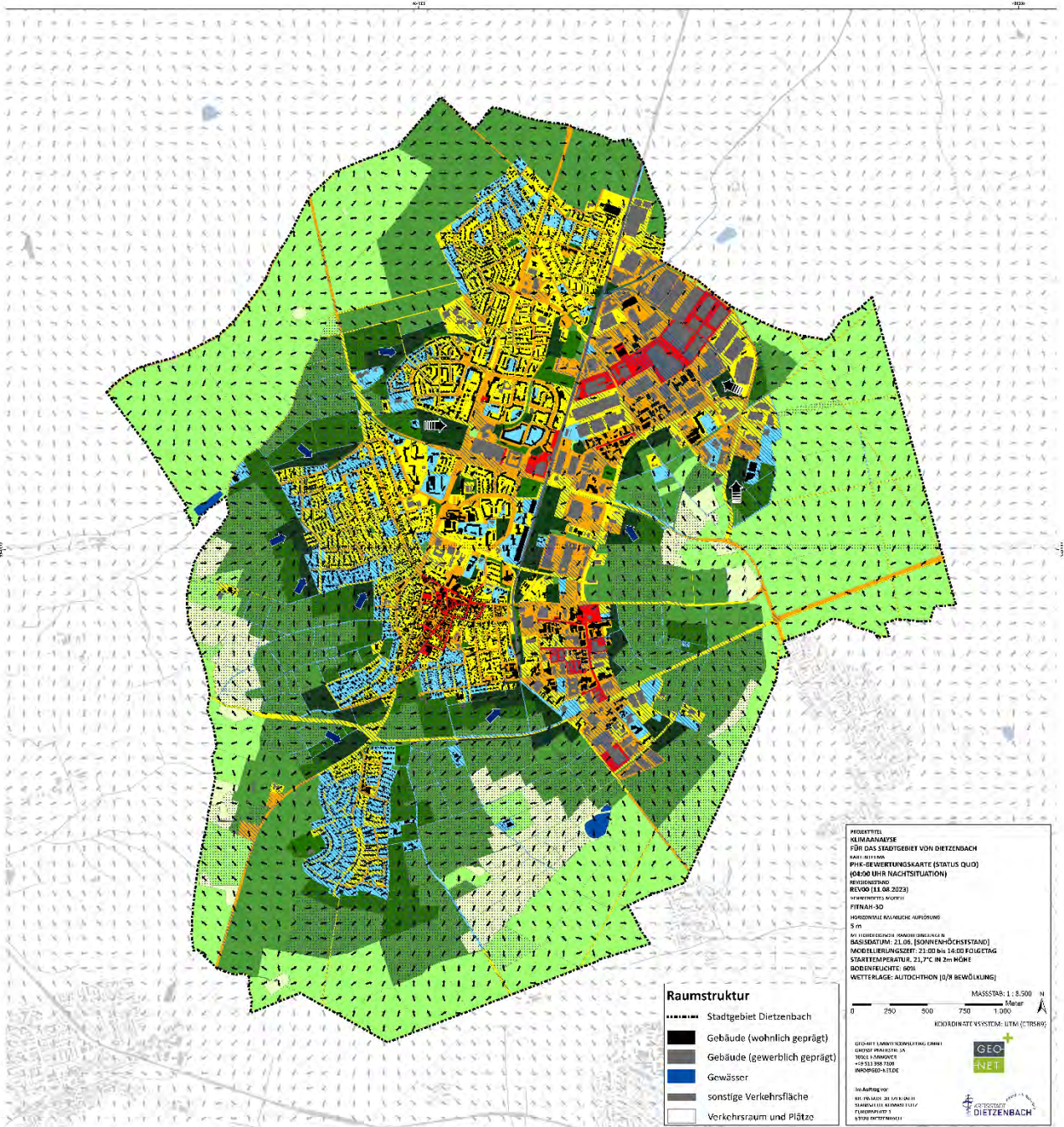


„sehr hoher“ bioklimatischer Bedeutung als besonders erhaltenswert gilt. Auch im Bereich vieler Kaltluftabflüsse, die direkt auf Siedlungsagglomerationen hindeuten und künftig vom Ausgleichs- zum Wirkraum transformiert werden, geschieht eine Bedeutungsaufwertung der luvwärts vorgelagerten Grün- und Freiflächen infolge der Abflussverschiebungen. Hier sind beispielsweise die Ausgleichsflächen rund um die Flächenerweiterungen Haunstetten-West, dem südlichen Inningen oder dem südlichen Göggingen zu nennen, die durch ihre künftig größere Nähe zum Siedlungsraum um 1 bis 2 Klassen aufgewertet werden.

Tabelle 16 zeigt des Weiteren die prozentualen Veränderungen der Bewertungsstufen in Wirk- und Ausgleichsraumflächen im Vergleich von Ist-Zustand zu den Zukunftsszenarien für das gesamte Stadtbild auf.

Tabelle 16: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand und in Zukunftsszenarien.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1	Flächenanteil im Ist-Zustand [%]	Flächenanteil im Zukunftsszenario [%]	Flächenanteil im Zukunftsszenario [%]
Nachtsituation	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	19,4	1,9	0,0
		2= günstig	45,1	23,1	0,4
		3= mittel	29,8	40,8	3,6
		4= ungünstig	5,6	33,7	40,8
		5= sehr ungünstig	0,0	0,5	55,1
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	5,5	9,4	10,6
		4= hoch	9,0	10,5	9,6
		3= mittel	35,7	29,2	28,9
		2= gering	42,7	43,8	43,9
		1= sehr gering	7,1	7,0	6,9
Tagsituation	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	0,1	0,0	0,0
		2= günstig	11,3	5,6	1,1
		3= mittel	30,2	14,8	7,2
		4= ungünstig	54,1	48,7	26,5
		5= sehr ungünstig	4,2	30,9	65,3
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	10,7	9,2	0,0
		2= günstig	15,2	12,4	13,9
		3= mittel	26,6	16,4	10,7
		4= ungünstig	42,6	36,9	23,2
		5= sehr ungünstig	4,9	25,2	52,2
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	1= sehr hoch	61,7	61,1	57,1
		2= hoch	7,8	5,7	6,3
		3= mittel	20,8	11,2	7,3
		4= gering	9,2	12,1	9,7
		5= sehr gering	0,5	9,9	19,7



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- Günstige bioklimatische Situation**
Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freizeitanlagen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entlastungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

AUSGLEICHSPAZIUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung**
Grün- und Freiflächen, die eine zentrale Rolle im städtischen Kaltlufthaushalt spielen und die wichtigsten klimaökologischen Ausgleichsräume darstellen. Bauliche Eingriffe sind gänzlich zu vermeiden bzw. sollten, sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen.
- Hohe humanbioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden werden bzw., sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden.
- Mittlere humanbioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- Geringe humanbioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- Sehr geringe humanbioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

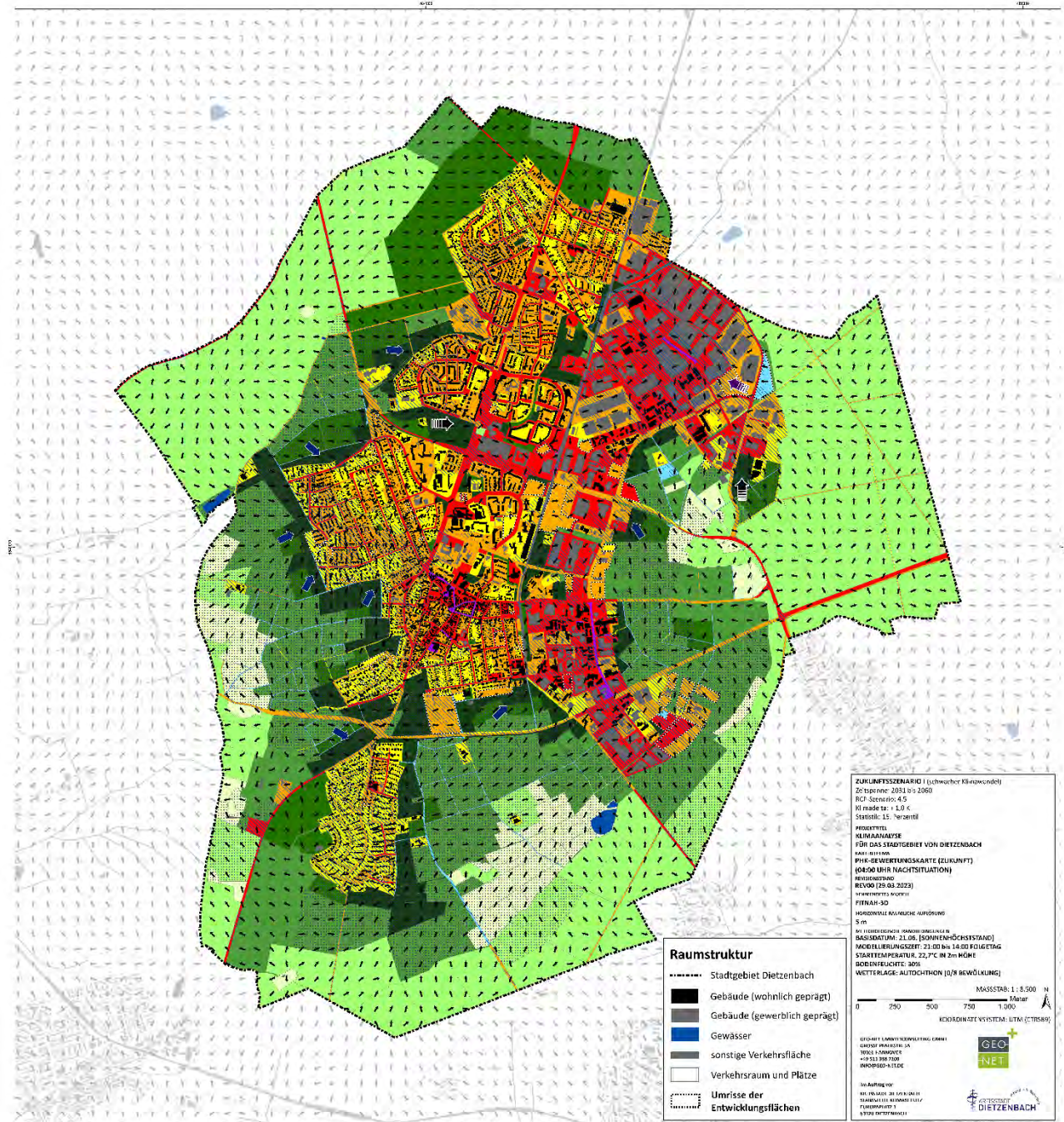
KALTLUFTPROZESSE

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmete Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftabfluss**
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde
- Kaltluftentstehungsgebiet**
- Kaltlufteinwirkungsbereich**

BODENNAHES STRÖMUNGSPELD (UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

- Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Abbildung 56: Bewertungskarte der Nachtsituation im Ist-Zustandes das Dietzenbacher Stadtgebiet.



ZUKUNFTSSZENARIO (schwacher Klimawandel)
 Zeitspanne: 2031 bis 2050
 RCP Szenario: 4.5
 KI max: 1,0 °C
 Statistik: 15. Perzentil

PROJEKTZIEL
 KLIMANALYSE FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH

PHK-BEWERTUNGSKARTE (ZUKUNFT)
 (04:00 UHR NACHTSITUATION)

REVISIONSDATUM
 REV00 (28.03.2023)

STRATEGISCHES KONZEPT
 FÜR DIETZENBACH

HORIZONTALE KLIMATISCHE AUSPRÄGUNG
 5 m

IN ABHÄNGIGKEIT VON VERÄNDERUNGEN IN
 BASISDATUM: 21.06. (SONNENSTANDSSTAND)
MOBILISIERUNGSGRÄDE: 21.03 bis 14.00 KUHEITIG
STARTTEMPERATUR: 22,7°C IN 2m HÖHE
BODENFEUCHTE: 30%
WETTERLAGE: AUFGICHTUNG (0/10 BEWÖLKUNG)

MASSSTAB: 1 : 8.500 N

KOORDINATENSYSTEM: UTM (ETRS89)

GEODÄTISCHES DATUM: ETRS89
PROJEKTION: UTM
PROJEKTIONSEINHEIT: Meter

IN ABHÄNGIGKEIT VON VERÄNDERUNGEN IN
 BASISDATUM: 21.06. (SONNENSTANDSSTAND)
MOBILISIERUNGSGRÄDE: 21.03 bis 14.00 KUHEITIG
STARTTEMPERATUR: 22,7°C IN 2m HÖHE
BODENFEUCHTE: 30%
WETTERLAGE: AUFGICHTUNG (0/10 BEWÖLKUNG)

- Raumstruktur**
- Stadtgebiet Dietzenbach
 - Gebäude (wohnl. geprägt)
 - Gebäude (gewerblich geprägt)
 - Gewässer
 - sonstige Verkehrsfläche
 - Verkehrsraum und Plätze
 - Umrisse der Entwicklungflächen

WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
 Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimakologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- Günstige bioklimatische Situation**
 Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimakologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freizeitanlagen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- Mittlere bioklimatische Situation**
 Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
 Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockimmanöfen).
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
 Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entlastungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockimmanöfen).

AUSGLEICHSRaum: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung**
 Grün- und Freiflächen, die eine zentrale Rolle im nächtlichen Kaltlufthaushalt spielen und die wichtigsten klimakologischen Ausgleichsräume darstellen. Bauliche Eingriffe sind gänzlich zu vermeiden bzw. sollten, sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen.
- Hohe humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimakologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden werden bzw., sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden.
- Mittlere humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimakologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- Geringe humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimakologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- Sehr geringe humanbioklimatische Bedeutung**
 Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

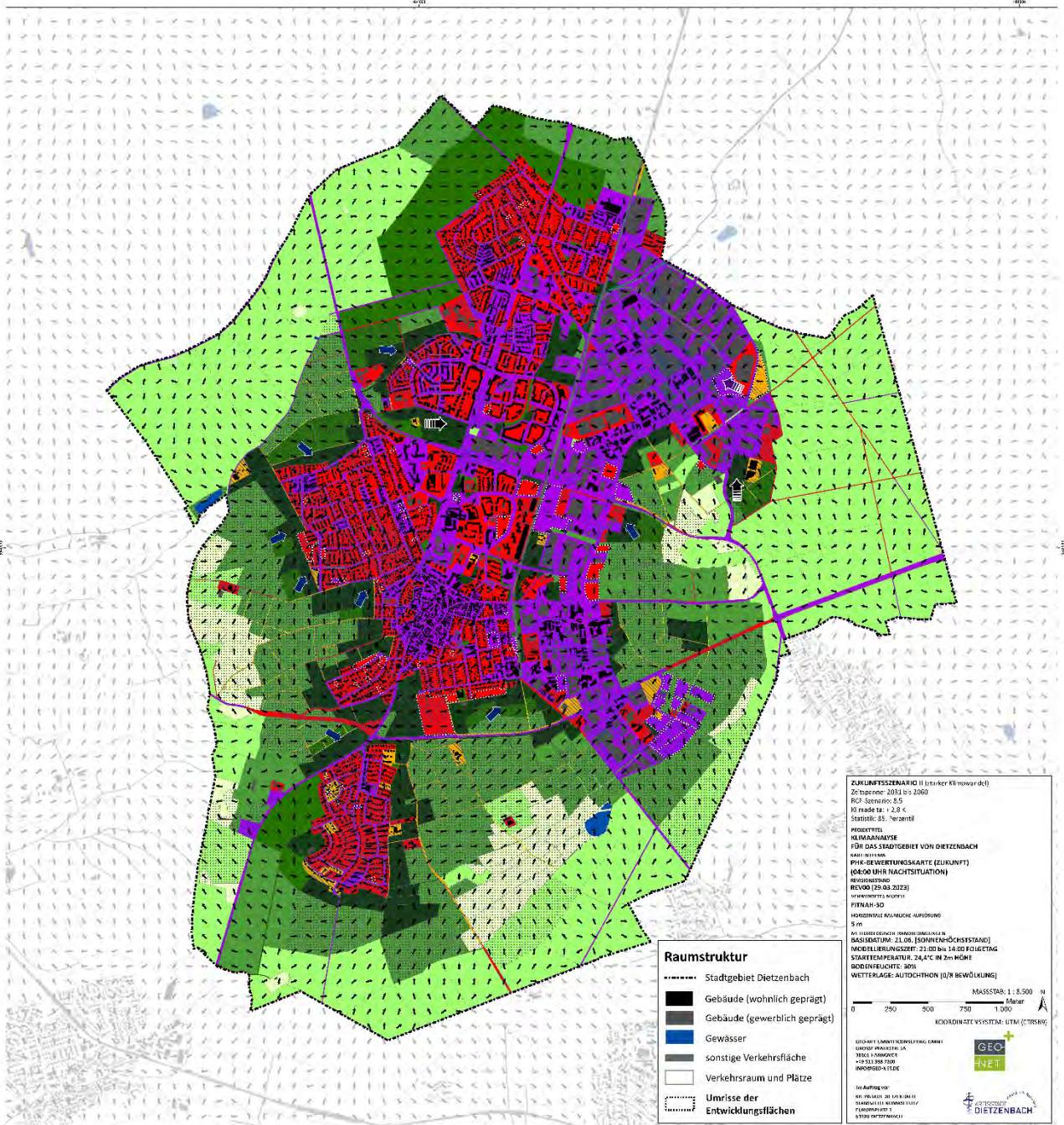
KALTLUFTPROZESSE

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
 linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmete Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftabfluss**
 kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde
- Funktion ggf. eingeschränkt / gefährdet**
- Kaltluftentstehungsgebiet**
- Kaltlufteinwirkungsbereich**

BODENNAHES STRÖMUNGSPELD (UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Abbildung 57: Bewertungskarte der Nachtsituation im Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- **Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
 Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimakologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- **Günstige bioklimatische Situation**
 Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimakologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freizeitanlagen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- **Mittlere bioklimatische Situation**
 Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- **Ungünstige bioklimatische Situation**
 Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Balkonen/Bänken).
- **Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
 Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entwicklungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Balkonen/Bänken).

