

Stadtklimaanalyse Augsburg Endbericht



Auftraggeberin



Stadt Augsburg

Stadt Augsburg

Referat für Nachhaltigkeit, Umwelt, Klima und Gesundheit
Rathausplatz 1
86150 Augsburg

Projektbegleitung durch:

Umweltamt	Stadtplanungsamt
Schießgrabenstraße 4	Rathausplatz 1
86150 Augsburg	86150 Augsburg

Auftragnehmer



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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



gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Das Projekt wurde im Rahmen der Förderrichtlinien Kommunaler Klimaschutz – KommKlimaFÖR durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert.





Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
GLOSSAR	X
ZUSAMMENFASSUNG	1
1. HINTERGRUND UND ANLASS	4
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN.....	6
2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	6
2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE	10
2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK	13
3. BEARBEITUNGS- UND BETEILIGUNGSPROZESS	19
4. KLIMA UND KLIMAWANDEL IM RAUM AUGSBURG	22
4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN.....	22
4.2 KLIMA IN GEGENWART UND VERGANGENHEIT.....	26
4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN.....	30
4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN	30
5. ANALYSEMETHODEN – NUMERISCHE MODELLIERUNG	41
5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D.....	41
5.2 SZENARIENENTWICKLUNG	45
5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN.....	48
5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN	61
5.5 MODELLAUSGABEBEGRÖßEN	63
5.6 QUALITÄTSSICHERUNG	64
5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN.....	65
6. ANALYSEERGEBNISSE – NUMERISCHE MODELLIERUNG	69
6.1 NACHTSITUATION.....	69
6.2 TAGSITUATION.....	88
7. KLIMAANALYSEKARTEN.....	95
8. BEWERTUNGSKARTEN UND PLANUNGSHINWEISKARTE	103
8.1 GRUNDLAGEN.....	103
8.2 GEOMETRISCHE BASIS.....	104
8.3 BEWERTUNGSKARTEN	105
8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA	121
8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN	129
8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM	157



QUELLENVERZEICHNIS 165

ANHANG I: KLIMAWANDEL IN AUGSBURG 174

METHODIK..... 174

BEOBACHTETE KLIMAVÄNDERUNGEN 176

TEMPERATURZUNAHME UND HITZE 177

NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG 178

TROCKENHEIT 179

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 10$ MM/D) 180

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 20$ MM/D) 180

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 30$ MM/D) 181

STURM..... 181

ANHANG II: ÄNDERUNG DER MODELLPARAMETER IM ZUKUNFTSSZENARIO GEGENÜBER DEM STATUS QUO 182

ANHANG III: WICHTIGE INFORMATION FÜR DIE STADT- BZW. BAULEITPLANUNG 188



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 2020) 6

ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018)..... 7

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) 8

ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ UND SETT 2019). 9

ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION ZWISCHEN 2001 UND 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)..... 10

ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)). 11

ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) 14

ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) 15

ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLUNG 2022) 16

ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE 19

ABBILDUNG 11: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB (RF = RADIATIVE FORCING) DER VERSCHIEDENEN IPCC-KLIMASZENARIEN (DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE; CUBASCH ET AL. 2013)..... 24

ABBILDUNG 12: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS..... 26

ABBILDUNG 13: KLIMADIAGRAMM DER STADT AUGSBURG FÜR DEN REFERENZZEITRAUM 1991 – 2020 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B). 26

ABBILDUNG 14: ENTWICKLUNG DER MITTELTEMPERATUR IN AUGSBURG IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B). 27

ABBILDUNG 15: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JÄHRLICHEN ANZAHL AN TAGEN MIT EINEM NIEDERSCHLAG > 30 MM IN AUGSBURG (NACH DWD 2022B)..... 29

ABBILDUNG 16: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN AUGSBURG FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION AUGSBURG (DWD 2022A). .. 29

ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN AUGSBURG (72,5 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION AUGSBURG (DWD 2022A)..... 30

ABBILDUNG 18: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN AUGSBURG (ALLE RCP-SZENARIEN). 31

ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN AUGSBURG (RCP 8.5)... 32

ABBILDUNG 20: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN AUGSBURG (RCP 8.5)..... 35

ABBILDUNG 21: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN AUGSBURG (RCP 8.5) 36

ABBILDUNG 22: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN PRO JAHR MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG (N ≥ 20 MM/D) IN AUGSBURG (ALLE SZENARIEN)..... 37

ABBILDUNG 23: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT N ≥ 30 MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN AUGSBURG (RCP 8.5). 40



ABBILDUNG 24: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN (TSURF = „SURFACE TEMPERATURE“) FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D..... 44

ABBILDUNG 25: 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 45

ABBILDUNG 26. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE) 47

ABBILDUNG 27: MODELLGEBIET SOWIE HERVORGEHOBEN DAS GEBIET DER STADT AUGSBURG (QUELLE DES LUFTBILDES: ESRI, MAXAR, EARTHSTAR GEOGRAPHICS, AND THE GIS USER COMMUNITY) 49

ABBILDUNG 28: ARBEITSSCHRITTE ZUR IDENTIFIKATION VON BAUMSTANDORTEN ANHAND VON NDVI-WERTEN UND STRUKTURHÖHEN. 51

ABBILDUNG 29: BERÜCKSICHTIGTE BAUFLÄCHEN- UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE FÜR DAS KLIMATISCHE ZUKUNFTSSZENARIO 2040 MIT KONKRETER UMSETZUNG AUS ZUM TEIL RECHTSKRÄFTIGEN B-PLÄNEN UND KONZEPTENTWÜRFEN (SCHWARZ) SOWIE DURCH MISCHPIXELANSATZ (BLAU) 53

ABBILDUNG 30: BEISPIELHAFT ÜBERFÜHRUNG DER INFORMATIONEN EINES B-PLANS UND EINES STÄDTEBAULICHEN ENTWURFS IN DAS FITNAH-NUTZUNGSRASTER ANHAND DES B-PLANS BP 482 „ZWISCHEN HOLZBACH UND STADTJÄGERSTRASSE“ 55

ABBILDUNG 31: SCHAUBILD ZUR IDENTIFIZIERUNG VON FLÄCHENZWILLINGEN ZUR RANDOMISIERTEN BEFÜLLUNG DER MISCHPIXELFLÄCHEN 1001 UND 1007 (JEWEILS HELLBLAU UMRANDET). 57

ABBILDUNG 32: DIGITALES GELÄNDEMOMENT FÜR AUGSBURG UND UMGEBUNG (REFERENZ- UND ZUKUNFTSSITUATION AUF RASTEREBOENE). 58

ABBILDUNG 33: KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG / STADTSTRUKTUR DER BESTANDSSITUATION IN AUGSBURG UND UMGEBUNG (REFERENZSITUATION AUF RASTEREBOENE). 59

ABBILDUNG 34: KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG / STADTSTRUKTUR DER BESTANDSSITUATION IN AUGSBURG UND UMGEBUNG (ZUKUNFTSSITUATION AUF RASTEREBOENE). 60

ABBILDUNG 35: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992) 61

ABBILDUNG 36: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION (BLAUE KURVE) SOWIE FÜR DAS SZENARIO „STARKER“ KLIMAWANDEL (ROT). 62

ABBILDUNG 37: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 73

ABBILDUNG 38: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 74

ABBILDUNG 39: PRINZIPSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM..... 75

ABBILDUNG 40: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTEN VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 79

ABBILDUNG 41: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTEN VON 04 UHR IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 80

ABBILDUNG 42: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 82

ABBILDUNG 43: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 83



ABBILDUNG 44: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 86

ABBILDUNG 45: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 04 UHR IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 87

ABBILDUNG 46: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 89

ABBILDUNG 47: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 94

ABBILDUNG 48: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN. ZUKÜNFTIG NEU ENTSTANDENE KALTLUFTLEITBAHNEN SIND IN DER KLIMAANALYSEKARTE DES SZENARIOS ROT UMRANDET DARGESTELLT. 96

ABBILDUNG 49: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN, DER LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN UND DER PARKWINDE (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG). 98

ABBILDUNG 50: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS..... 100

ABBILDUNG 51: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM ZUKUNFTSSZENARIO 2040 FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 102

ABBILDUNG 52: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE. 104

ABBILDUNG 53: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) 106

ABBILDUNG 54: BEWERTUNGSSHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION. 109

ABBILDUNG 55: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM. 110

ABBILDUNG 56: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 114

ABBILDUNG 57: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 115

ABBILDUNG 58: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 119

ABBILDUNG 59: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 120

ABBILDUNG 60: PHK-LEGENDENTEIL ZU DEMOGRAFISCHEN INFORMATIONEN. 122

ABBILDUNG 61: PHK-LEGENDENTEIL MIT INFORMATIONEN ZU (POTENZIELLEN) ENTLASTUNGSRÄUMEN..... 124

ABBILDUNG 62: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN AUSSCHNITT DES AUGSBURGER STADTGEBIETS. 128

ABBILDUNG 63: PHK-AUSSCHNITT FÜR PFERSEE-MITTE – BEREICH AUGSBURGER STRAÙE (LEGENDE: S. ABBILDUNG 62). 144

ABBILDUNG 64: BEWERTUNGSKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND BEWERTUNGSKARTE TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT PFERSEE-MITTE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 56 BZW. ABBILDUNG 58)..... 145

ABBILDUNG 65: KLIMAANALYSEKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND PET TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT PFERSEE-MITTE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 50 BZW. ABBILDUNG 46). 146

ABBILDUNG 66: LANDNUTZUNG DES IST-ZUSTANDS (LINKS) UND ZUGEHÖRIGES LUFTBILD VON 2020 (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT PFERSEE-MITTE (LEGENDE DER LANDNUTZUNG: S. ABBILDUNG 33). 146

ABBILDUNG 67: AUSZUG VON MAÙNAHMENVORSCHLÄGEN FÜR DEN UNTERSUCHUNGSRAUM PFERSEE-MITTE..... 147



ABBILDUNG 68: PHK-AUSSCHNITT DER ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHEN IM NORDEN DER HAMMERSCHMIEDE (LEGENDE: S. ABBILDUNG 62).	148
ABBILDUNG 69: BEWERTUNGSKARTE NACHT, ZUKUNFTSSZENARIO (LINKS) UND BEWERTUNGSKARTE TAG, ZUKUNFTSSZENARIO (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHEN IM NORDEN DER HAMMERSCHMIEDE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 57 BZW. ABBILDUNG 59).	149
ABBILDUNG 70: KLIMAANALYSEKARTE NACHT, ZUKUNFTSSZENARIO (LINKS) UND PET TAG, ZUKUNFTSSZENARIO (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHEN IM NORDEN DER HAMMERSCHMIEDE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 51 BZW. ABBILDUNG 47).	149
ABBILDUNG 71: KVSD DES ZUKUNFTSSZENARIOS (LINKS) UND DES IST-ZUSTANDES (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHEN IM NORDEN DER HAMMERSCHMIEDE (LEGENDE: S. ABBILDUNG 41 BZW. ABBILDUNG 40).	150
ABBILDUNG 72: LANDNUTZUNG DES ZUKUNFTSSZENARIOS (LINKS) UND DAS LUFTBILD VON 2020 (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHEN IM NORDEN DER HAMMERSCHMIEDE (LEGENDE DER LANDNUTZUNG: S. ABBILDUNG 34).	150
ABBILDUNG 73: PHK-AUSSCHNITT DER NEUBURGER STRAÙE – BEREICH ZWISCHEN HANS-BÖCKLER-STRAÙE UND KLAUSSTRAÙE (LEGENDE: S. ABBILDUNG 62).	151
ABBILDUNG 74: BEWERTUNGSKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND BEWERTUNGSKARTE TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER NEUBURGER STRAÙE – BEREICH ZWISCHEN HANS-BÖCKLER-STRAÙE UND KLAUSSTRAÙE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 56 BZW. ABBILDUNG 58).	152
ABBILDUNG 75: KLIMAANALYSEKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND PET TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER NEUBURGER STRAÙE – BEREICH ZWISCHEN HANS-BÖCKLER-STRAÙE UND KLAUSSTRAÙE (LEGENDEN S. ABBILDUNG 50 BZW. ABBILDUNG 46).	152
ABBILDUNG 76: LANDNUTZUNG DES IST-ZUSTANDS (LINKS) UND ZUGEHÖRIGES LUFTBILD VON 2020 (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER NEUBURGER STRAÙE – BEREICH ZWISCHEN HANS-BÖCKLER-STRAÙE UND KLAUSSTRAÙE (LEGENDE DER LANDNUTZUNG: S. ABBILDUNG 33).	153
ABBILDUNG 77: MAÙNAHMENVORSCHLÄGE FÜR DEN UNTERSUCHUNGSRAUM DER NEUBURGER STRAÙE – BEREICH ZWISCHEN HANS-BÖCKLER-STRAÙE UND KLAUSSTRAÙE.	153
ABBILDUNG 78: PHK-AUSSCHNITT FÜR DIE GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR. (LEGENDE: S. ABBILDUNG 62).	154
ABBILDUNG 79: BEWERTUNGSKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND BEWERTUNGSKARTE TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR. (LEGENDEN S. ABBILDUNG 56 BZW. ABBILDUNG 58).	155
ABBILDUNG 80: KLIMAANALYSEKARTE NACHT, IST-ZUSTAND (LINKS) UND PET TAG, IST-ZUSTAND (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR (LEGENDEN S. ABBILDUNG 50 BZW. ABBILDUNG 46).	156
ABBILDUNG 81: LANDNUTZUNG DES IST-ZUSTANDS (LINKS) UND ZUGEHÖRIGES LUFTBILD VON 2020 (RECHTS) FÜR DEN AUSSCHNITT DER GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR (LEGENDE DER LANDNUTZUNG: S. ABBILDUNG 33).	156
ABBILDUNG 82: MAÙNAHMENVORSCHLÄGE FÜR DEN UNTERSUCHUNGSRAUM DER GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR.	157
ABBILDUNG 83: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“.	158



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN ... 18

TABELLE 2: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOGISCHEN KENNTAGEN IN AUGSBURG IN DER VERGANGENHEIT (NACH DWD 2022A BZW. DWD 2022B)..... 28

TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN AUGSBURG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 32

TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN AUGSBURG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 33

TABELLE 5: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER MITTL. NIEDERSCHLAGSSUMME IN AUGSBURG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)..... 35

TABELLE 6: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN (ANZAHL TAGE PRO JAHR) SOWIE DES MAXIMALEN TAGESNIEDERSCHLAGS IN AUGSBURG (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 39

TABELLE 7: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M..... 43

TABELLE 8: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE. 48

TABELLE 9: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS IN AUGSBURG ALS BASIS FÜR DIE REFERENZSITUATION SOWIE DAS ZUKUNFTSSZENARIO..... 50

TABELLE 10: RECHTSKRÄFTIGE B-PLÄNE MIT KURZFRISTIG GEPLANTER BAULICHER UMSETZUNG, DIE IM RAHMEN DES IST-ZUSTANDS DER KLIMAANALYSE AUGSBURG BEREITS BERÜCKSICHTIGUNG FANDEN..... 52

TABELLE 11: RECHTSKRÄFTIGE B-PLÄNE UND PLANUNGSVORHABEN, DIE IM RAHMEN DES ZUKUNFTSSZENARIOS DER KLIMAANALYSE AUGSBURG BERÜCKSICHTIGUNG FANDEN. 54

TABELLE 12: LOOKUP-TABELLE MIT AUF DEN FLÄCHENZWILLINGSTYPEN IDENTIFIZIERTEN PROZENTUALEN NUTZUNGSKLASSENANTEILEN UND ZUGEHÖRIGEN MITTLEREN STRUKTURHÖHEN. DIE NUTZUNGSKLASSEN „GEBÄUDE“, „GEWÄSSER“, „NATURFERN“, „BAUM Ü. NATURFERN“ UND „GLEIS“ WURDEN BEI DER GIS-BASIERTEN ANALYSE DER FLÄCHENZWILLINGSTYPEN NICHT GEFUNDEN UND SIND DAHER DER ÜBERSICHTLICHKEIT HALBER NICHT AUFGEFÜHRT. 56

TABELLE 13: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER. 63

TABELLE 14: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT. 64

TABELLE 15: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004)..... 88

TABELLE 16: DIFFERENZEN „ZUKUNFT MINUS IST“ DER WINDGESCHWINDIGKEIT „WG“, DER KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE „KVSD“, DER KALTLUFTPRODUKTIONSRATE „KPR“, DER NÄCHTLICHEN TEMPERATUR „T04“ UND DER PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTEN TEMPERATUR AM TAGE „PET“. FÜR JEDE POTENZIALFLÄCHE (1-23) BZW. ENTWICKLUNGS- UND SIEDLUNGSRESERVEFLÄCHE (24-35) SIND FÜR JEDEN PARAMETER JEWEILS FLÄCHENMINIMUM, -MITTELWERT UND -MAXIMUM AUFGETRAGEN. 93

TABELLE 17: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN 97



TABELLE 18: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP..... 107

TABELLE 19: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP. 110

TABELLE 20: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND UND IM ZUKUNFTSSZENARIO. 113

TABELLE 21: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHN- UND GEWERBERAUM..... 121

TABELLE 22: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE HANDLUNGSPRIORITÄTEN FÜR DEN WIRKRAUM. 122

TABELLE 23: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM. 123

TABELLE 24: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE SCHUTZBEDARFE FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM..... 124

TABELLE 25: FLÄCHENANTEILE DER HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE. 125

TABELLE 26: FLÄCHENANTEILE DER SCHUTZBEDARFE IM AUSGLEICHSRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE. 126

TABELLE 27: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT AUGSBURG..... 133

TABELLE 28: METADATENSATZ ZUM VEKTORDATENSATZ (PHK, BEWERTUNGSKARTEN). 159



Glossar

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

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

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *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).

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

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

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *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 → *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 (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw. RCP



8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

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

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 → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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



Zusammenfassung

Mit der Klimaanalyse 2022 liegt nach dem Jahr 1986 nun die zweite gesamtstädtische Analyse des Augsburger Stadtklimas vor, welche durch das Stadtentwicklungskonzept (STEK, STADT AUGSBURG – Stadtplanungsamt, 2020) und das Klimawandelanpassungskonzept (KASA, STADT AUGSBURG – Umweltamt, 2022) der Stadt angeregt wurde. Hauptziel der Analyse war eine räumliche und inhaltliche Detaillierung und Konkretisierung der vorangegangenen Stadtklimastudie. Im Fokus standen dabei insbesondere der städtische Kaltluftaushalt sowie die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht, die mithilfe des methodischen Herzstücks der Analyse – einer hochaufgelösten computergestützten Modellsimulation des Augsburger Stadtklimas – untersucht wurden. Aufgrund des auch in Augsburg steigenden Einflusses des Klimawandels auf das Stadtklima wurde zudem eine Modellsimulation für den Prognosehorizont 2040 angefertigt, deren Ergebnisse ebenfalls unmittelbar in die Produkte der Klimaanalyse Einzug fanden.

Das Hauptprodukt des ca. 2-jährigen Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebundenem Maßnahmenkatalog, die in einem verwaltungsinternen, ämterübergreifenden Prozess (inklusive Workshops) unter Leitung des Umweltamtes entwickelt worden ist. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Augsburger Stadtbevölkerung sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) einen Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu. Hierbei flossen sowohl die Tag- als auch die Nachtsituation, aber auch Informationen zum Status Quo und zum Zukunftsszenario 2040 in die Bewertungsabwägung ein.

Im Vorfeld der Modellierung erfolgte innerhalb der Stadtklimaanalyse eine umfassende Aufbereitung des vergangenen und zukünftigen Klimas Augsburgs. Die Stadt weist eine Jahresmitteltemperatur von 8,9 °C und eine Jahresniederschlagssumme von 840 mm auf und ist damit um 0,4 °C kühler und um 50 mm feuchter als der bundesdeutsche Durchschnitt. Bei der Betrachtung des Augsburger Stadtklimas der Vergangenheit bis heute wird deutlich, dass die klimatische Entwicklung der Stadt den globalen Trends folgt. Hinsichtlich der mittleren Jahrestemperatur konnte seit Beginn der Messungen im 19. Jh. bis zur aktuellen Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020 eine Zunahme um 2,2 °C nachgewiesen werden, wobei die fünf wärmsten Jahre des Zeitraumes allesamt in den letzten 30 Jahren registriert wurden. So stieg auch die Zahl der temperaturinduzierten sommerlichen Kenntage wie Sommertage oder Heiße Tage in den letzten 30 Jahren merklich an. Besonders hoch ist der sommerliche Hitzestress zu windschwachen Strahlungswetterlagen, die am Tage die ungehinderte Einstrahlung auf die städtischen Flächen begünstigen und in der Nacht den Unterschied zwischen überwärmter Stadt und kühlerem Umland (Urbane Wärmeinsel) am stärksten aufzeigen. Aus diesen Gründen verwendet auch das für die Analyse genutzte Modell FITNAH-3D diese sog. autochthone Wetterlage als Randbedingung – auch in Augsburg unterliegt fast jede dritte Sommernacht diesen Witterungsbedingungen, die häufig mit Ausgleichsströmungen aus vornehmlich südwestlichen oder südöstlichen Richtungen einhergehen.

Die Interpolation des Klimas in die Zukunft bestätigt die genannten Temperaturentwicklungen ebenfalls – bis zum Ende des Jahrhunderts ist je nach betrachtetem RCP-Szenario mit einem Temperaturanstieg zwischen 0,6 °C und 4,5 °C zu rechnen, zudem ist künftig tendenziell eine Sommertrockenheit zu erwarten. In Zukunft



ist gleichzeitig davon auszugehen, dass die Intensität von klimatologischen Extremereignissen zunimmt. So wird es zwar im Schnitt weniger oft regnen, dafür werden Starkregenereignisse häufiger auftreten als im aktuellen Referenzzeitraum. Da Starkregen oftmals mit hohen Windgeschwindigkeiten einhergeht, sind häufigere Stürme zukünftig nicht auszuschließen, eine Signifikanz für diese Vermutung konnte im Rahmen dieser Analyse für Augsburg jedoch nicht festgestellt werden.

Für die Modellrechnung des Ist-Zustandes wurde eine umfangreiche Datenaufbereitung der Landnutzung, des Geländes und der Strukturhöhen auf Grundlage einer Datenbasis von 2021 in einer horizontalen Auflösung von 10 m vorgenommen, wobei zusätzlich 13 rechtskräftige Bebauungspläne (B-Pläne) eingepflegt wurden, deren Umsetzung kurz- bis mittelfristig geplant ist. Als meteorologische Randbedingungen lag dem Modell ein Sommertag mit idealisierter autochthoner Wetterlage ohne Bewölkung und eine Bodenfeuchte von 60 % zugrunde.

Für das Zukunftsszenario fand eine Modifizierung der meteorologischen Rahmenbedingungen, entsprechend des angenommenen Klimawandels statt. Hierbei erfolgte die Berücksichtigung der Erderwärmung für Augsburg anhand eines starken Temperatursignals von + 1,8 °C für 2040 im Vergleich zur aktuellen Referenzperiode, was dem zukünftig weiterhin intensiv anthropogen geprägten RCP-Szenario 8.5 – und damit einem Worst-Case-Szenario entspricht. Die zu erwartende Sommertrockenheit wurde zusätzlich mit der Absenkung der Bodenfeuchte auf 30 % modelliert. Die Modelleingangsdaten wurden durch 23 Flächen, die zum Teil aus rechtskräftigen Bebauungsplänen und Planungsvorhaben stammen sowie um 67 Blockflächen (Entwicklungsflächen) erweitert und deren Landnutzungen mithilfe des Mischpixelansatzes approximiert. Unter den Blockflächen sind auch drei größere Bereiche mit sogenannten Siedlungsreserveflächen. Dabei handelt es sich um im Stadtentwicklungskonzept (STEK, STADT AUGSBURG – Stadtplanungsamt, 2020) dargestellte und beschlossenen optionale Flächen, die bei Bedarf (in Teilbereichen) langfristig entwickelt werden können.

Die Modellergebnisse der Nacht (Ausgabezeitpunkt 04 Uhr: Temperatur, Windfeld, Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftproduktionsrate) und des Tages (Ausgabezeitpunkt 14 Uhr: Physiologisch Äquivalente Temperatur) bilden die Grundlage für Sachkarten wie die Klimaanalysekarte, für Bewertungskarten des Status Quo und des Zukunftsszenarios und schließlich für die Planungshinweiskarte, beschreiben aber bereits ihrerseits die klimaökologisch wichtigsten Prozesse der Stadt und sind in Planungsprozessen aus Klimasicht stets hinzuzuziehen. So weisen die großflächigen Agrargebiete im Außenbereich der Stadt Kaltluftentstehungsgebiete auf, deren gebildete Kaltluft insbesondere südlich der Kernstadt durch Hangab- und Flurwinde gen Norden, hin zum (belasteten) Siedlungsraum transportiert wird. Unterstützend wirken hierbei die beiden wichtigen Kaltluftleitbahnen längs der Wertach und nordwestlich des Siebentischwaldes. Während die Stadtteile Augsburgs in Randlage weniger dicht bebaut sind und ein weites Eindringen dieser entlastenden Windsysteme erlauben, nimmt die Bebauungsdichte in Richtung der Kernstadt weiter zu, was einen strömungsabbremsenden Effekt begründet. Insbesondere in den höher versiegelten Innenstadtbereichen ist daher die Verfügbarkeit eigener, mit flacher Vegetation bestandener Kaltluftproduktionsflächen geboten, ohne die Tagsituation zu vernachlässigen, bei welcher die Reduktion der Wärmebelastung insbesondere durch schattenspendende Bäume prioritär zu betrachten ist.

Dem gesamten Kartenwerk der Klimaanalyse Augsburg ist ein 21 Maßnahmen umfassender Maßnahmenkatalog angehängt, der unterstützt durch vier Anwendungsbeispiele Empfehlungen für verschiedene Räume und Anwendungsbereiche aufzeigt. Die Maßnahmen reichen vom Themenkomplex „Thermisches Wohlbefinden im Außenraum“ über die „Verbesserung der Durchlüftung“ bis zur „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“.



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

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder stadtweite Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit. Für eine möglichst eindeutige und reibungslose Handhabung des Berichts der Klimaanalyse wurde neben einem Glossar auch zusammengefasste Hinweise für die Bauleitplanung im Anhang integriert, die auf entsprechende Passagen des Endberichts verweisen. Darüber hinaus erfolgte die Anfertigung eines externen Dokumentes als Lesehilfe für das im Rahmen der Klimaanalyse erzeugten Kartenwerks.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Augsburger Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 Jahren anzustreben.



1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Klimaanalyse Augsburg 2022“ stellt die Fortschreibung und schwerpunktmäßige Neuausrichtung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalyse von Jacobeit (1986) nach heutigem Stand der Technik dar. Die Notwendigkeit einer Aktualisierung rührt vor allem daher, dass die letztmalige Analyse bereits 36 Jahre zurückliegt. Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die eine Neufassung 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).
- Die Stadt Augsburg ist eine dynamisch wachsende Stadt. Die heutige Stadtstruktur unterscheidet sich aus der klimaökologischen Perspektive wesentlich von der Grundlage der 1986er Version der Klimaanalyse.
- 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.
- Die Klimafolgenanpassung (hier die Hitzevorsorge und die Bedeutung von Kaltluft) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Als Konsequenz ist die Fortschreibung und Detaillierung der Klimaanalyse als eine übergeordnete Schlüsselmaßnahme im Klimawandel-Anpassungskonzept für die Stadt Augsburg (Stadt Augsburg – Umweltamt 2022) definiert. Die Klimaanalyse stellt somit einen wichtigen Schritt zur Umsetzung des Konzeptes dar.
- Das Stadtentwicklungskonzept (STEK, STADT AUGSBURG – Stadtplanungsamt, 2020), das 2019 vom Augsburger Stadtrat beschlossen wurde, identifiziert das Stadtklima (neu) als zentrales Handlungsfeld für die weitere Entwicklung der Stadt. Es formuliert den Auftrag, dezidierte Grundlagen für Analyse und Bewertung stadtklimatologischer Aspekte und deren Folgewirkungen auf die menschliche Gesundheit zu schaffen sowie diese Erkenntnisse in städtebaulichen Planungsprozessen zu implementieren. So formuliert das STEK bspw. im Handlungsfeld Landschaft und Umwelt die "Identifizierung urbaner Hitze-Hotspots und die Einrichtung eines Stadtklimamodells" als Schlüsselprojekt der Stadtentwicklung.

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 subsummieren:

- 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).

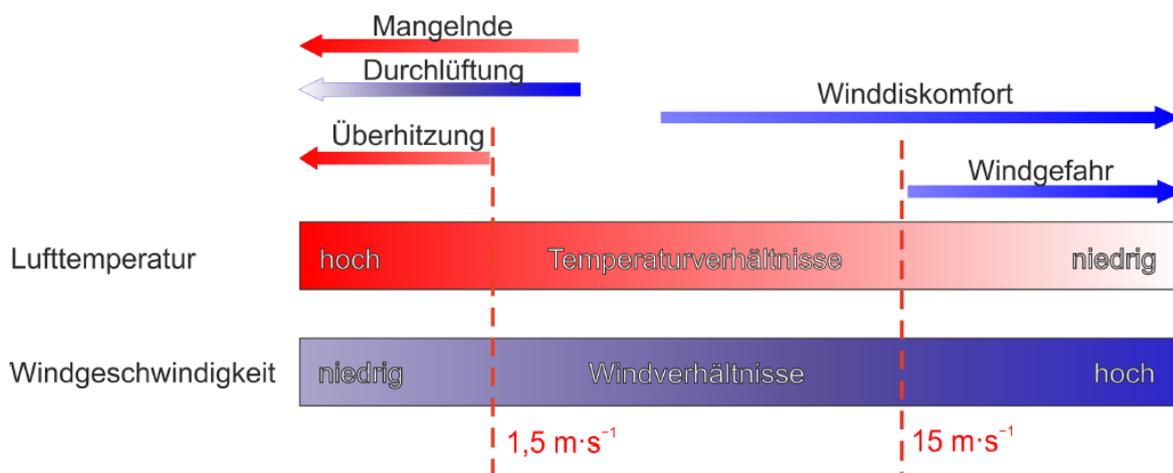


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 2020)



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 Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

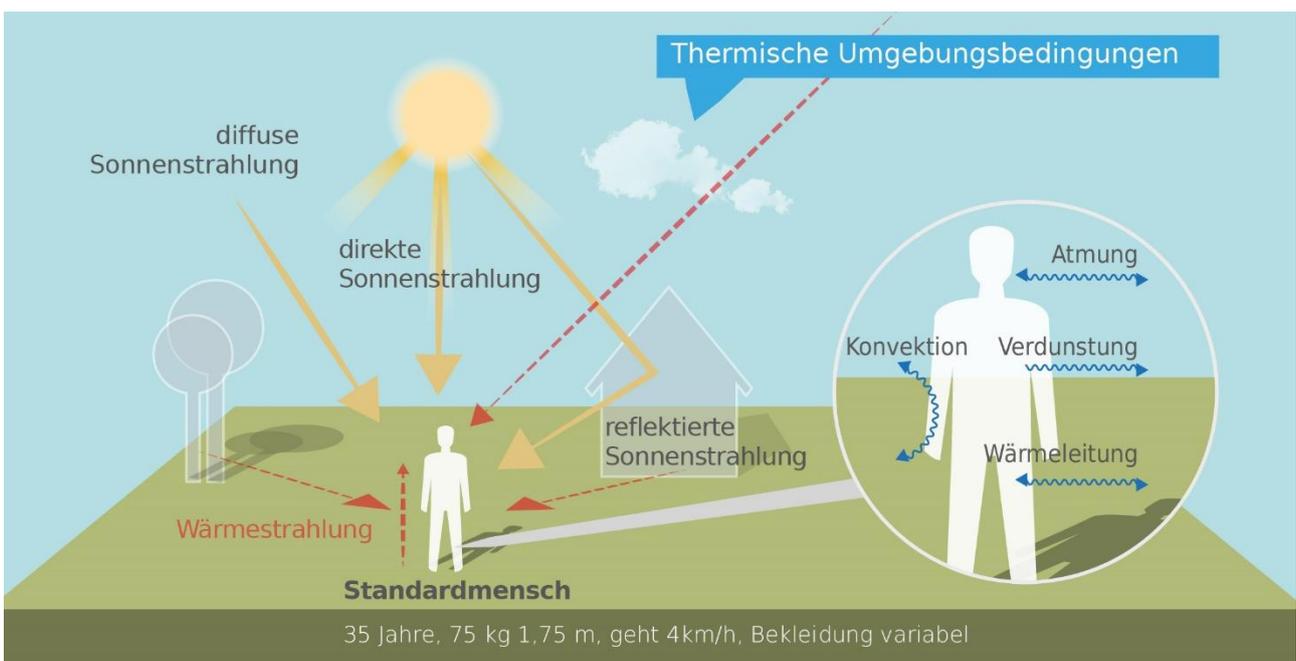


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

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).

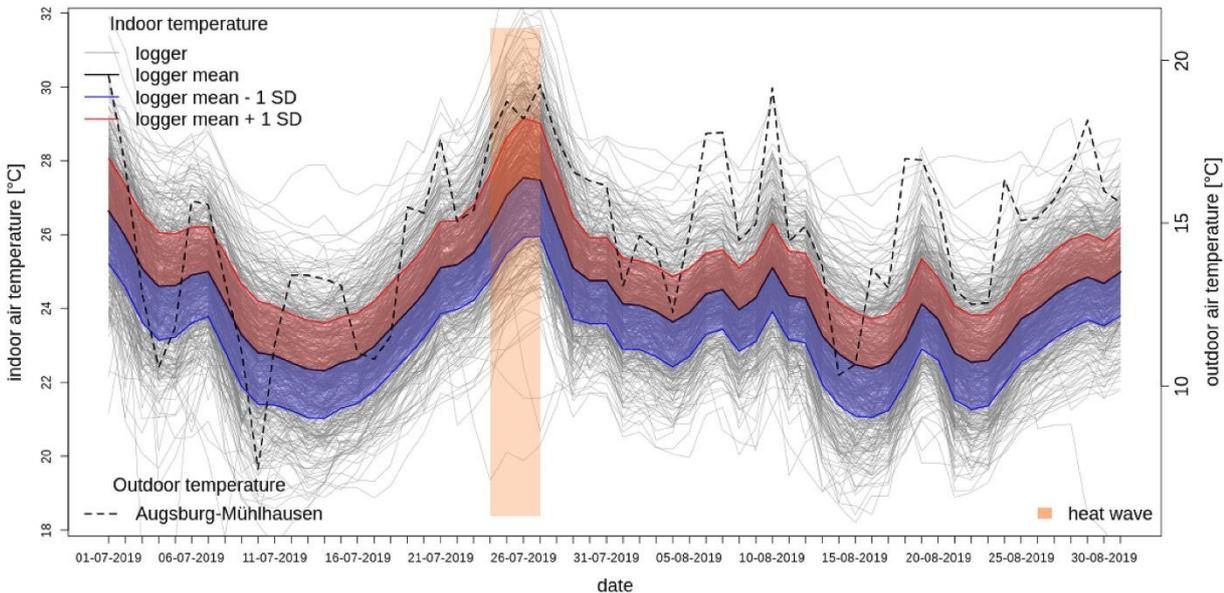


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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).

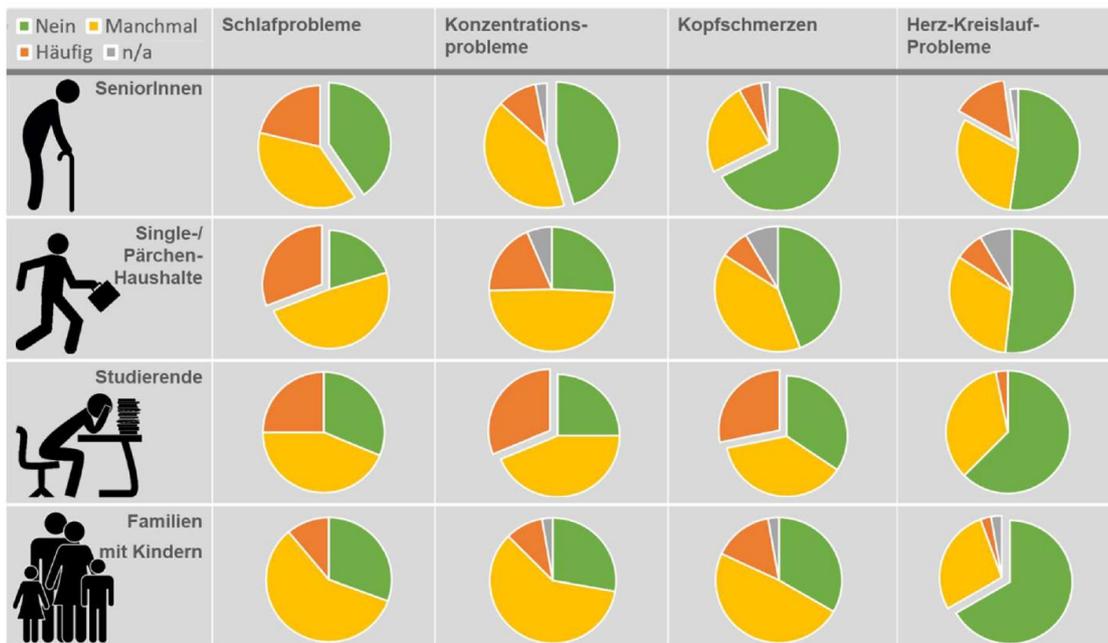


Abbildung 4: Gesundheitsliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz und Sett 2019).

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).

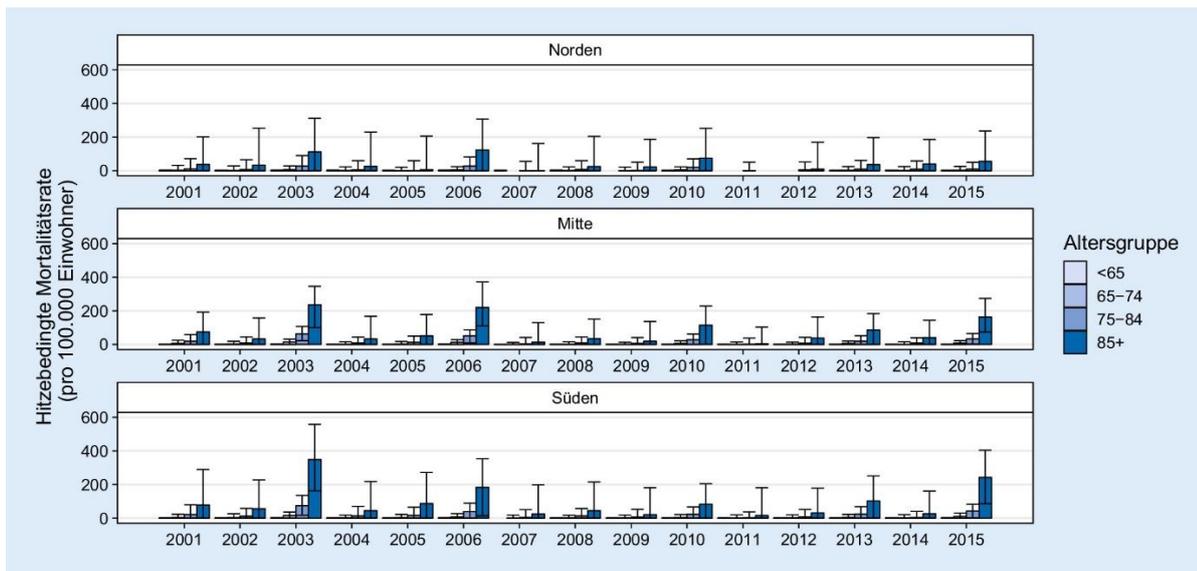


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region zwischen 2001 und 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/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.

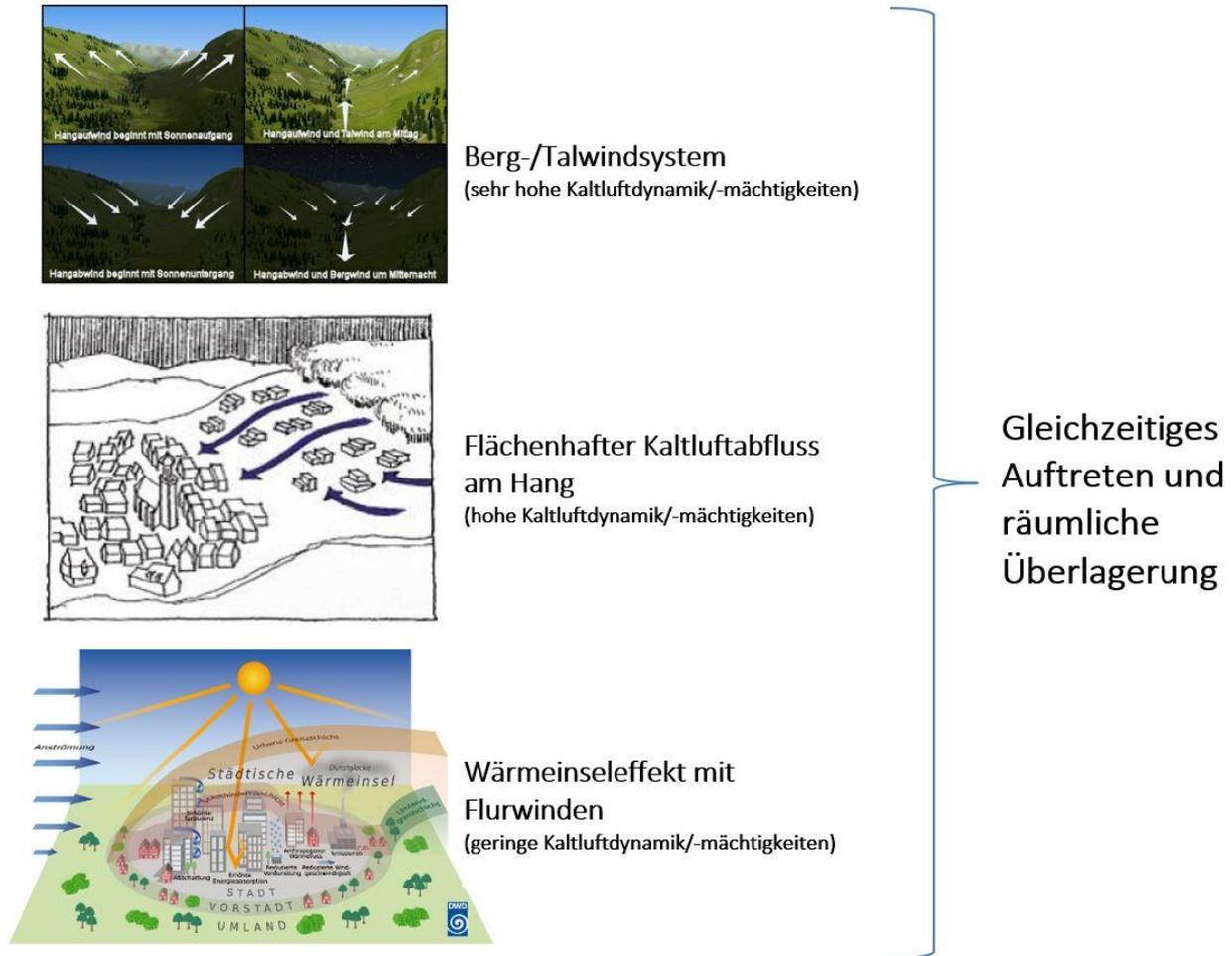


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten)).

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 („Flurwindensystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht.



Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts 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 Augsburg 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 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 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).

Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Klimatope		
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

Klimaeigenschaft	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.

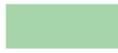
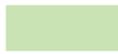
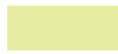
Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck	Raumspezifische Hinweise		
Grün- und Freiflächen			Begrünung im Stadt- raum und in Wohnge- bieten		15/95/44 dunkelgrün
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün	Hauptverkehrsstraße mit Potenzial für hohe bis extreme 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 die in der Übersicht des HLNUG gänzlich fehlenden 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 sogenannten 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 2021 und April 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 beim Umweltamt, dem Stadtplanungsamt sowie zu speziellen Einzelthemen (vor allem Bevölkerungsdaten) zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.

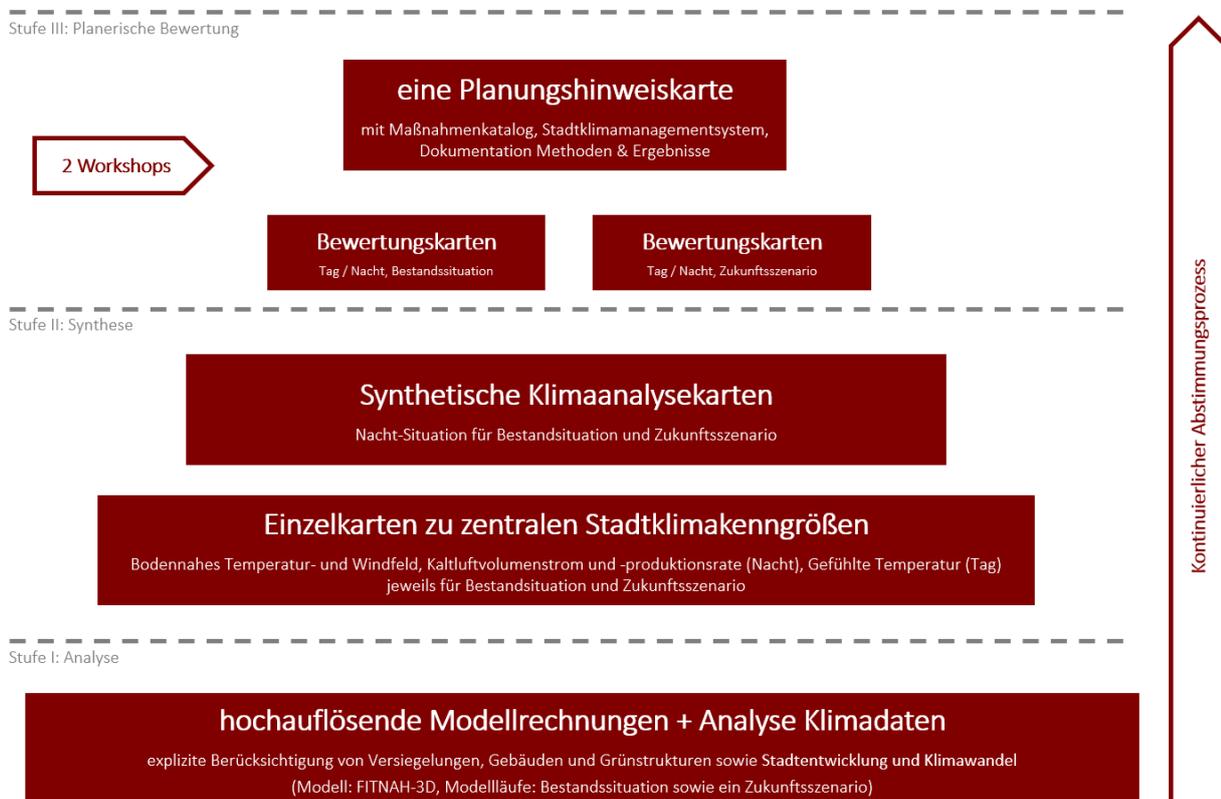


Abbildung 10: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

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 umweltplanerischen 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, die sowohl alle relevanten verwaltungsinternen Dienststellen als auch ein im Rahmen des Landschaftsplans beauftragtes externes Planungsbüro repräsentieren, waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- **Umweltamt**
- **Stadtplanungsamt**
- **Amt für Grünordnung, Naturschutz und Friedhofswesen (AGNF)**
- **Gesundheitsamt**
- **Amt für Brand- und Katastrophenschutz**
- **Smart City Geschäftsstelle**
- **Planungsbüro Kling Consult** (Als Auftragnehmer zur Erarbeitung des Landschaftsplans im Rahmen der Neuaufstellung des Flächennutzungsplans)

Insgesamt fanden außer einem Kickoff-Termin und einer Online-Präsentation zu Zwischenergebnissen zwei weitere Sitzungen der PAG in Form von Workshops zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- Kickoff (Vor-Ort-Termin) am 05.10.2021
- Ergebnispräsentation und -diskussion (Online-Termin) am 08.04.2022 nach Fertigstellung der Modellrechnung des Status Quo und der zugehörigen Klimaanalysekarte
- Workshop I (Vor-Ort-Termin) am 11.07.2022 zu Bewertungs- und Planungshinweiskarten
- Workshop II (Vor-Ort-Termin) am 20.09.2022 zur Verknüpfung von Planungshinweiskarte und Maßnahmen



4. Klima und Klimawandel im Raum Augsburg

4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN

Die folgende Beschreibung **der vergangenen klimatischen Entwicklung** in Augsburg 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 Augsburgs 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 Augsburg 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 Auflöung

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 Augsburg 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 2.6, 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 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °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 2.6 und 4.5 finden sich jeweils im Anhang.

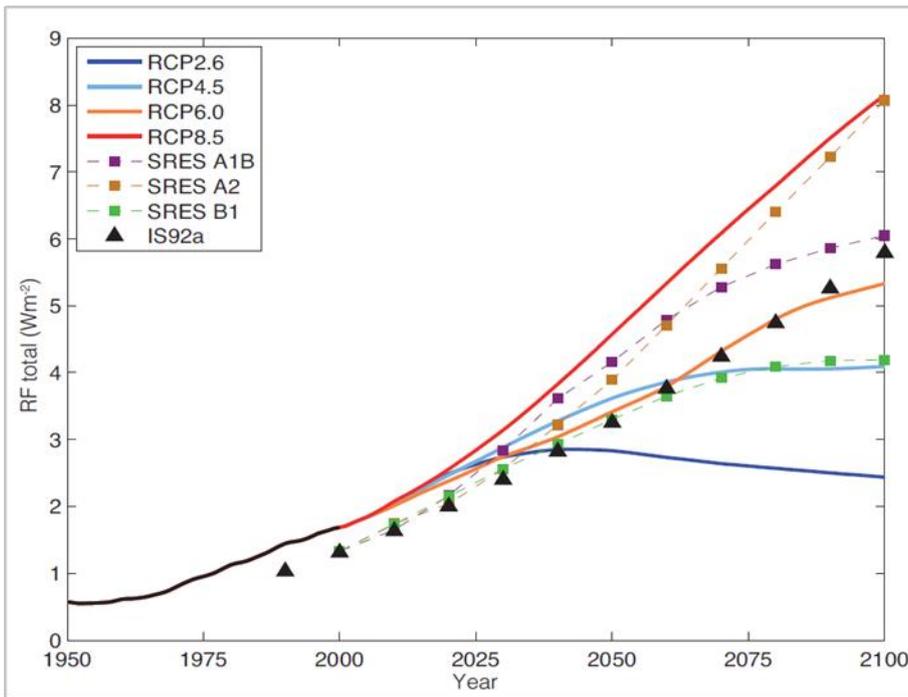


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb (RF = Radiative Forcing) der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013).

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 Augsburg 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): 2026 – 2055
- 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).

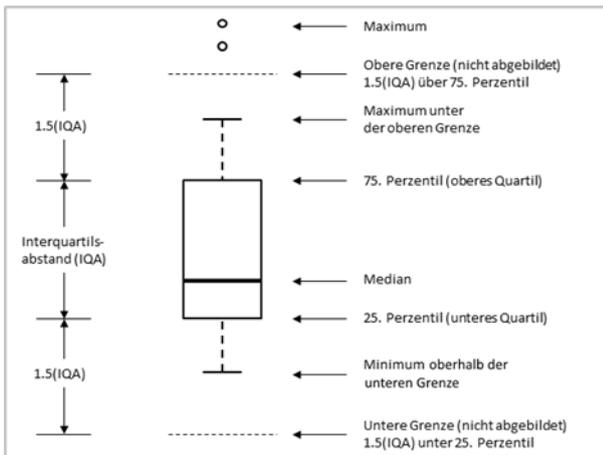


Abbildung 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

4.2 KLIMA IN GEGENWART UND VERGANGENHEIT

Bayern liegt im Übergangsbereich des westeuropäischen, eher maritim geprägten sowie des osteuropäischen vornehmlich kontinental geprägten Klimas innerhalb der Klimazone des warm-gemäßigten Regenklimas (Cf-Klima nach Köppen). Während das maritime Klima eher mit kühleren Sommern und milderen Wintern assoziiert ist, kann es unter kontinentalem Einfluss im Sommer zu höheren Temperaturen und trockenen Phasen, im Winter zu Kälteperioden kommen. Durch Augsburgs Lage im Südbayerischen Hügelland wird das Regionalklima zusätzlich von der Geländestruktur bestimmt (LfU 2021a, 2021b).

Das warm-gemäßigte Klima in Augsburg spiegelt sich in einer **Jahresmitteltemperatur** von 8,9 °C und einer **jährlichen Niederschlagssumme** von 840 mm in der Referenzperiode 1991 – 2020 wider. Das Klimadiagramm nach Walther und Lieth ist in Abbildung 13 aufgetragen. Im Vergleich zum deutschlandweiten Durchschnitt zeigt sich Augsburg um 0,4 K kühler und um 50 mm feuchter (DWD 2020).

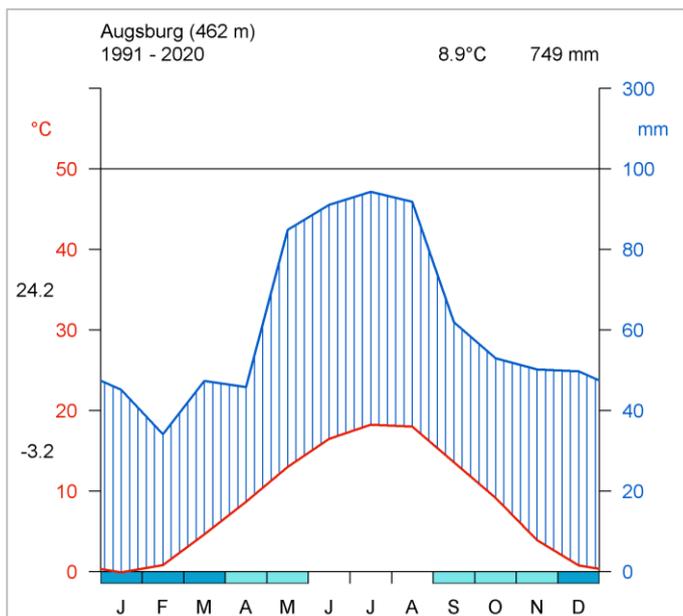


Abbildung 13: Klimadiagramm der Stadt Augsburg für den Referenzzeitraum 1991 – 2020 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).



Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Augsburg – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die **Temperatur** seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um ca. 2,2 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in den letzten drei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 4 Jahreswerte allein in den letzten acht Jahren (Abbildung 14).

Die beobachtete Erwärmung geht mit einer deutlichen Veränderung der Anzahl meteorologischer Kenntage einher. So ist die Anzahl an Sommertagen in Augsburg um 12 Tage auf durchschnittlich 44 Tage pro Jahr im Vergleich der Perioden 1961 – 1990 zu 1991 – 2020 gestiegen. Ebenso hat sich die Auftrittshäufigkeit der als besonders belastend geltenden Heißen Tage mehr als verdoppelt (Tabelle 2). Eine entgegengesetzte Entwicklung zeigen Frost- bzw. Eistage, deren Anzahl im selben Zeitraum um 3 bzw. 7 Tage pro Jahr zurückgegangen ist. Tropennächte treten in Augsburg gegenwärtig statistisch gesehen nie auf. Da die Auswertung der DWD-Grids (DWD 2022b) für die anderen dreißigjährigen Perioden darüber hinaus keine Aussagen zu Tropennächten zulassen, können zu dieser Kennzahl keine statistisch belastbaren Erkenntnisse gewonnen werden.

In Bezug auf den **Niederschlag** sind in der Vergangenheit kaum Auswirkungen durch den Klimawandel festzustellen. Seit Beginn der systematischen Messungen Ende des 19. Jahrhunderts zeigt sich kein signifikanter Trend steigender Jahresniederschläge (Abbildung A 2 im Anhang). Passend dazu sind über die letzten ca. 60 Jahre keinerlei relevante Veränderungen auszumachen, wobei die mittlere jährliche Niederschlagsmenge um 840 mm schwankte (Tabelle 2).