AUSGLEICHSRaum: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden. Im Einzelfall kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- **Sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung**
 Grün- und Freiflächen, die eine zentrale Rolle im nächtlichen Kaltlufthaushalt spielen und die wichtigsten klimakologischen Ausgleichsräume darstellen. Bauliche Eingriffe sind gänzlich zu vermeiden bzw. sollten, sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen.
- **Hohe humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimakologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden werden bzw., sofern bereits planungsrechtlich zulässig, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Dünnsystemleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen angestrebt werden.
- **Mittlere humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimakologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- **Geringe humanbioklimatische Bedeutung**
 Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimakologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- **Sehr geringe humanbioklimatische Bedeutung**
 Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

KALTLUFTPROZESSE

- ↑ **Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
 linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmete Stadtgebiet transportiert
- ↑ **Kaltluftabfluss**
 kühlte, flächenhaft auftretende Hangabwinde
- ↑ **Funktion ggf. eingeschränkt / gefährdet**
- ↑ **Kaltluftentstehungsgebiet**
- ↑ **Kaltlufteinwirkungsbereich**

BODENNAHES STRÖMUNGSELD (UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

- ↑ **Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s**

Abbildung 58: Bewertungskarte der Nachtsituation im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Dietzenbach, die im Ist-Zustand in Abbildung 59 aufgetragen ist, werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die PET, die vornehmlich durch Verschattung modifiziert wird.

In Dietzenbach sind kaum Wohn- und Gewerbeflächen (0,1 %), jedoch 10,7 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Im Stadtgebiet fehlt es an durchgrüntem Siedlungsteilen, auch die Einzelhausbebauung (z.B. Hexenberg, Westend) zeigen am Tage keine sehr günstigen Bedingungen auf, da zu wenig (großkronige) Bäume vorhanden sind. Am Tage würde ein hoher Grün- und insbesondere Baumanteil durch Schattenwirkung für thermisches Wohlbefinden im Außenraum sorgen. Verkehrsraum mit sehr günstiger thermischer Situation liegt für die Straßen in den umliegenden Waldgebieten vor.

11,3 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Dietzenbach wurden der Kategorie der günstigen humanbioklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Beispielflächen befinden sich an den äußeren und waldnahen Siedlungsbereichen von Hexenberg und Steinberg sowie in den mit großkronigen Bäumen bestandenen Wohngebieten im Spessartviertel. Die Wohnblöcke und Innenhöfe profitieren sowohl von der Beschattung durch Baumpflanzungen als auch durch jene der Gebäudefassade selbst. Bei den Verkehrsflächen weisen 15,2 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf. Der mit vielen Stadtbäumen ausgestattete Theodor-Heuss-Ring ist ein Beispiel hierfür.

Mit 30,2 % ist der zweitgrößte Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch etwa ein Viertel der Verkehrsflächen (26,6 %) heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Ein großer Teil der Flächen im Norden Steinbergs, im Spessartviertel und in Hexenberg sind mit dieser Klassifizierung belegt. Die Wirkraumflächen mit mittlerer Belastung liegen hier bei niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil vor. Durch auf der Wirkraumfläche befindliche Bäume oder erzeugte Verschattung durch hohe Gebäude kann gar mancherorts auf Gewerbearealen eine mittlere Klassifizierung erfolgen.

Mit 54,1 % der Dietzenbacher Wohn- und Gewerbeflächen und 42,6 % der Verkehrsflächen sind am Tage Großteile der Wirkraumflächenkulisse durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen Stadtteile (z.B. Hexenberg, Westend, südliches Steinberg), aber auch Großteile der äußeren Altstadt. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzug in die Modellrechnung Einzug zu erhalten. Bei den großen Industrie- und Gewerbearealen im Osten Dietzenbachs ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören z.B. die Velizystraße, die Paul-Brass-Straße oder der Schulhof der Ernst-



Reuter-Schule in der Altstadt die Landwehrstraße oder Hügelstraße, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen.

Der restliche Teil der Wohn- und Gewerbeflächen (4,2 %) sowie der Verkehrsflächen (4,9 %) fällt in die Klasse der sehr ungünstigen thermischen Situation. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. Wie bereits in der Nacht, zeigt auch die Bewertungskarte des Tages, dass vor allem Gewerbeflächen dieser Kategorie angehören, insbesondere im Gewerbegebiet Mitte und Süd. Auch für einige Wohnquartiere, bspw. am Thomas-Mann-Ring oder an der Barbarossastraße in Steinberg sowie im Zentrum der Altstadt, liegt eine sehr ungünstige Einordnung vor. Vor allem in der Altstadt ist der an hoch belastete Wohnflächen angrenzende Verkehrsraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert – u.a. die Bahnhofstraße oder die Darmstädter fallen in diese Kategorie.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (61,7 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese höchste Bewertungsklasse fallen etwa die Waldareale im entfernteren Umland Dietzenbachs oder die baumbestandenen Bereiche im Stadtpark. Innenstadtnah gibt es keine sehr hoch bewertete Ausgleichsflächen, somit mag es an Rückzugsorte für die Bewohner der belasteten Zentrumsbereiche fehlen.

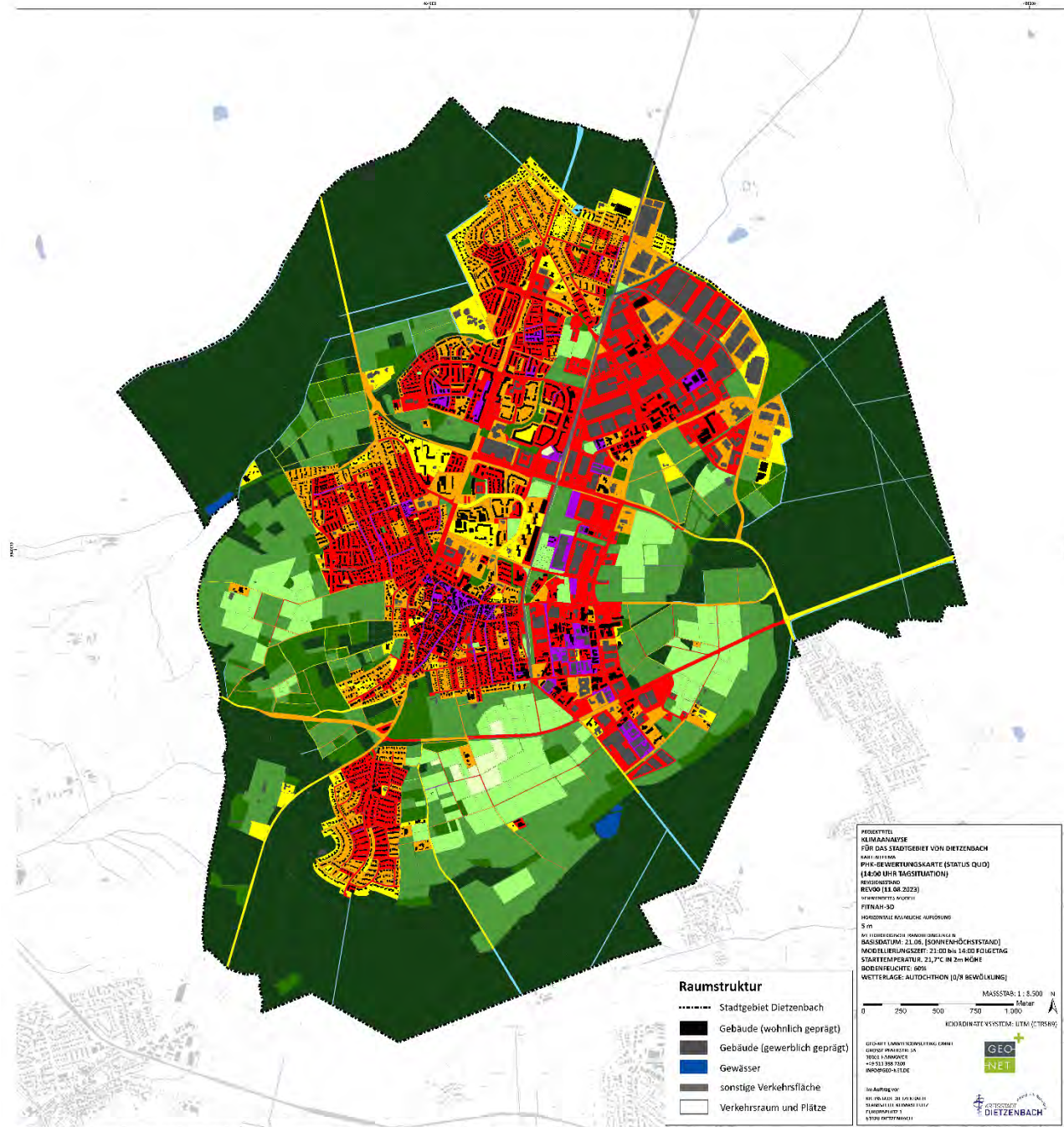
Ein kleinerer Anteil (7,8 %) der Ausgleichsflächen ist einer hohen Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in Waldrandbereichen zu finden, die über einen lichtereren Baumbestand verfügen, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch im Siedlungsraum sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. der Friedhof Dietzenbach, im Stadtpark oder entlang der Bieber) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (20,8 % der Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit geringer (9,2 %) oder sehr geringer (0,5 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung meist unbeschattete Ackerflächen ausmachen.

Die Bewertungskarte des Tages in den Zukunftsszenarien ist in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal eine deutliche Auswirkung auf die Klassifizierung hat. Der Anteil an Flächen mit einer sehr geringen Aufenthaltsqualität nimmt zu, da sich insbesondere die landwirtschaftlichen Flächen im Ausgleichsraum noch stärker aufheizen. Die vorhandenen Wälder verlieren auch in Zukunft größtenteils nicht an Aufenthaltsqualität. Da am Tage die Priorität auf Verschattung liegt, diese Effekte aber anders als das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen nicht überörtlich, sondern lokal stattfinden, ist die Bewertung einzelner Ausgleichsräume nur von ihrer eigenen Umgestaltung abhängig, nicht jedoch von der Entwicklung benachbarter Flächen.



Auch im Wirkraum sind zukünftig, u.a. von der Entwicklung auf der jeweiligen Fläche abhängige, Änderungen der Klassifikation festzustellen (s. Tabelle 16). Viele der neu hinzugefügten, durch den Mischpixelansatz approximierten und teils großflächigen Entwicklungsflächen sind zukünftig in der Wirkraumkategorie der (sehr) ungünstigen Aufenthaltsqualität am Tage eingeordnet, meist ähnlich der Bewertung der benachbarten Bebauung. Dies hat zur Folge, dass der Anteil an Wohn- und Gewerbeflächen mit einer „sehr ungünstigen humanbioklimatischen Situation“ um 27 % (RCP 4.5) bzw. um 61 % (RCP 8.5) im Vergleich zum Status quo zu-
stimmt. Der prozentuale Anteil an Flächen in den übrigen Klassen nimmt in den Zukunftsszenarien hingegen ab, zudem findet eine Verschiebung der Flächenbewertung hin zur negativeren Klasse statt.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein. Die Planungshinweise gelten nicht für Autobahnen und Bundesfernstraßen.

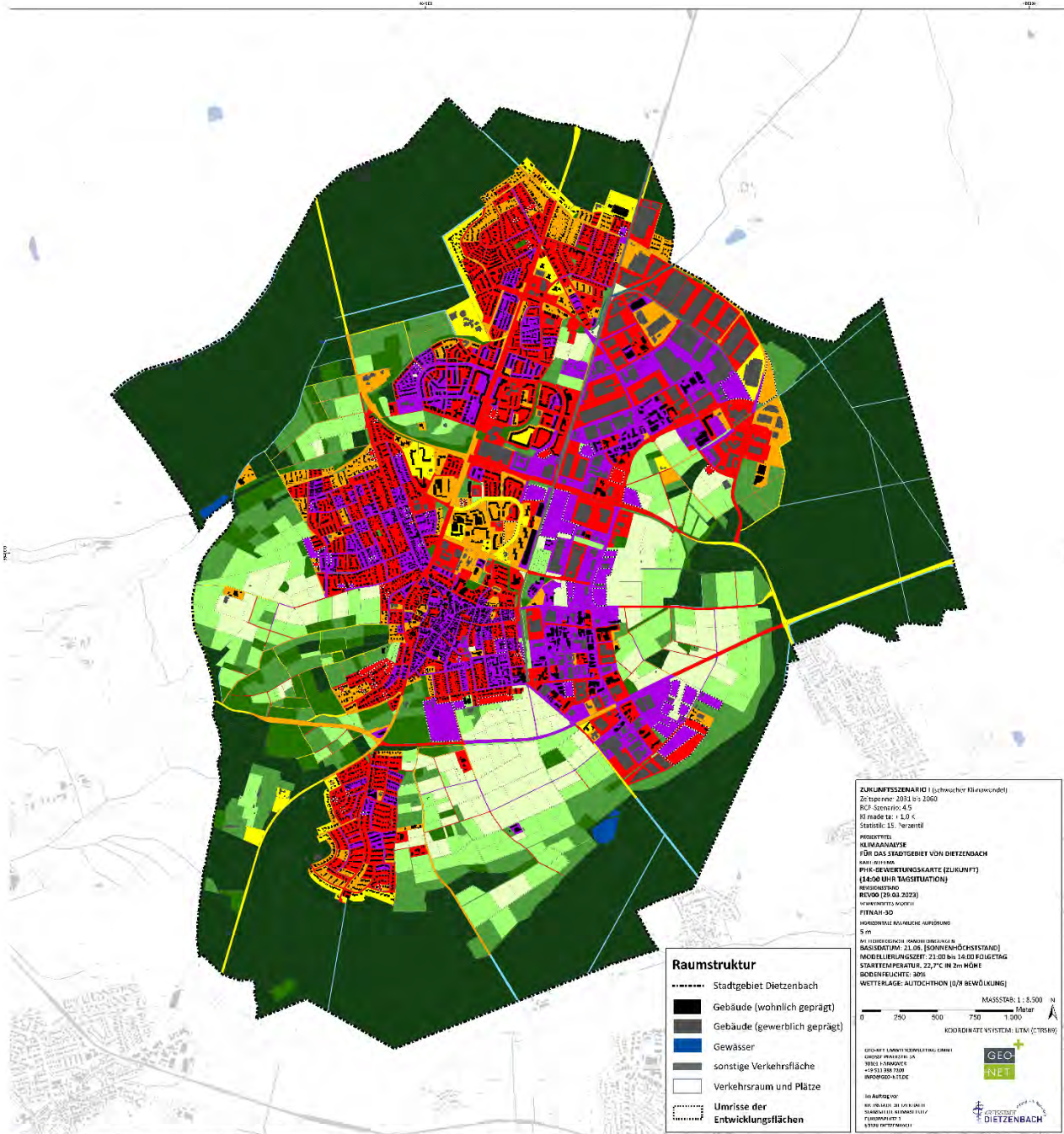
- Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Günstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht zwingend erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten hübläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzliche Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten hübläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzliche Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten hübläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

AUSGLEICHSRAUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem sehr günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer sehr hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung). Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung und evtl. zu entwickeln). Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Mittlere Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem mittleren Humanbioklima und dementsprechend einer mittleren Aufenthaltsqualität, bei denen der humanbioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten, zu schützen (ggf. Bewässerung) und auszubauen.
- Geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem Defizit an Verschattung (geringe Aufenthaltsqualität). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikroklimafakt.).
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung und damit schlechter Aufenthaltsqualität (vorwiegend Rasen bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Im siedlungsnahen Raum sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikroklimafakt.).

Abbildung 59: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustandes für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein. Die Planungshinweise gelten nicht für Autobahnen und Bundesfernstraßen.

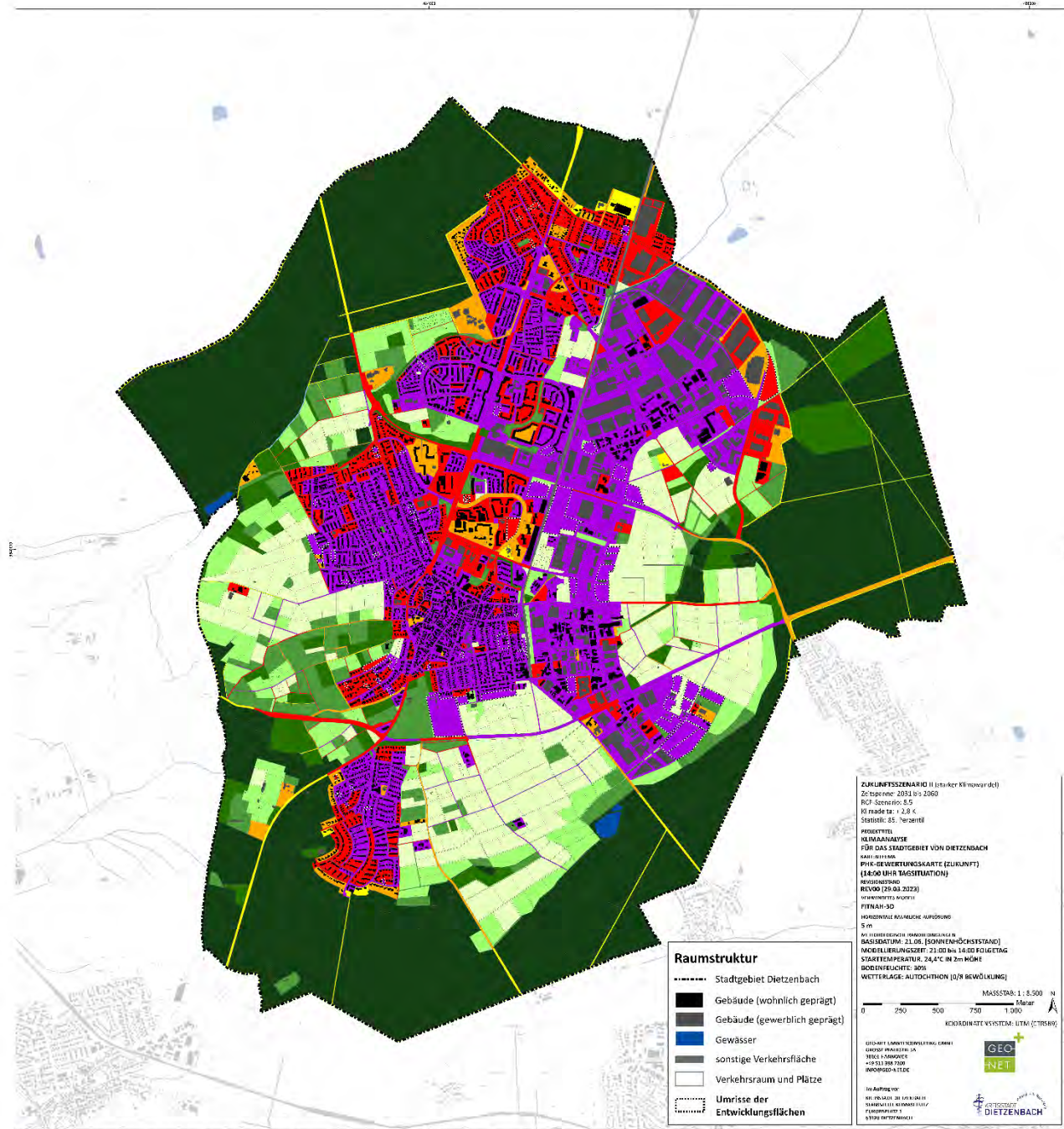
- Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Günstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht zwingend erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten hübläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzliche Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten hübläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzliche Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten hübläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

AUSGLEICHSRAUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem sehr günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer sehr hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung). Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung). Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Mittlere Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem mittleren Humanbioklima und dementsprechend einer mittleren Aufenthaltsqualität, bei denen der humanbioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten, zu schützen (ggf. Bewässerung) und auszubauen.
- Geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem Defizit an Verschattung (geringe Aufenthaltsqualität). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikrovielfalt).
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung und damit schlechter Aufenthaltsqualität (vorwiegend Rasen bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Im siedlungsnahen Raum sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikrovielfalt).