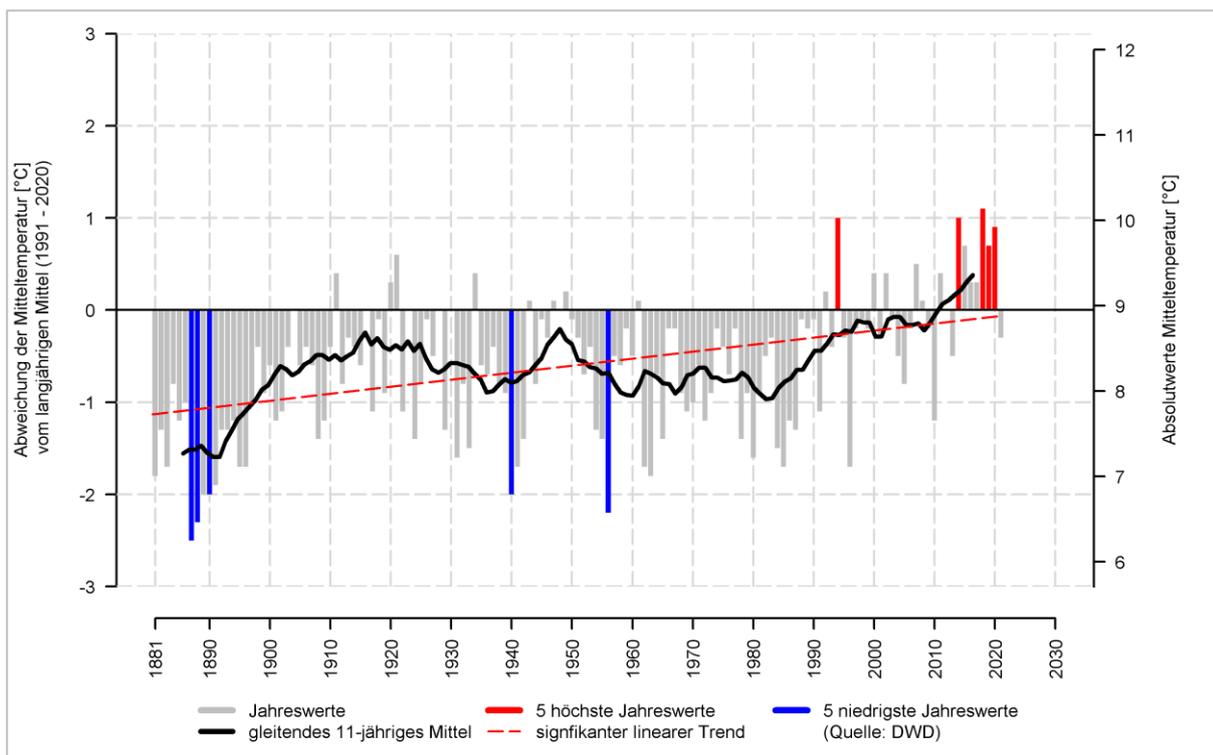


Abbildung 14: Entwicklung der Mitteltemperatur in Augsburg im Zeitraum von 1881 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).



Tabelle 2: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kennzahlen in Augsburg in der Vergangenheit (nach DWD 2022a bzw. DWD 2022b).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
tägliches Maximum der Lufttemperatur [°C]	12,6	12,9	13,7
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,1	8,3	8,9
tägliches Minimum der Lufttemperatur [°C]	4,0	4,2	4,3
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	32	34	44
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	4	5	9
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	Keine Angabe	0
Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	103	101	100
Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	31	27	24
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	833	844	840
Tage mit Niederschlag > 10 mm [n/Jahr]	24	24	24
Tage mit Niederschlag > 20 mm [n/Jahr]	6	6	7
Tage mit Niederschlag > 30 mm [n/Jahr]	2	2	2

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.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in Augsburg keine signifikanten Änderungen an Tagesniederschlägen von mehr als 10, 20 bzw. 30 mm zu erkennen (Tab. 1). Für die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 30 mm deutet sich eine leicht zunehmende Häufigkeit an (vgl. Abbildung 15), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.

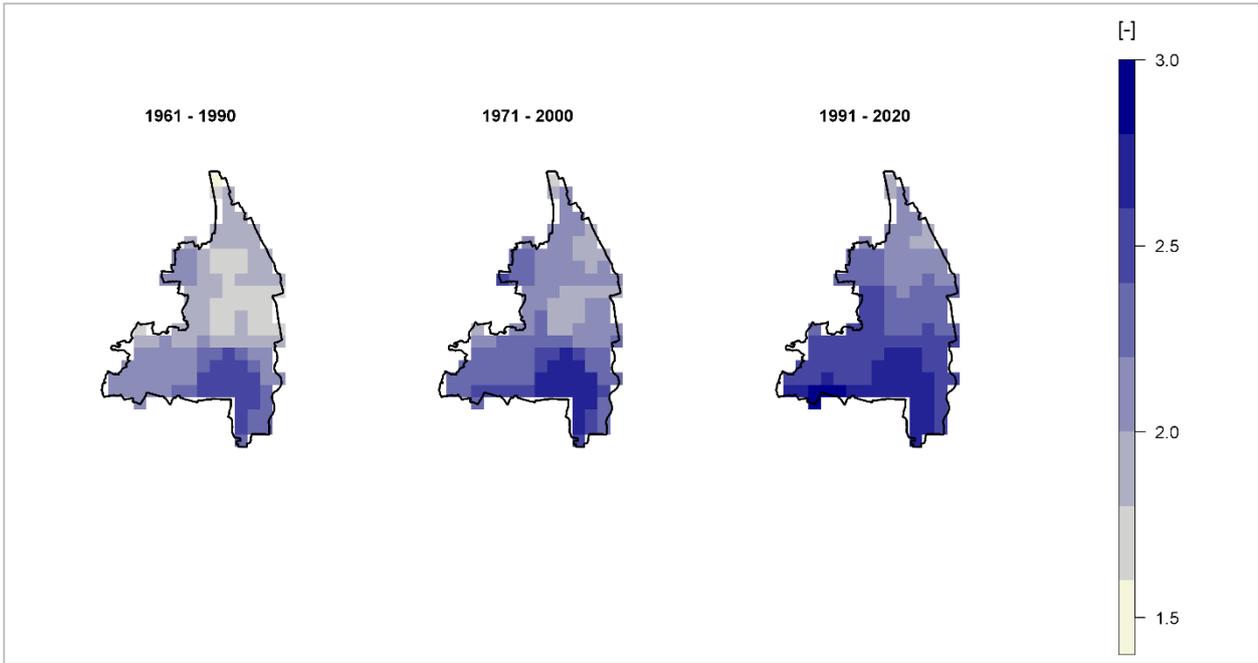


Abbildung 15: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Augsburg (nach DWD 2022b).

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Augsburg dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in der Stadt. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 2,9 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leichte Brise). In den Nachtstunden dominieren Winde aus südwestlicher oder südöstlicher Richtung, während tagsüber der Wind am häufigsten aus west-südwestlichen Richtungen weht (Abbildung 16).

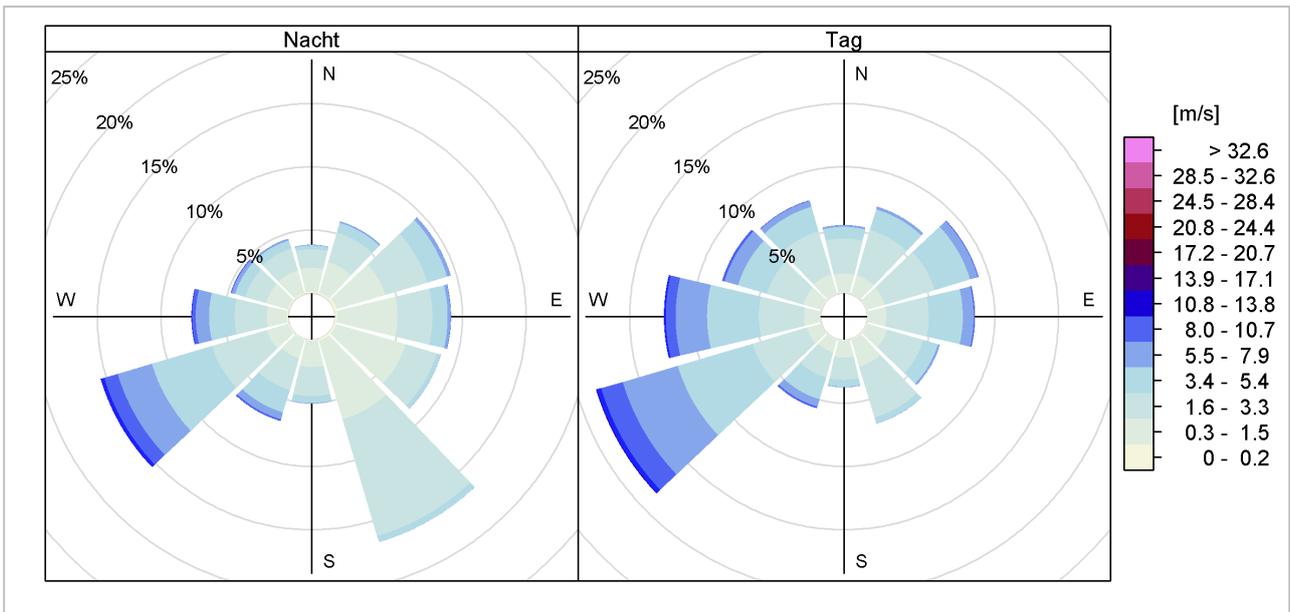


Abbildung 16: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Augsburg für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Augsburg (DWD 2022a).



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 Augsburg traten im langjährigen Mittel der letzten 30 Jahre 72,5 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 17). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel rund 27 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 29,2 % entspricht – fast jede dritte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

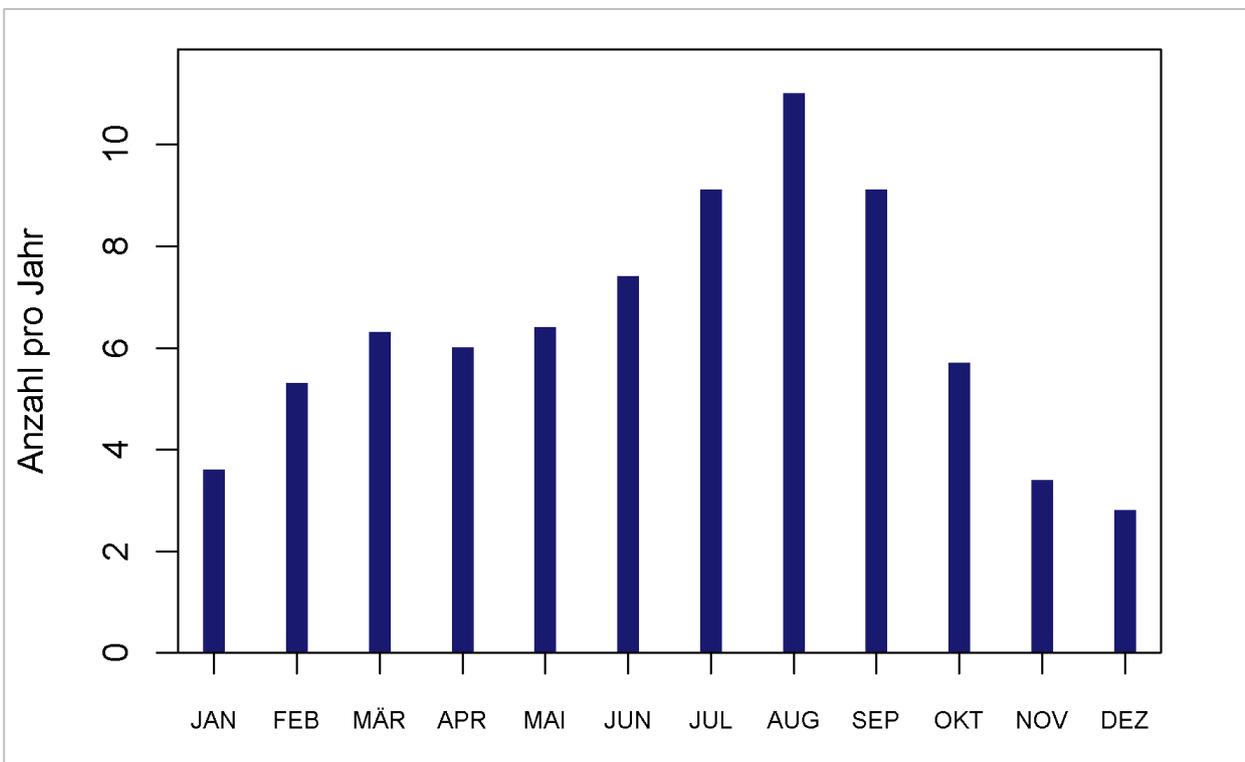


Abbildung 17: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Augsburg (72,5 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Augsburg (DWD 2022a).

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

4.4.1 TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Augsburg bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 18 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 3).



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

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 18 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).

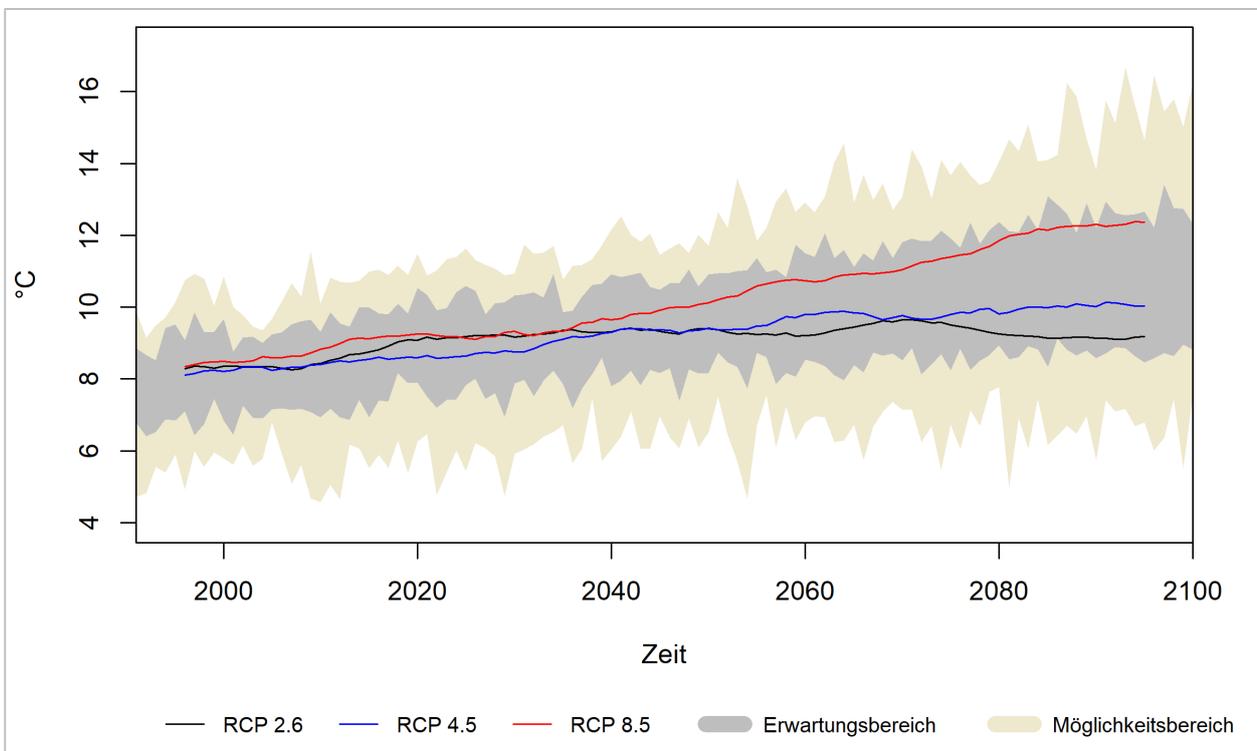


Abbildung 18: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Augsburg (alle RCP-Szenarien).

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst (Abbildung 19). 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 19).



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

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2026 – 2055			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P15	P50	P85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,6	0,8	1	0,6	0,8	1	0,6	0,8	1,1
	RCP 4.5	0,7	0,9	1,2	0,8	1,2	1,8	1,3	1,8	2,1
	RCP 8.5	0,8	1,2	1,5	1,3	2	2,3	3	3,5	4,5
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,2	1,2	1,7	0,4	1,6	2,4	0,1	1,2	4,2
	RCP 4.5	1,1	1,8	4,4	1,7	2,8	4,9	2,8	3,5	5,1
	RCP 8.5	1,1	2	4,2	2,1	3,4	6,5	5,3	7,3	9,7
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	-0,1	0,8	1,7	0,3	0,8	1,2	0,3	0,9	1,3
	RCP 4.5	1	1,4	2,1	1,3	1,9	2,7	1,5	2	3
	RCP 8.5	0,9	1,6	2,2	1,6	2,6	3,6	3,7	4,7	6,7

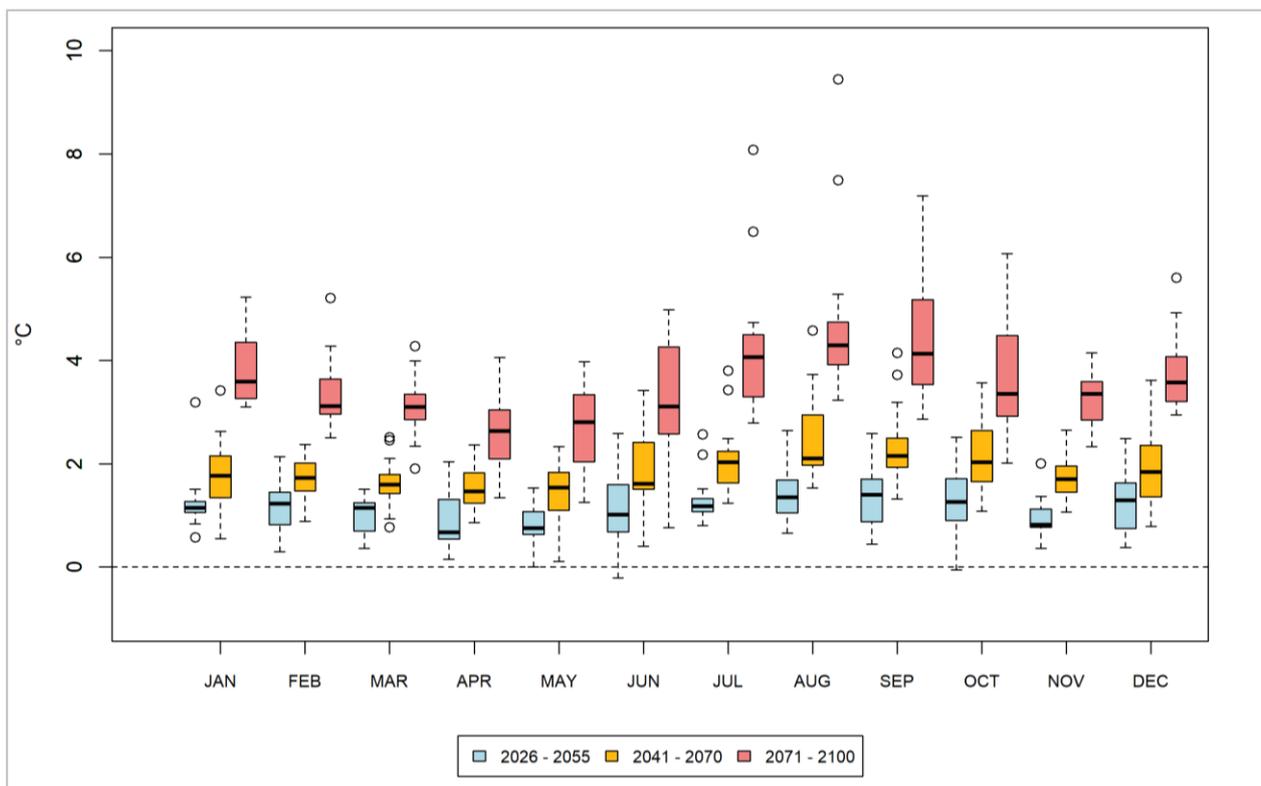


Abbildung 19: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Augsburg (RCP 8.5).



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 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit knapp 26 Heißen Tagen mehr pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1991 – 2020) nur 9-mal jährlich auftraten (s. Tabelle 2).

Tropennächte treten in Augsburg derzeit so gut wie nie auf (im Mittel 0 Tropennächte pro Jahr). In der nahen Zukunft (2026 – 2055) erhöht sich die Zahl der Tropennächte pro Jahr kaum (Tabelle 4), 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 Tropen-nächten im RCP 2.6 weiter stagniert, prognostiziert das RCP 8.5 für den Zeitraum bis 2070 eine Zunahme um 1,5 Nächte dieser Art. In der 3. Zukunftsperiode steigt die Änderung im stärksten Szenario gar bis auf knapp 9 zusätzliche Tropennächte pro Jahr in Augsburg an. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen ist eine noch höhere Anzahl an Tro-pennächten 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 Tageshöchsttempera-tur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Augsburg zukünftig länger andauern (Abbildung A 4 im Anhang). Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 10 Tage.

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Augsburg (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2026 – 2055			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	2,4	9,2	13,8	2,5	8,6	13	2,6	8,6	12,3
	RCP 4.5	8,1	10,3	15,6	9,5	17	21,6	13,4	17	22
	RCP 8.5	9,6	12,2	22,3	17,5	24,3	37,2	36,8	43,7	59
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,8	1,6	7,2	0,6	2	6,1	1,4	4,1	8,7
	RCP 4.5	4,3	4,9	7,3	5,2	7,5	10,2	6,7	8,6	12,3
	RCP 8.5	4,2	5,9	10,1	7,8	10,3	17,1	19,1	25,6	33,7
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	0,1	0	0	0,1	0	0,1	0,4
	RCP 4.5	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3	0,7	0,2	0,5	1,1



	RCP 8.5	0,1	0,3	0,7	0,3	0,8	1,5	2,4	6,1	8,9
Frosttage (T _{min} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	-16,9	-11,2	-7,6	-15,1	-13,2	-8,9	-16,8	-12,4	-9,1
	RCP 4.5	-17,5	-13,6	-10,5	-27,7	-17,4	-13,5	-39	-30,4	-24,1
	RCP 8.5	-21,6	-17,4	-14,3	-33,1	-30	-24,8	-59,5	-54,3	-50,5
Eistage (T _{max} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	-8,6	-6,3	-3,1	-9,1	-5,4	-3,9	-11,2	-6,5	-3,7
	RCP 4.5	-9	-6,4	-5,2	-13,4	-8,6	-6,3	-13,6	-12,1	-9,5
	RCP 8.5	-9,7	-7,6	-5,4	-13,9	-12,2	-6,9	-20,1	-18,8	-17

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an **Frost- und Eistagen**. In Augsburg werden im langjährigen Mittel 100 Frosttage bzw. 24 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1991 – 2020). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 46 Frosttage bzw. 5 Eistage auftreten. Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG UND TROCKENHEIT

4.4.2.1 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

In Bezug auf die **Jahresniederschlagssumme** sind in Augsburg keine eindeutigen 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 infolge des RCP 2.6 langfristig keine relevanten Änderungen zu erwarten sind (Tabelle 5, 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 jeweils um weniger als 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Insgesamt kann für Augsburg 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 20). Die RCP-Szenarien 2.6 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 5: Langjährige Änderung der mittl. Niederschlagssumme in Augsburg (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2026 – 2055			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 2.6	-22,3	9,9	48,1	-40	7	31,2	-43,7	-0,6	36,5
	RCP 4.5	-34,9	10	64,5	-18,8	22,8	66,3	16,1	50	85,9
	RCP 8.5	-11,6	44,4	60,4	-29,1	49,7	66,2	-17,7	63	101,9

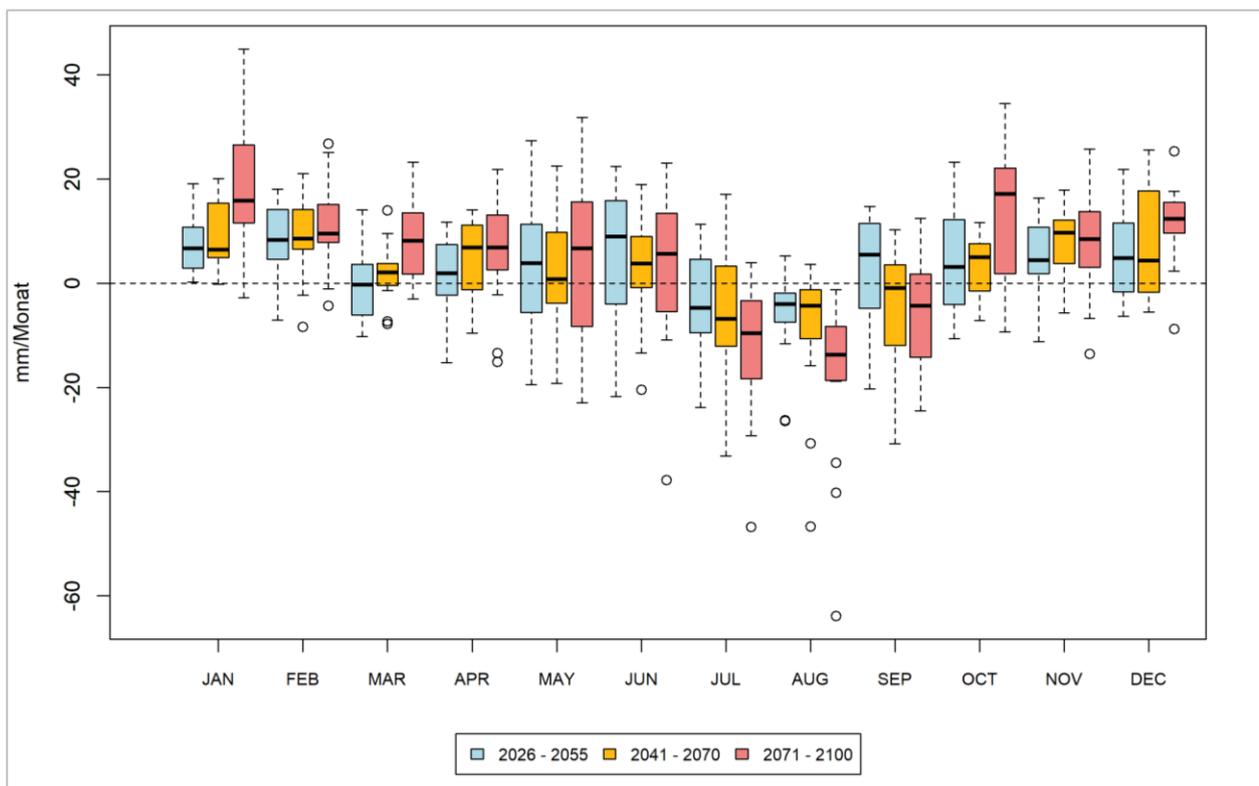


Abbildung 20: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Augsburg (RCP 8.5).

4.4.2.2 TROCKENHEIT

Begriffe wie Trockenheit oder Dürre sind nicht eindeutig definiert und die Bewertung dieser Ereignisse hängt oftmals von der jeweiligen fachlichen oder individuellen Sichtweise ab. Im allgemeinen Verständnis sind Trockenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, der aus einem Niederschlagsdefizit resultiert und über einen längeren Zeitraum zu Wasserknappheit führen kann. Ein Indikator für Trockenheit ist die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust).

In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in Augsburg feststellbar. 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 21). Diese **saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz** gilt für alle drei Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus – der Juni weist gar die größte positive klimatische Wasserbilanz des Jahres auf. Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 2.6 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.

Die abnehmende klimatische Wasserbilanz im Sommer lässt häufigere bzw. längere anhaltende Trockenperioden vermuten, jedoch sind die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering, um valide Aussagen treffen zu können (vgl. exemplarisch die Häufigkeit extremer Trockenperioden in Abbildung A 8 im Anhang).

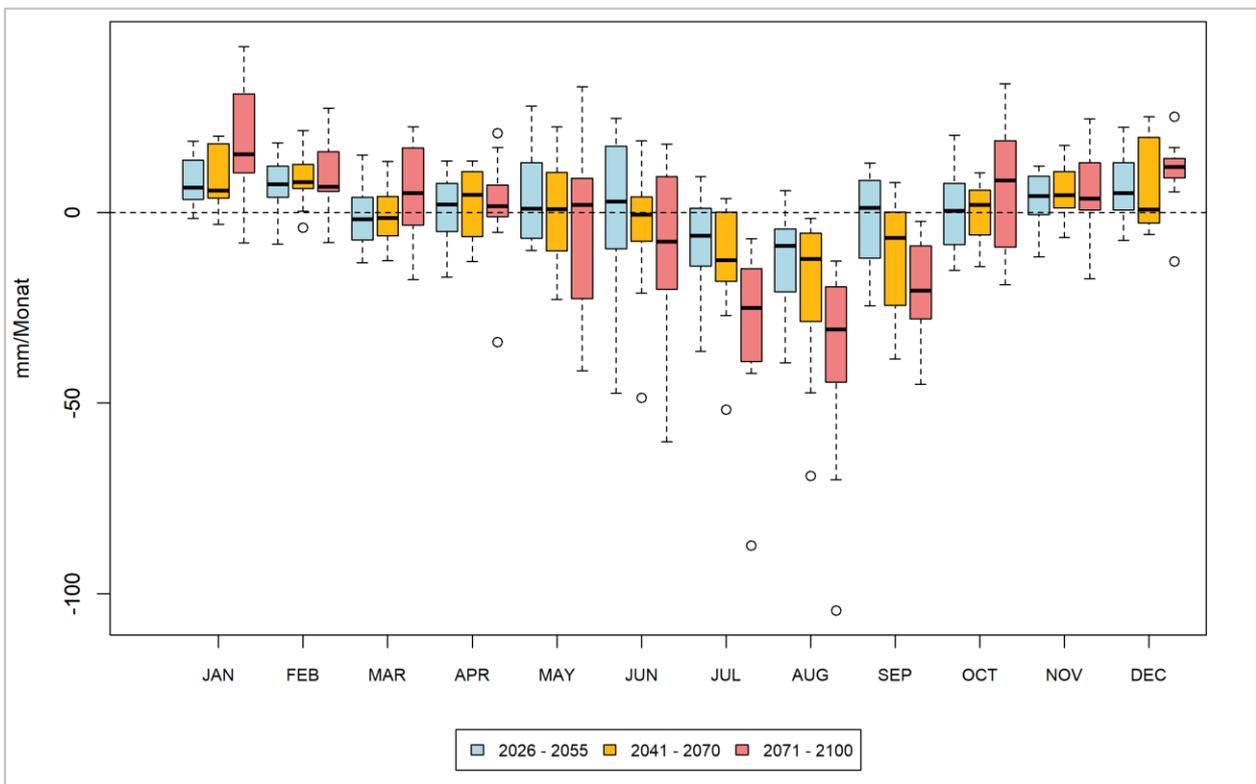


Abbildung 21: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Augsburg (RCP 8.5)

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. Starkregenerenignisse 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: $N \geq 10$ mm/d
- Stärkerer Niederschlag: $N \geq 20$ mm/d
- Starkniederschlag: $N \geq 30$ mm/d

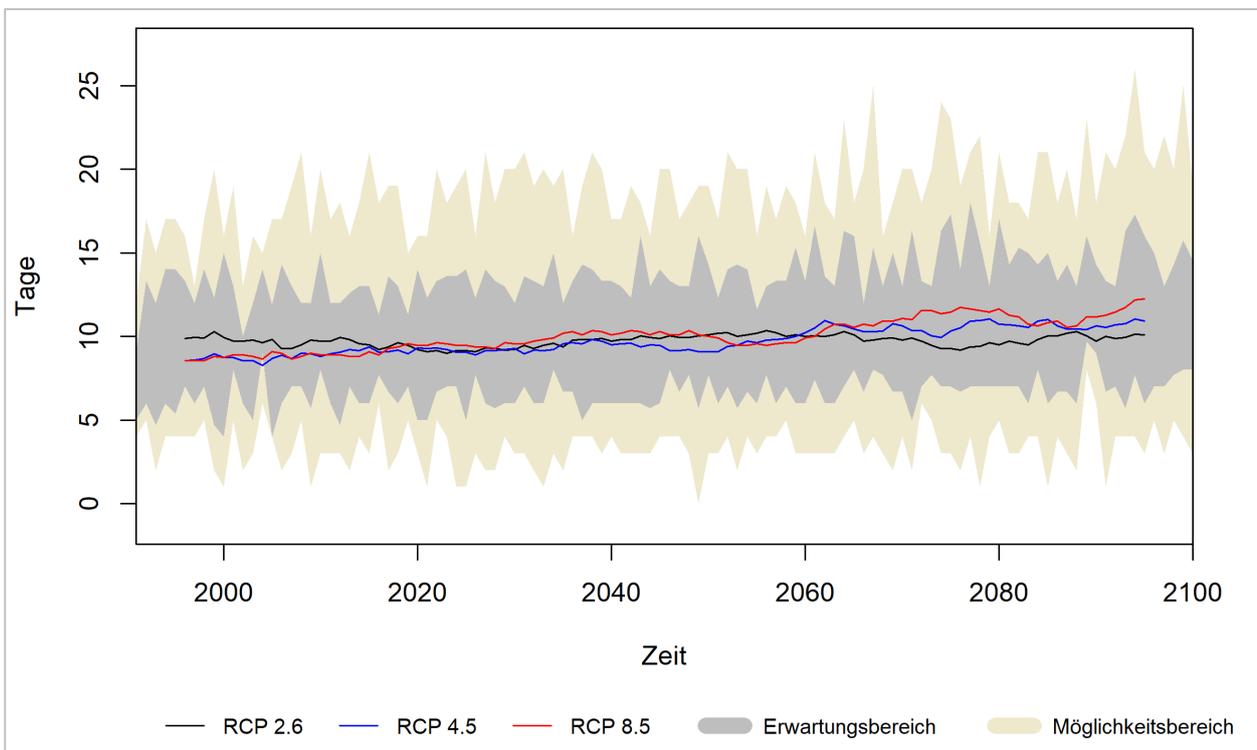


Abbildung 22: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) in Augsburg (alle Szenarien).

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 ($N \geq 20$ mm/d) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abbildung 14).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse $N \geq 10$ mm/d und $N \geq 20$ mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tabelle 6). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen um 1-3 Ereignisse in den jeweiligen Zunkunftszeiträumen.



Starkniederschläge ≥ 30 mm/d treten momentan sehr selten auf (im Mittel 2 Ereignisse pro Jahr) und haben eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sodass valide Prognosen derzeit kaum möglich sind. Gerade langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit 1-2 zusätzlichen Starkniederschlagsereignissen pro Jahr gerechnet (Tabelle 6 und Abbildung 23).

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 mm/d verbunden. Das bedeutet: Es regnet weniger, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

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.



Tabelle 6: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Augsburg (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2026 – 2055			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Starker Niederschlag (N ≥ 10mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,7	0,9	4,4	-0,4	1	3,1	-1,2	1,2	2,2
	RCP 4.5	-1,6	0,9	3,1	-0,5	2,2	3,4	1,3	2,4	4,4
	RCP 8.5	0,6	2	3,8	0,2	2,9	3,4	0,7	4,7	5,8
Stärkerer Niederschlag (N ≥ 20mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,2	0,3	1	-0,4	0,5	1,2	-0,6	-0,1	1,1
	RCP 4.5	-1	0,7	1,3	-0,1	0,8	1,8	0,8	1,4	2,1
	RCP 8.5	0,2	1,2	1,8	0,3	1,6	1,9	1,5	2,6	4
Starkniederschlag (N ≥ 30mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,3	0,3	0,5	-0,3	0,4	0,6	-0,5	0	0,5
	RCP 4.5	-0,3	0,4	1	0	0,5	1,2	0,3	0,8	1,2
	RCP 8.5	-0,1	0,5	1,1	0,3	0,9	1,3	1,1	1,6	2,2
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-2,3	2,5	4,7	-0,4	2	4,8	-3,5	-0,4	4,2
	RCP 4.5	-2	1	6,2	-3,1	1,9	6,6	0	2	8
	RCP 8.5	-1,8	1,1	6,1	-2,6	3,4	8,7	2,8	6,7	12

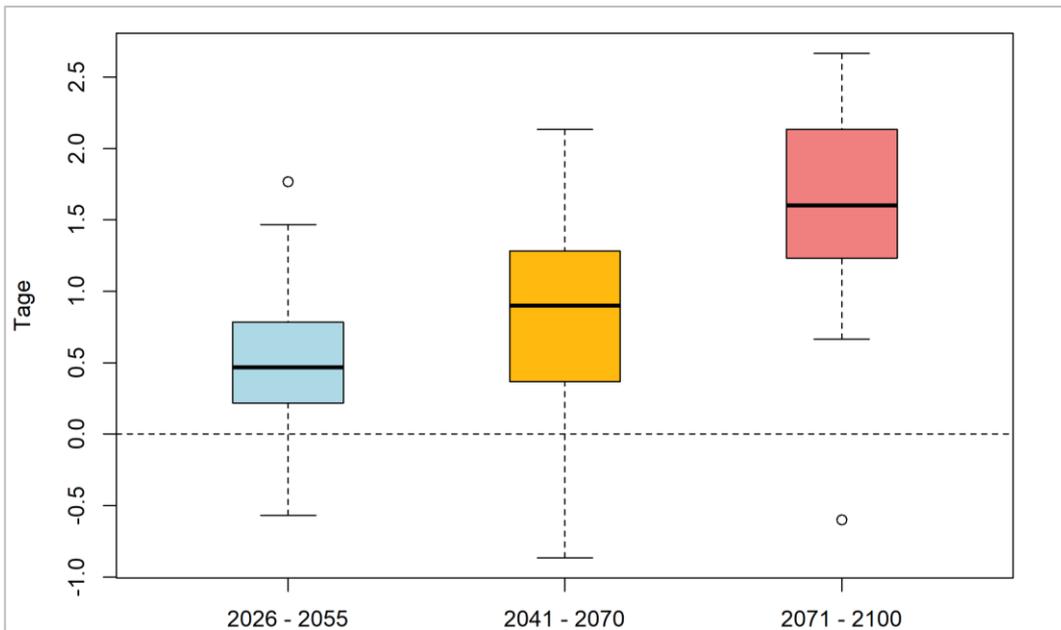


Abbildung 23: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Augsburg (RCP 8.5).

4.4.3 WIND UND STURM

Ein Sturm wird als „Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 [...], der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann“ definiert (DWD 2020d). Folgende Sturmklassen werden dabei gemäß DWD an-hand ihrer Windstärke eingeteilt:

- Sturm: Beaufort 9 (75 bis 88 km/h)
- Schwerer Sturm: Beaufort 10 (89 bis 102 km/h)
- Orkanartiger Sturm: Beaufort 11 (103 bis 117 km/h)
- Orkan: Beaufort 12 (> 117 km/h)

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, sodass sie nur bedingt statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich in einer wärmeren Atmosphäre aufgrund von mehr verfügbarer latenter Wärme, die beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Flüssigwasser frei wird, potenziell stärkere Stürme ausbilden können (Pinto et al. 2009, Fink et al. 2012, Pinto und Ryers 2017). Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge, wobei noch nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die Häufigkeit der Sturmereignisse zunimmt oder ob bei gleichbleibender Häufigkeit die Intensität steigt, also die Stärke der auftretenden Windgeschwindigkeiten (Pinto et al. 2009, Donat et al. 2010, McDonald 2011, Pinto und Ryers 2017).

Die Analyse zur Häufigkeit von **Sturmereignissen** ergab für Augsburg in allen drei Klimaszenarien keinen eindeutigen Trend bis zum Jahr 2100 (weder Zu- noch Abnahmen; ohne Abbildung). Dementsprechend weist kaum ein Modell des Ensembles signifikante Trends auf, sodass sich keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableiten lassen.



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 10 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Augsburg und angrenzendes Umland rund 5,17 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 100 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 7 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 7: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 10 m

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
1	Gebäude	individuell
2	Gebäude mit Gründach	individuell
3	unbebaut versiegelt	0
4	Gewässer	0
5	Gleis	0
6	niedrige Vegetation	0,5
7	niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
8	Baum über Versiegelung	individuell
9	Baum über Rasen	individuell
10	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	individuell
11	Photovoltaik	0

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

Abbildung 24 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 der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (ganz) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

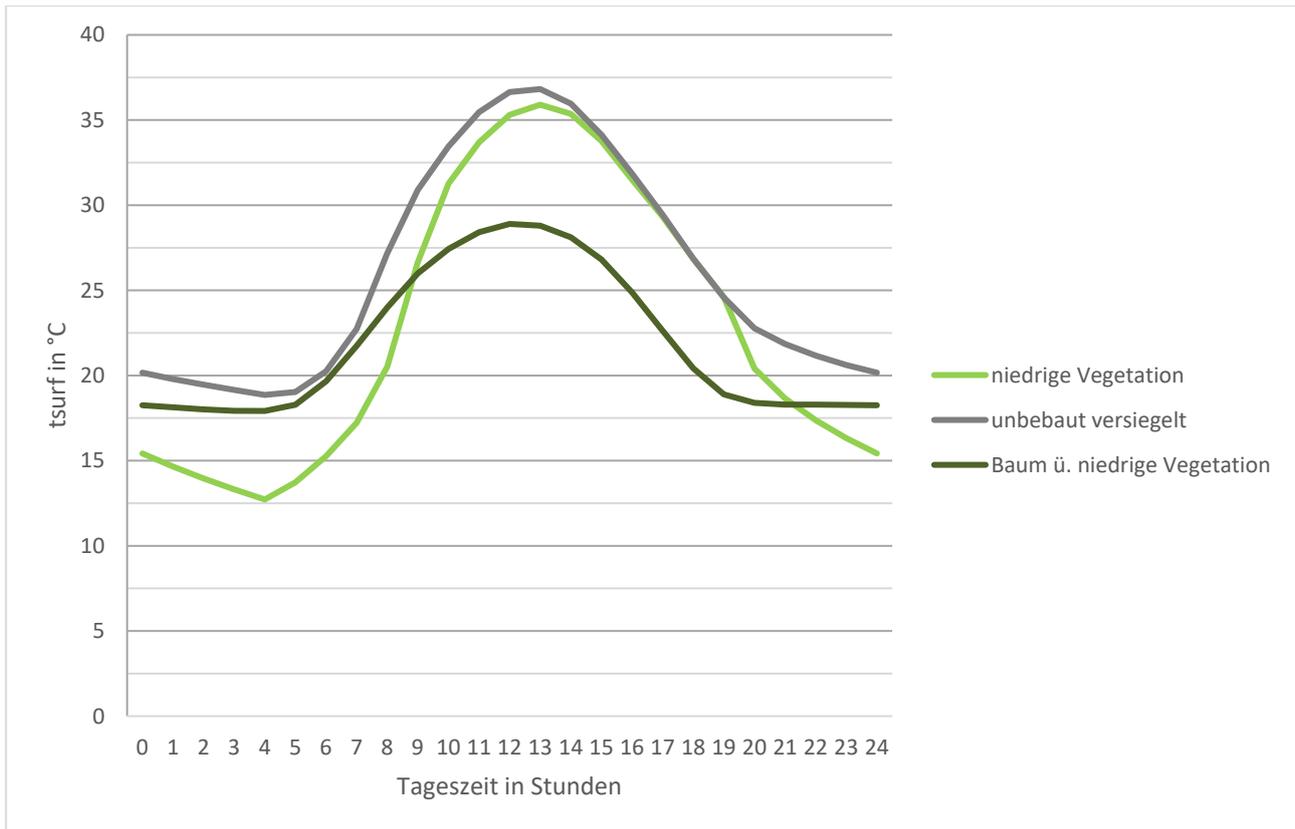


Abbildung 24: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen (tsurf = „surface temperature“) für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D

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 25 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.

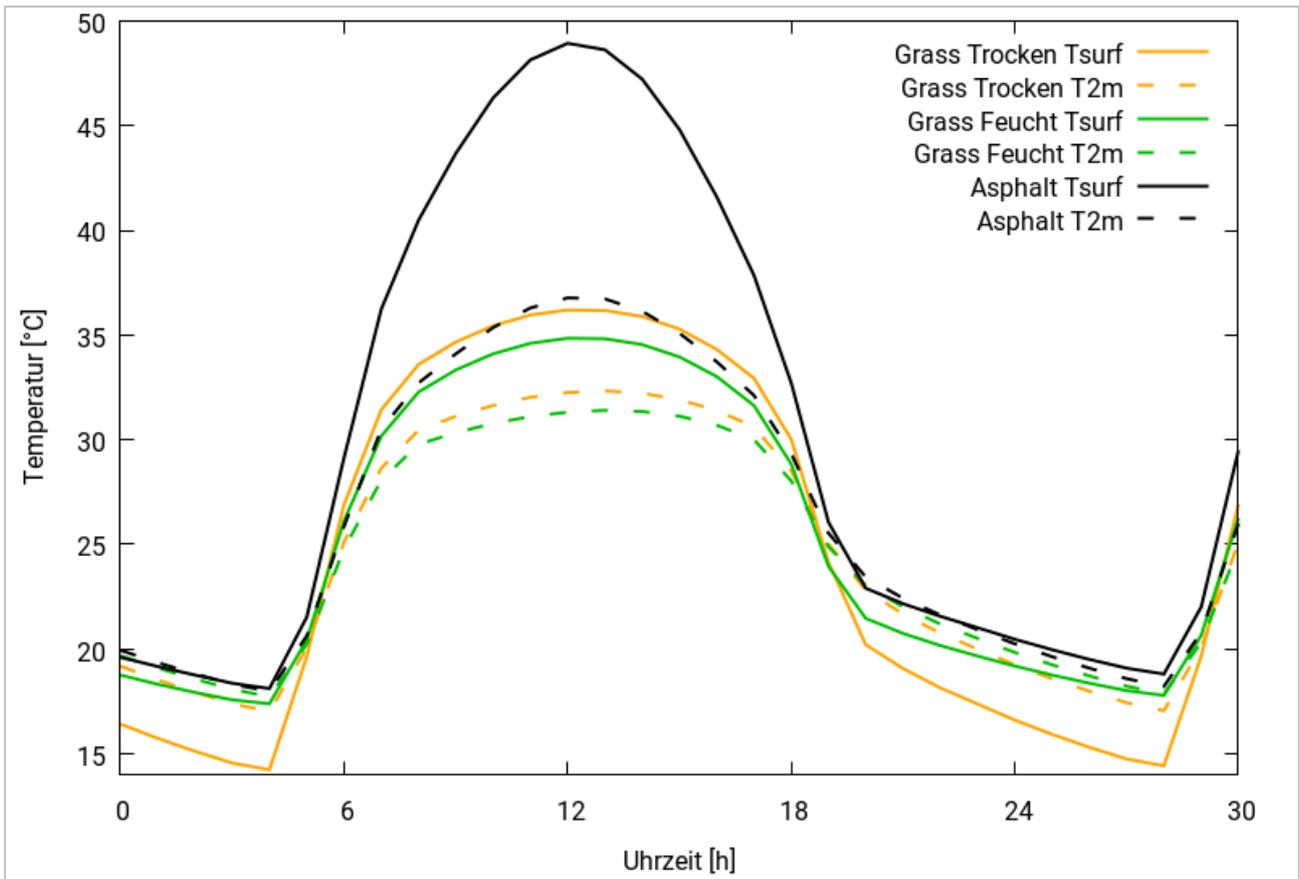


Abbildung 25: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (tsurf = „surface temperature“) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m = Temperatur auf 2 m ü. Gr.) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

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 Augsburg nicht betrachtet, lediglich eine Anpassung der Bodenfeuchte fand modellseitig statt (s. Tabelle 8).

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 26, 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.

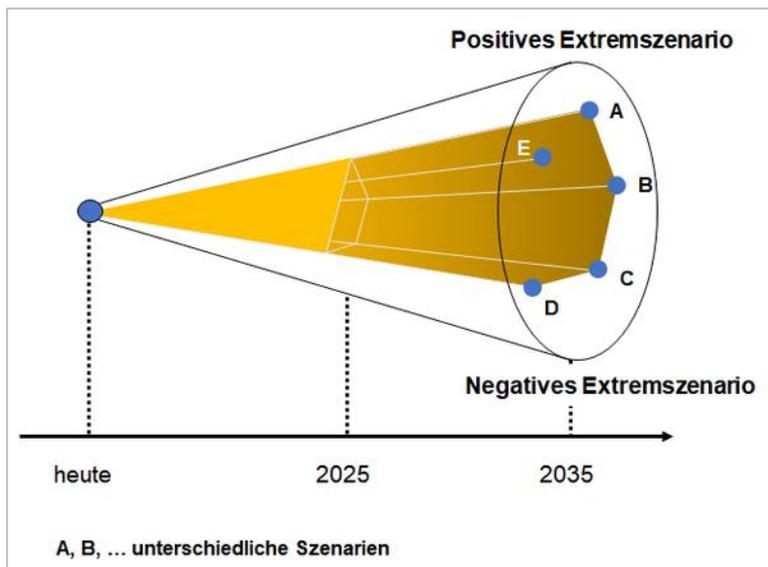


Abbildung 26. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Im vorliegenden Fall fiel die Wahl auf die Analyse eines Worst-Case-Szenarios für das Zieljahr 2040. Dieses zeichnet sich durch einen starken anthropogenen Klimawandel aus, dargestellt durch das RCP-Szenario 8.5 sowie durch die Annahme eines Trockenszenarios. Weiterhin wurden zusammen mit dem Auftraggeber insgesamt 23 Flächen, die zum Teil aus rechtskräftigen Bebauungsplänen und Planungsvorhaben stammen sowie weitere 67 im Planungsprozess bisher weniger weit fortgeschrittene Blockflächen (darunter drei perspektivische Siedlungsreserveflächen) identifiziert (s. Tabelle 8 und Abbildung 29). Während die konkreten B-Pläne in die Nutzungsklassen von FITNAH-3D übersetzt werden konnten, erfolgte für die unkonkreten Fälle eine Modellübersetzung anhand des sogenannten Mischpixelansatzes durch 12 Flächenvorlagen der aktuellen Bestandsbebauung der Stadt Augsburg (s. Kapitel 5.3). Tabelle 8 fasst die wichtigsten Merkmale des Zukunftsszenarios und der Referenzsituation zusammen.



Tabelle 8: Entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Referenzsituation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von 2021, zusätzlich wurden 13 konkret geplante Bebauungen im Rahmen rechtskräftiger B-Pläne eingepflegt, die kurzfristig umgesetzt werden sollen.
Szenario 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Datenbasis der Referenzsituation + Entwicklungsflächen (23 Flächen, die zum Teil aus rechtskräftigen Bebauungsplänen und Planungsvorhaben stammen sowie weitere 67 im Planungsprozess bisher weniger weit fortgeschrittene Blockflächen nach 12 Mischpixelflächenvorlagen) ■ Berücksichtigung eines starken Temperatursignals von 1,8 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommertrockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte des Modells von 60 % auf 30 %

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 vom Geodatenamt Augsburg in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten bereitgestellten Geoinformationen, gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen. Wie in Kapitel 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 Augsburger Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 516,55 km², weist also den etwa 3,5-fachen Flächeninhalt der Stadt Augsburg selbst auf (Abbildung 27).

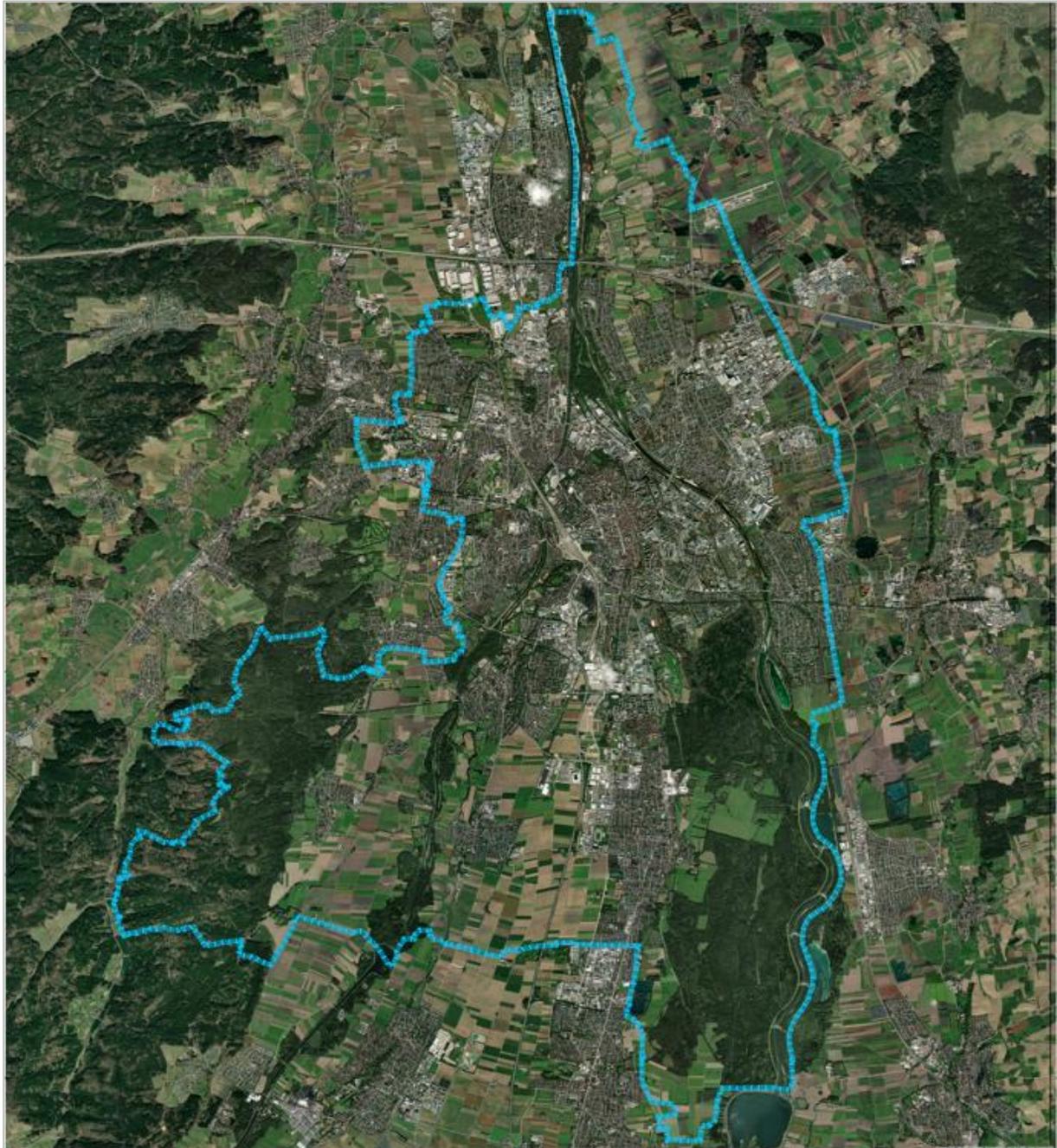


Abbildung 27: Modellgebiet sowie hervorgehoben das Gebiet der Stadt Augsburg (Quelle des Luftbildes: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community)

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 Augsburg im Jahr 2012 durchgeführt wurden. Die Abbildung 32 zeigt das überwiegend von Süd nach Nord geneigte Relief



von Augsburg in einer grafischen Überhöhung. Die höchste Erhebung ist innerhalb des Untersuchungsgebietes mit etwas über 579 m ü. NHN im Bereich der Stauden zu finden, die den Südteil des „Naturparks Augsburg – Westliche Wälder“ beschreiben. Die flachste Stelle liegt dagegen nordwestlich von Augsburg im Bereich des Schmuttertals auf ca. 440 m ü. NHN. Deutlich zu erkennen sind im Digitalen Geländemodell auch die Flussbetten der beiden wichtigsten Flüsse im Augsburger Stadtgebiet – der Wertach und des Lechs, die auf Höhe der Wolfzahnau zusammenfließen.

Im Unterschied zu den Geländehöhen unterscheidet sich der Eingangsdatensatz zur Stadtstruktur in den beiden Modellrechnungen voneinander. Die bereits in Tabelle 7 eingeführten FITNAH-Nutzungsklassen wurden aus verschiedenen Geodaten verschnitten. Tabelle 9 zeigt eine Auflistung hierfür genutzter Geodatensätze.