Abbildung 60: Bewertungskarte der Tagsituation im Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein. Die Planungshinweise gelten nicht für Autobahnen und Bundesfernstraßen.

- Sehr günstige humanbioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Günstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht zwingend erforderlich, sollten bei wichtigen Fußwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Das günstige Humanbioklima ist zu sichern.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzliche Begrünung (z.B. Pocket Parks), Verschattung und Entseelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

AUSGLEICHSRAUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation in Wohn- und Mischgebieten sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken. Bei einer baulichen Entwicklung bzw. Nachverdichtung kann ein separates Gutachten erforderlich sein.

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem sehr günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer sehr hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) und evtl. zu entwickeln. Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Hohe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem günstigen Humanbioklima und dementsprechend einer hohen Aufenthaltsqualität. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) und evtl. zu entwickeln. Eine gute Erreichbarkeit ist zu gewährleisten und ggf. über eine Grünvernetzung auszubauen.
- Mittlere Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem mittleren Humanbioklima und dementsprechend einer mittleren Aufenthaltsqualität, bei denen der humanbioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten, zu schützen (ggf. Bewässerung) und auszubauen.
- Geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit einem Defizit an Verschattung (geringe Aufenthaltsqualität). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikrovielfalt).
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität**
Ausgleichsräume mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung und damit schlechter Aufenthaltsqualität (vorwiegend flache bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Im siedlungsnahen Raum sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln und auszubauen (Erhöhung der Mikrovielfalt).

Abbildung 61: Bewertungskarte der Tagsituation im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



8.4 SENSITIVITÄTSANALYSE

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

8.4.1 DATENGRUNDLAGE

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

Hochaltrige: Personen im Alter ab 75 Jahren wurden in dieser Untersuchung als „Hochaltrige“ bezeichnet und gehören zu einer gegenüber Hitze vulnerablen Gruppe. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multimorbidität sowie Multimedikation und eine herabgesetzte Fähigkeit zur physiologischen Anpassung an Hitze (HLNUG 2019, Becker et al. 2019).

Senioren: Personen im Alter von 65 bis 75 Jahren wurden aufgrund ihrer Einstufung als „ältere“ Bevölkerung ebenfalls als potenziell vulnerabel betrachtet und als „Senioren“ bezeichnet. Ältere Menschen sind unter Umständen weniger mobil und besitzen eine geringere physiologische Anpassungsfähigkeit gegenüber Hitze (geringere Abgabe der Körperwärme, fehlende Wahrnehmung der Hitze, schnellere Dehydration) (BMG 2021).

Kleinkinder: Kinder bis einschließlich 5 Jahren wurden als „Kleinkinder“ definiert. Im Vergleich zu Erwachsenen besteht bei Kleinkindern eine geringere Thermoregulation, der Körper produziert weniger kühlenden Schweiß, gleichzeitig bietet die Körperoberfläche eine größere relative Absorptionsfläche für Wärmestrahlung. Weiterhin liegt bei Kleinkindern ein höherer Flüssigkeitsanteil im Körper vor und die relative Verdunstung ist aufgrund der größeren Körperoberfläche in Bezug zum Körpervolumen ebenfalls höher als bei Erwachsenen. Bei Hitze sind sie daher einem größeren Risiko ausgesetzt, eine Exsikkose (Austrocknung des Körpers) als Folge einer Dehydration zu erleiden (HLNUG 2019).

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung Dietzenbachs in einer Karte. Die demographischen Daten lagen mit hoher Genauigkeit vor und wurden auf die Ebene von „Baublöcken“, die aus zumeist mehreren Wohngebäuden bestehen, zusammengefasst. Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Einwohnerdichte und -anzahl pro Baublock im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet.



Analyse sensibler Orte / Einrichtungen

Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. In Dietzenbach wurden Kinderspielflächen, Kindertagesstätten, Grundschulen, Seniorenzentren sowie die Volkshochschulen, Bildungshäuser und Bibliotheken erfasst. Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zuteilwerden, um den Aufenthalt von hitzesensibler Bevölkerung im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend zu gestalten.

Analyse der Bevölkerungsanzahl /-dichte

Gebiete (*hier*: Baublöcke) mit einer hohen absoluten Anzahl an Einwohnern (*nf. kurz* Einw.) oder einer hohen relativen Anzahl an Einwohnern auf geringem Raum (= hohe Einwohnerdichte) wurden ebenfalls zur Identifikation sensibler Bereiche herangezogen. Eine hohe Einwohnerzahl wurde festgelegt ab 100 Einw. / Hektar pro Baublock und eine hohe Einwohnerdichte ab 200 Einw. / Hektar pro Baublock. Enger Wohnraum kann als eine relevante Benachteiligung betrachtet werden. Gegenüber einer Einfamilienhaussiedlung steht weniger Fläche pro Person für Wohnraum oder für Ausweichmöglichkeiten im Freien zur Verfügung. Zudem geht eine hohe Einwohnerdichte häufig auch mit einer hohen Bebauungsdichte einher, welche die Hitzebelastung im Straßenraum zusätzlich fördert.

8.4.2 METHODIK

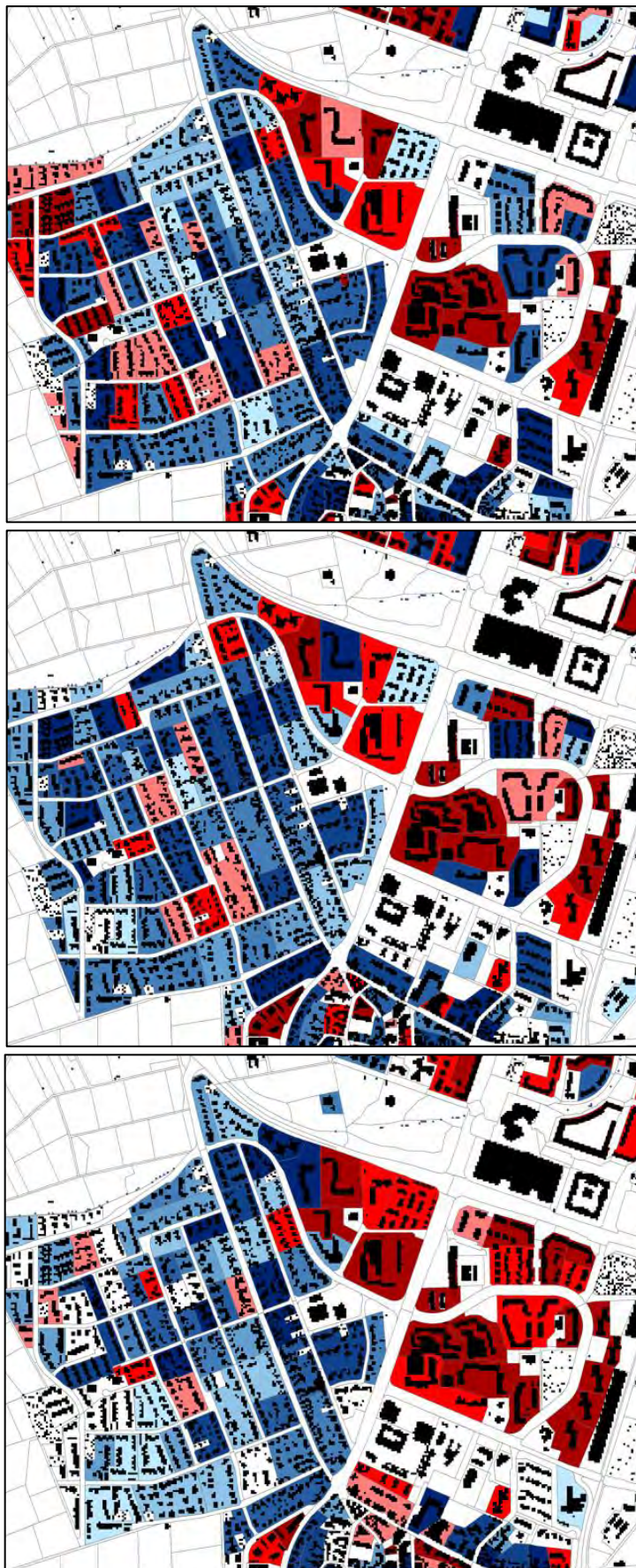
Zur Ermittlung der Sensitivität eines Gebietes wurden Klassengrenzen definiert, welche sich aus den vorhandenen demographischen Daten ableiten. Dafür wurde die Verteilung eines jeden Indikators (Hochaltrige, Senioren, Kleinkinder) berechnet und in Dezile eingeteilt. Der erste Schritt bestand aus der Berechnung der Dichte der jeweiligen vulnerablen Bevölkerungsgruppe in Einwohner pro Hektar pro Baublock. Als nächstes wurden die einzelnen Einwohnerdichten in je zehn Dezile eingeteilt¹⁸, wodurch sich jeweils 10 Prozent der betrachteten Raumeinheit miteinander vergleichen lassen.

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

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

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in den nachfolgenden Abbildung 62 für jede vulnerable Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Ausschnittes des Dietzenbacher Stadtgebiets dargestellt.

¹⁸ Dezil-Bildung: Die Einzelwerte eines Indikators werden der Größe nach sortiert und in zehn gleichstark besetzt Gruppen eingeteilt.



Verteilung der Dichte vulnerabler Bevölkerungsgruppen

Einteilung in Dezile

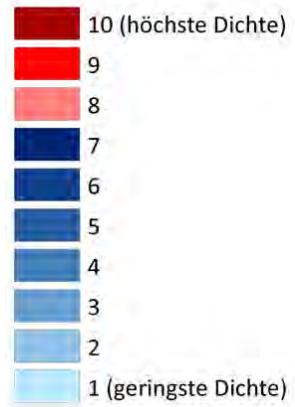


Abbildung 62: Konzentration der Sensitivität von Hochaltrigen (oben), Senioren (Mitte) und Kleinkindern (unten) in einem Ausschnitt des Dietzenbacher Stadtgebiets.



8.4.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

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

Zur Identifizierung sensibler Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der folgenden Tabelle 17 zu entnehmen ist.

Die Gefährdung der Hochaltrigen und Senioren wurde bei der Ausweisung sensibler Gebiete stärker gewichtet als die Kinderdichte, da eine auf Deutschland übertragbare, wissenschaftliche Evidenz für die Vulnerabilität von älteren Menschen gegenüber Hitze vorliegt (HLNUG 2019, Becker et al. 2019) wohingegen die Kinder- und Armutsdichte nicht auf eindeutiger Evidenz beruht (HLNUG 2019).

Tabelle 17: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung.

Klasse	Indikatoren
Extrem sensitives Gebiet	Hochaltrigendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 10
Sehr hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 8 bis 10
Hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 oder Kinderdichte Dezil 10
Sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend, aber hohe Einwohneranzahl /-dichte* oder 1 sensibler Ort
wenig sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend

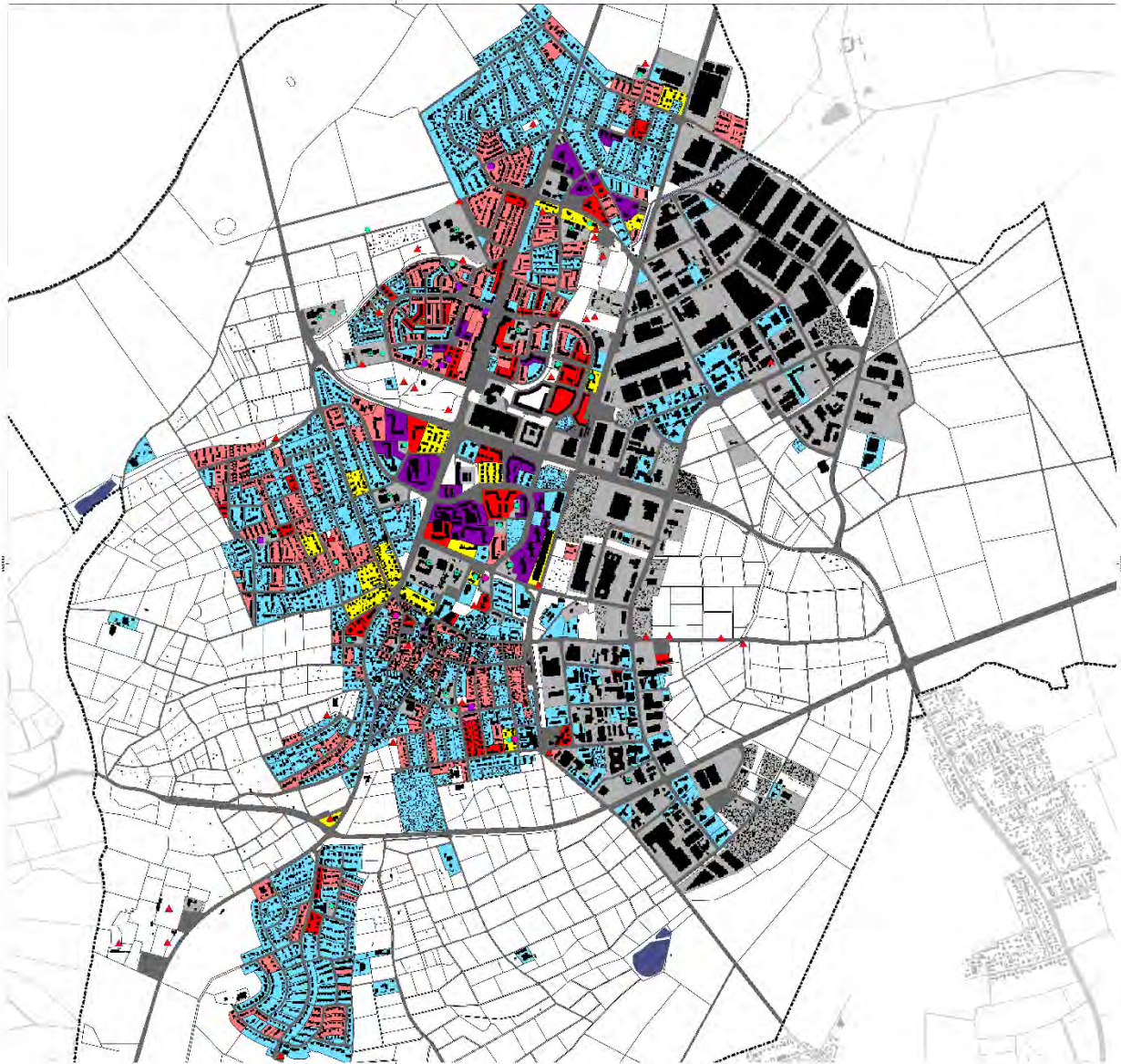
* hohe Einwohneranzahl = ab 100 Einwohner pro Wohnblock; hohe Einwohnerdichte = ab 200 EWO / Hektar und mind. 25 Einwohner

Die Sensitivitätsanalysekarte (s. Abbildung 63) zeigt die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen auf Wohnblockebene. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Dietzenbacher Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

In der „Planungshinweiskarte Stadtklima“ (s. Kapitel 8.5) wird die Sensitivität der Bevölkerung mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Dietzenbach verschnitten, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können.



Sensitivitätsanalyse Dietzenbach: Vulnerable Bevölkerungsgruppen



Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Dietzenbacher Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

Zur Bestimmung der Sensitivität wird in Anlehnung an das KLIMPRAX Stadtklima-Projekt* die räumliche Verteilung hitzeempfindlicher Bevölkerungsgruppen in Dietzenbach betrachtet. So gelten bspw. Kleinkinder und hochaltrige Menschen in Hitzeperioden als körperlich stärker gefährdet im Vergleich zu anderen Altersgruppen. Zudem weisen sie eine geringere Anpassungsfähigkeit auf (z.B. weil sie weniger mobil sind), was auch für ökonomisch und sozial benachteiligte Personen gilt (eingeschränkte finanzielle Mittel zur Anpassung).

In der "Planungshinweiskarte Stadtklima" wird die Sensitivität der Bevölkerung mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Dietzenbach verschrieben, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können.