Tabelle 9: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters in Augsburg als Basis für die Referenzsituation sowie das Zukunftsszenario

Datenquelle	Erfassungsjahr Referenzsituation	Erfassungsjahr Zukunftsszenario	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhe	2012 (identischer Datensatz)		Raster	1 m	Direkt (DGM ²)
Gebäude/-höhen	2021/ 2019	2021/ 2019	Grundrisse/ City GML	LOD1 / LOD 2	Verschneidung beider Datensätze mit uneinheitlichen Kubaturen zu gemeinsamen Datensatz
Gründächerkartierung	2021	2021	Flächenvektoren	-	Manuelle Aktualisierung aufgrund von Unvollständigkeit
Vegetation	2020/ 2021	2021	CIR20 / Baumkataster	0,2 m	Grundlage zur Berechnung des NDVI ³ / Baumkataster als sekundäre Informationsquelle
Strukturhöhe	2020	2020	Raster	0,4 m	Ermittelt aus Differenz von DOM ⁴ und DGM
Versiegelung	2021	2021	ALKIS- Flächenvektoren / CIR20	- / 0,2 m	Verschneidung versiegelter Areale aus dem ALKIS ⁵ mit NDVI-Informationen
Straßennetz	2021	2021	ALKIS- Flächenvektoren	-	Extraktion der Straßenflächen aus dem ALKIS

Die Augsburger **Landnutzung für die Referenzsituation** wird über 11 verschiedene Nutzungsklassen (Abbildung 33) definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 10 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungs-klassifizierung aufzulösen. Bei den Gebäuden konnte mithilfe der vorliegenden Gründächer-

² DGM = Digitales Geländemodell

³ NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

⁴ DOM = Digitales Oberflächenmodell

⁵ ALKIS = Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem



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.

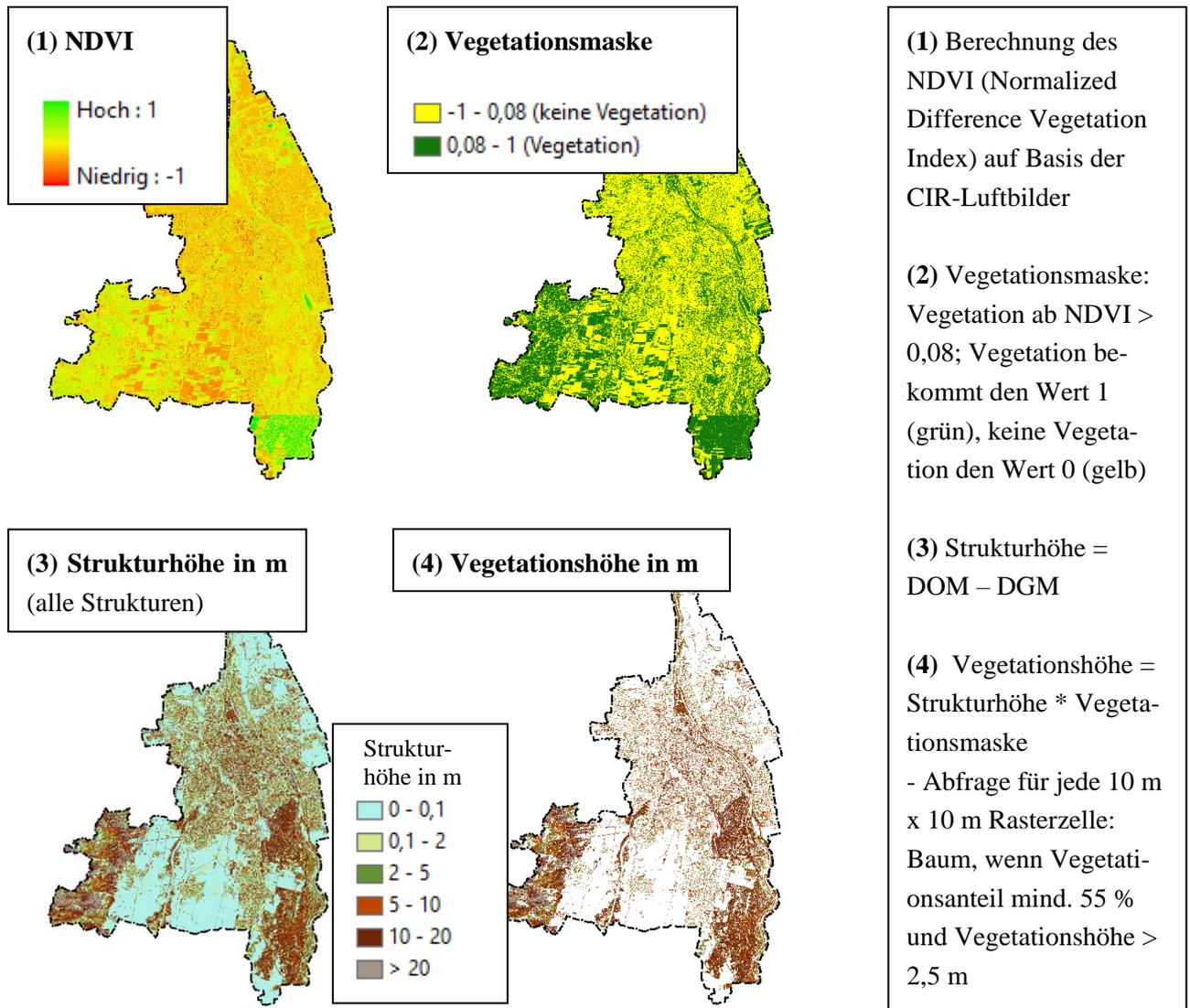


Abbildung 28: Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen.

Da für die Stadt Augsburg keine gesamtstädtische Baumkartierung vorlag, sondern lediglich öffentliche Baumbestände als Punktinformationen im Rahmen des Baumkatasters zur Verfügung standen, mussten für die Erzeugung einer flächendeckenden Bauminformation andere Datenquellen hinzugezogen werden. Hierfür lagen hochaufgelöste CIR-Luftbilder aus dem Jahr 2020 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt



wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von 0,08 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Abbildung 28). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 10 m x 10 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 6 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

Da zur Zeit der Bearbeitung dieser Klimaanalyse bereits 13 rechtskräftige B-Pläne (s. Tabelle 10) mit einer kurzfristig geplanten baulichen Umsetzung vorlagen, wurden diese zusätzlich händisch in die FIT-NAH-Landnutzung integriert. Hierbei wurden die Festsetzungen zu Art und Maß der baulichen Nutzung des jeweiligen Bebauungsplanes berücksichtigt.

Tabelle 10: Rechtskräftige B-Pläne mit kurzfristig geplanter baulicher Umsetzung, die im Rahmen des Ist-Zustands der Klimaanalyse Augsburg bereits Berücksichtigung fanden.

	B-Plan Nummer	Standort
1	BP 219 D	Nördlich der Bürgermeister-Ackermann-Straße, östlich der Grenzstraße (Ackermann-Park)
2	BP 228	Reese-Kaserne, Einarbeitung rotumrandeter Gebäude aus Dista-Kartenauszug (19.11.2021)
3	BP 228 B I	Reese-Kaserne, Teilbereich südlich der Ulmer Straße
4	BP 228 B II	Reese-Kaserne, Teilbereich nordöstlich der Sepp-Mastaller-Straße (außer westliches Gebäude)
5	BP 228 C	Reese-Kaserne, Teilbereich an der Bürgermeister-Ackermann-Straße zwischen Sommerstraße und Reinöhlstraße
6	BP 278 A	Zwischen Meierweg und Zirbelstraße (ehemaliges Cema-Gelände)
7	BP 288 B I	Sheridan-Kaserne, Teilbereich östlich des Nestackerweges, nördlich des Grasigen Weges (nur Gebäude die kurz- mittelfristig fertiggestellt werden).
8	BP 288 B I Ergänzung	Sheridan-Kaserne, Teilbereich östlich des Nestackerweges, nördlich des Grasigen Weges, Einarbeitung rotumrandeter Gebäude aus Dista-Kartenauszug (19.11.2021)
9	BP 300	Universität Augsburg – Medizinische Fakultät (nur die beiden nördlichsten Gebäude)
10	BP 476 II	Innerer und mittlerer Ladenhof zwischen Hauptbahnhof und Gögginger Brücke
11	BP 671	Westlich der Wernhüterstraße
12	BP 893	Nördlich der Fritz-Hintermayr-Straße, westlich der Windprechtstraße
13	BP 900	Augsburg Innovationspark (nur Baufelder im südlichen Bereich der Karl-Drais-Straße / Forschungsallee und an der Straße ‚Am Technologiezentrum‘)

Der **Landnutzung für die Zukunftssituation** liegt an erster Stelle diejenige der Referenzsituation zugrunde. Weiter wurden in Abstimmung mit der Stadt Augsburg für das Zukunftsszenario insgesamt 23 Flächen, die zum Teil aus rechtskräftigen Bebauungsplänen und Planungsvorhaben stammen (s. Tabelle 11) sowie weitere 67 im Planungsprozess bisher weniger weit fortgeschrittene Blockflächen berücksichtigt. Darunter sind auch drei größere Bereiche mit sogenannten Siedlungsreserveflächen. Dabei handelt es sich um im Stadtentwicklungskonzept (STEK, STADT AUGSBURG – Stadtplanungsamt, 2020) dargestellte optionale Flächen, die bei Bedarf (in Teilbereichen) langfristig entwickelt werden können. Um klimatische Auswirkungen durch eine bauliche Entwicklung dieser Flächen zu untersuchen, wurden diese hier berücksichtigt (s. Abbildung 29). Entsprechend der klimaangepassten Bebauungsstrategie Augsburgs wurde gemeinsam mit der Stadt entschieden, sämtliche geplante Gebäude als FITNAH-Klasse „Gebäude mit Gründach“ zu integrieren.

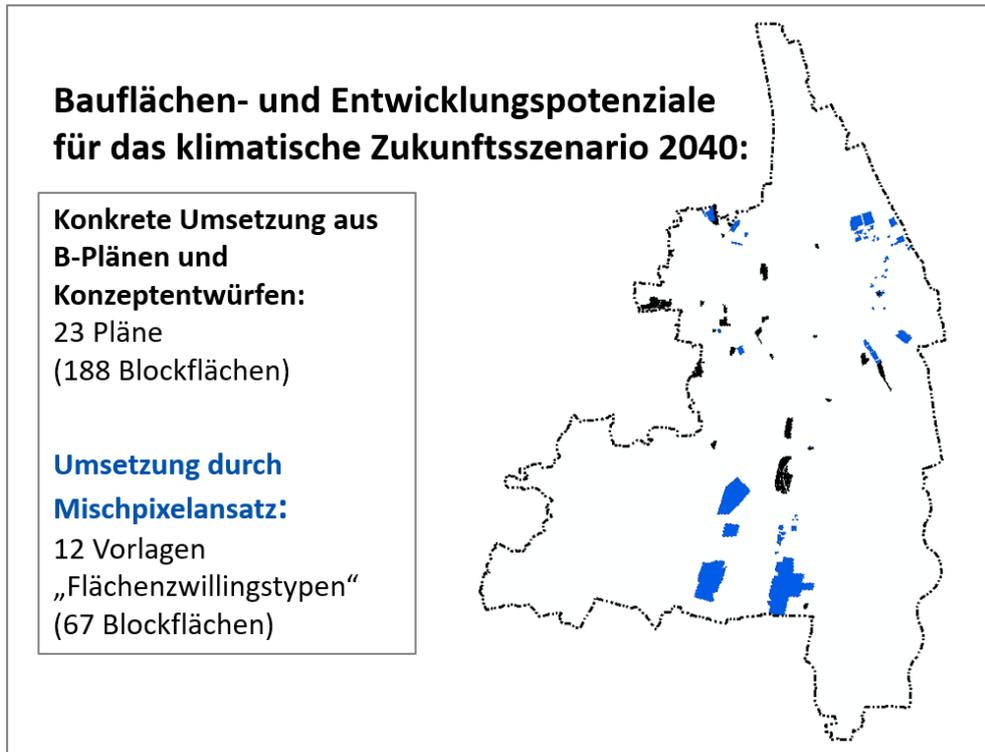


Abbildung 29: Berücksichtigte Bauflächen- und Entwicklungspotenziale für das klimatische Zukunftsszenario 2040 mit konkreter Umsetzung aus zum Teil rechtskräftigen B-Plänen und Konzeptentwürfen (schwarz) sowie durch Mischpixelansatz (blau)



Tabelle 11: Rechtskräftige B-Pläne und Planungsvorhaben, die im Rahmen des Zukunftsszenarios der Klimaanalyse Augsburg Berücksichtigung fanden.

	B-Plan Nummer/ Vorhaben	Standort
1	BP 228	Reese-Kaserne (Einarbeitung restlicher Gebäude)
2	BP 251	Südlich der Stenglinstraße
3	BP 288 B I	Sheridan-Kaserne, Teilbereich östlich des Nestackerweges, nördlich des Grasigen Weges (Ergänzung restlicher Gebäude)
4	BP 289 A	Zwischen Christian-Dierig-Straße und Eberlestraße
5	BP 298	Südlich der Ahornerstraße, westlich der Äußeren Uferstraße
6	BP 299	Südlich der Tunnelstraße, westlich des Babenhauser Weges
7	BP 300	Universität Augsburg - Medizinische Fakultät
8	BP 410 D	Nördlich der Paracelsusstraße (u.a. ehemalige Augusta-Brauerei, Lauterlech 10)
9	BP 423 A	Nördlich der Reichenbacher Straße, östlich des Proviantbaches
10	BP 449 A	Südlich der Max-Hempel-Straße
11	BP 482	Zwischen Holzbachstraße und Stadtjägerstraße
12	BP 623 D	Südlich der Dr.-Schmelzing-Straße, westlich der Karlsbader Straße
13	BP 659 I	Nördlich der Meraner Straße, westlich der Bozener Straße
14	BP 872 A	Zwischen Waldstraße und Döllgaststraße
15	BP 892	Westlich der Königsbrunner Straße, nördlich der Jupiterstraße
16	BP 894	Nördlich der Carron-du-Val-Straße, östlich des Spitalbaches
17	BP 900	Augsburg Innovationspark (restliche Flächen)
18	Vorhaben: Berliner Allee (südliche Potenzialflächen)	Zwischen Berliner Allee und Lech
19	Vorhaben: DISTA 1	Univiertel Nordost DISTA
20	Vorhaben: Ehemaliges Bahnbetriebswerk	Westlich der Firnhaberstraße: Entwurf nach ksg architekten und stadtplaner GmbH
21	Vorhaben: Neugestaltung Bahnhofsvorplatz Ost	Bahnhofsvorplatz Ost nach Gestaltungsentwurf von Atelier Loidl Landschaftsarchitekten (17.06.2022)
22	Vorhaben: GVZ	Güterverkehrszentrum Raum Augsburg (Karlsruher Straße)
23	Vorhaben: WOHANKA	WOHANKA-Areal am Holzweg

Die 23 zum Teil rechtskräftigen B-Plangebiete und Planungsvorhaben wurden analog zu jenen im Referenzlauf direkt in FITNAH-Nutzungsklassen überführt. Da die B-Planzeichnungen und Textteile teils sehr unkonkret waren, dienten städtebauliche Entwürfe und Konzepte als Informationsgrundlage zur landschaftsplanerischen Ausgestaltung, sofern diese den Angaben aus den B-Planzeichnungen und -texten nicht widersprachen (vorrangige Berücksichtigung des B-Plans gegenüber den Planzeichnungen). Ein Beispiel der Überführung der Informationen in die FITNAH-Nutzungsklassen zeigt die Abbildung 30.

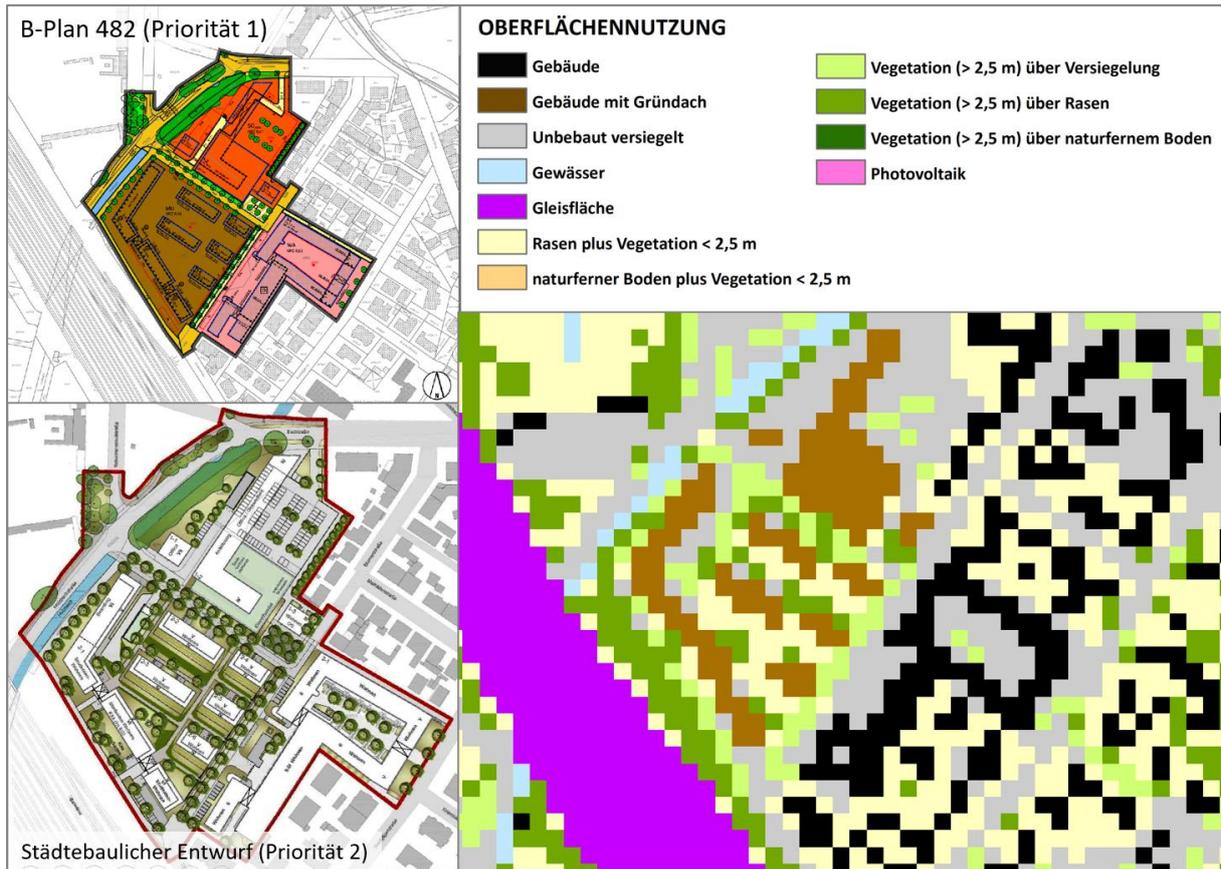


Abbildung 30: Beispielhafte Überführung der Informationen eines B-Plans und eines Städtebaulichen Entwurfs in das FITNAH-Nutzungsrastraster anhand des B-Plans BP 482 „Zwischen Holzbach und Stadtjägerstraße“.

Bei den 67 weiteren Blockflächen (Entwicklungspotenziale) kam der **Mischpixelansatz** zum Einsatz. Zur Schaffung einer Annäherung an die Landnutzung dieser Flächen im klimatischen Zukunftsszenario mit dem Zieljahr 2040 wurden vorab von der Stadt Augsburg Bestandsflächen im Untersuchungsgebiet definiert, deren siedlungstypologische Ausprägung jener der zukünftig entwickelten Reserveflächen näherungsweise entsprechen könnte. Für diese sog. „Flächenzwillingstypen“ fand anschließend eine GIS-gestützte Analyse der prozentualen Anteile der vom jeweiligen Flächenzwilling überlagerten Nutzungsinformationen des Ist-Zustandes statt. Für die 67 Blockflächen (Entwicklungspotenziale) ergaben sich somit 12 verschiedene Mischpixelklassen, die als eigene Nutzungsklassen 1001 bis 1012 in das Modell eingegangen und eng mit der Verteilungsinformation der üblichen FITNAH-Nutzungsinformation verknüpft sind. Gleichzeitig werden für alle Nutzungsklassen, die eine individuelle Höhenangabe benötigen, bspw. Gebäude oder Bäume, für jede Klasse einheitliche Strukturhöhen vorgegeben, die ebenfalls aus den Mittelwerten der Analyse der Flächenzwillinge erhoben wurden. Eine Aufstellung der für Augsburg gewählten Flächenzwillingstypen, den zugehörigen Mischpixelnutzungsklassen mit den prozentualen Anteilen der Nutzungsklassen und zugewiesenen Strukturhöhen ist in der (Lookup-)Tabelle 12 aufgetragen.



Tabelle 12: Lookup-Tabelle mit auf den Flächenzwillingstypen identifizierten prozentualen Nutzungsklassenanteilen und zugehörigen mittleren Strukturhöhen. Die Nutzungsklassen „Gebäude“, „Gewässer“, „naturfern“, „Baum ü. naturfern“ und „Gleis“ wurden bei der GIS-basierten Analyse der Flächenzwillingstypen nicht gefunden und sind daher der Übersichtlichkeit halber nicht aufgeführt.

Mischpixel-Nutzungs-klasse	Bezeichnung des Flächenzwillingstypen	Rasen	Gebäude m. Gründach	Unbebaut versiegelt	Baum ü. Versiegelung	Baum ü. Rasen
		Anteil der jeweiligen Nutzungsklasse an der Mischpixelfläche [%]				
1001	GVZ	5	59	36	0	0
1002	Gewerbe Lechhausen	0	41	53	6	0
1003	Umweltpark 1	6	28	62	4	0
1004	Umweltpark 2	2	15	81	2	0
1005	Sheridan-Kaserne	47	18	31	1	3
1006	Inningen	55	21	23	0	1
1007	Kleinvenedig	27	50	16	0	7
1008	Umweltpark 3	0	41	59	0	0
1009	Gewerbe Haunstetten Nord	0	48	52	0	0
1010	Reese-Kaserne	27	40	20	0	13
1011	Gewerbe Ostfriedhof	1	73	25	0	1
1012	Univiertel Nord	0	37	63	0	0
		Mittlere Strukturhöhe [m]				
1001	GVZ	0	11	0	0	0
1002	Gewerbe Lechhausen	0	14	0	8	0
1003	Umweltpark 1	0	16	0	11	0
1004	Umweltpark 2	0	13	0	7	0
1005	Sheridan-Kaserne	0	10	0	16	16
1006	Inningen	0	12	0	0	14
1007	Kleinvenedig	0	19	0	0	13
1008	Umweltpark 3	0	8	0	0	0
1009	Gewerbe Haunstetten Nord	0	13	0	0	0
1010	Reese-Kaserne	0	5	0	0	11
1011	Gewerbe Ostfriedhof	0	13	0	0	19
1012	Univiertel Nord	0	12	0	0	0

Im Zukunftsmodelllauf greift das FITNAH-Modul „Randomisator“ bei Aufkommen der Nutzungsklassen 1001 bis 1012 auf die Nutzungsverteilungen zu und füllt diese rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften herkömmlichen FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen aus der erzeugten Lookup-Tabelle auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Das Schaubild in Abbildung 31 zeigt exemplarisch die randomisierte Flächenzuweisung für eine Wohn-/Mischbebauung (nach Flächenzwillingstyp Kleinvenedig) und eine Gewerbeentwicklung (nach Flächenzwillingstyp GVZ). Obwohl die Gebäude im Ist-Zustand über kein Gründach verfügten, wurde dieses im Zukunftsszenario für alle Gebäude angenommen (s.o.), weshalb Gebäude in der randomisierten Verteilung durch braune statt schwarze Rasterpixel dargestellt wurden.

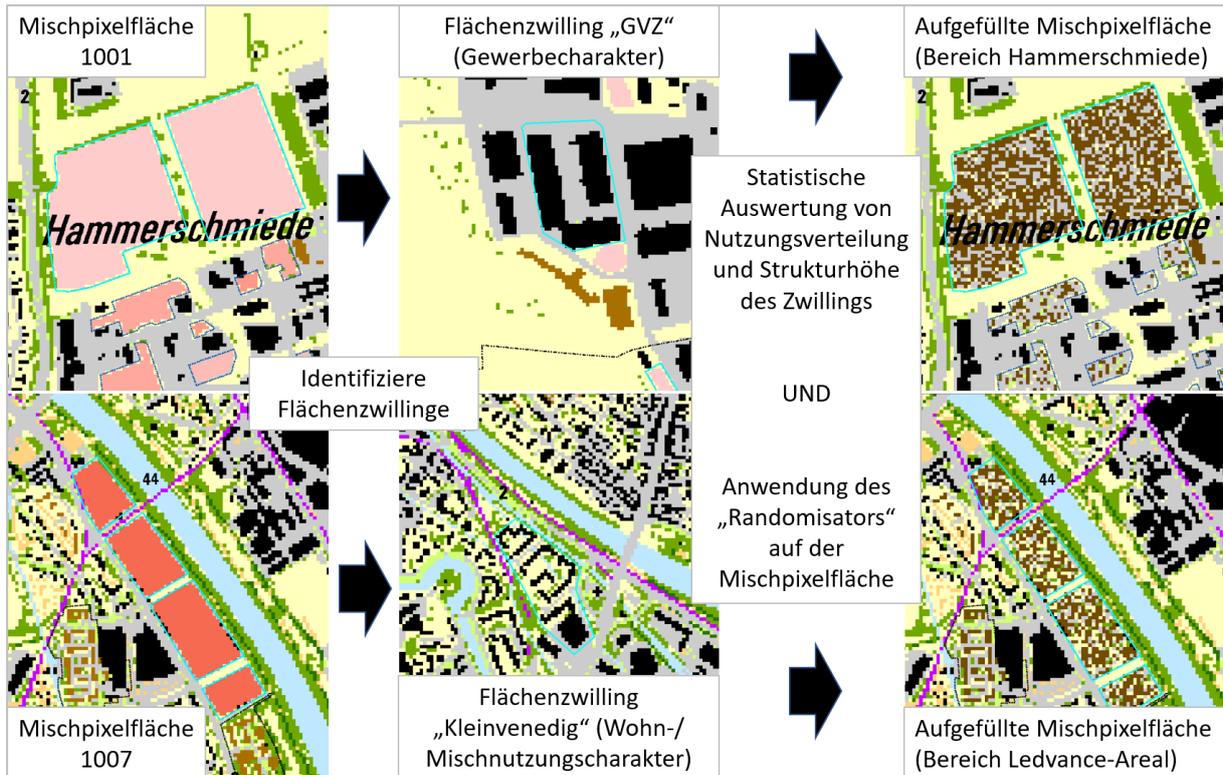


Abbildung 31: Schaubild zur Identifizierung von Flächenzwillingen zur randomisierten Befüllung der Mischpixelflächen 1001 und 1007 (jeweils hellblau umrandet).

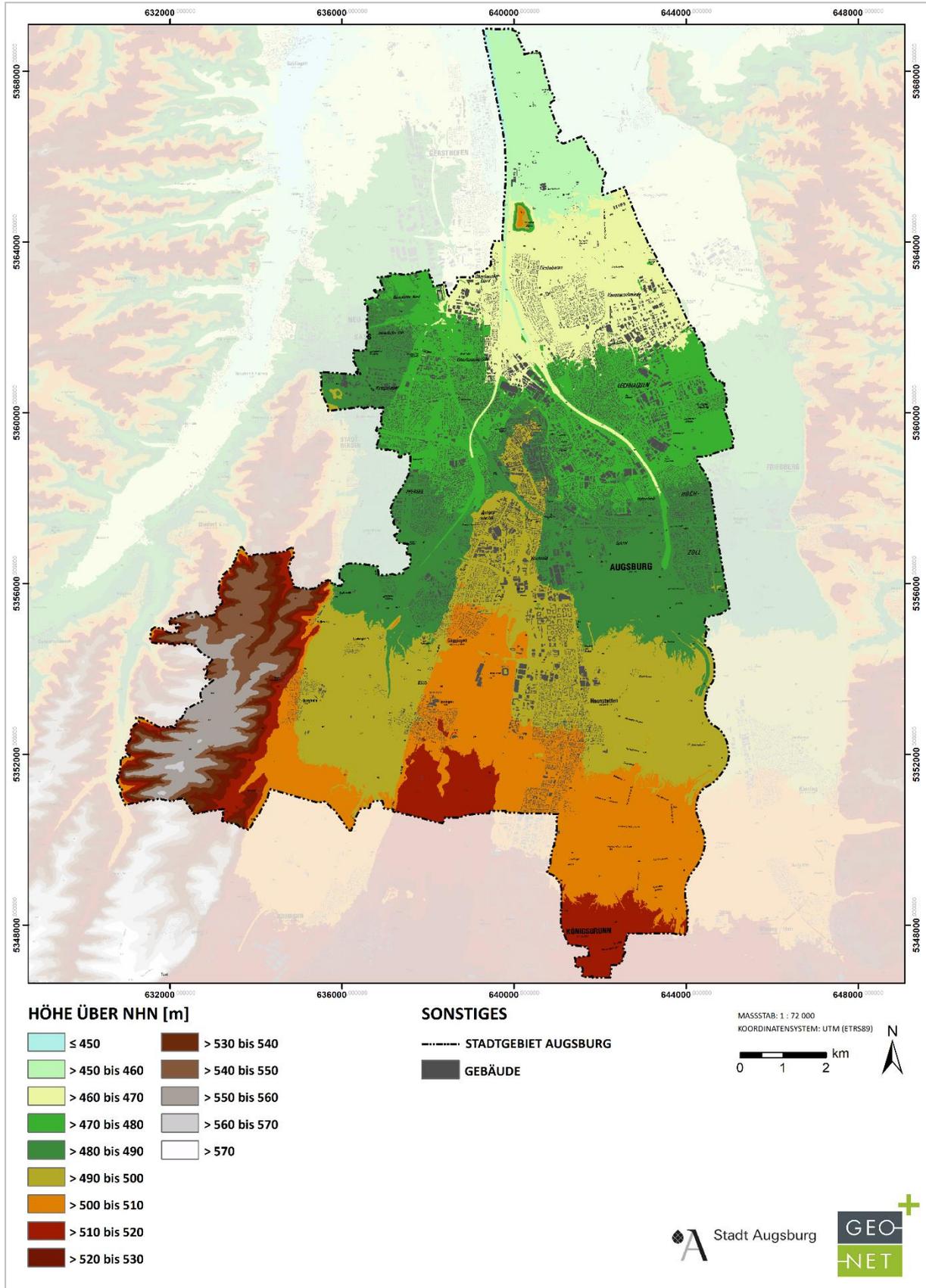


Abbildung 32: Digitales Geländemodell für Augsburg und Umgebung (Referenz- und Zukunftssituation auf Rasterebene).

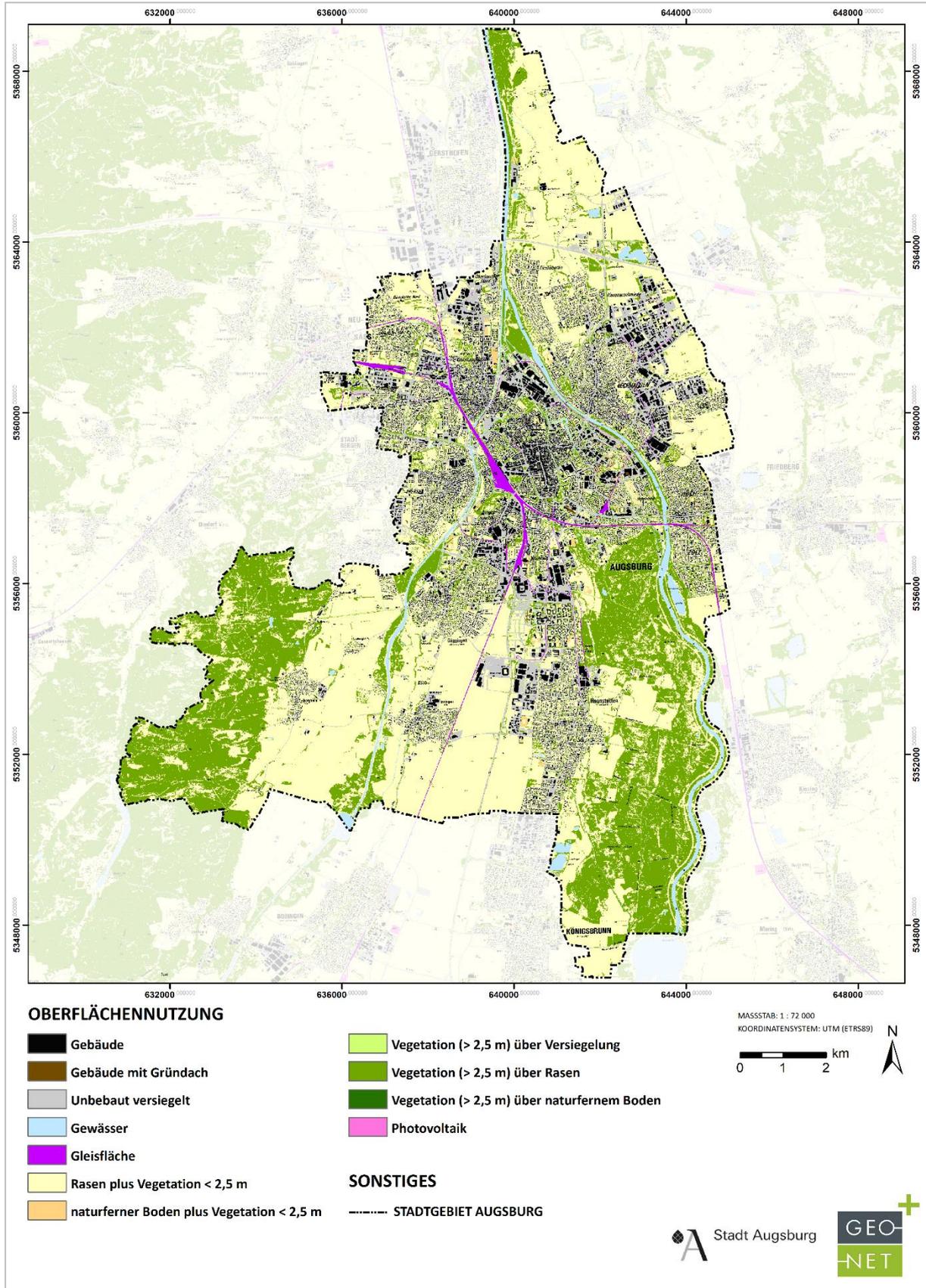


Abbildung 33: Klassifizierte Landnutzung / Stadtstruktur der Bestandssituation in Augsburg und Umgebung (Referenzsituation auf Rasterebene).

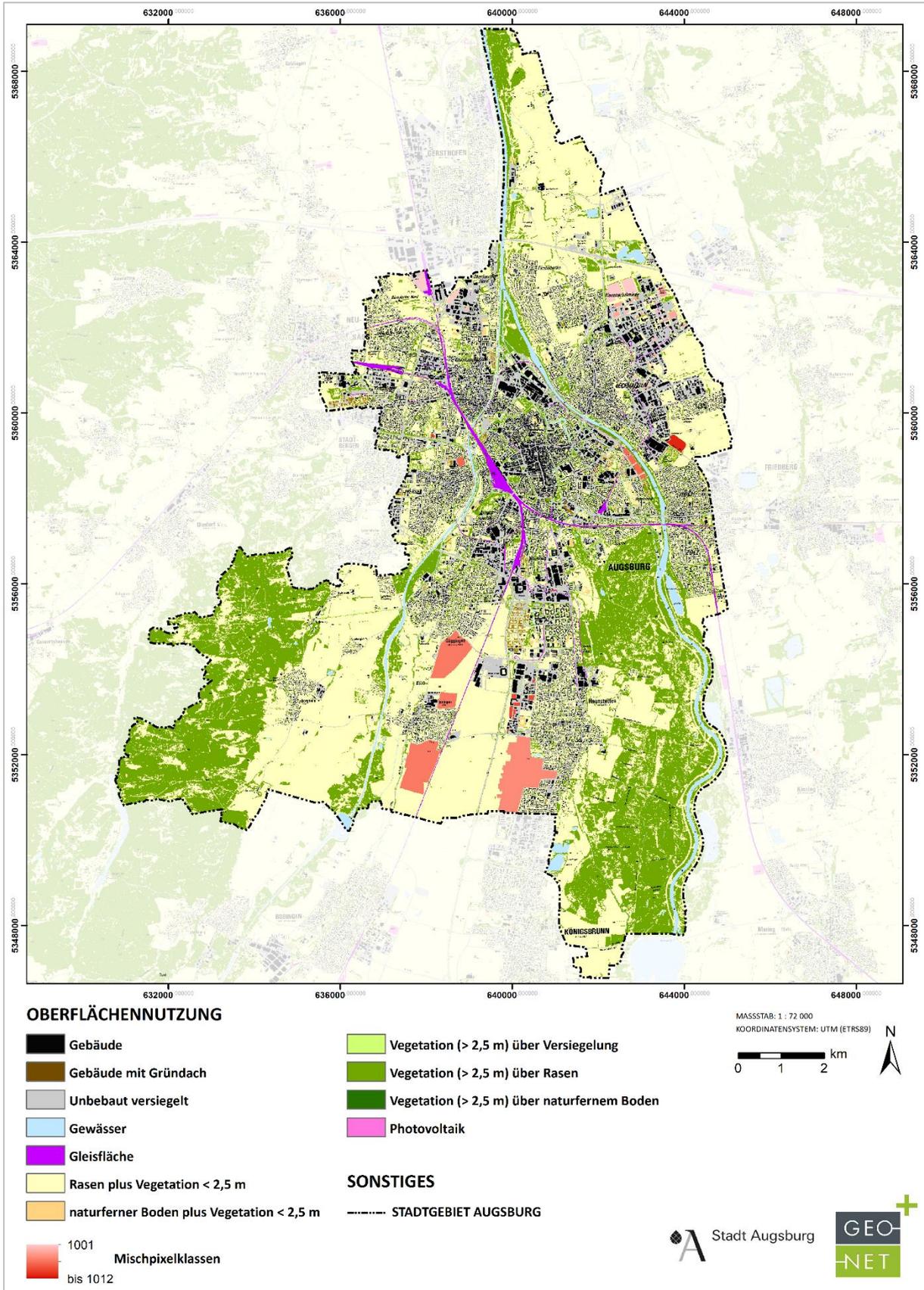


Abbildung 34: Klassifizierte Landnutzung / Stadtstruktur der Bestandssituation in Augsburg und Umgebung (Zukunftssituation auf Rasterebene).



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 Augsburg 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 Augsburg 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 35 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.

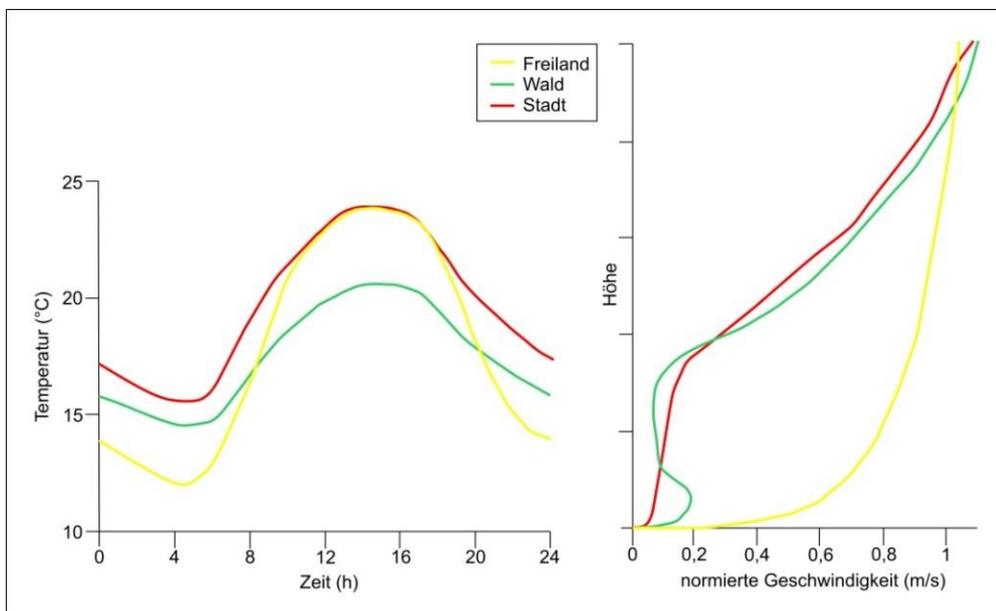


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Um die regionalen Winde im Großraum (hier: „Alpines Pumpen“) berücksichtigen zu können, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus der landesweiten Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsplanung in Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt/GEO-NET 2021). Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsgeschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Augsburger Klimaanalyse weitergegeben.

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels im Modelllauf für das Zukunftsszenario 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 ein einheitliches Delta von +1,8K ermittelt (entspricht dem 85. Perzentil des verwendeten Ensembles zum RCP 8.5 für die Sommermonate Juni-August). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhengiveaus addiert (s. Abbildung 36). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21 °C bzw. 22,8 °C.

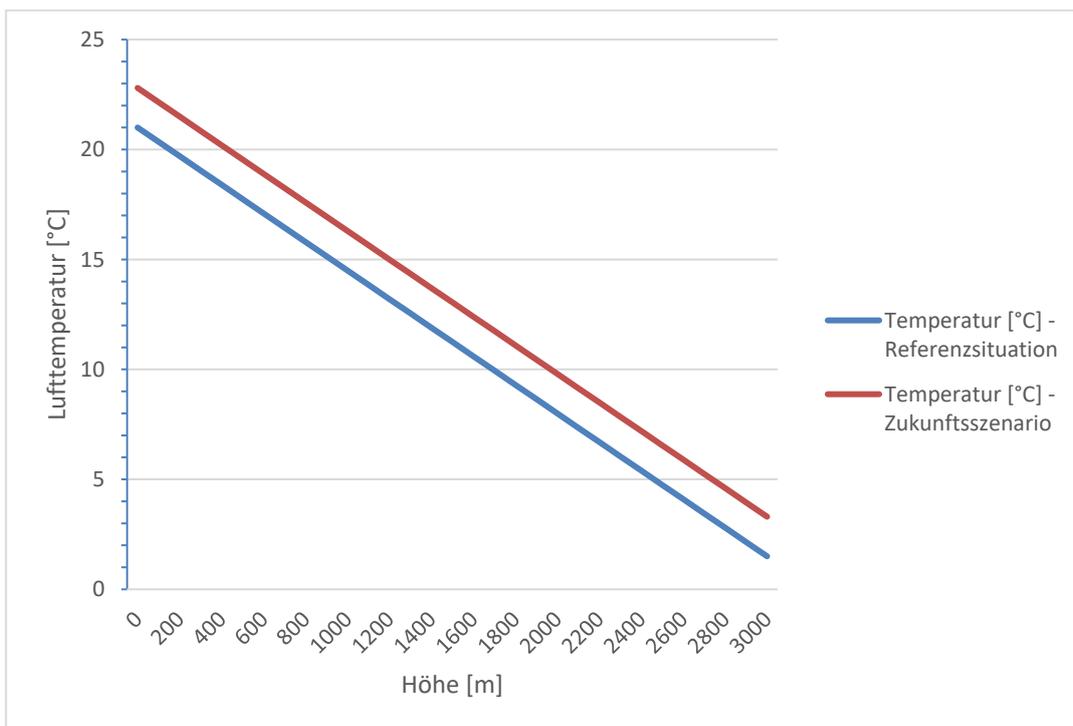


Abbildung 36: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation (blaue Kurve) sowie für das Szenario „starker“ Klimawandel (rot).

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 8.5). 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 13). 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 13: 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]	
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
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 14).

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 Kaltluftvo-



lumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertzeitpunkte 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 14: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltfluthaushalt.

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&E⁶-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 Kaltluftthaushaltes. 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.

⁶ 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 100 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte in der Größenordnung Augsburgs 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 10 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, 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 (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt 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. Da für Augsburg kein hochaufgelöster, städtischer Geodatensatz verfügbar war, wird folglich 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 Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen 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 einzelstehenden 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 Variationspotenzial, 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 5.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation kann eine überwiegend aktuelle Datengrundlage aus den Jahren 2020 oder 2021 und folglich eine geringe Unsicherheit attestiert werden. Lediglich das Digitale Geländemodell war zum Zeitpunkt der Modellierung ca. 10 Jahre alt. Da dieses jedoch über Jahrzehnte hinweg kaum Änderungen unterliegt, kann auch das DGM als hinreichend aktuell bezeichnet und eingangsdatenbedingte Unsicherheiten als gering eingeschätzt werden.

Für Augsburg 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 perspektivisch 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 zum heutigen Zeitpunkt nicht vorhersehbar.

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 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 5.4). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Klassenschritte in der Farblegende wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

6.1 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 Augsburger Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von ca. 12,3 °C über siedlungsfernen Freiflächen und Maximalwerten bis etwa 19,2 °C in hochversiegelten Bereichen eine Spannweite von 6,9 °C. Die mittlere Temperatur der Stadt liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,6 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den bereits in den Grundlagen benannten Wärmeineffekt (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 Innenstadt Augsburgs sind die höchsten Bebauungsdichten und – insbesondere auch in den gewerblich geprägten Bereichen – hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der größten nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (s. Abbildung 37). Insbesondere am



Rand von großen Industrie- und Gewerbehallen, etwa in Hammerschmiede, Lechhausen oder dem Riedinger Gewerbepark, aber auch in der Innenstadt im Bereich rund um den Rathausplatz und der Maximilianstraße, teils auch im Stadtteil Oberhausen werden flächenhaft mehr als 18 °C, punktuell auch knapp 19 °C registriert. Mit steigender Entfernung zum Zentrum nimmt die Überwärmung ab, in den zentrumsnahen, aber teils aufgelockerteren Stadtteilen Hochfeld, Spickel-Herrenbach und Teilen von Lechhausen und Pfersee liegt die Temperatur im Bereich von 15 bis 19 °C. Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden mit Spannen zwischen überwiegend knapp 14 bis 18 °C in den Stadtteilen am nördlichen (z.B. Bärenkeller) und südlichen Rand Augsburgs (z.B. Bergheim, Inningen, Haunstetten Süd) erreicht.

Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Agrargebiete im Süden Augsburgs mit teils unter 13 °C zu den kältesten Bereichen der Stadt. Acker- und auch Rasenflächen kühlen sich nachts am stärksten ab, weshalb diese Orte in der Regel Temperaturen unterhalb von 14 °C aufzeigen und auch eine Gunstwirkung auf umliegende Bebauung bedingen können. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 13 bis 15 °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 14 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Amberger Wiese mit ca. 14,3 bis 15 °C). Größere vegetationsgeprägte Grünareale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potenzielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar. In Augsburg gibt es zahlreiche größere und kleinere Stadtparks mit solchen Eigenschaften, beispielsweise den Wittelsbacher Park, den Griesle, den Botanische Garten und die Siebentischanlagen oder die Grünfläche nördlich der Straße „Am Pfannenstiel“. Friedhöfe (z.B. Westfriedhof, Hermanfriedhof, Alter Ostfriedhof), Kleingartenanlagen (z.B. Kleingartenanlage Hochfeld), aber auch auf Naturrasen basierte Sportplätze (z.B. Sportplätze Georg-Mayr-Weg und die Sportanlage Süd) 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 15 - 16 °C erreicht werden (z.B. Siebentischwald, Naturpark Westliche Wälder). 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 des Lechs und der Wertach nachts bei Temperaturen von 17,5 °C bis 18 °C ähnlich überwärmt wie weite Teile des Siedlungsraumes. Gleiches gilt für Augsburgs reich verzweigtes Netz an Bächen und Kanälen, das sich über eine Länge von mehr als 135 km erstreckt (Umweltstation Augsburg 2022). Auch z.B. am Proviantbach oder dem Stadtbach werden nächtliche Lufttemperaturen um ca. 18 °C simuliert, wodurch sich diese nicht vom umliegenden Siedlungsraum abheben.

Aufgrund des Klimawandels ist in naher Zukunft (Zieljahr 2040) mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von durchschnittlich 1,8 K gegenüber der Referenzperiode (1991-2020) zu rechnen (RCP-Szenario 8.5, s. Abbildung 38). Mit dem Klimawandel erwärmen sich die Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen ähnlich



stark wie die Grün- und Freiflächen, wodurch der Wärmeinseleffekt von 6,9 K unverändert bestehen bleibt (bei einem Minimum der Temperatur von 14,1 °C im Umland und einem Temperaturmaximum im Zentrum/Gewerbe von 21,0 °C). Ungleichmäßiger zeigen sich die Temperaturänderungen im Bereich der Entwicklungs- und Siedlungspotenzialflächen (s. Tabelle 16).

Bei allen für das klimatische Zukunftsszenario 2040 berücksichtigten Blockflächen (Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen), die als Mischpixelklassen parametrisiert wurden, ist im Vergleich zum Ist-Zustand im Mittel mit einer Erhöhung der nächtlichen Temperatur zu rechnen. Die beiden Entwicklungsflächen der Vorhaben an der Berliner Allee und DISTA 1 liegen dabei genau im Bereich des Klimawandelsignals⁷ von im Mittel 1,8 K. Insgesamt 11 der 23 B-Planflächen und Vorhaben und 10 der 12 Siedlungspotenzialflächen 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 den Entwicklungsflächen ist nach Umsetzung des B-Plans 659 I „Nördlich der Meraner Straße, westlich der Bozener Straße“ die im Mittel größte nächtliche Temperaturzunahme um 5,3 K im Vergleich zum Ist-Zustand zu erwarten. Die heutige Agrarfläche wird im Zuge einer Gewerbeentwicklung in Lechhausen (rundherum liegen drei Mischpixelflächen 1002 für die Gebäudepositionen und -anteile) ebenerdig asphaltiert und damit die Wärmekapazität der Fläche drastisch erhöht. Mit einer Erhöhung um 5,9 K ist die maximale Temperaturzunahme auf der betrachteten Fläche zwar sehr hoch, das Maximum wird jedoch bei der Entwicklung der B-Planfläche 300 „Universität Augsburg - Medizinische Fakultät“ mit 7,2 K in einem versiegelten Innenhof modelliert. Dort, wo eine heutige Parkplatzfläche in eine Rasenfläche mit umliegender Straßenbahnwendeschleife umfunktioniert wird, verringert sich die Temperatur hingegen maximal um 1,6 K. Die im Mittel geringste Temperaturerhöhung ist mit 0,2 K verglichen mit der heutigen Situation nach Umsetzung des B-Plans 299 „Südlich der Tunnelstraße, westlich des Babenhauser Weges“ festzustellen, was als Indiz für dessen für die Nachtsituation klimaangepasste Ausgestaltung zu werten ist. Im Vergleich zur zuvor vorherrschenden Parkplatzfläche zeigt sich die etablierte Zeilenbebauung mit Einzelbaumpflanzungen und unversiegelten Rasenflächen als lokale Kaltluftproduktionsstätte und wertet den Standort in Bezug auf das nächtliche Temperaturniveau sichtbar auf.

Bei den mittels Mischpixelansatz approximierten Entwicklungsflächen bedingt Mischpixelfläche 1007 (Flächenzwilling „Kleinvenedig“) die geringste mittlere Temperaturerhöhung um lediglich 0,5 K. Zwar ist der angenommene Rasenanteil von 27 % geringer als bei anderen Flächenzwillingen, führt in der Anwendung im heutigen Ledvance-Areal jedoch zu einer enormen Flächenaufwertung in Bezug auf Entsiegelung und das Potenzial zur Kaltluftentstehung. Auch der verringerte Gebäudeanteil auf 50 % führt zu einer im Vergleich zum Klimawandelsignal geringeren Temperaturzunahme. Mit einer mittleren nächtlichen Erhöhung der Temperatur um 5,1 K bzw. 5,4 K sind die Mischpixelflächen MP 1011 (Flächenzwilling „Gewerbe Ostfriedhof“) und MP 1001 (Flächenzwilling „GVZ“) diejenigen mit der größten Temperaturzunahme. Beide Flächenentwicklungen sind an Gewerbe angelehnt und sind durch einen hohen zukünftigen Anteil an Gebäuden und unbebaut versiegelter Fläche charakterisiert, die das in Zukunft hohe Temperaturniveau erklären. Bei einem besonders

⁷ Hier: Synonym für die im Modelllauf des Zukunftsszenarios aus dem RCP-Szenario 8.5 abgeleitete Temperaturerhöhung um 1,8 K bis 2040.



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. Die Differenzkarte der nächtlichen Temperatur von Zukunftsszenario und Ist-Zustand ist in Abbildung A 12 im Anhang aufgetragen.

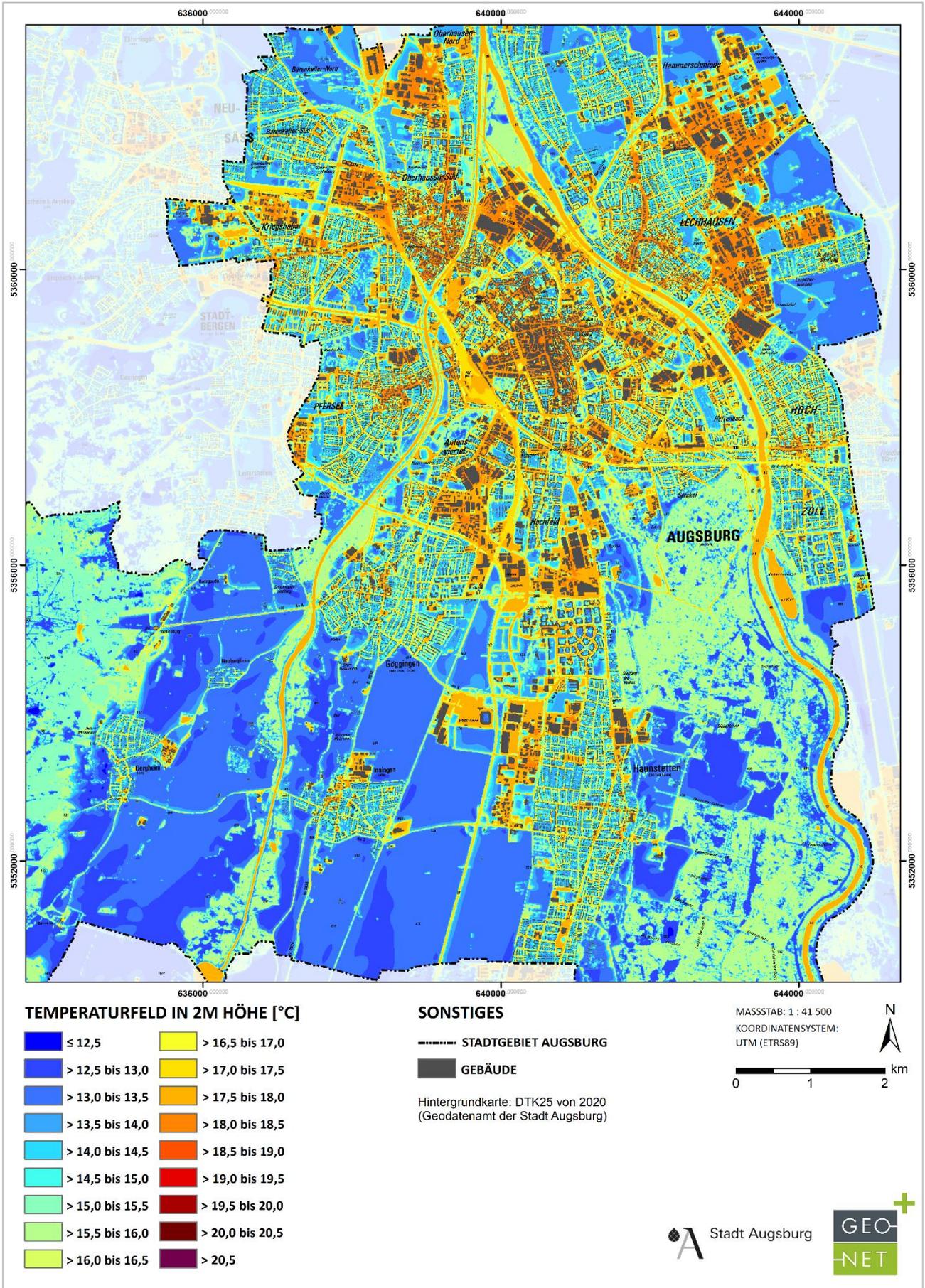


Abbildung 37: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

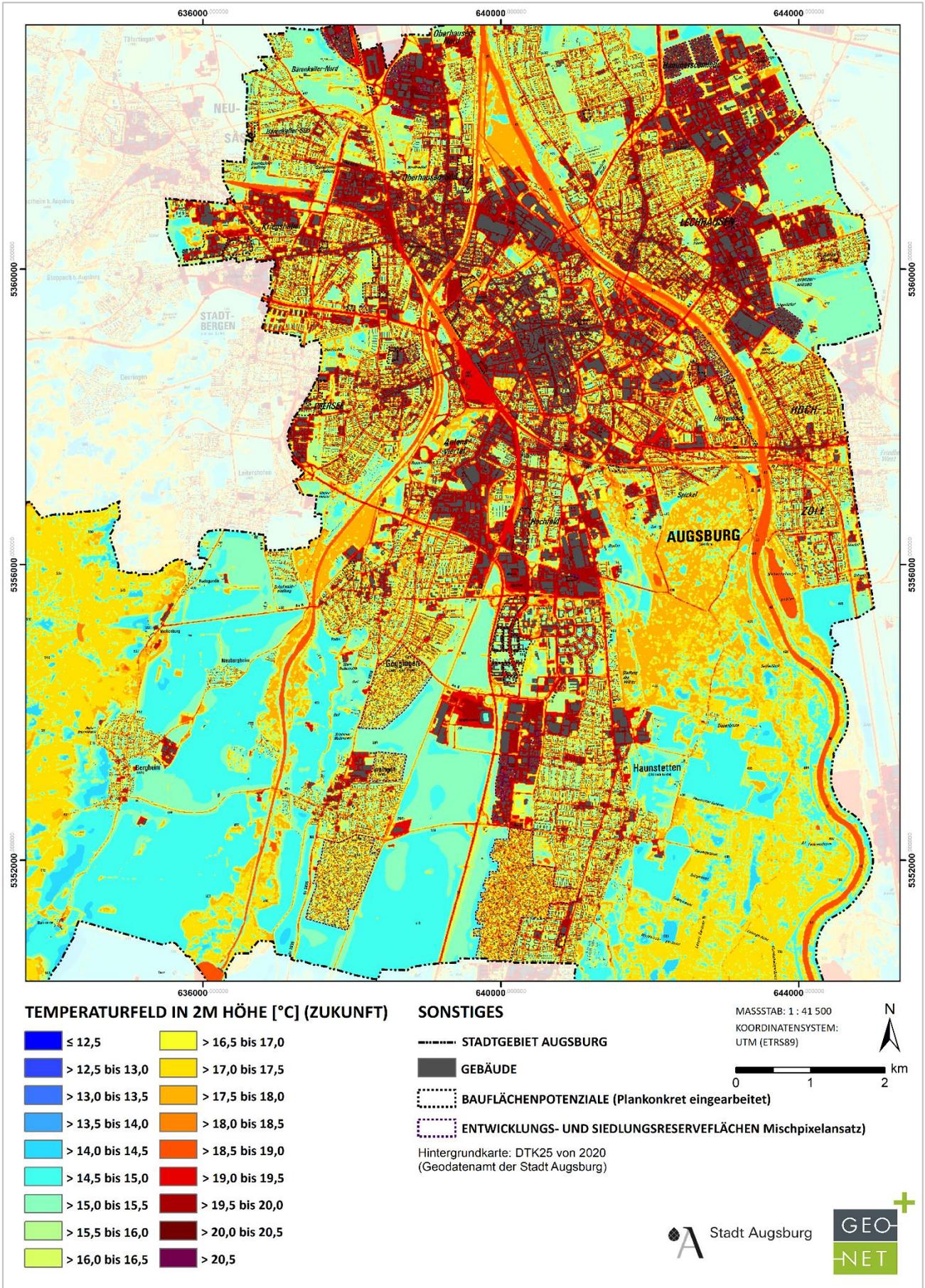


Abbildung 38: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



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 39).