Altersbezogene Sensitivität der Bevölkerung auf räumlicher Ebene von Baublöcken

Indikator: Dichte hitzesensibler Bevölkerungsgruppen**

- extrem sensitives Gebiet
- sehr hoch sensitives Gebiet
- hoch sensitives Gebiet
- sensitives Gebiet
- weniger sensitives Gebiet

Orte sensibler Nutzung

- Volkshochschule / Stadtbibliothek / Bildungshaus
- ▲ Spiel-/ Sportplätze
- Seniorenzentren
- Schule
- KITA

Sonstiges

- Stadtgebiet Dietzenbach
- Gewässer
- Gebäude
- Verkehrsflächen
- Gewerbe-/ Industriegebiete

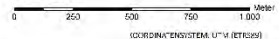
MAP 011111
KLIMAAANALYSE
FÜR DAS STADTGEBIET VON DIETZENBACH
KREISHAUPTMANN
SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

REVID-DATUM:
REV 00 (11.08.2023)

*HLNUG 2019: KLIMPRAX Stadtklima.
Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung
in Hessen - Hitze und Gesundheit -

** Bewertungsgrundlage
Hitzesensible Bevölkerungsgruppen auf Wohnblockebene:
- Hochaltrige (ab 75 Jahren)
- Senior*innen (ab 65 Jahren)
- Kleinkinder (unter 6 Jahren)

MAßSTAB: 1:6.000



VORORDNUNGSSYSTEM: UTM (ETRS89)

2023 MIT UNTERSTÜTZUNG DURCH
GROßE FIRMLICHEN SA
ZUSAMMENARBEITUNG
48313 000 730
00000000 NETZE



In Auftrag von
KREISSTADT DIETZENBACH
LEBENSQUALITÄT
KIMASCHUTZ
KIMAPLANUNG
KIMASCHUTZ



Abbildung 63: Sensitivitätsanalysekarte des Dietzenbacher Stadtgebiets.



8.4.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

In den extrem bzw. (sehr) hoch sensitiven Gebieten wird empfohlen, Maßnahmen zur Anpassung an Hitzeextreme vorzunehmen, da dort gehäuft Menschen mit besonderem Schutzbedarf in Bezug auf Hitzeminderung leben.

Der Leitfaden zur Klimaanpassung (HLNUG 2019) gibt zum Schutz von Hochaltrigen folgende Empfehlungen vor: „Zur Vermeidung von Übersterblichkeit ist der präventive Aufbau von geeigneten Unterstützungsstrukturen für ältere, alleinlebende Menschen im Stadtteil im Rahmen der kommunalen Gesundheitsförderung anzustreben. Während Hitzeextremen wird empfohlen, kühle Orte bereit zu stellen, an denen sich hochalt-rige Menschen aufhalten können.“ (HLNUG 2019, S, 108).

In sensitiven Gebieten werden folgende Empfehlungen für Kinder unter 5 Jahren vorgeschlagen: „Insbesondere dann, wenn die betroffenen Gebiete zugleich eher bildungsbenachteiligte Gebiete sein könnten, sollten Strategien zur Information von Eltern über geeignete Multiplikatoren entwickelt werden. Die Bauten von Kindertagesstätten und Schulen in öffentlicher Trägerschaft sollten auf ihr thermisches Verhalten hin überprüft und ggf. saniert werden. Empfehlungen zum Aufenthalt im Freien während Hitzeextremen sollten gegeben werden. Familienhebammen, Kinderärzte, Erzieher und Lehrkräfte sind potenzielle Multiplikatoren für Präventionsstrategien.“ (HLNUG 2019, S. 108).

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



8.5 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der sechs Bewertungskarten „Ist-Zustand Nacht“, „Ist-Zustand Tag“, „Zukunftsszenario I Nacht“, „Zukunftsszenario II Nacht“, „Zukunftsszenario I Tag“ und „Zukunftsszenario II Tag“ (s. Kapitel 8.3) sowie die Inhalte der Sensitivitätsanalysekarte (s. Kapitel 8.4) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen einen hohen Schutzbedarf innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine Handlungspriorität vorherrscht. Die zugrunde gelegte Flächenkulisse ist die der Zukunftssituation.

8.5.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird die **stadtklimatische Handlungspriorität** dargestellt. Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Diese Bewertungsunterschiede wurden aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht (zuerst für den Ist-Zustand) extrahiert und jeweils im Rahmen zweier Bewertungsmatrizen für den Wohn- und den Gewerberaum gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status Quo (s. Abbildung 64). Ein identisches Durchlaufen dieser Wirkraummatrizen der Bewertungskarten des Szenarios 2045 lieferte im Anschluss eine gesamthafte Tag-Nacht-Bewertungsklassifizierung 1-5 für die zukünftige Situation.

Wohnsiedlung: Wirkraum = 1 und Gewerbe = 0					
Wohnsiedlungen	Bewertung Nacht				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	3	4
2	1	2	3	4	4
3	2	2	3	4	5
4	2	3	3	4	5
5	3	3	4	5	5

Belastung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste

Gewerbe: Wirkraum = 1 und Gewerbe = 1					
Belastung am Tag	Bewertung Nacht				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	2
2	2	2	2	2	3
3	3	3	3	3	4
4	4	4	4	4	5
5	4	4	5	5	5

Abbildung 64: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohnraum sowie Gewerbe- und Straßenraum.



Je nachdem, ob bereits heutzutage oder erst in Zukunft eine für die Tag-Nacht-Kombination ermittelte Wirkraumbelastung vorherrscht, wurden Handlungsprioritäten vergeben (s. Tabelle 18).

Tabelle 18: Aus Bewertungskarten abgeleitete Handlungsprioritäten für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus den Matrizen Wohnen und Gewerbe (mit Straßenraum) (Bewertungskarten)	Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum
5 = sehr ungünstig (Ist-Zustand)	1
5 = sehr ungünstig (Zukunft I)	2
5 = sehr ungünstig (Zukunft II)	3
4= ungünstig (Ist-Zustand oder Zukunft I oder Zukunft II)	4
Restliche Bewertung (Ist-Zustand, Zukünfte)	keine

Zusätzlich sind für den Wirkraum die in der Sensitivitätsanalysekarte abgebildeten Informationen (vgl. Kapitel 8.4) überlagert worden. Über Schraffuren erfolgt eine Kennzeichnung von Baublöcken, die ein extrem oder sehr hoch sensitives bzw. ein (hoch) sensitives Gebiet darstellen. Diese Gebiete weisen einen entsprechend hohen Anteil an vulnerabler Wohnbevölkerung auf, sodass kenntlich wird, wo sich thermische Belastungsräume mit hohen Bevölkerungsdichten überschneiden (s. Abbildung 65).

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze



-  Extrem oder sehr hoch sensitives Gebiet auf Baublockebene
-  Hoch sensitives oder sensitives Gebiet auf Baublockebene

Abbildung 65: PHK-Legende mit Signaturen zur Kennzeichnung der Gebiete mit sensitiven Bevölkerungsanteilen anhand der Bevölkerungsdichte.

Sind mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkbereiche ausgewiesen, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Kaltluftfunktion“ gekennzeichnet (s. Abbildung 66). Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als „Trittsteine“ für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.

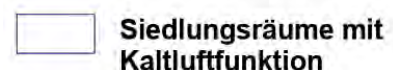


Abbildung 66: PHK-Symbologie für Siedlungsräume mit Kaltluftfunktion.

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den **stadtklimatischen Schutzbedarf** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltfluthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum, wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt (s. Abbildung 67).



Schritt 2		Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5
Aufenthalts- qualität Tag - kein Ausgleichsraum	5	1	2	3	4	5
	4	1	2	3	4	5
	3	2	2	3	4	5
	2	3	3	4	4	5
	1	4	4	5	5	5

Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste

Abbildung 67: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Die aus der Gegenüberstellung der Bewertung von Ausgleichsflächen am Tage und in der Nacht resultierenden Schutzbedarfe und Planungshinweise sind in Tabelle 19 aufgeführt. In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.

Tabelle 19: Aus Bewertungskarten abgeleitete Schutzbedarfe für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsaumbewertung aus der Matrix Grünflächen (Bewertungskarten)	Schutzbedarf in der PHK im Ausgleichsraum
5= sehr hoch (Ist-Zustand)	Sehr hoch
5= sehr hoch (Zukunft I oder Zukunft II)	
4= hoch (Ist-Zustand)	Hoch
4= hoch (Zukunft I oder Zukunft II)	
3= mittel (Ist-Zustand)	Erhöht
3= mittel (Zukunft I oder Zukunft II)	
2= gering oder 1= sehr gering (Ist-Zustand oder Zukünfte)	Keiner

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte der Zukunft übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen und -abflüssen sowie Dietzenbacher Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden, Gleisflächen und Schnellstraßen im Außenraum sowie den zukünftig erschlossenen Entwicklungsflächen.



8.5.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Dietzenbach, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 68 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Schutzbedarfen und Handlungsprioritäten aus.

Die **Handlungsprioritäten des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird (s. Tabelle 20).

Tabelle 20: Flächenanteile der Handlungsprioritäten im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
1	4,2	Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation sind bei allen Vorhaben dringend umzusetzen. Möglichkeiten der (klimagerechten) Gebäudekühlung sind zu prüfen.
2	14,8	
3	53,7	Bei allen baulichen Entwicklungen, auch bspw. im Zuge von Straßensanierungen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, hohe Aufenthaltsqualität schaffen).
4	20,7	
Keine vorrangige Handlungspriorität	6,6	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen oder im Zuge von Straßensanierungen sind Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation zu prüfen.

Die Tabelle 20 zeigt zudem die Flächenanteile der verschiedenen Handlungsprioritäten auf. Mit 19 % sind die beiden höchsten Handlungsprioritäten zuvorderst im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerberaum zu finden. Darunter auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Bereichen der Altstadt sind solch hohe Handlungsprioritäten verzeichnet. Besonders kritisch und prioritär sind hierbei diejenigen Flächen zu betrachten, die zusätzlich Bereiche hoher **Bevölkerungsdichte** beinhalten und darüber hinaus vornehmlich **vulnerable Bevölkerungsgruppen** beherbergen. Die mittleren Handlungsprioritäten 3 und 4 machen mit insgesamt 74,4 % der Wirkraumflächen den größten Teil des Wirkraumes aus. Zu den „optimierenden Maßnahmen“ zählen je nach Vorhaben bspw. das Freihalten von Durchlüftungsachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Bäume, Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen und damit die Schaffung zugänglicher kühler Orte. Eine Auswahl der wichtigsten Maßnahmen verschiedener Funktionsziele ist in Kapitel 8.6 zusammengefasst. Die im Zukunftsszenario hinzugefügten Entwicklungsflächen sind der Handlungspriorität 2 bis 4 zugeordnet. Durch eine geeignete Klimaanpassung in den betrachteten Zukunftsquartieren könnte es im besten Fall gelingen, in den Bereich „keiner vorrangigen Handlungspriorität“ vorzudringen, deren Flächenkulisse in der vorliegenden Analyse 6,6 % ausmacht.

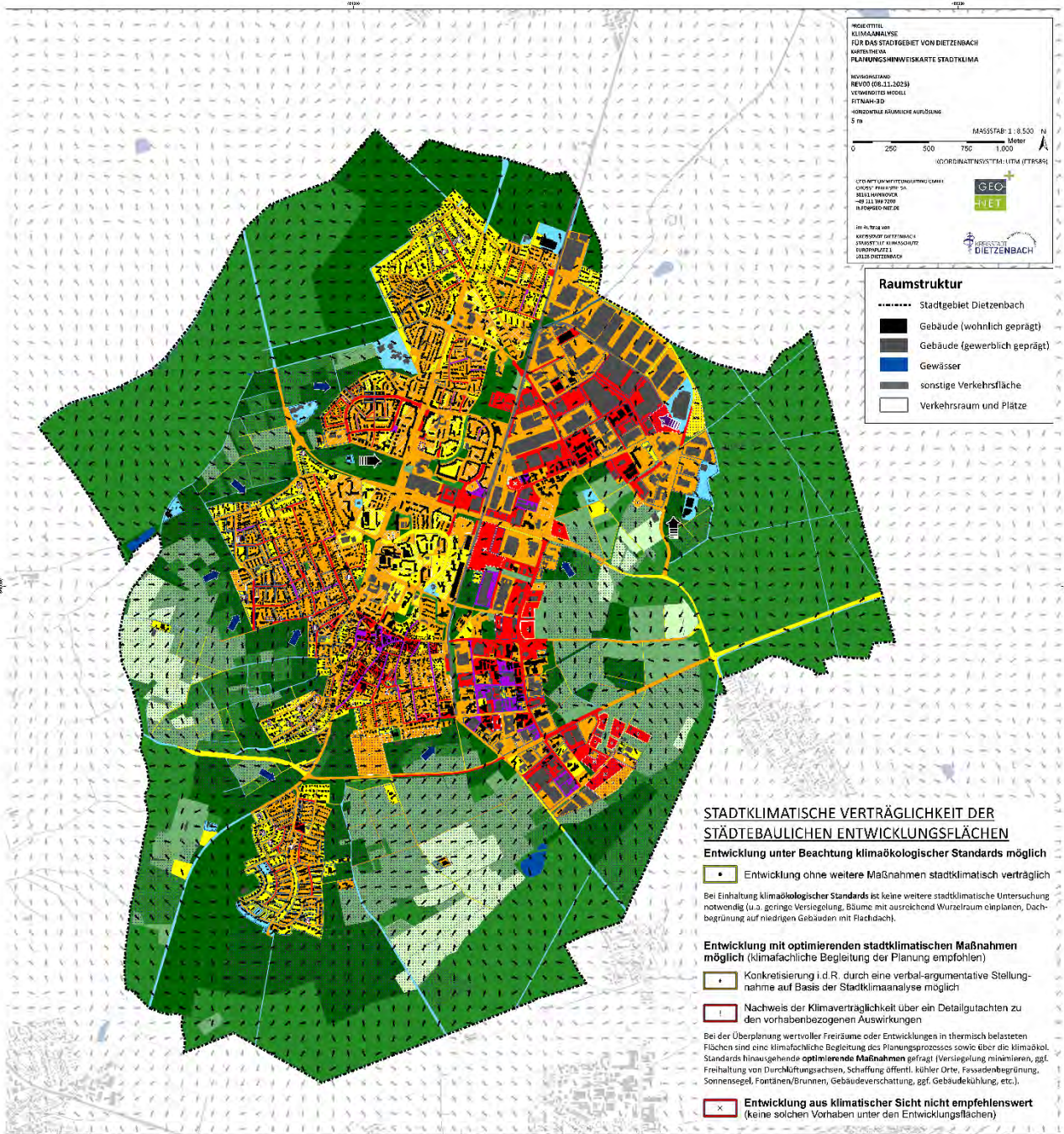
Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an heißen Tagen darstellen, sind in der PHK durch entsprechende **Schutzbedarfe im Ausgleichsraum** ausgewiesen. Tabelle 21 stellt den Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Schutzbedarfsklasse.



Mit einem Anteil 28,0 % ist der Ausgleichsraum im Dietzenbacher besonders schutzbedürftig. Hierzu zählen Waldbereiche mit erhöhter Kaltluftströmung, aber auch der Stadtpark und siedlungsnahe Kaltluftgebiete. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils sehr hohen Schutzbedarfen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, an dem die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Fortbestand in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen stets modellhaft nachzuweisen. Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse des hohen Schutzbedarfs, die den Großteil aller Ausgleichsflächen betrifft (49,5 %), ist zu achten und durch eine verbalargumentative oder modellhafte Untersuchung eine Klimaoptimierung des Planvorhabens zu erreichen. 16,7 % der Grün- und Freiflächen weisen noch immer einen erhöhten Schutzbedarf auf. Hierzu zählt z.B. der Großteil der westlich, östlich und südlich der Kernstadt anliegenden Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten.

Tabelle 21: Flächenanteile der Schutzbedarfe im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Schutzbedarf in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
Sehr hoch	28,0	Bei geplanten Entwicklungen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) modellhaft nachzuweisen.
Hoch	49,5	Auf den Erhalt der klimatischen Funktion ist zu achten. Je nach Vorhabengröße kann dies über eine qualitative Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung zur Optimierung der Planung erfolgen.
Erhöht	16,7	Auf den Erhalt der klimatischen Funktion ist zu achten. Für größere Vorhaben (z.B. Gewerbepark, Hochhaus) sollte eine qualitative Stellungnahme zur Optimierung der Planung erfolgen.
Keiner	5,8	Die Flächen weisen aktuell für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf.



AUSGLEICHSRaum: GRÜN- / FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Stadtklimatischer Schutzbedarf

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

- Sehr hoher Schutzbedarf** (28,0 % Flächenanteil)
Bei geplanten Entwicklungen ist der Erhalt der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) modellhaft nachzuweisen.
- Hoher Schutzbedarf** (49,5 % Flächenanteil)
Auf den Erhalt der klimatischen Funktion ist zu achten. Je nach Vorhabengröße kann dies über eine qualitative Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung zur Optimierung der Planung erfolgen.
- Erhöhter Schutzbedarf** (16,7 % Flächenanteil)
Auf den Erhalt der klimatischen Funktion ist zu achten. Für größere Vorhaben (z.B. Gewerbepark, Hochhaus) sollte eine qualitative Stellungnahme zur Optimierung der Planung erfolgen.
- Kein besonderer Schutzbedarf** (6,8 % Flächenanteil)

Siedlungsräume mit Kaltluftfunktion
Bereiche mit einer hohen Kaltluftströmung bzw. -entstehung, die potenziell auch auf angrenzende Räume günstig wirken. Bei Vorhaben in diesen Bereichen ist die Kaltluftfunktion der Flächen zu beachten (Grünflächen erhalten, Gebäudegestaltung, etc.)

WIRKRaum: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM

Stadtklimatische Handlungspriorität

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Grundsätzlich wird die Einhaltung klimaökologischer Standards in allen Flächen empfohlen. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Daraus ergibt sich explizit keine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen. Liegt bei den Flächen neben einer Wärmebelastung auch eine hohe Vulnerabilität vor, steigen der Handlungsdruck und der Bedarf an Anpassungsmaßnahmen.