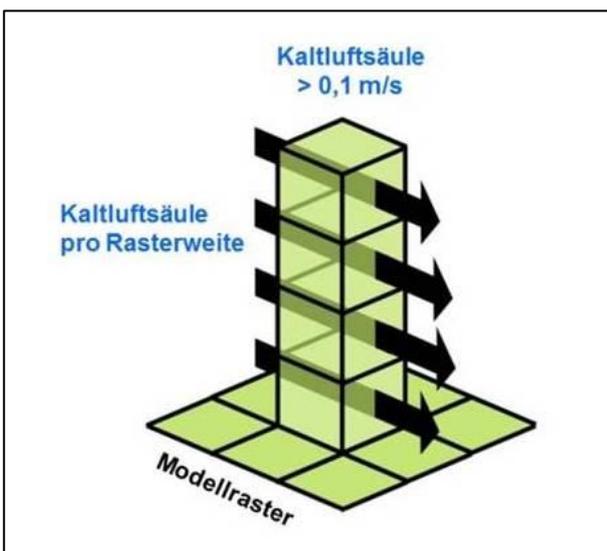


Abbildung 39: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

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.⁸

⁸ Der Kaltluftvolumenstrom in m^3/s beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 10 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 luvseitig⁹ markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee¹⁰ zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der 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 über $93 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Augsburger Stadtgebiet liegt bei $21,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Hohe Kaltluftvolumenströme bewegen sich als Kaltluftabflüsse aus dem Südbayerischen Hügelland von Süden her auf das Augsburger Stadtgebiet zu (Abbildung 40). Auch über den Freiflächen im Süden Augsburgs zwischen Bergheim und Haunstetten entsteht Kaltluft, die aufgrund der Geländeneigung in Richtung des nördlich gelegenen Siedlungsraumes abfließt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem solche, auf das Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse. Kaltluftvolumenströme sind dabei jedoch nicht ausschließlich geländeorientiert: Dies wird am Beispiel der größeren Ströme, die von nördlich gelegenen Ackerflächen jeweils von Norden her nach Inningen, Hammerschmiede oder Firnhaberau hineinwabern, ersichtlich. Solche Kaltluftbewegungen entstehen durch Temperaturunterschiede zwischen kühlem Ausgleichsraum und warmen Siedlungskörper. Über letzterem steigt die warme Luft auf, wodurch ein Vakuum entsteht, das durch vergleichsweise kühlere Luft vom umgebenen Umland ausgeglichen wird. Diese Art thermisch bedingter Winde werden Flurwinde genannt. Die eher lockere Bebauung am Stadtrand Augsburgs 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 große, innerstädtische Grünflächen aufgrund der Temperaturunterschiede zur Umgebung ihr eigenes Windsystem aus (z.B. Wolfzahnau, Freiflächen Lech-Nord, Westfriedhof oder Kleingartenanlage Hochfeld). Diese sogenannten „Parkwinde“ stellen wichtige Ausgleichsströme für die angrenzende Bebauung dar.

Rauigkeitsarme Strukturen wie Bahntrassen oder breite Straßen sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüngerprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen). Der orografisch tiefliegende und größtenteils nah an den Siedlungsstrukturen befindliche Lech eignet sich ebenfalls weniger zum Kaltlufttransport in Richtung der Innenstadt. Deutlich prädestinierter zeigt sich die Wertach, insbesondere im Bereich zwischen Gabelsberger Straße und Pferseer Straße. Hier fließt die vornehmlich im Gögginger Wäldle gebildete Kaltluft entlang des Flusses und der umgebenen flachen Grünstrukturen wie Sportplätzen und Kleingartenanlagen, die den

⁹ dem Wind zugewandte Seite

¹⁰ dem Wind abgewandte Seite

Strom zusätzlich mit weiterer Kaltluft speisen, nahezu ungehindert gen Norden. Dies spiegelt sich in oftmals überdurchschnittlichen Werten des Kaltluftvolumenstroms wider.

Die Kaltluftdynamik in der nahen Zukunft verändert sich im Zuge des Klimawandels gegenüber der heutigen Situation nur moderat (Abbildung 41) – eine flächendeckende KVSD-Änderung analog zur nächtlichen Temperatur ist bei diesem Parameter nicht zu beobachten. Änderungen im Kaltluftströmungsfeld ergeben sich vorrangig im Umfeld der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen, da neu errichtete Gebäude oder Bäume als Strömungshindernisse fungieren und damit die Winde abbremsen bzw. umlenken.

Bei den 23 Entwicklungsflächen wird bei 19 Flächen eine Abnahme des Kaltluftvolumenstroms, bei lediglich vier Flächen eine Zunahme registriert. Auch bei den 12 durch den Mischpixelansatz approximierten Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen nimmt das Kaltluftprozessgeschehen größtenteils ab (10 von 12 Flächen, s. Tabelle 16). BP 251 ist mit einer Verringerung des mittleren Kaltluftvolumenstroms um $11,7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (im Maximum gar um $52,3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) diejenige Entwicklungsfläche mit dem größten negativen Änderungssignal. Hierbei wird die heutzutage frei überströmbare Ackerfläche südlich der Semmelweisstraße vollständig mit Gebäuden und Bäumen überplant und auf diese Weise die Rauigkeit auf der Fläche um ein Vielfaches erhöht, was das Kaltluftgeschehen größtenteils zum Erliegen bringt. Bei den Mischpixelflächen liegt die größte mittlere negative Änderungsrate gar bei $-20,3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Dieser hohe Wert ist jedoch nicht durch den Flächenzwillung „Umweltpark 2“ bedingt, der nur eine geringfügige Überbauung von nur 15 % und einen Baumbestand von 2 % vorgibt. Die betrachteten nachverdichteten Flächen im Stadtteil Hammerschmiede liegen vielmehr innerhalb des Siedlungsraumes und werden von den weiter außen gelegenen, neuen Mischpixelflächen MP 1001 beeinflusst, die einem hochversiegelten Gewerbe nachempfunden sind und eine entsprechend große thermische Sogwirkung auf die Umgebung ausüben. Auch die Differenz-Abbildung A 13 im Anhang zeigt, dass sich die Auswirkungen auf die KVSD anders als auf 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 42 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur¹¹) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ angenommen.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeld folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Augsburger Stadtgebiet treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis $1,6 \text{ m/s}$ im Bereich der Hänge westlich von Bergheim auf, wo thermische Winde durch das starke Relief beschleunigt werden. Vergleichbar gut durchströmt zeigen sich zudem erneut die bereits bei der Betrachtung der KVSD genannten ruhigkeitsarmen Ausgleichsflächen (Freiflächen im Süden Augsburgs zwischen Bergheim und Haunstetten und nördliche Agrarflächen im Bereich Hammerschmiede/Firnhaberau). In $2 \text{ m} \ddot{u}.$ Gr. tritt jedoch die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass einige Bereiche des

¹¹ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung von 200 m abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.



Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren. Der mittlere Wind beträgt innerhalb der Stadtgrenzen 0,2 m/s.

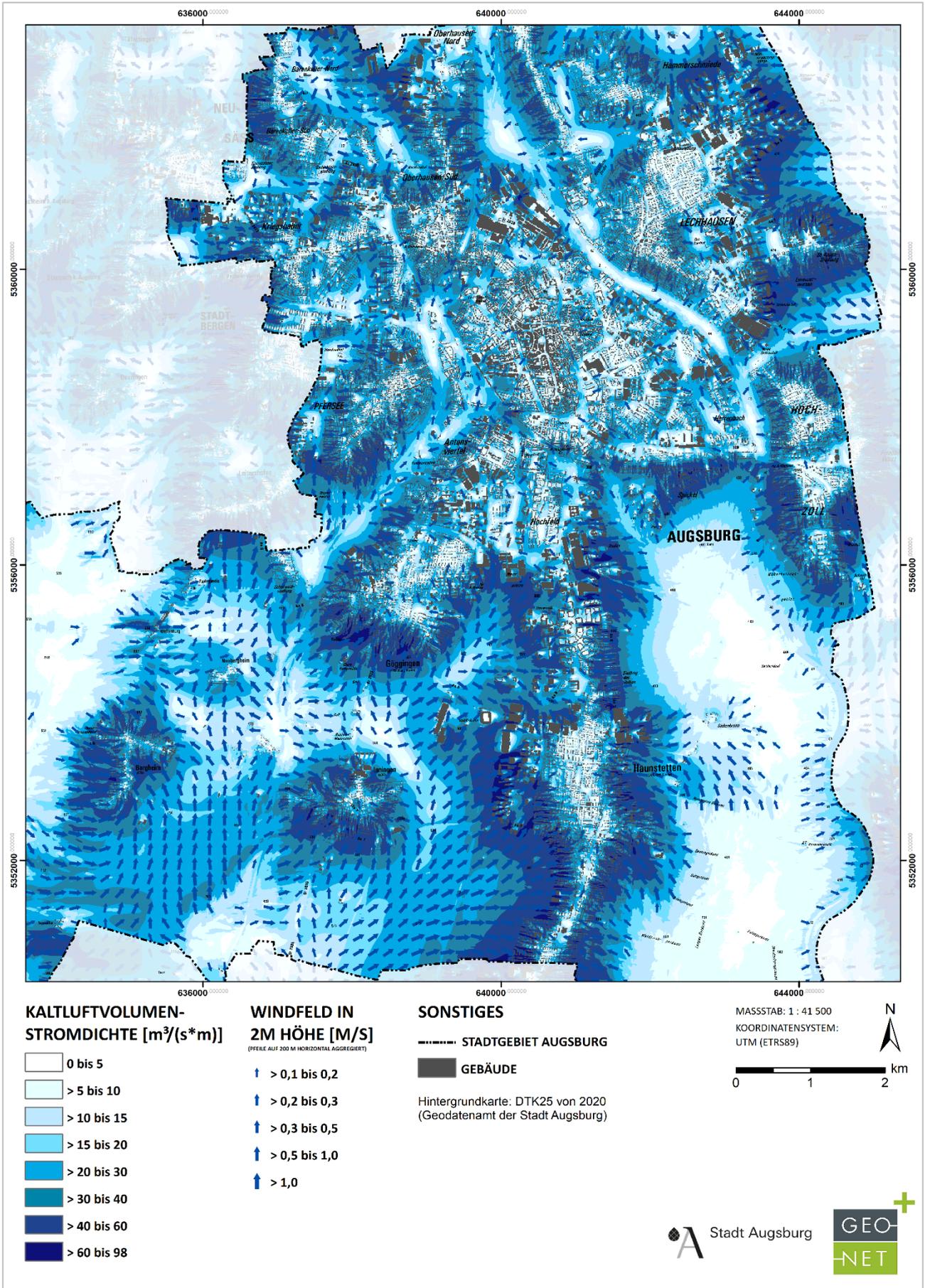


Abbildung 40: Nächliche Kaltluftvolumenstromdichte von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

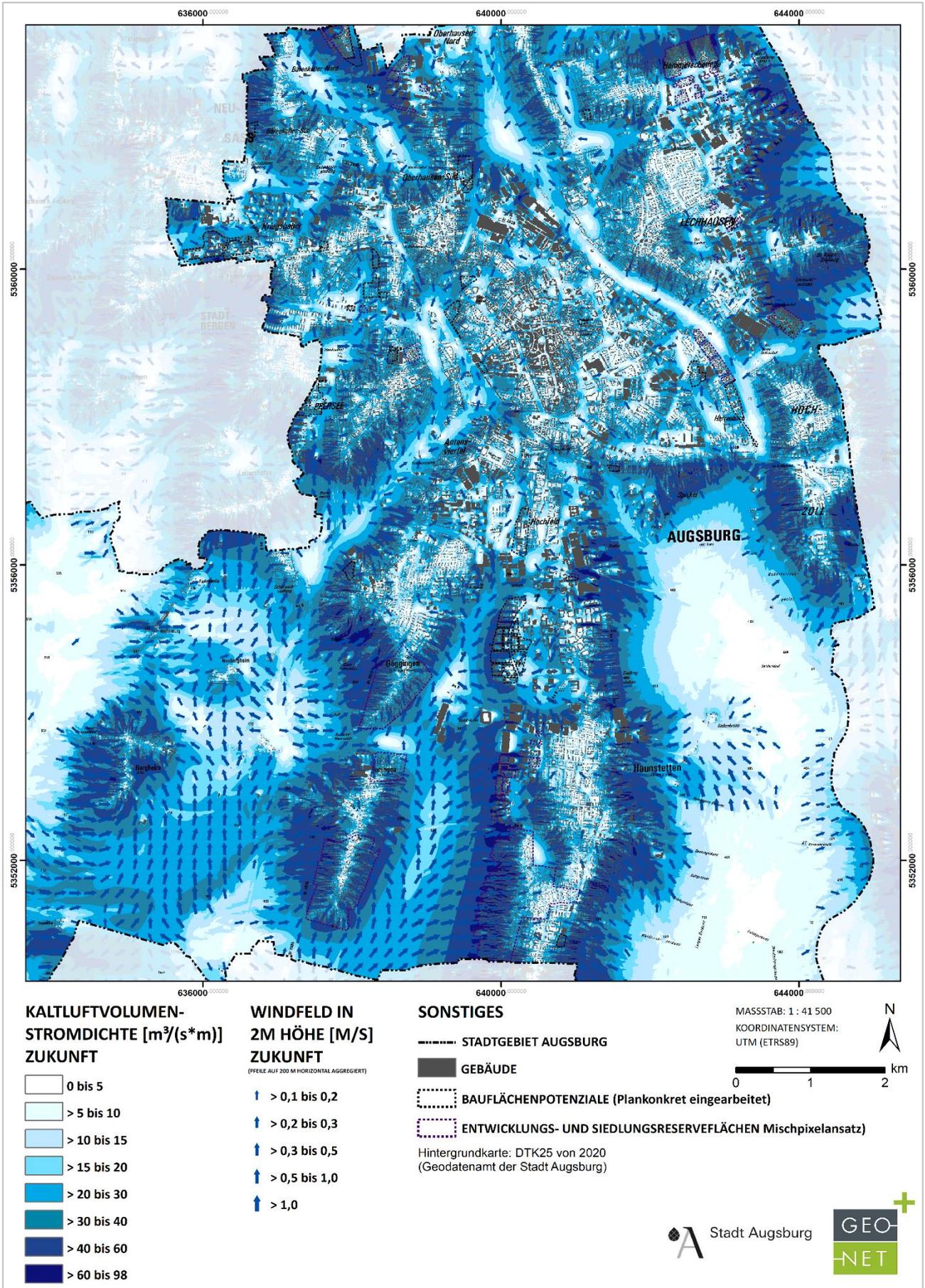


Abbildung 41: Nächliche Kaltluftvolumenstromdichte von 04 Uhr im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



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 43 zeigt das nächtliche bodennahe Windfeld der nahen Zukunft (Zieljahr 2040). Analog zur Kaltluftvolumenstromdichte ist bei Geschwindigkeiten von mittleren 0,2 m/s und einem Maximum von 1,6 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 Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen anzutreffen (s. Tabelle 16), wirken sich aber wie bei der KVSD je nach Größe der entwickelten Fläche auch auf die (unmittelbare) Umgebung aus. Auf den Entwicklungsflächen findet im Mittel überall eine Abnahme der Windgeschwindigkeit um bis zu 0,3 m/s statt (B-Pläne 251, 872 A und Vorhaben WOHANKA). Auf vier B-Plänen kann die mittlere Windgeschwindigkeit im Vergleich zum Ist-Zustand konstant gehalten werden. Bei BP 289 wird beispielsweise die massive Bebauung einer Gewerbehalle durch eine aufgelockerte Wohnbebauung ersetzt, wodurch sich trotz zusätzlicher Gebäude auf der Entwicklungsfläche keine Änderung des Strömungsgeschehens einstellt.

Auf den Siedlungsreserveflächen sind im Mittel ausschließlich Abnahmen des Strömungsgeschehens zu beobachten – gar in größerem Maße als bei den Entwicklungsflächen (-0,1 m/s bis -0,5 m/s). MP-Fläche 1009, die die größten mittleren Abnahmen der Windgeschwindigkeit aufzeigt, induziert lokal gar eine Verringerung um 1,3 m/s. Dies steht in engem Zusammenhang zur Flächenzwillingsfläche „Gewerbe Haunstetten Nord“, die zu 48 % mit Gebäuden überstandenen und zu 52 % versiegelt ist. Ähnlich dem zukünftigen nächtlichen Temperatur- und Kaltluftvolumenstromfeld sind die etwas größeren Abnahmen der Windgeschwindigkeiten auf den Siedlungsreserveflächen im Vergleich zu den konkret eingearbeiteten Entwicklungsflächen auf eine Überschätzung infolge der zufälligen Gebäude- und Baumverteilung des Mischpixelansatzes zurückzuführen.

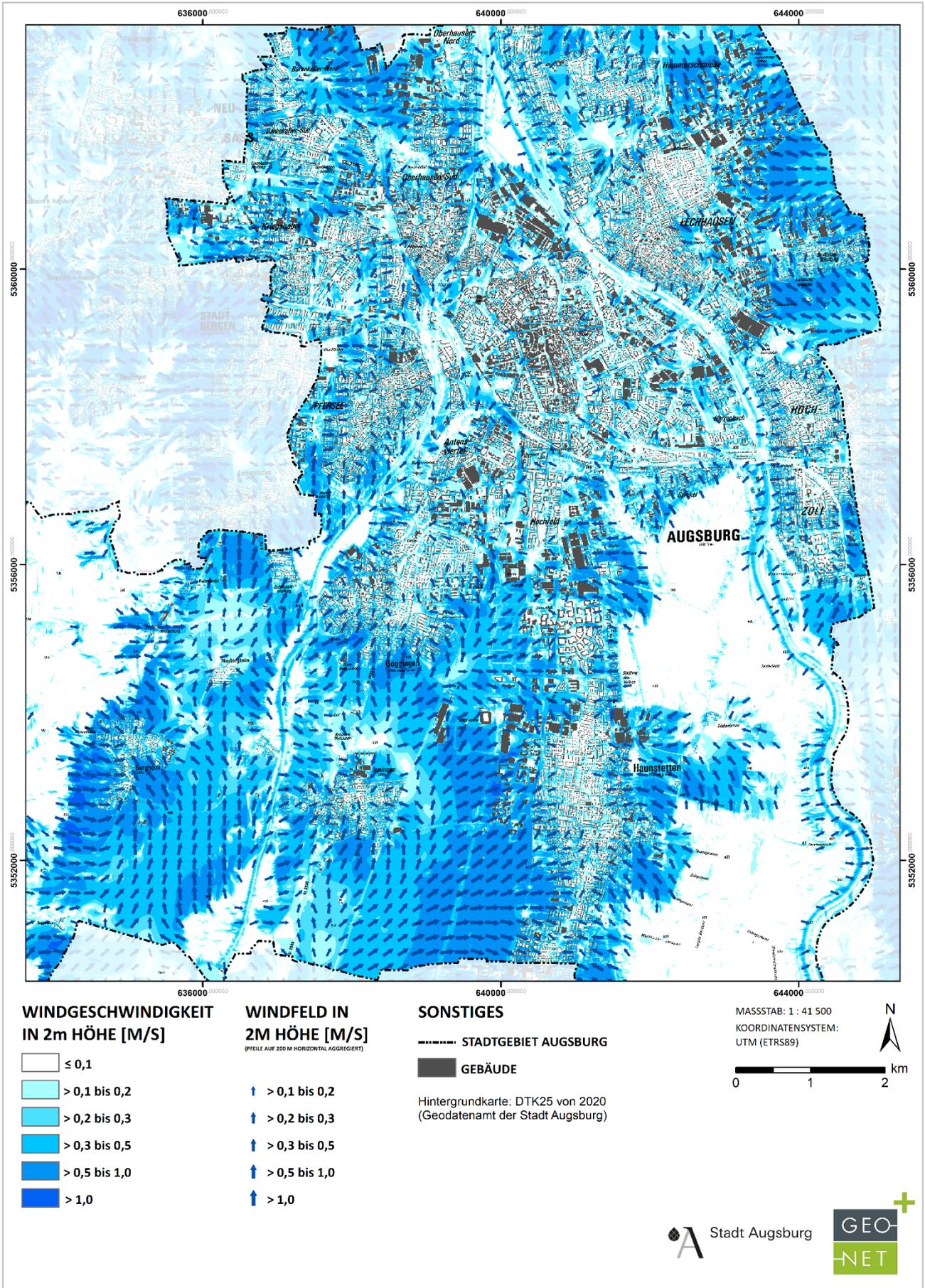


Abbildung 42: Nächtliches bodennahes Windfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

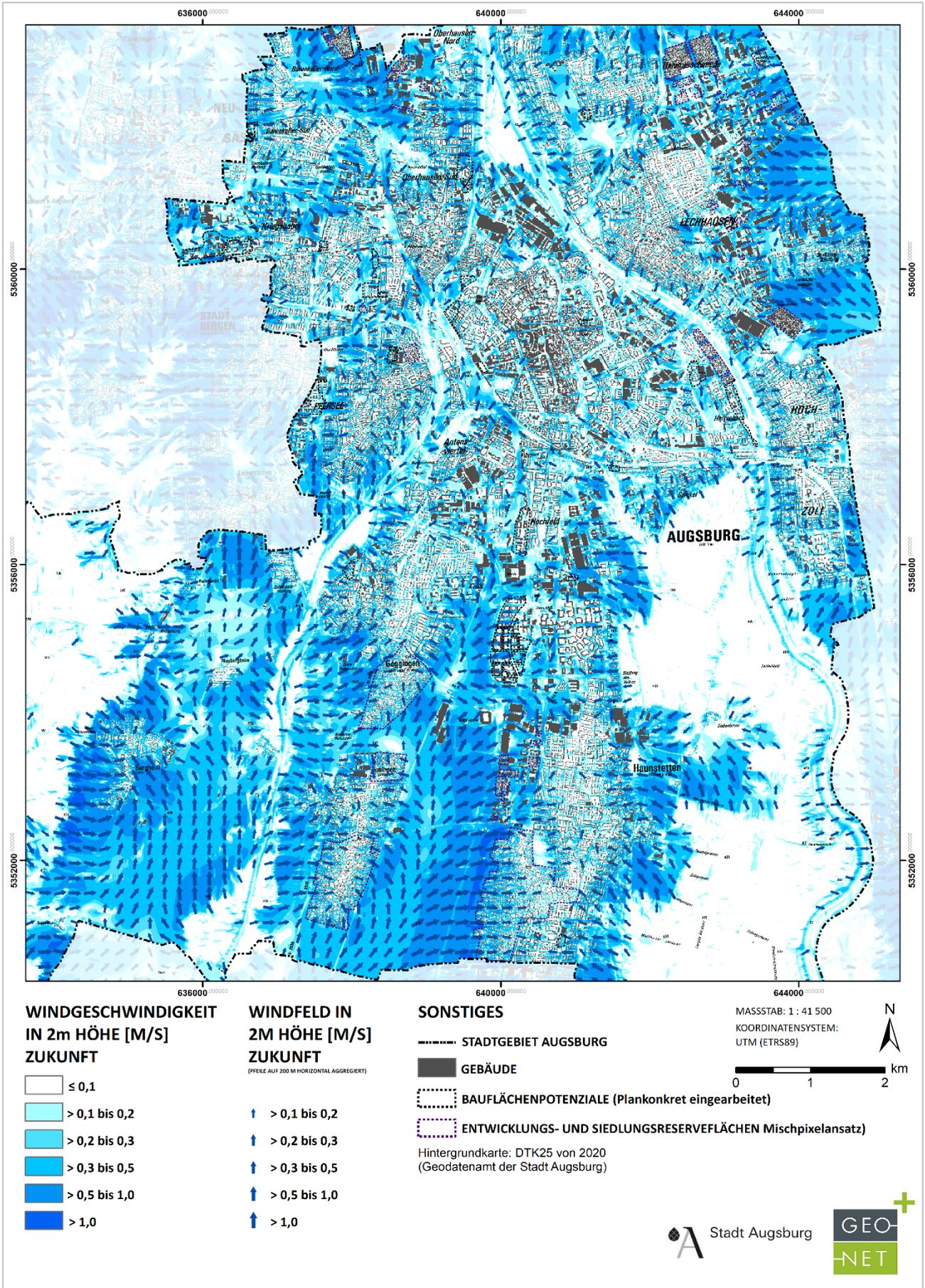


Abbildung 43: Nächtliches bodennahes Windfeld von 04 Uhr im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



Neben Gebäuden stellen Bäume und insbesondere Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis für bodennahe Strömung dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den Waldrändern (z.B. Siebentischwald) 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 den Rändern der westlichen Wälder oder der Reliefkante zwischen Göggingen, Inningen und der südlichen Augsburger Stadtgrenze wird bei KPR-Werten bis $53 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Maximum des Stadtgebietes) ersichtlich, dass die Geländeneigung die bestimmende Größe für Kaltluftentstehung darstellt (Mittelwert innerhalb der Stadtgrenze: $19,1 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$). Zusätzlich ist die Landnutzung die zweite entscheidende Größe zur Beeinflussung der Kaltluftproduktion – je versiegelungsärmer der Untergrund, desto größer die Kaltluftproduktionsrate. So weisen die geeigneten Agrarflächen südlich und nördlich der Kernstadt allesamt überdurchschnittlich hohe Werte zwischen 25 und $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ auf. Auch im Siedlungsbereich sind Grünflächen wie die Sportplätze im westlichen Antonsviertel (Rosenaustadion), der Wittelsbacher Park, die Kleingartenanlage Lotzbeckwiese oder die Grünfläche südlich des Industrieparks Augsburg 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, 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 oder die Gleisflächen im Bereich des Hauptbahnhofes 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 45, Differenz-Abbildung A 15 und Tabelle 16). Dies betrifft sowohl Entwicklungs- als auch Siedlungsreserveflächen, die infolge der Zukunftsmodellierung realisiert wurden. Ein Klimaänderungssignal ähnlich jenem der nächtlichen Temperatur wird für Kaltluftentstehungsprozesse nicht vorausgesetzt.