- Handlungspriorität 1** (4,2 % Flächenanteil)
Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation sind bei allen Vorhaben dringend umzusetzen. Möglichkeiten der (klimagerechten) Gebäudekühlung sind zu prüfen.
- Handlungspriorität 2** (14,8 % Flächenanteil)
- Handlungspriorität 3** (53,7 % Flächenanteil)
Bei allen baulichen Entwicklungen, auch bspw. im Zuge von Straßensanierungen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, hohe Aufenthaltsqualität schaffen).
- Handlungspriorität 4** (20,7 % Flächenanteil)
- keine vorrangige Handlungspriorität** (6,6 % Flächenanteil)
Bei Nachverdichtung, baulichen Entwicklungen oder im Zuge von Straßensanierungen sind Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation zu prüfen.

KALTLUFTPROZESSE im Ausgleichsraum

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
Innere Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weit reichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftabfluss**
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde
- Funktion durch die Entwicklungsflächen ggf. eingeschränkt / gefährdet**
- Kaltluftentstehungsgebiet**

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD (UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

- Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

- Extrem sensitives oder sehr hoch sensitives Gebiet
- Hoch sensitives oder sensibles Gebiet

Abbildung 68: Planungshinweiskarte Stadtklima für das Dietzenbacher Stadtgebiet.



- **Stadtklimatische Bewertung der städtebaulichen Entwicklungsflächen**

In der Planungshinweiskarte werden die möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen in Dietzenbach über die Ergebnisse der Modellierung der Zukunftsszenarien stadtklimatisch bewertet, indem die stadtklimatische Situation vor einer Bebauung (Bedeutung der Grün-/Freifläche bei Entwicklungen im Außenraum bzw. bestehende thermische Belastung bei Innenentwicklungen) mit der Situation nach Umsetzung der Bebauung verglichen wird (



Tabelle 22).

Unter den untersuchten Entwicklungsflächen sind lediglich im derzeitigen Ausgleichsraum einige Flächen zu finden, deren (zumindest teilweise) Entwicklung aus stadtklimatischer Sicht gänzlich auszuschließen ist. Für einen Großteil der Flächen sind Auswirkungen zu erkennen, die eine klimafachliche Begleitung der Planung notwendig erscheinen lassen. Dies gilt insbesondere, wenn die Entwicklungsflächen eine Kaltluftfunktion aufweist (Bereiche mit hoher Kaltluftströmung bzw. -entstehung). In diesem Fall ist in einem Detailgutachten die Klimaverträglichkeit des Vorhabens nachzuweisen (z.B. dass die Funktion einer Kaltluftleitbahn durch die Berücksichtigung von Grünachsen und Abstandsflächen sowie eine geeignete Bauweise erhalten bleibt).

Außerhalb der besonderen Kaltluftprozesse werden für viele Entwicklungsflächen, insbesondere angesichts zunehmender Hitzeperioden infolge des Klimawandels, optimierende Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation empfohlen. In diesen Fällen ist i.d.R. eine verbal-argumentative Stellungnahme auf Basis der Stadtklimaanalyse ausreichend, die je nach Lage und Art des Vorhabens von den städtischen Fachdiensten oder externen Büros übernommen werden können.

In einigen Fällen sind die vorgesehenen Planungen ohne optimierende Maßnahmen stadtklimaverträglich umsetzbar, wobei zum „klimaökologischen Standard“ bei allen künftigen Entwicklungen in Dietzenbach geraten wird. Dies meint u.a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung. Zu den darüberhinausgehenden „optimierenden Maßnahmen“ zählen je nach Vorhaben bspw. das Freihalten von Durchlüftungachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Bäume, Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen und damit die Schaffung zugänglicher kühler Orte.



Tabelle 22: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Bewertung der Entwicklungsflächen im Außen- und Innenraum.

Bewertung der Entwicklungsflächen		Methodische Herleitung bei Vorhaben im Außenraum	Methodische Herleitung bei Vorhaben im Innenraum
Entwicklung unter Beachtung klimaökologischer Standards möglich			
+	Entwicklung führt zu einer stadtklimatischen Verbesserung	IST > P1 und IST ≥ P2	-
•	Entwicklung ohne weitere Maßnahmen stadtklimatisch verträglich	Handlungspriorität = 4 oder keine (Bei vorliegender Kaltluftfunktion → Klasse „rot !“)	Grün IST ≤ 3 und Handlungspriorität = 4 oder keine (Bei vorliegender Kaltluftfunktion → Klasse „rot !“)
Entwicklung unter Beachtung klimaökologischer Standards möglich			
◊	Konkretisierung i.d.R. durch eine verbal-argumentative Stellungnahme auf Basis der Stadtklimaanalyse möglich	Handlungspriorität = 2 – 3	Grün IST ≤ 3 und Handlungspriorität = 1 – 3 ODER Grün IST > 3 und Handlungspriorität = 3 bis keine
!	Nachweis der Klimaverträglichkeit über ein Detailgutachten zu den vorhabenbezogenen Auswirkungen	Wie oben und zusätzlich hohe Bedeutung für den Kaltlufthaushalt (Fläche weist Kaltluftfunktion auf)	Wie oben und zusätzlich hohe Bedeutung für den Kaltlufthaushalt (Fläche weist Kaltluftfunktion auf)
Entwicklung aus klimatischer Sicht nicht empfehlenswert			
x	Keine solchen Vorhaben unter den Entwicklungsflächen	Handlungspriorität = 1	Grün IST > 3 und Handlungspriorität = 1 – 2

IST = Status quo, P1 bzw. P2 = Szenario Schwacher bzw. Starker Klimawandel

Grün IST = kombinierte Bewertung des Ausgleichsraum am Tag und in der Nacht gemäß Abbildung 67.

Kaltluftfunktion = Wirkraum mit einem Kaltlufteinwirkungsbereich von > 50 %



8.6 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN

8.6.1 MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt 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 Dietzenbach wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

Die Auswahl bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 23 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

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

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab.

So hängt beispielsweise ...

- ... die Beschattungsintensität von Stadtbäumen von der Pflanzdichte und dem Kronendurchmesser ab.
- ... der konkrete Nutzen einer Maßnahme von ihrer Verortung in thermisch belasteten und bewohnten Gebieten ab.
- ... die kühlende Wirkung eines Gründaches auf die bodennahe Atmosphäre von der Gebäudehöhe (vertikale Entfernung) ab.
- ... die lokal spürbare, kühlende Wirkung von Springbrunnen oder Bäumen von deren horizontalen Entfernung zum Aufenthaltsbereich des Menschen ab.

Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Dietzenbacher Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Der hohe Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld



wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die Waldgebiete Dietzenbachs oder der Stadtpark stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ *M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen*). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage, nachts auch als „Trittsteine“¹⁹ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichsströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ *M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen*).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) übernehmen Bäume (und Sträucher) 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 mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ *M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben*). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (→ *M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung*). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen²⁰. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume den Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz²¹ geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ *M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien*). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ *M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen*).

In der Stadt Dietzenbach sind kleinere Fließgewässer wie Gräben und Bäche vorhanden (z.B. die Bieber). 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

¹⁹ „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herantransportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beiträgt.

²⁰ Baumarten sowie ergänzende Informationen siehe Menke et al. 2013

²¹ Straßenbaumliste mit Standortangaben zur Hitze- und Trockenheitsverträglichkeit: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>



Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Wasser einen stärkeren Kühleffekt als stehendes Gewässer, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen²² Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. 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 Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ *M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen*). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ *M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme*), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

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 Hitzeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeintrag minimiert wird (→ *M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes*). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → *M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch*). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo²³ kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ *M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten*). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ *M16: Dachbegrünung*, → *M17: Fassadenbegrünung*, → *M19: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen*, → *M20: Technische Gebäudekühlung*).

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 die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist

²² "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)

²³ Albedo bezeichnet das Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzweiliger Strahlung)



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). Neue Versiegelung von Flächen für weiteren Parkraum ist zukünftig zu vermeiden. Alternativ sollten unterirdische Parkräume (Tiefgaragen mit Dachbegrünung) oder Parkhäuser mit Dach- und Fassadenbegrünungen etabliert werden.

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

In dicht bebauten Siedlungsgebieten lassen sich Erholungsräume über sogenannte „Pocket Parks“ auch auf kleinem Raum einrichten. Schattenspendende Bäume, Sitzgelegenheiten und ansprechende Pflanzungen schaffen einen Raum zum Verweilen und Entspannen, insbesondere für Menschen, die keinen eigenen Garten oder Balkon besitzen. Beispiele finden sich mittlerweile in zahlreichen Städten, wie Bochum²⁴, Nürnberg²⁵ Bonn²⁶ oder Düsseldorf²⁷.

²⁴ <https://www.bochum.de/Pressemeldungen/30-Mai-2023/Eine-kleine-grosse-Erfolgsgeschichte-3.-Pocket-Park-eroeffnet>

²⁵ https://www.nuernberg.de/internet/soer_nbg/pocketpark_pestadel.html

²⁶ <https://www.bonn.de/pressemitteilungen/mai-2022/klimaanpassung-im-kleinformat-pocket-park-in-duisdorf-neugestaltet.php>

²⁷ <https://www.duesseldorf.de/aktuelles/news/detailansicht/newsdetail/pocketpark-stadt-macht-aus-schotter-parkplatz-ein-quartierswaeldchen>



Tabelle 23: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Dietzenbach.

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

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

Bild: Sheridan Park (Quelle: © Pascal Cormont)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern
Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 		<ul style="list-style-type: none"> Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)



04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen
Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement 		<ul style="list-style-type: none"> Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe



Bild: Theodor-Heuss-Platz (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>05</p> <p>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“ 	 <p>Bild: Verlängerung Linie 3, Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsigelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
<p>06</p> <p>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen 	 <p>Bild: Königsplatz in Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld 	



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Kräutergarten im Park am Roten Tor in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)

08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltfluthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)



Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: © Mirian Lübbecke)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird
--	---

<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen
--	---



Bild: Schwalllech Am Schwall in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)

<p>10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen
---	---

<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze
--	--

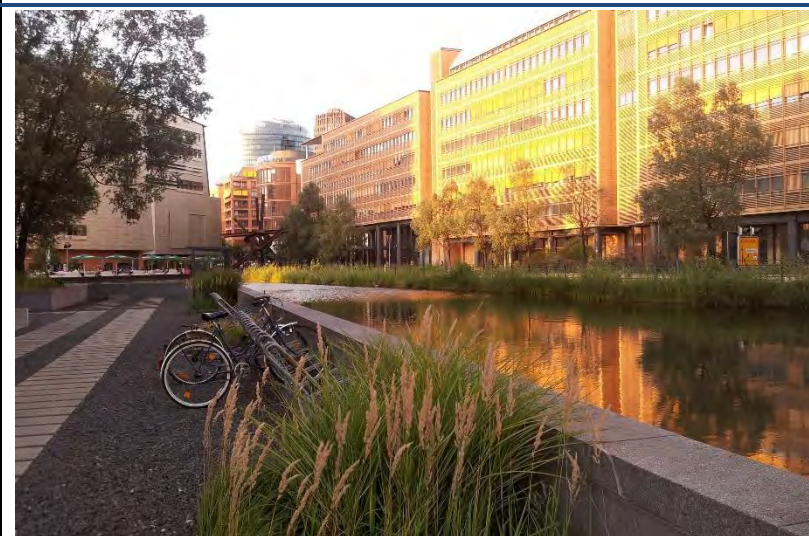


Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: © Miriam Lübbecke)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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



Bild: Stiftsplatz in Bonn (Quelle: © Bundesstadt Bonn)

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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

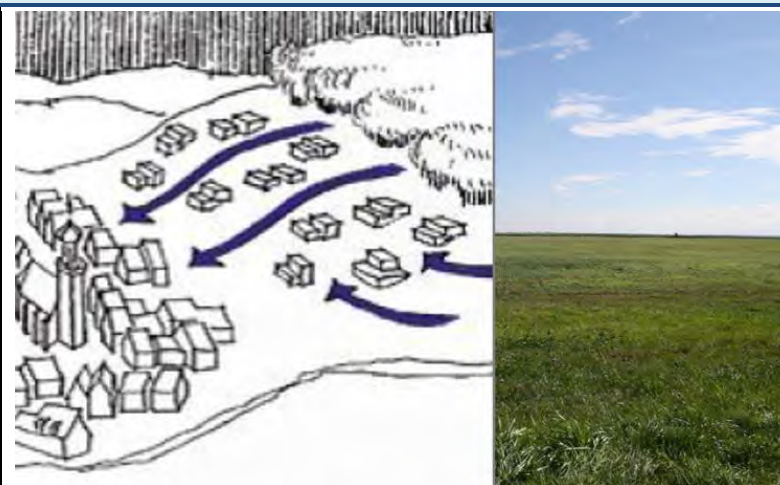


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>13 Optimierung der Gebäudety- pologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die insb. in Augsburg oftmals Parkwinde induzieren Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht
---	---

<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks
---	---



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

<p>14 Entdichtung (Rückbau)</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen
--	--

<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen Garagen Lagerhallen ggf. Industrie- und Gewerbebrachen Bahnanlagen
---	---



Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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



Bild: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Leßmann, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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



Bild: Dachgarten Diakonissenkrankenhaus Augsburg (Quelle: © Evangelische Diakonissenanstalt)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>17 Fassadenbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen) 	
<p>18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand) 	

Bild: Fassadenbegrünung Fuggerei Augsburg (Quelle: © Sebastian Köhler, STPLA)

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



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme
-----------	---	---

	Wirkung	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Bestand)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 	



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

20	Technische Gebäudekühlung	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung ▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird ▪ Erdkältenutzung ▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden
-----------	----------------------------------	---

	Wirkung	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 	

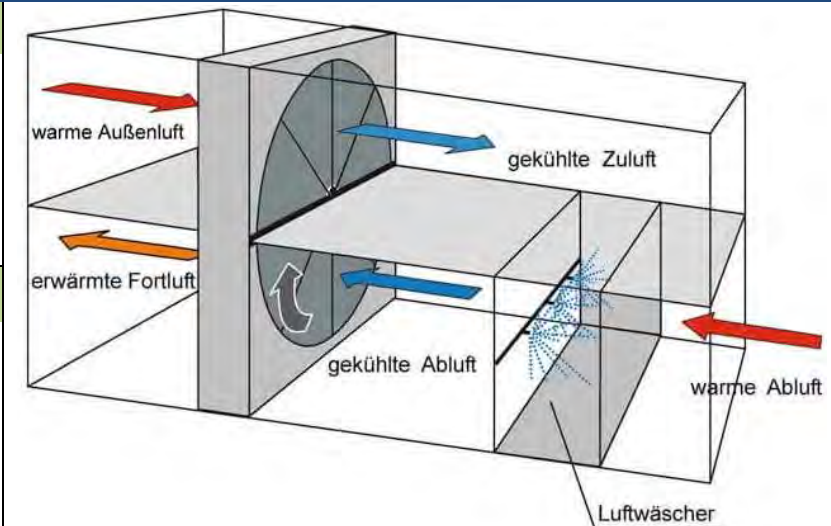



Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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



8.6.2 BEISPIELE ZUR ANWENDUNG DER KARTENERGEBNISSE

Für die im Rahmen der PHK flächenkonkret definierten Handlungsprioritäten im Wirkraum und Schutzbedarfe im Ausgleichsraum sollten geeignete Maßnahmen zugeordnet und angewandt werden, um die thermische Belastung im Siedlungsraum zu reduzieren und Klimafunktionen zu erhalten bzw. zu stärken.

Anhand konkreter Flächenbeispiele wird nachfolgend erklärt, wie die Planungshinweiskarte in Verbindung mit allen weiteren Ergebniskarten der Stadtklimaanalyse Dietzenbach zu nutzen ist. Hierbei ist eine hierarchische Herangehensweise analog zur in Kapitel 3 aufgeführten Produktpyramide ratsam. Durch diese gelingt es, die konzentrierte Information der PHK über die Bewertungskarten und die Klimaanalysekarte bis hin zu den Einzelkarten zentraler Stadtklimakenngrößen und den Eingangsdaten zu entflechten und auf diese Weise eine vereinfachte Entscheidungsfindung über geeignete Maßnahmen herbeizuführen. Dieser Leitfaden zur Entscheidungshilfe wird für folgende vier Flächenbeispiele durchgeführt:

Fokusraum „Altstadt“

- Beispielfläche 1: „Wirkraum mit Handlungspriorität 1 oder 2“: Wohnblöcke Babenhäuser Straße / Bahnhofsstraße
- Beispielfläche 2: „Platz mit sehr Handlungspriorität 1“: Parkplatz Darmstädter Straße
- Beispielfläche 3: „Straßenraum Handlungspriorität 1“: Bahnhofsstraße
- Beispielfläche 4: „Ausgleichsraum sehr hohen Schutzbedarfs“: Grünfläche Lehrstraße

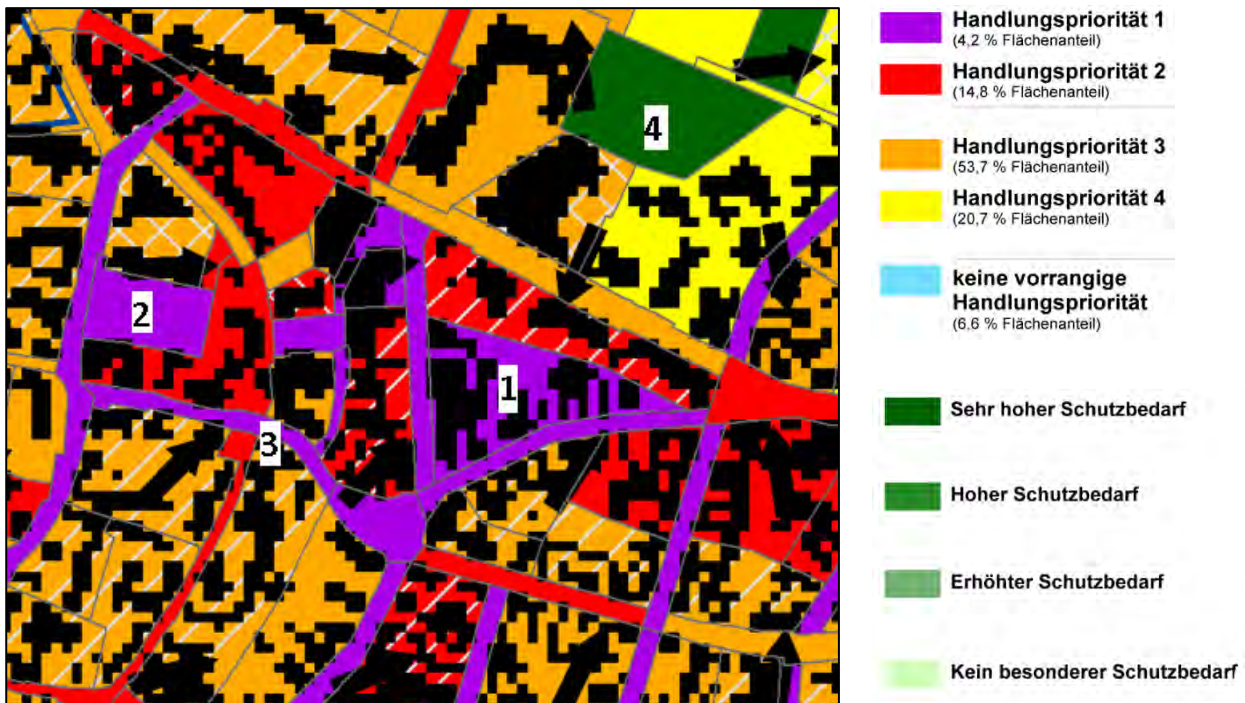


Abbildung 69: Planungshinweiskarte Stadtklima. Fokusraum "Altstadt" mit nummerierten Beispielflächen.

1 = Wohnblöcke Babenhäuser Straße / Bahnhofsstraße; 2 = Parkplatz Darmstädter Straße; 3 = Straßenraum Bahnhofsstraße; 4 = Grünfläche Lehrstraße



Der Fokusraum „Altstadt“ weist überwiegend Wirkraumflächen der Handlungspriorität 1 bis 3 sowie Straßenraum der Handlungspriorität 1 und 2 auf. In den Wohnblockflächen entlang des Babenhäuser Straße, der Hügelstraße oder der Schmidtstraße liegen zudem sensitive Bereiche vor, d.h. dort besteht eine höhere Dichte an gegenüber Hitze vulnerablen Bevölkerungsgruppen.

Die der PHK hierarchisch direkt untergeordneten Karten sind die Bewertungskarten, welche in Abbildung 70 und Abbildung 71 aufgetragen sind. Diese geben Aufschluss darüber, ob sich auf den betrachteten Flächen vornehmlich der humanbioklimatische Komfort in der Nacht oder die Aufenthaltsqualität am Tage als schützenswert bzw. verbesserungswürdig herausstellen. Hierdurch wird für die spätere Maßnahmenentscheidung bereits eine erste grobe Richtung vorgegeben.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

- Sehr günstige humanbioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

AUSGLEICHSRAUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität
- Hohe Aufenthaltsqualität
- Mittlere Aufenthaltsqualität
- Geringe Aufenthaltsqualität
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität

Abbildung 70: Bewertungskarte Tag, Fokusraum "Altstadt"



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

- Sehr günstige humanbioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

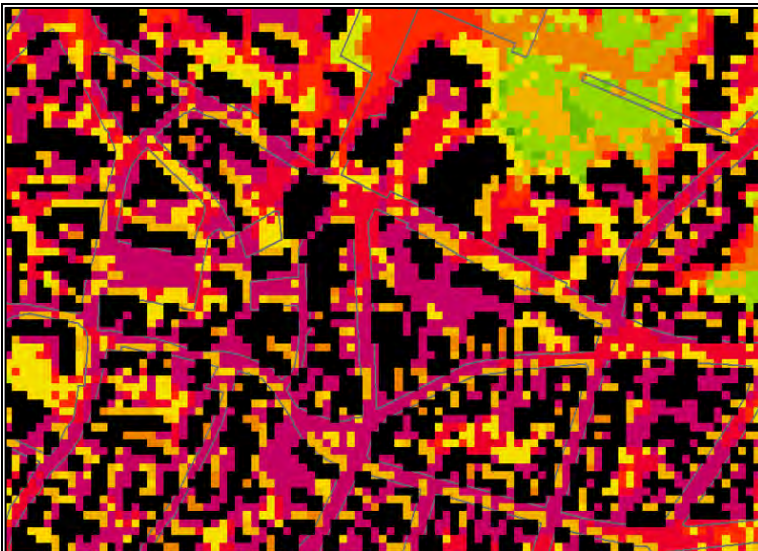
AUSGLEICHSRAUM: GRÜN-/ FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

- Sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung
- Hohe humanbioklimatische Bedeutung
- Mittlere humanbioklimatische Bedeutung
- Geringe humanbioklimatische Bedeutung
- Sehr geringe humanbioklimatische Bedeutung

Abbildung 71: Bewertungskarte Nacht, Fokusraum "Altstadt"



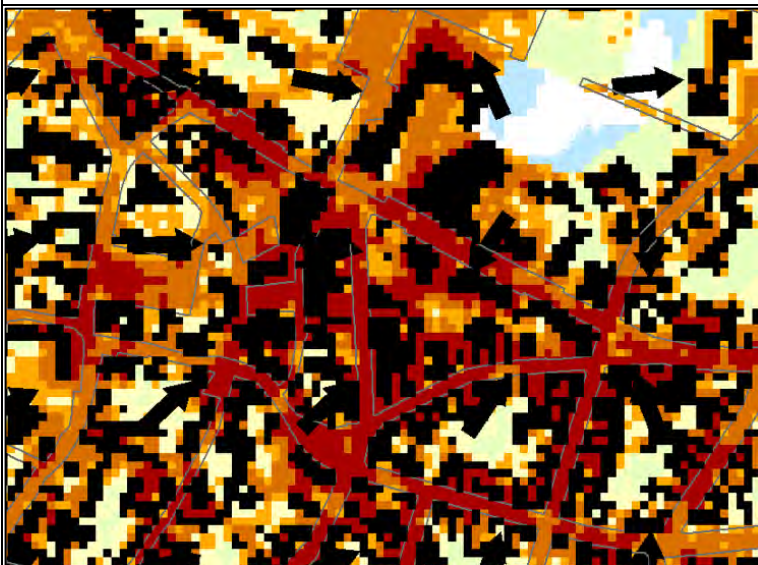
Die methodische Grundlage der Wirkraumbewertung am Tage bildet die rasterbasierte Information der PET, die hierfür auf Gebietsumrisse der Basisgeometrie gemittelt wurde. Im hierarchisch nächstfolgenden Schritt wird daher die Karte der PET hinzugezogen (vgl. Abbildung 72), wodurch lokale Minima und Maxima dieser gefühlten Temperatur in Erscheinung treten, die nachfolgend die Zuweisung ortsbezogener Maßnahmen für die Tagsituation zulassen. Die Nachtsituation zeigt sich anhand der Klimaanalysekarte (s. Abbildung 73). Zur Veranschaulichung der örtlichen Begebenheiten sind zudem das Landnutzungsraaster (s. Abbildung 74) sowie ein Luftbild (s. Abbildung 75) des Fokusraum „Altstadt“ abgebildet.



PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR IN 1,1M HÖHE [°C]

bis 21,0	> 31,0 bis 33,0
> 21,0 bis 23,0	> 33,0 bis 35,0
> 23,0 bis 25,0	> 35,0 bis 37,0
> 25,0 bis 27,0	> 37,0 bis 39,0
> 27,0 bis 29,0	> 39,0 bis 41,0
> 29,0 bis 31,0	> 41,0

Abbildung 72: Physiologisch äquivalente Temperatur am Tage (PET) für den Fokusraum "Altstadt".



Wärmeineleffekt von Siedlungsflächen

Nächtliche Temperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr [°C]

unter 16	> 18 bis 19
> 16 bis 17	> 19 bis 20
> 17 bis 18	über 20

Abbildung 73: Klimaanalysekarte (KAK) für den Fokusraum "Neustadt"



Nutzungsraaster

Landnutzungstypen

- 7 - Gleisfläche
- 9 - Freiland, Rasen
- 14 - Gewässer
- 20 - Gebäude
- 21 - Gebäude mit Dachbegrünung
- 22 - un bebaut versiegelt
- 23 - naturferner Boden
- 24 - Baum über Versiegelung
- 25 - Baum über Rasen
- 26 - Baum über naturfernem Boden
- 28 - Sand

Abbildung 74: Nutzungsraaster für den Fokusraum "Altstadt"



Abbildung 75: Luftbild für den Fokusraum "Altstadt".

Bei der **Beispielfläche (1)** handelt es sich um zwei thermisch belastete Wohnblöcke an der Babenhäuser Straße und der Bahnhofstraße, welche in der PHK die Handlungspriorität 1 bzw. 2 aufweisen (s. Abbildung 69). Zudem handelt es sich bei einem der Wohnblöcke um ein hoch sensitives Gebiet, was bedeutet, dass dort eine hohe Dichte an vulnerablen Bevölkerungsgruppen (Alte Menschen, Kleinkinder) vorliegt und der Handlungsdruck zur Umsetzung von klimaökologischen Maßnahmen steigt. Am Tage besteht dort eine sehr ungünstige bioklimatische Situation (s. Abbildung 70), wobei die PET (physiologische äquivalente Temperatur) je nach vorliegender Nutzung zwischen 29 und < 41 °C liegt, was einer mäßigen bis extremen Wärmebelastung entspricht (s. Tabelle 24). In den Bereichen mit Schattenwurf durch die wenig vorhandenen Bäume oder Gebäudeschatten reduziert sich die PET lokal auf 29 bis < 35 °C, die höchsten Temperaturen kommen



über den (versiegelten) unbeschatteten Bereichen vor (s. Abbildung 72). Für eine Verbesserung der thermischen Belastung im Innen- und Außenraum bieten sich für die Tagsituation folgende Maßnahmen aus dem Katalog an: M01, M03, M04, M06 (Außenraum); M16, M17, M18, M19, M20, M21 (Innenraum).

Tabelle 24: 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	Schwäche 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

In der Nachtsituation zeigt sich für den Wohnblock an der Babenhäuser Straße eine mittlere und für den Block an der Bahnhofstraße eine ungünstige bioklimatische Situation (s. Abbildung 71). Im Bereich der versiegelten Flächen liegt die nächtliche Temperatur bei 19 bis 20 °C wohingegen die unversiegelten Freiflächen innerhalb des Wohnblocks in der Nacht stärker auskühlen (16 – 18 °C) (s. Abbildung 73). Das nächtliche Windfeld zeigt auf (s. Abbildung 76), dass kaum Kaltluft aus der Umgebung in den Wohnblock strömt, sodass dort keine Abkühlung über herantransportierte Kaltluft stattfinden kann, zudem bewirkt der unversiegelte Anteil des Wohnblocks (Hausgärten) nur eine geringe Abkühlung. Maßnahmen zur Verbesserung der Nachtsituation innerhalb des Wohnblocks bestehen aus einer Entsigelung (M01, M04,) sowie aus gebäudebezogenen Eingriffen (M03, M19, M20).

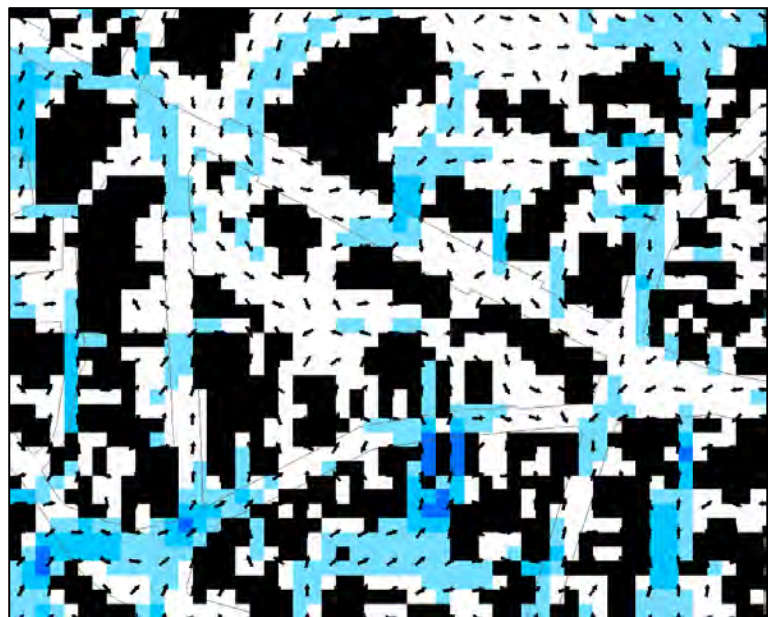


Abbildung 76: Nächtliches Windfeld (Kaltluftströmung) für die Beispielfläche 1



Die **Beispielfläche 2** zeigt eine thermisch belastete Parkfläche. Die Planungshinweiskarte gibt für den Parkplatz an der Darmstädter Straße die Handlungspriorität 1 vor (s. Abbildung 69). Aufgrund der hohen Versiegelungsdichte und der fehlenden Beschattung liegt am Tage eine sehr ungünstige thermische Situation (s. Abbildung 70) aufgrund der hohen PET (31 bis > 41 °C) vor (s.). Klimaökologische Maßnahmen wären ähnlich vorrangig Entsiegelungs- und Verschattungsmaßnahmen (M02, M04, M05, M06, M11). In der Nachtsituation besteht eine ungünstige thermische Situation (s. Abbildung 71). Da Parkplätze in der Nacht weniger als Aufenthaltsraum dienen, sind primär Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation anzugehen. Aus klimaökologischer Sicht wäre ein Parkplatz mit einem hohen Grünvolumen, bestehend aus zahlreichen großkronigen Bäumen, welche die versiegelte Fläche beschatten sowie ein teilverseigelter Untergrund (bspw. aus Rasengittersteinen) in den Parkbuchten optimal ausgestaltet.

Die **Beispielfläche 3** stellt den Straßenraum mit Handlungspriorität 1 entlang der Bahnhofsstraße dar (s. Abbildung 69). Insbesondere verkehrsreiche Straßen sollten auch für den Langsamverkehr (Fußgänger, Radfahrer) klimaoptimiert werden. Am Tage liegt im Straßenraum eine sehr ungünstige klimatische Situation (s. Abbildung 70) aufgrund hoher PET Werte (31 bis > 41 °C) vor (s.). Wie im Luftbild und im Nutzungsraster zu sehen ist, sind die genannten Straßenzüge großteils versiegelt und weisen fast keine Straßenbäume auf (s. Abbildung 74, Abbildung 75), was die hohen PET Werte erklärt. Zur Reduzierung der thermischen Belastung am Tage und zum Schutz von Fußgängern und Radfahrern sollten vor allem beschattende Maßnahmen sowie die Erhöhung der Verdunstungskühlung, bspw. über die alleeartige Anpflanzung von Bäumen, umgesetzt werden: M04, M05, M06, M10. Ergänzend können Trinkbrunnen installiert oder „erlebbar Wasserflächen“ etabliert werden (M09, M10). Die Bäume spenden nicht nur dem Langsamverkehr Schatten, sondern verschatten zusätzlich Gebäudefassaden, wodurch ein Beitrag für ein angenehmeres Innenraumklima in den umliegenden Gebäuden geleistet wird. Die darüberhinausgehende Installation technischer Verschattungselemente, von Dach- und Fassadenbegrünung, aber auch die klimaoptimierte Gestaltung von Oberflächen im Außenraum verstärkt diesen sekundären Effekt zusätzlich (M03, M16-M18). Zur Verbesserung der Überwärmung sind innerhalb des Siedlungsbereichs vor allem Entsiegelungsmaßnahmen empfohlen. Selbst auf kleineren Grünflächen können Kaltluftentstehungsprozesse in Gang gebracht werden, die sich positiv auf das nahe Umfeld auswirken (M04). Die zuvor genannte, aufgelockerte Alleebepflanzung sorgt dabei für eine gewisse Durchlässigkeit des Strömungsgeschehens.

In der Nacht wird die tagsüber im Asphalt-/ Betonboden gespeichert Wärme wieder an die Luft abgegeben, wodurch sich die hochversiegelten Straßenräume nur geringfügig abkühlen und selbst in der Nacht noch über 19 °C aufweisen (s. Abbildung 73). Durch eine Entsiegelung und Verminderung der Aufheizung des Bodens (bspw. durch Beschattung oder helle Oberflächen) können die thermischen Bedingungen auch für die Nachtsituation verbessert werden.



Bei der **Beispielfläche 4** handelt es sich um eine Ausgleichsfläche sehr hohen Schutzbedarfs an der Lehrstraße (s. Abbildung 69). Der Planungshinweiskarte ist zu entnehmen, dass die angrenzenden Wohnblöcke eine geringe Handlungspriorität (3 bzw. 4) aufweisen. Die hohe Wertigkeit der Grünfläche zeichnet sich durch eine sehr hohe Aufenthaltsqualität am Tage (s. Abbildung 70) sowie eine sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung in der Nacht aus (s. Abbildung 71). Die aus einem Mix von großkronigen Bäumen und Freifläche sowie einer Sandfläche (Spielplatz) gestaltete Grünfläche weist eine hohe mikroklimatische Vielfalt auf: Am Tage liegen die PET-Werte zwischen 21 bis 35 °C (s.) und in der Nacht liegt die Temperatur zwischen 14 und 17 °C (s. Abbildung 73). Somit besteht sowohl am

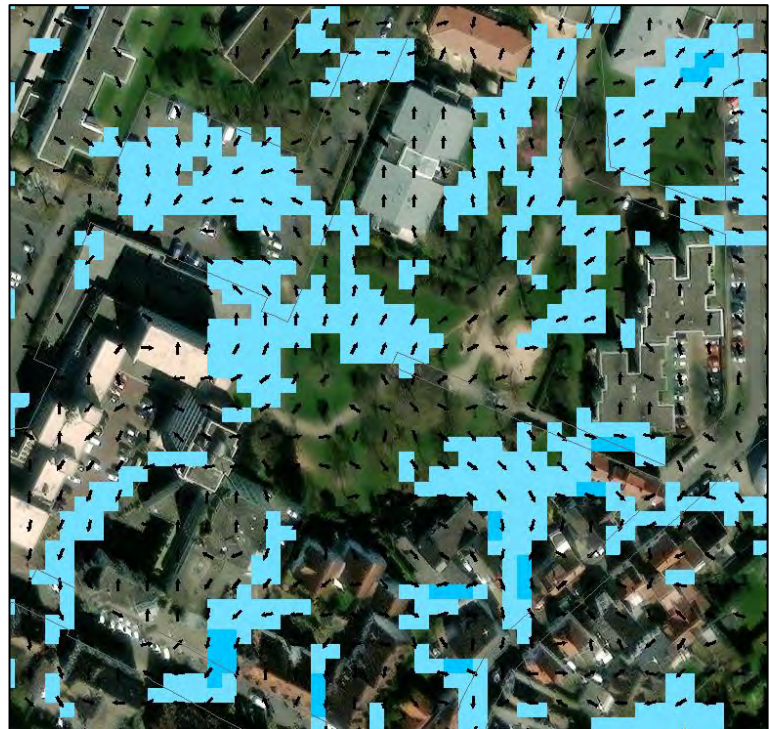


Abbildung 77: Nächtliches Windfeld (Kaltluftströmung) für die Beispielfläche 4

Tage in den beschatteten Bereichen eine hohe Aufenthaltsqualität, zugleich entsteht in der Nacht über den freien Rasenflächen Kaltluft, welche in die Umliegenden Wohnsiedlungen strömt (s. Abbildung 77).

8.7 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (esri ArcGIS 10.8 und höher) zur Verfügung.

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

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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der rund 2.480 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 70 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen für Status Quo und den Zukunftsszenarien (u.a. Nut-



zung), Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (s. Abbildung 78 bzw. Tabelle 25 für den gesamten Metadatensatz).

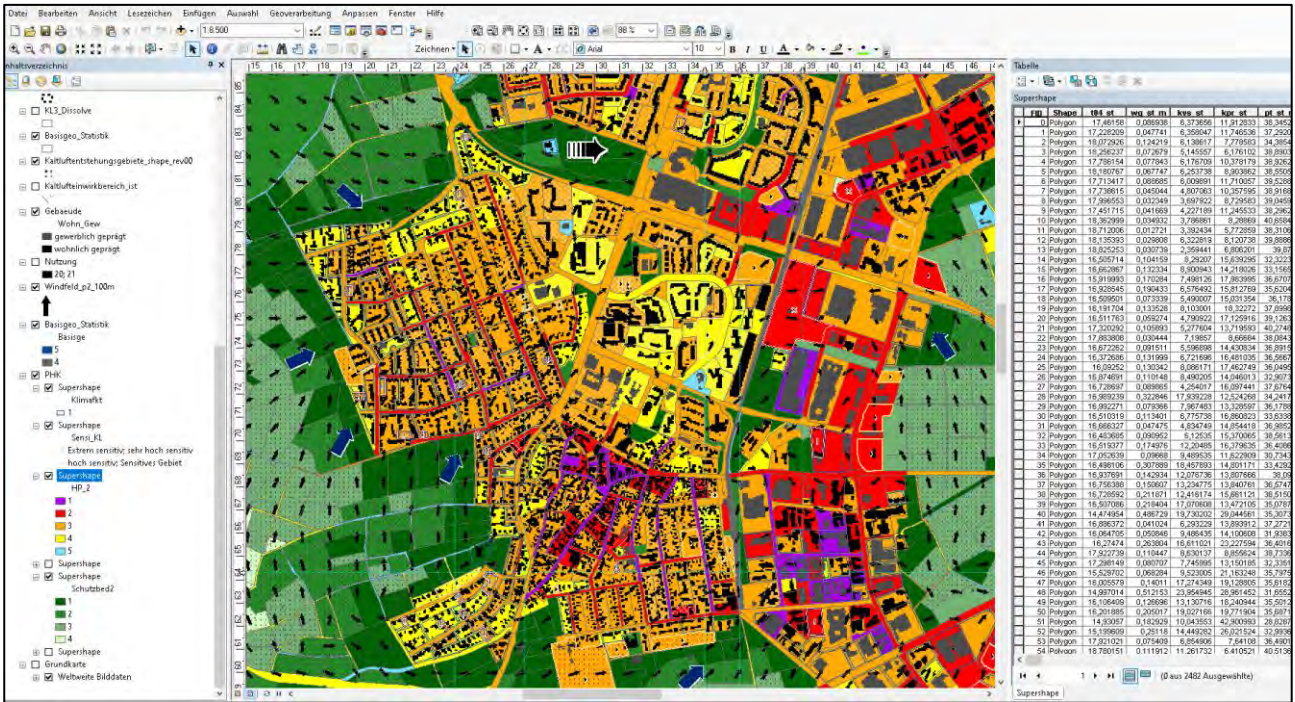


Abbildung 78: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiskarte innerhalb des Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.



Tabelle 25: Metadatenatz zum Vektordatenatz (PHK, Bewertungskarten).

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
ID_fest	-	Interne laufende Nummer des Zukunfts-Szenarios
Basisge	-	Landnutzungs-kategorie Ist-Zustands: 1 = Siedlung 2 = Gewerbe 3 = Straße 4 = Gleis 5 = Gewässer 6 = Frei-/Grünfläche 7 = Wald
Platz	-	Platz (bspw. Parkplatz) in Klasse 3 „Straße“
Nutz_Zk	-	Nutzklasse des Zukunfts-Szenarios; Klassen: s. „Nutz_ist“
Flach_h	Hektar	Polygongröße in Hektar
t04_ist	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_ist_t04_rev00.tif
wg_ist	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_ist_WG_rev00.tif
kvs_ist	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_ist_kvs_rev00.tif
kpr_ist	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_ist_kpr_rev00.tif
pet_ist	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_ist_PET_rev00.tif
t04_p1_	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario I Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p1_t04_rev00.tif
wg_p1_m	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario I Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p1_WG_rev00.tif
kvs_p1_	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtlicher Kaltluftvolumenstrom um 04:00 morgens, Zukunftsszenario I Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p1_kvs_rev00.tif
kpr_p1_	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Zukunftsszenario I Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p1_kpr_rev00.tif



pet_p1_m	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Zukunftsszenario I Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p1_PET_rev00.tif
t04_p2_	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario II Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p2_t04_rev00.tif
wg_p2_m	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario II Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p2_WG_rev00.tif
kvs_p2_	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtlicher Kaltluftvolumenstrom um 04:00 morgens, Zukunftsszenario II Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p2_kvs_rev00.tif
kpr_p2_	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Zukunftsszenario II Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p2_kpr_rev00.tif
pet_p2_m	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Zukunftsszenario II Methodik: ZS „mean“ von 2_22_085_p2_PET_rev00.tif
Agglomerat		Zusammenhängende Ortsteile ohne Einzelflächen im Außenraum (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Klimafkt	-	Kaltluftfunktion (Ist-Zustand) = 1 Methodik: Prozentualer Anteil des Kaltlufteinwirkungsbereichs am Baublock (nur Wirkraum) im Ist-Zustand -> Ausweisung als Fläche mit Kaltluftfunktion, wenn dieser Anteil >=50 %
Leitbahn	-	Leitbahn im Ist-Zustand: 1 = Primärfunktion 2 = Einzugsgebiet/Sekundärfunktion 3 = Einzugsgebiet indirekt
Z_Leitbahn	-	Leitbahn im Zukunftsszenario: 1 = Primärfunktion 2 = Einzugsgebiet/Sekundärfunktion 3 = Einzugsgebiet indirekt
KLF	-	1 = Ausgleichsfläche mit Kaltluftfunktion (des Ist-Zustands) Überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstrom (>= 10,91) oder Überdurchschnittliche Kaltluftproduktionsrate (>= 19,58) oder Überdurchschnittliche Windgeschwindigkeit (>= 0,19)
Z_KLF	-	1 = Ausgleichsfläche mit Kaltluftfunktion (des Zukunftsszenarios II) Überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstrom (>= 10,84) oder Überdurchschnittliche Kaltluftproduktionsrate (>= 19,37) oder Überdurchschnittliche Windgeschwindigkeit (>= 0,18)



W_T04_i	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für die Ist-Situation (Werte von Siedlung/Gewerbe und Verkehrsräumen)
ZW_p1_Nach	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für das Zukunftsszenario I (Werte von Siedlung/Gewerbe, Verkehrsräumen und Entwicklungsflächen)
ZW_p2_Nach	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für das Zukunftsszenario II (Werte von Siedlung/Gewerbe, Verkehrsräumen und Entwicklungsflächen)
W_PET_i	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für die Ist-Situation (Werte von Siedlung/Gewerbe, Straße)
ZA_PET_i	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für die Ist-Situation für den Ausgleichsraum (Werte von Grün/Freiflächen)
ZW_p1_Tag	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für das Zukunftsszenario I (Werte von Siedlung/Gewerbe, Straßen und Entwicklungsflächen)
ZW_p2_Tag	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für das Zukunftsszenario II (Werte von Siedlung/Gewerbe, Straßen und Entwicklungsflächen)
PHK_N_iA	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums in der Nacht, Ist-Zustand: 5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering
PHK_N_Z1A	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums in der Nacht, Zukunftsszenario I, Klassen s. „PHK_N_iA“
PHK_N_Z2A	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums in der Nacht, Zukunftsszenario II, Klassen s. „PHK_N_iA“
Wi_Nacht	-	Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) in der Nacht im Ist-Zustand: 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig
W_p1_Nacht	-	Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) in der Nacht im Zukunftsszenario I, Klassen s. „Wi_Nacht“
W_p2_Nacht	-	Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) in der Nacht im Zukunftsszenario II, Klassen s. „Wi_Nacht“
PHK_Tag_iA	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums am Tag im Ist-Zustand:



		<p>1 = sehr hoch 2 = hoch 3 = mittel 4 = gering 5 = sehr gering</p>
PHK_Tag_AP1	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums am Tag, Zukunftsszenario I, Klassen s. „PHK_Tag_iA“
PHK_Tag_AP2	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums am Tag, Zukunftsszenario II, Klassen s. „PHK_Tag_iA“
Wi_Tag	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) am Tag im Ist-Zustand</p> <p>1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig</p>
W_p1_Tag	-	Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) am Tag im Zukunftsszenario I, Klassen s. „Wi_Tag“
W_p2_Tag	-	Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe, Straßen) am Tag im Zukunftsszenario II, Klassen s. „Wi_Tag“
PHK_Ist_A	-	Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraums am Tag und in der Nacht für die Ist-Situation, Klassen s. „PHK_N_iA“
PHK_P1_A	-	Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraum am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario I, Klassen s. „PHK_N_iA“
PHK_P2_A	-	Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraum am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario II, Klassen s. „PHK_N_iA“
Schutzbed2	-	<p>Gesamthafte Bewertung des Ausgleichsraum über alle Szenarien (Ist-Zustand und Zukunftsszenarien):</p> <p>1 = sehr hoher Schutzbedarf 2 = hoher Schutzbedarf 3 = erhöhter Schutzbedarf 4 = kein besonderer Schutzbedarf</p>
PHK_i	-	Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht für die Ist-Situation, Klassen s. „Wi_Nacht“
PHK_p1	-	Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario I, Klassen s. „Wi_Nacht“
PHK_p2	-	Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario II, Klassen s. „Wi_Nacht“
HP_2	-	Gesamthafte Bewertung des Wirkraums (Siedlungsraum/Gewerbe, Straßen) über alle Szenarien (Ist-Zustand und Zukunftsszenarien):



		<p>0 = kein Wirkraum 1 = Handlungspriorität 1 2 = Handlungspriorität 2 3 = Handlungspriorität 3 4 = Handlungspriorität 4 5 = keine vorrangige Handlungspriorität</p>
A_W_G	-	<p>Nutzungsgruppe des Ist-Zustands: A_ist = Ausgleichsraum W_ist = Wohngebiet G_ist = Gewerbegebiet S_ist = Straßenraum, Plätze</p>
A_W_G_P	-	<p>Nutzungsgruppe des Zukunftsszenarios: A_ist = Ausgleichsraum W_ist = Wohngebiet G_ist = Gewerbegebiet S_ist = Straßenraum, Plätze</p>
EntwickFL	-	<p>1 = Entwicklungsfläche</p>
ha_KL_EWB	Hektar	Flächengröße des Kaltlufteinwirkbereichs im Wirkraum
PROZ_KL_EWB	Prozent	Prozentualer Anteil des Kaltlufteinwirkbereichs im Wirkraum
EntBew3	-	<p>Stadtklimatische Verträglichkeit der städtebaulichen Entwicklungsflächen</p> <p>0 = keine Entwicklungsfläche 2 = Entwicklung ohne weitere Maßnahmen stadtklimatisch verträglich 3 = Konkretisierung i.d.R. durch eine verbal-argumentative Stellungnahme auf Basis der Stadtklimaanalyse möglich 4 = Nachweis der Klimaverträglichkeit über ein Detailgutachten zu den vorhabenbezogenen Auswirkungen 5 = Entwicklung aus klimatischer Sicht nicht empfehlenswert</p>
Sensi_Ort	-	Sensible Nutzung / Einrichtung an denen sich vulnerable Bevölkerungsgruppen (Kleinkinder, ältere Menschen) aufhalten
Hohe_EWO	-	1 = hohe Einwohnerdichte oder -anzahl (ab 100 Einwohner pro Baublock oder Bevölkerungsdichte über 200 Einwohner pro Hektar)
Sensi_KL	-	Sensitivität des Baublocks
DEZ_KL8	-	Dezil des Indikators „Hochaltrige“ (Personen ab 75 Jahren)
DEZ_KL7	-	Dezil des Indikators „Senioren“ (Personen > 65 bis 75 Jahren)
DEZ_KL1	-	Dezil des Indikators „Kleinkinder“ (Kinder unter 6 Jahren)



Quellenverzeichnis

AN DER HEIDEN, M.; MOTHERS, 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.

AUGTER, G. (1997): BERECHNUNG DER HÄUFIGKEITEN WINDSCHWACHER STRAHLUNGSNÄCHTE UND WINDSCHWACHER ABKÜHLUNGSNÄCHTE. DEUTSCHER WETTERDIENST.

BBSR (2015): ÜBERFLUTUNGS- UND HITZEVORSORGE DURCH DIE STADTENTWICKLUNG. STRATEGIEN UND MAßNAHMEN ZUM REGENWASSERMANAGEMENT GEGEN URBANE STURZFLUTEN UND ÜBERHITZTE STÄDTE.

BECKER, C., A. HERRMANN, W. E. HAEFELI, K. RAPP, U. LINDEMANN (2019): NEUE WEGE ZUR PRÄVENTION GESUNDHEITLICHER RISIKEN UND DER ÜBERSTERBLICHKEIT VON ÄLTEREN MENSCHEN BEI EXTREMER HITZE. IN: BUNDESGESUNDHEITSBLATT 62, S. 565-570.

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](https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286)

BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT HAMBURG (2012): STADTKLIMAANALYSE UND KLIMAWANDELSZENARIO ZUM LANDSCHAFTSPROGRAMM HAMBURG.

BfN (2016) – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (HRSG.): URBANES GRÜN IN DER DOPPELTEN INNENENTWICKLUNG. BfN-SKRIP-TEN 444.

BMVI (2016): HANDLUNGSHILFE KLIMAWANDELGERECHTER REGIONALPLAN. ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSPROJEKTES KLIM-REG FÜR DIE PRAXIS: SCHRIFTENREIHE: MORO-PRAXIS. BMVI.

BODEN T.A., MARLAND G., ANDRES R.J. (2017): GLOBAL, RE-GIONAL, AND NATIONAL FOSSIL-FUEL CO2 EMISSIONS. CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER, OAK RIDGE NATION-AL LABORATORY, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, OAK RIDGE, TENN., U.S.A.

BUNDESREGIERUNG (2004): ARBEITSSTÄTTENVERORDNUNG (ARBSTÄTTV).

BUNDESREGIERUNG (2008): DEUTSCHE ANPASSUNGSSTRATEGIE AN DEN KLIMAWANDEL.

BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (2009): BAYERISCHE KLIMA-ANPASSUNGSSTRATEGIE (BAYKLAS).

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.



CHEN, YEN-CHANG; TAN, CHIH-HUNG; WEI, CHIANG; SU, ZI-WEN (2014): COOLING EFFECT OF RIVERS ON METROPOLITAN TAIPEI USING REMOTE SENSING. IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH 11 (2), S. 1195–1210. DOI: 10.3390/IJERPH110201195.

CLC (2017): CORINE LANDCOVER 2018. TECHNICAL GUIDELINES. [HTTPS://LAND.COPERNICUS.EU/USER-CORNER/TECHNICAL-LIBRARY/CLC2018TECHNICALGUIDELINES_FINAL.PDF](https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc2018technicalguidelines_final.pdf)

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](https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien)

DONAT M. G., LECKEBUSCH G. C., PINTO J. G., ULBRICH U. (2010): EUROPEAN STORMINESS AND ASSOCIATED CIRCULATION WEATHER TYPES: FUTURE CHANGES DEDUCED FROM A MULTI-MODEL ENSEMBLE OF GCM SIMULATIONS. CLIMATE RESEARCH 42:27–43.

DWD (2014): MUKLIMO_3 MODELL.

DWD (2020): NATIONALER KLIMAREPORT, KLIMA – GESTERN, HEUTE UND IN DER ZUKUNFT.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2020A): NATIONALER KLIMA-REPORT. 4. KORRIGIERTE AUFLAGE. STAND ERRATA 8. JUNI 2020.

DWD (2022A): DATENBASIS: DEUTSCHER WETTERDIENST, BEOBACHTUNGSDATEN. FREIER ONLINE-ZUGANG ZU KLIMADATEN: [FTP://OPENDATA.DWD.DE/CLIMATE_ENVIRONMENT/CDC/OBSERVATIONS_GERMANY/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/cdc/observations_germany/)

DWD (2022B): DATENBASIS: DEUTSCHER WETTERDIENST, RASTERDATEN. [FTP://OPENDATA.DWD.DE/CLIMATE_ENVIRONMENT/CDC/GRIDS_GERMANY/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/cdc/grids_germany/)

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2022C): ANALYSEN RADARBASIERTER STÜNDLICHER (RW) UND TÄGLICHER (SF) NIEDERSCHLAGSHÖHEN (HOMEPAGE).

ONLINE: [HTTPS://WWW.DWD.DE/DE/LEISTUNGEN/RADOLAN/RADOLAN.HTML](https://www.dwd.de/de/leistungen/radolan/radolan.html) (ABRUF 22.11.2022).

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2022D): WETTERLEXIKON (HOMEPAGE).

ONLINE: [WWW.DWD.DE/DE/SERVICE/LEXIKON/LEXIKON_NODE.HTML](http://www.dwd.de/de/service/lexikon/lexikon_node.html) (ABRUF 22.11.2022).

DWD (2023): DATENBASIS: DEUTSCHER WETTERDIENST, RASTERDATEN. ONLINE: [HTTPS://OPENDATA.DWD.DE/CLIMATE_ENVIRONMENT/CDC/GRIDS_GERMANY/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/cdc/grids_germany/)

FANGER, P.O. (1972): THERMAL COMFORT, ANALYSIS AND APPLICATION IN ENVIRONMENT ENGINEERING. NEW YORK: MCGRAW HILL.

FINK A. H., POHLE S., PINTO J. G., KNIPPERTZ P. (2012): DIAG-NOSING THE INFLUENCE OF DIABATIC PROCESSES ON THE EXPLOSIVE DEEPENING OF EXTRATROPICAL CYCLONES. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 39:L07803.



FREIE HANSESTADT BREMEN (2013): KLIMAANALYSE FÜR DAS STADTGEBIET DER HANSESTADT BREMEN. [HTTPS://WWW.LAPRO-BREMEN.DE/ASSETS/LAPRO-PLAN/FB_STADTKLIMA_2013/2_12_013_BREMEN_KLIMAANALYSE_REV02_AUG2013.PDF](https://www.lapro-bremen.de/assets/lapro-plan/fb_stadtklima_2013/2_12_013_bremen_klimaanalyse_rev02_aug2013.pdf)

FÜRST, D. UND SCHOLLES, F. (HG.) (2008): HANDBUCH THEORIEN UND METHODEN DER RAUM- UND UMWELTPLANUNG. DORTMUND: DOROTHEA ROHN, 3.AUFLAGE.

GAEDE, M. UND HÄRTLING, J. (2010): UMWELTBEWERTUNG UND UMWELTPRÜFUNG. BRAUNSCHWEIG: WESTERMANN.

GEO-NET (2021), BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.): LANDESWEITE SCHUTZGUTKARTE KLIMA/LUFT FÜR DIE LANDSCHAFTSRAHMENPLANUNG. ONLINE VERFÜGBAR: [HTTPS://WWW.LFU.BAYERN.DE/DOWNLOAD/NATUR/SCHUTZ-GUTKARTEN/KLIMALUFT_ABSCHLUSSBERICHT.PDF](https://www.lfu.bayern.de/download/natur/schutz-gutkarten/klimaluft_abschlussbericht.pdf)

GIORGI F., JONES C., ASRAR G. R. (2009): ADDRESSING CLIMATE INFORMATION NEEDS AT THE REGIONAL 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: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0295.

GROSS, G. (2012): EFFECTS OF DIFFERENT VEGETATION ON TEMPERATURE IN AN URBAN BUILDING ENVIRONMENT. MICROSCALE NUMERICAL EXPERIMENTS, METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT, VOL. 21, NO. 4, 399-412.

GROSS, G. (2012): NUMERICAL SIMULATION OF GREENING EFFECTS FOR IDEALISED ROOFS WITH REGIONAL CLIMATE FORCING, METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT, VOL. 21, NO. 2, 173-181.

GROSS, G. (2013): ON THE PARAMETRIZATION OF URBAN LAND USE IN MESOSCALE MODELS, BOUNDARY-LAYER METEOROL (2014) 150:319-326.

GROSS G. (2016): DISPERSION OF TRAFFIC EXHAUSTS EMITTED FROM A STATIONARY LINE SOURCE VERSUS INDIVIDUAL MOVING CARS – A NUMERICAL COMPARISON, METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT.

GROSS, G. (2017): SOME EFFECTS OF WATER BODIES ON THE N ENVIRONMENT – NUMERICAL EXPERIMENTS, JOURNAL OF HEAT ISLAND INSTITUTE INTERNATIONAL VOL. 12-2.



HLNUG - HESSISCHE LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (HRSG., 2022): INTERAKTIVE ENTSCHEIDUNGSHILFE – CHECKLISTEN UND EINFÜHRUNG IN METHODEN DER STADTKLIMAANALYSE. UNTER MITARBEIT VON INFRASTRUKTUR & UMWELT, PROFESSOR BÖHM UND PARTNER. HESSISCHES LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE, FACHZENTRUM KLIMAWANDEL UND ANPASSUNG. ONLINE: [HTTPS://WWW.HLNUG.DE/FILEADMIN/DOKUMENTE/KLIMA/HANDLUNGSHILFEN/INTERAKTIVE_ENTSCHEIDUNGSHILFE_STADTKLIMAANALYSEN.PDF](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/handlungshilfen/interaktive_entscheidungshilfe_stadtklimaanalysen.pdf)

HLNUG - HESSISCHE LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (HRSG., 2019): KLIMPRAX STADTKLIMA. HANDLUNGSLEITFADEN ZUR KOMMUNALEN KLIMAAANPASSUNG IN HESSEN -HITZE UND GESUNDHEIT-. 167 S.

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.

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.

JACOBEIT, J. (1986). STADTKLIMATOLOGIE VON AUGSBURG UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER LUFTHYGIENISCHEN SITUATION SOWIE DES LÄRMS: FORSCHUNGSPROJEKT IM AUFTRAG UND MIT FÖRDERUNG DER STADT AUGSBURG.

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](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 CLIMATECHANGE IN GERMANY – DATA, PRODUCTS AND SERVICES OF GERMANY`S NATIONAL CLIMATE DATA CENTRE. ADV. SCI. RES., 10, 99–106

KRAUSER ET AL. (2018): TROPENNÄCHTE - FORSCHER BELEGEN: DARUM SCHWITZEN DIE BASLER IN SOMMERNÄCHTEN STÄRKER KRAUSER, HELENA AND FEIGENWINTER, CHRISTIAN AND WICKI, ANDREAS. (24 AUGUST 2018) TROPENNÄCHTE - FORSCHER BELEGEN: DARUM SCHWITZEN DIE BASLER IN SOMMERNÄCHTEN STÄRKER. BZ BASEL. P. 1. LIESTAL.

KUTTLER, W. (2013): KLIMATOLOGIE. PADERBORN: UTB, 2. AUFLAGE.

LINKE C. ET AL. (2016): LEITLINIEN ZUR INTERPRETATION REGIONALER KLIMAMODELLDATEN DES BUND-LÄNDER-FACHGESPRÄCHES „INTERPRETATION REGIONALER KLIMAMODELLDATEN“, POTSDAM.



LFU (2002): METHODIKBAND ZUR ERSTELLUNG VON LANDSCHAFTSENTWICKLUNGSKONZEPTEN (LEK) IN BAYERN. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT. INTERNE ARBEITSANLEITUNG.

LFU (2009): LUFTHYGIENISCHER JAHRESBERICHT 2009. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT.

LFU (2020): DAS BAYERISCHE KLIMAPROJEKTIONSENSEMBLE. AUDIT UND ENSEMBLEBILDUNG. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT. SCHRIFTENREIHE: UMWELTSPEZIAL.

LFU (2020A): EMISSIONSKATASTER GENEHMIGUNGSBEDÜRFTIGE ANLAGEN. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT.

LFU (2020B): MÜNDLICHE ABSPRACHE, GEO-NET/BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT.

LFU (2021): KLIMAREPORT BAYERN 2021. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT. SCHRIFTENREIHE: UMWELTSPEZIAL.

LFU (2021A): BAYERNS KLIMA IM WANDEL – KLIMAREGION SÜDBAYERISCHES HÜGELLAND. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT.

LFU (2021B): KLIMA IN BAYERN. [HTTPS://WWW.LFU.BAYERN.DE/KLIMA/KLIMAWANDEL/KLIMA_IN_BAYERN/INDEX.HTM](https://www.lfu.bayern.de/klima/klimawandel/klima_in_bayern/index.htm) (ABRUF: 22.11.2022)

LANUV (2018): KLIMAANALYSE NORDRHEIN-WESTFALEN. SCHRIFTENREIHE: LANUV-FACHBERICHT 86.

LAUREANT 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.

LEP HESSEN (2021): LANDESWEITE KLIMAANALYSE HESSEN. [HTTPS://LANDESPLANUNG.HESSEN.DE/INFORMATIONEN/ANPASSUNG-AN-DEN-KLIMAWANDEL/LANDESWEITE-KLIMAANALYSE-GUTACHTEN](https://landesplanung.hessen.de/informationen/anpassung-an-den-klimawandel/landesweite-klimaanalyse-gutachten)

MARONGA ET AL. (2020): REVIEW OF THE PALM MODEL SYSTEM 6.0, GEOSCI. MODEL DEV., 13, 1335-1372.

MAYER, H.; BECKRÖGE, W. ; MATZARAKIS, A. (1994): BESTIMMUNG VON STADTKLIMARELEVANTEN LUFTLEITBAHNEN. UVP-REPORT 5/94, S. 265-268.

MCDONALD R. E. (2011): UNDERSTANDING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON NORTHERN HEMISPHERE EXTRA-TROPICAL CYCLONES. CLIMATE DYNAMICS 37:1399-1425.

MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2012): HANDBUCH STADTKLIMA. MAßNAHMEN UND HANDLUNGSKONZEPTE FÜR STÄDTE UND BALLUNGSRÄUME ZUR ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL.

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU BADEN-WÜRTTEMBERG (2011): STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL. HINWEISE FÜR DIE BAULEITPLANUNG.

MOORE, G. E. (1903): PRINCIPIA ETHICA. DITZINGEN: REKLAM.



MOSIMANN ET AL. (1998): SCHUTZGUT KLIMA/LUFT IN DER LANDSCHAFTSPLANUNG. BEARBEITUNG DER KLIMA- UND IMMISSIONSÖKOLOGISCHEN INHALTE IM LANDSCHAFTSRAHMENPLAN UND LANDSCHAFTSPLAN. SCHRIFTENREIHE: INFORMATIONSDIENT NATURSCHUTZ NIEDERSACHSEN. NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE.

MPELASOKA F.S.; CHIEW F.H. (2009): INFLUENCE OF RAINFALL SCENARIO CONSTRUCTION METHODS ON RUNOFF PROJECTIONS. J. HYDROMETEOR., 10, 1168–1183.

MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARD K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VAN VUUREN D. P., CARTER T. R., EMORI S., KAINUMA M., KRAM T., MEEHL G. A., MITCHELL J. F. B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S. J., STOUFFER R. J., THOMSON A. M., WEYANT J. P., WILBANKS T. J. (2010): THE NEXT GENERATION OF SCENARIOS FOR CLIMATE CHANGE RE-SEARCH AND ASSESSMENT. NATURE 463, 747–756.

PETERS G.P., ANDREW R.M., BODEN T., CANADELL J.G., CIAIS P., LE QUÉRE 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

PINTO J. G., RYERS M. (2017): WINDE UND ZYKLONEN. IN: BRAS-SEUR G., JACOB D., SCHUCK-ZÖLLER S. (HRSG.) (2017): KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND.

PINTO J. G., ZACHARIAS S., FINK A. H., LECKEBUSCH G. C., UL-BRICH U. (2009): FACTORS CONTRIBUTING TO THE DEVELOPMENT OF EXTREME NORTH ATLANTIC CYCLONES AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE NAO. CLIMATE DYNAMICS 32:711–737

OKE (2017): URBAN CLIMATES. CAMBRIDGE: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

R CORE TEAM (2019): R: A LANGUAGE AND ENVIRONMENT FOR STATISTICAL COMPUTING. R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING, VIENNA, AUSTRIA.

RAUTHE M., MALITZ G., GRATZKI A., BECKER A. (2014): STARKREGEN. IN: BECKER P., HÜTTL R. F. (HRSG.): FORSCHUNGSFELD NATURGEFAHREN. POTSDAM UND OFFENBACH, S. 112.

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

SANDHOLZ 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 WORKING-PAPER.

SCHÄDELER, G.; LOHMEYER, A. (1994): SIMULATION OF NOCTURNAL DRAINAGE FLOWS ON PERSONAL COMPUTERS. METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT. 3, 167-171.

SCHÄR, CH., CH. FREI, D. LÜTHI, H.C. DAVIES (1996): SURROGATE CLIMATE-CHANGE SCENARIOS FOR REGIONAL CLIMATE MODELS. GEOPHYS. RES. LETT. 23, 669-672.



SCHLÜNZEN, K. H. ET AL. (2018): STADTKLIMA IN HAMBURG. IN: VON STORCH H., MEINKE I., CLAUßEN M. (EDS) HAMBURGER KLIMABERICHT – WISSEN ÜBER KLIMA, KLIMAWANDEL UND AUSWIRKUNGEN IN HAMBURG UND NORDDEUTSCHLAND. SPRINGER SPEKTRUM, BERLIN, HEIDELBERG.

SIEVERS, U. (2005): DAS KALTLUFTABFLUSSMODELL KLAM_21. BERICHT DES DWD 227, OFFENBACH.

STACHOWIAK, H. (1973): ALLGEMEINE MODELLTHEORIE. WIEN: SPRINGER.

STADT AUGSBURG – UMWELTAMT (2022): KLIMAWANDEL-ANPASSUNGSKONZEPT FÜR DIE STADT AUGSBURG (KASA)-TEIL 2: STRAGETIEN, CONTROLLING, VERSTETIGUNG UND KOMMUNIKATION

STADT JENA (2016): BÄUME IN JENA. STADT- UND STRAßENBÄUME IM KLIMAWANDEL. SCHRIFTEN ZUR STADTENTWICKLUNG NR. 7.

STADT KARLSRUHE (2014): STÄDTEBAULICHER RAHMENPLAN KLIMAAANPASSUNG. [HTTPS://WWW.KARLSRUHE.DE/B3/BAUEN/PROJEKTE/KLIMAAANPASSUNG.DE](https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de)

STADT ZÜRICH (2020): FACHPLANUNG HITZEMINDERUNG. [HTTPS://WWW.STADT-ZUERICH.CH/TED/DE/INDEX/GSZ/PLANUNG-UND-BAU/FACHPLANUNG-HITZEMINDERUNG.HTML](https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html)

STMUV (2015): KLIMASCHUTZPROGRAMM BAYERN 2050. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ.

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/](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. UMWELTBUNDEAMT.

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#GESUNDHEITSRI-SIKO-HITZE](https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze)



UMWELTSTATION AUGSBURG (2022): BÄCHE UND KANÄLE IN AUGSBURG. <https://www.wasserleben-augsburg.de/bachsteckbriefe/>, BESUCHT AM: 12.12.2022

URBAN H. & STEININGER K.W. (2015): MANUFACTURING AND TRADE: LABOUR PRODUCTIVITY LOSSES. IN: STEININGER K., KÖNIG M., BEDNAR-FRIEDL B., LOIBL W., KRANZL L., PRETTENTHALER F., HAAS W., FORMAYER H., GOETZL M., ZULKA K. 2015:ECONOMIC EVALUATION OF CLIMATE CHANGE IMPACTS – DEVELOPMENT OF A CROSS-SECTORAL FRAMEWORK AND RESULTS FOR AUSTRIA. BASEL: 301–322.

VDI (2003): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.5: UMWELTMETEOROLOGIE. LOKALE KALTLUFT.

VDI (2004) VDI-RICHTLINIE 3787, BL.9: UMWELTMETEOROLOGIE. BERÜCKSICHTIGUNG VON KLIMA UND LUFTHYGIENE IN RÄUMLICHEN PLANUNGEN.

VDI (2008) VDI-RICHTLINIE 3785, BL.1: UMWELTMETEOROLOGIE. METHODIK UND ERGEBNISDARSTELLUNG VON UNTERSUCHUNGEN ZUM PLANUNGSRELEVANTEN STADTKLIMA.

VDI (2008A) VDI-RICHTLINIE 3785, BL.2: UMWELTMETEOROLOGIE. METHODEN ZUR HUMAN-BIOMETEOROLOGISCHEN BEWERTUNG VON KLIMA UND LUFTHYGIENE FÜR DIE STADT- UND REGIONALPLANUNG - TEIL I: KLIMA.

VDI (2015): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.1: UMWELTMETEOROLOGIE. KLIMA- UND LUFTHYGIENEKARTEN FÜR STÄDTE UND REGIONEN.

VDI (2017): VDI-RICHTLINIE 3783, BL.7: UMWELTMETEOROLOGIE. PROGNOTISCHE 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.

ZAMG – ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2022): STARKNIEDERSCHLAG. ONLINE: [HTTPS://WWW.ZAMG.AC.AT/CMS/DE/KLIMA/INFORMATIONSPORTAL-KLIMAWANDEL/KLIMAVERGANGENHEIT/NE-OKLIMA/STARKNIEDERSCHLAG](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/ne-oklima/starkniederschlag) (ABRUF 22.11.2022)



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 10.11.2023

Erstellt von:

Lara Wichmann

Lara Wichmann (M.Sc. Landschaftswissenschaften)

Geprüft von:

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



Anhang I: Klimawandel in Dietzenbach

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

	GCM	RCM	Historical	RCP 4.5	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