Die Änderung der mittleren Kaltluftproduktionsrate zeigt sich auf den 23 Entwicklungsflächen sehr differenziert. Während 14 dieser Flächen mit einer vornehmlich aus zusätzlicher Versiegelung resultierenden Ab-



nahme der KPR in Erscheinung treten, sind durch eine klimaangepasste und versiegelungsarme Ausgestaltung auf den restlichen 9 Entwicklungsflächen Zunahmen der Kaltluftproduktionsrate zu erkennen. Die größten mittleren KPR-Zunahmen sind auf den B-Planflächen 299 (Südlich der Tunnelstraße, westlich des Babenhauser Weges) (+ 8,8 m³/m²*h) und 449 A (Südlich der Max-Hempel-Straße) (+8,6 m³/m²*h) zu beobachten. Auf ersterem entsteht auf der heutigen Brachfläche Dayton-Ring Ecke Tunnelstraße ein durchgrüntes Wohnquartier, auf letzterem wird ein asphaltierter Parkplatz nebst Gewerbehalle durch Wohnbebauung in klimaangepasstem Umfeld substituiert. Die größten mittleren Abnahmen der KPR sind bei B-Planfläche 659 I mit 23,6 m³/m²*h festzustellen, auf der eine durchlässige Ackerfläche vollständig unbebaut versiegelt wird.

Bei den durch den Mischpixelansatz dargestellten Entwicklungen der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen sind überwiegend negative Änderungen der Kaltluftproduktionsrate festzustellen. Dabei werden auf 10 der 12 Flächen vergleichsweise hohe mittlere Abnahmen zwischen 8,7 m³/m²*h bis 20,9 m³/m²*h und auf einer Fläche eine Zunahme um 6,3 m³/m²*h modelliert. Mit 0,2 m³/m²*h bleiben KPR-Werte auf der Mischpixelfläche 1012 (Flächenzwilling „Univiertel Nord“) nahezu konstant. Die größten Abnahmen der KPR mit Werten über 20 m³/m²*h sind mit Gewerbeentwicklung auf den Mischpixelflächen 1001 und 1011 und damit mit großflächiger Versiegelung assoziiert. Die mittleren KPR-Zunahmen von 6,3 m³/m²*h folgen dem vergleichsweise grünausgestalteten (27 % Rasen, 7% Baumbestand) Flächenzwilling „Kleinvenedig“.

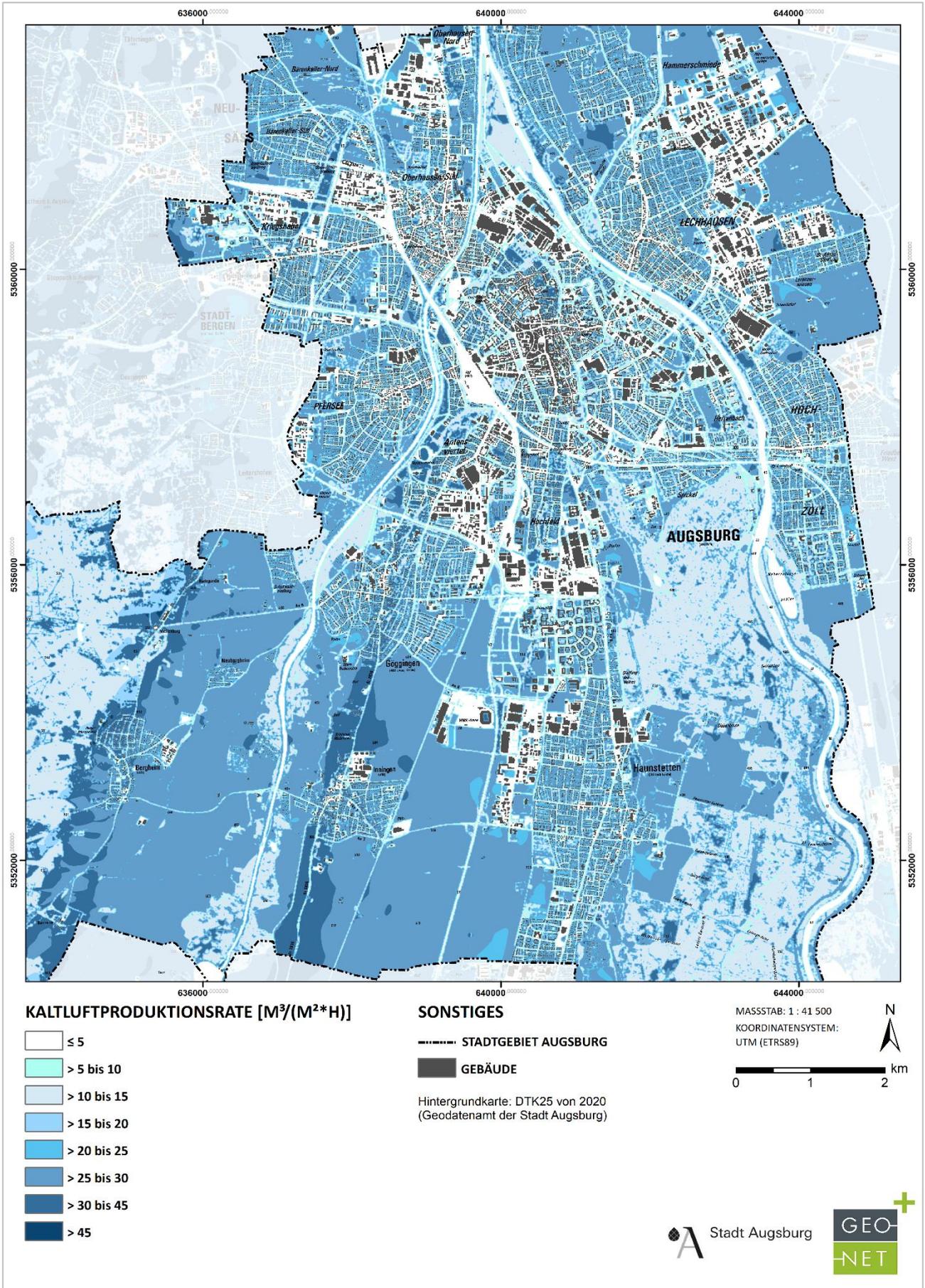


Abbildung 44: Nächliche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

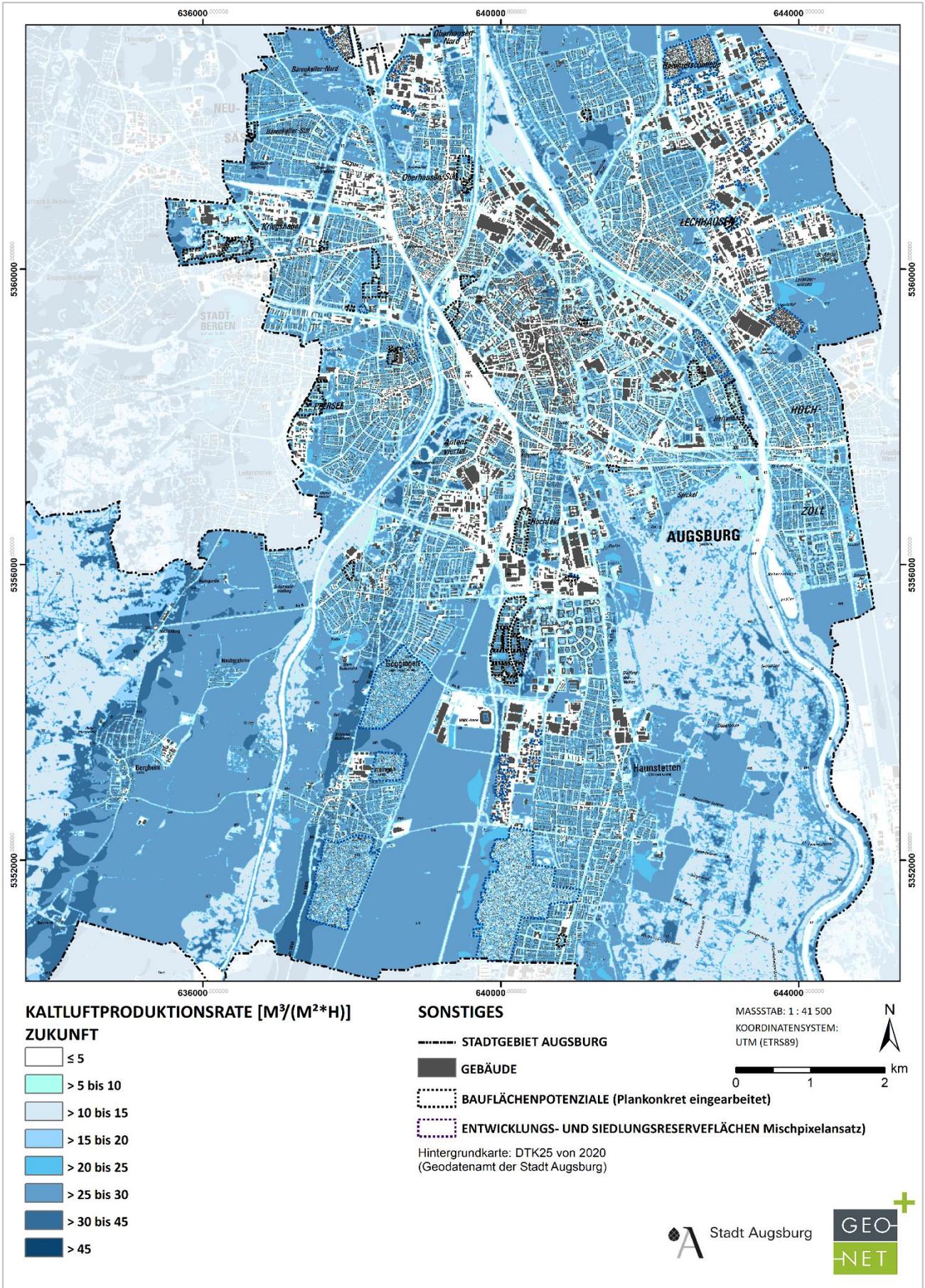


Abbildung 45: Nächliche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



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 abschätzen¹².

Tabelle 15: 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 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 können¹³. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (KUTTLER 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 15).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET mit einer Spannbreite von 27,6 °C größere Unterschiede in der Stadt auf und reicht von 15,9 bis 43,5 °C. Die geringsten Werte sind in den Uferbereichen von Lech und Wertach sowie in Waldgebieten (z.B. Siebentischwald oder Gögginer Wäldle) zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 29 °C, oftmals gar unter 23 °C, (keine bis schwache Wärmebelastung) eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung induzieren (Abbildung 46).

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

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

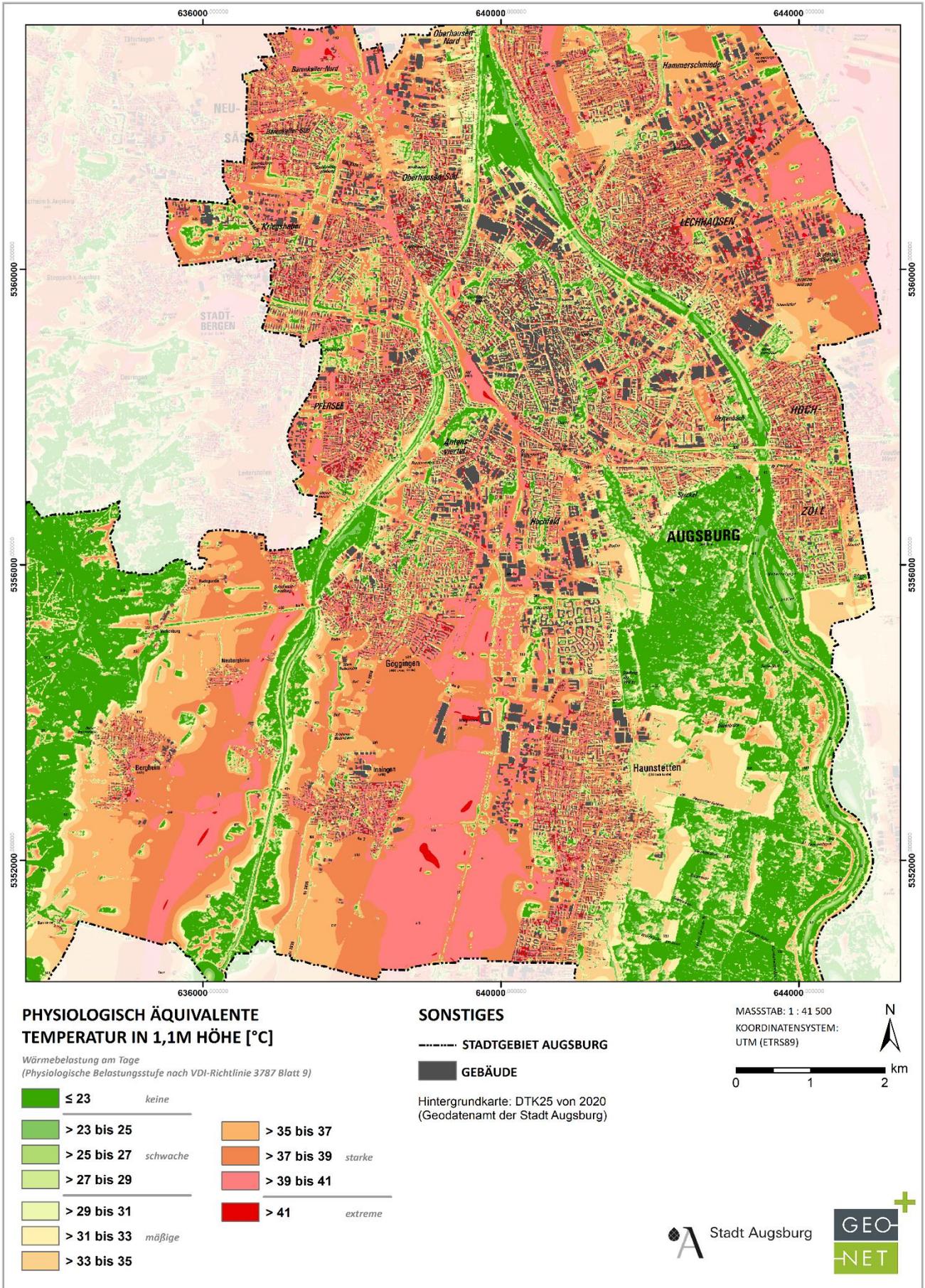


Abbildung 46: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



Auch in Parks (z.B. Windprechtpark, Park am Roten Tor, Griesle oder der Wittelsbacher Park) oder auf Friedhöfen (z.B. Hermanfriedhof, Westfriedhof, Neuer Ostfriedhof oder Alter Friedhof) herrschen unter größeren Baumgruppen größtenteils PET-Werte von unter 23 °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. Hierfür ist beispielhaft die Wolfzahnau zu nennen, die durch Ihre Lage am Zusammenfluss von Lech und Wertach und die großflächig baumbestandenen Bereiche bei PET-Werten von teils unter 20 °C einen besonderen humanbioklimatischen Stellenwert im Stadtbild genießt.

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 (z.B. im Osten Lechhausens, am Messezentrum oder im Bahnhofsbereich) und im versiegelten und unverschatteten Straßenraum zu finden (mehr als 41 °C PET; extreme Wärmebelastung). Auch Teile der Innenstadt sind mit einer extremen Wärmebelastung assoziiert. So wurden in der Georgenstraße und der Straße „Auf dem Kreuz“ im Georgsviertel durch die starke Überbauung und die verschattungsarme, ebenerdige Versiegelung oftmals ebenfalls mehr als 41 °C modelliert. Auch der Rathausplatz und die Maximilianstraße gehören zu den stark überwärmten innerstädtischen Flächen. Letztere profitiert zum Modellausgabezeitpunkt jedoch bereits von der gen Osten sichtbaren Schattenwirkung der westlich des Straßenraums gelegenen Gebäude, die die PET hier auf teils 30 °C absenken kann. Damit ergibt sich auf der Westseite der Straße eine mäßige, auf der Ostseite eine extreme Wärmebelastung. Die Schattenwirkung als vornehmlich PET-steuernder Parameter wird auch auf den Ackerflächen im Außenbereich deutlich. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen fast ähnlich hohe Werte wie in der unverschatteten Innenstadt. Beispielhaft sind hier die großräumigen Agrarflächen zwischen Inningen und Haunstetten zu nennen, in welchen flächendeckend mindestens 39 °C auftreten.

Analog zur Nachtsituation erzielen begrünte Innenhöfe in der Stadt, beispielsweise im Beethovenviertel oder dem Stadtjägerviertel, auch tagsüber eine starke Kühlwirkung. Auch die Grünräume zwischen der Zeilenbebauung in Hochzoll 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 Alleen wie die Schießgrabenstraße/Konrad-Adenauer-Allee, die Jakoberwallstraße/Vogelmauer oder der Straßenbereich von Remboldstraße im Süden bis Oberer Graben im Norden mit PET-Werten unter 29 °C deutlich kühler als die stark versiegelten und nur geringfügig verschatteten Siedlungsbereiche. Neben den bereits genannten innerstädtischen Straßenräumen bilden die Siedlungsräume Pfersee (entlang der Augsburger Str. oder zwischen Leitershofenstr. Und Uhlandstr.) oder Lechhausen (insb. südlich der Blücherstraße) negative Gegenbeispiele, die sich durch Ihren geringen oder kleinkronigen Baumbestand zumeist im Bereich starker, oftmals gar extremer Wärmebelastung befinden.

Durch die beim Prozess der Verdunstung entstehende Kühlwirkung, wird die PET in unmittelbarer Nähe zur Vielzahl der in Augsburg auftretenden Kanäle und Bäche abgesenkt. Aufgrund der Rasterweite von 10 m konnten jedoch nicht alle Kanäle in den Eingangsdaten berücksichtigt werden, was mit Blick auf die PET-



Karten und die spätere Auswertung im Rahmen der Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (ab Kapitel 8) Beachtung finden muss. Einige größere innerstädtische Bäche und Kanäle wie der Proviantbach, der Stadtbach, der Hanreibach oder der Äußere Stadtgraben schlagen sich jedoch sichtbar auf die Werte der PET nieder. In deren Umfeld wird mindestens eine mäßige Wärmebelastung, in Kombination mit Baumbeständen sogar eine geringe bis keine Wärmebelastung simuliert.

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 47). Die Veränderung der PET gegenüber der heutigen Situation reicht je nach durchgeführter Nutzungsänderung auf den Entwicklungsflächen von $-18,1\text{ °C}$ bis $+23,2\text{ °C}$. In Räumen, in denen keine Nutzungsänderung durchgeführt wurde, lag die PET-Änderung ungefähr im Bereich des Gebietsmittelwertes von ca. $+2,0\text{ °C}$, welcher eng an den eingebrachten Klimawandel geknüpft (s. ergänzend die Differenzkarte in Abbildung A 16 im Anhang).

Aufgrund der steigenden Lufttemperaturen und der Zunahme des Versiegelungsgrades auf den Entwicklungsflächen erhöht sich die PET im Mittel in den meisten Gebieten gegenüber der heutigen Situation. Dies betrifft 15 von 23 konkreten Entwicklungsflächen und alle Mischpixelflächen (s. Tabelle 16). Da der Klimawandel jedoch ohnehin mit $+2,0\text{ °C}$ zubuche schlägt, sind alle Flächen unterhalb dieser Zahl als für die Tagsituation eher klimaangepasst einzuordnen.

Auf den Entwicklungsflächen befindet sich die Erhöhung der mittleren PET im Vergleich zum Ist-Zustand mit Werten zwischen $0,2\text{ K}$ und $2,6\text{ K}$ im Rahmen des einbezogenen Klimawandelsignals bzw. sogar darunter. Lediglich auf dem B-Plan 228 und beim GVZ-Vorhaben werden zukünftig im Mittel mit $3,6\text{ K}$ und $3,8\text{ K}$ nochmals fast doppelt so hohe PET-Werte modelliert, wie durch den Klimawandel angenommen. Während bei ersterem vorrangig Ackerflächen und Bäume durch überwiegend Gebäude und Straßen ersetzt wurden, fand bei letzterem eine Substitution von Ackerfläche zugunsten von Gleisbett statt. Bereits diejenigen Flächen, die in der mittleren Änderung der PET das Klimawandelsignal unterschreiten, lassen einen starken Fokus auf eine klimawandelangepasste, landschaftsplanerische Ausgestaltung am Tage schließen. Noch stärker tritt dies bei B-Planflächen in Erscheinung, die im Vergleich zur heutigen Situation im Mittel gar eine Verbesserung der humanbioklimatischen Situation erreichen, was an negativen Werten der PET-Änderung ersichtlich wird. Die größte mittlere PET-Abnahmen werden mit $-3,4\text{ K}$ bzw. $-3,6\text{ K}$ durch die Umgestaltung des Bahnhofsvorplatzes und die Entwicklung der B-Planfläche 623 D erreicht. An beiden Standorten ist es die Etablierung großkroniger Bäume, die durch die zunehmende Schattenwirkung Abkühlungsprozesse auf den Entwicklungsflächen induziert. So gelingt auf dem Bahnhofsvorplatz im Kernschatten eines Baumes, verglichen mit dem Aufenthalt auf der zuvor sonnenbeschienenen, unverschatteten Asphaltfläche eine maximale PET-Abnahme um $16,9\text{ K}$. Auf der B-Planfläche 623 D sind es verglichen mit der Brachfläche im Ist-Zustand immerhin 16 K . Auch die Schattenwirkung der neuen Wohngebäude trägt am Tage überwiegend zu einer Abnahme der PET bei. Dennoch treten auch auf diesen beiden Planflächen Flächenversiegelungen durch stärkere PET-Zunahmen zum Vorschein, insbesondere an jenen Gitterpunkten, welche zuvor unversiegelt oder gar verschattet waren.

Die durch den Mischpixelansatz approximierten Siedlungsreserveflächen weisen bei durchschnittlichen PET-Änderungen von $+1,0\text{ K}$ bis $+7,6\text{ K}$ im Mittel allesamt Erhöhungen des Parameters auf. Flächen, die zukünftig über einen erhöhten Baumbestand verfügen wie die Mischpixelflächen MP 1007 (Flächenzwilling „Kleinvenedig“) und MP 1010 (Flächenzwilling „Reesekaserne“) mit 7% bzw. 13% Baumanteil, zeigen mit einer im Vergleich zum Ist-Zustand erhöhten PET um $1,5\text{ K}$ bzw. $1,0\text{ K}$ eine unterhalb des Klimawandelsignals liegende



Zunahme auf. Besonders hoch ist die PET-Zunahme hingegen auf Siedlungsreserveflächen, die Gewerbegebieten nachempfunden sind, wobei wiederum beispielhaft MP-Fläche 1011 zu nennen ist (Flächenzwilling „Gewerbe Ostfriedhof“). 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 16: Differenzen „Zukunft minus Ist“ der Windgeschwindigkeit „WG“, der Kaltluftvolumenstromdichte „KVSD“, der Kaltluftproduktionsrate „KPR“, der nächtlichen Temperatur „T04“ und der physiologisch äquivalenten Temperatur am Tage „PET“. Für jede Potenzialfläche (1-23) bzw. Entwicklungs- und Siedlungsreservefläche (24-35) sind für jeden Parameter jeweils Flächenminimum, -mittelwert und -maximum aufgetragen.

	BP-Num- mer/ Vorhaben/ MP-Klasse	Diff. WG [m/s]			Diff. KVSD [m³/(s*m)]			Diff. KPR [m³/(m²*h)]			Diff. T04 [K]			Diff. PET14 [K]		
		min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
1	BP 228	-0,7	-0,1	0,6	-31,4	1,2	35,3	-23,6	-0,2	27,6	-2,4	1,5	5,0	-6,2	3,6	19,7
2	BP 251	-1,0	-0,3	0,4	-52,3	-11,7	34,2	-26,9	-8,4	7,4	0,2	2,7	6,4	-16,4	-1,2	17,9
3	BP 288 B I	-0,6	-0,1	0,6	-31,4	-2,4	28,2	-25,8	-5,8	15,9	-0,5	2,5	5,9	-16,4	1,1	17,9
4	BP 289 A	-0,7	0,0	0,8	-26,2	-0,5	23,1	-0,1	8,1	26,5	-2,2	0,2	2,4	-15,8	0,6	4,7
5	BP 298	-0,8	-0,1	0,8	-37,3	-6,5	31,6	-28,7	-10,4	28,3	-0,4	2,7	5,9	-12,9	1,6	17,6
6	BP 299	-0,2	0,0	0,3	-14,6	1,5	17,0	-5,1	8,8	23,1	-1,6	0,2	2,1	-15,7	0,2	20,3
7	BP 300	-0,7	-0,1	0,5	-38,6	-3,9	32,3	-28,6	-13,8	25,8	-1,6	3,9	7,2	-14,8	0,0	17,2
8	BP 410 D	-0,8	-0,2	0,3	-25,0	-1,5	13,9	-5,8	2,5	19,6	-0,6	1,4	2,3	-10,1	0,7	12,6
9	BP 423 A	-0,4	0,0	0,6	-22,1	-2,1	33,7	-13,7	4,3	23,4	-2,1	1,1	4,2	-16,5	-1,3	19,0
10	BP 449 A	-0,4	-0,1	0,3	-26,9	-0,7	30,7	-15,0	8,6	28,3	-1,9	0,7	3,0	-15,0	-2,7	14,4
11	BP 482	-0,6	-0,1	0,5	-31,5	-4,1	29,1	-13,0	4,3	26,2	-2,0	1,4	2,7	-16,6	-2,3	17,3
12	BP 623 D	-0,4	-0,1	0,2	-14,4	-0,5	23,4	-25,9	-12,7	2,1	1,0	3,1	5,6	-16,0	-3,6	13,7
13	BP 659 I	-0,3	-0,2	0,0	-14,8	-6,6	2,0	-26,0	-23,6	1,3	2,3	5,3	5,9	-11,0	2,6	5,5
14	BP 872 A	-1,0	-0,3	0,8	-30,9	-9,3	25,5	-24,9	-9,8	9,5	0,1	3,4	6,2	-11,8	0,9	14,7
15	BP 892	-0,3	0,0	0,4	-7,2	19,3	43,2	-22,9	3,3	25,8	-1,6	1,1	4,6	-11,4	0,5	6,5
16	BP 894	-0,7	-0,1	0,5	-20,5	-0,8	25,7	-22,1	-5,1	13,7	-0,2	2,1	5,2	-13,1	1,4	16,5
17	BP 900	-0,7	-0,2	0,8	-45,1	-6,7	46,5	-26,7	-4,9	29,6	-2,5	1,6	4,4	-9,8	1,3	7,3
18	Berliner Al- lee (südli- che Poten- zialflächen)	-0,5	-0,1	0,6	-25,2	-1,8	29,8	-27,0	-1,8	24,3	-1,8	1,8	5,5	-14,9	0,9	16,8
19	DISTA 1	-0,5	-0,2	0,1	-29,2	-8,8	13,6	-0,1	0,2	0,4	1,6	1,8	2,1	-4,3	2,0	5,0
20	Ehemaliges Bahnbe- triebswerk	-0,5	-0,1	0,4	-24,0	-3,2	25,2	-27,1	-6,2	28,0	-1,7	3,0	6,2	-18,1	-1,2	19,1
21	Gestaltung Bahnhofs- vorplatz Ost	-0,3	-0,1	0,1	-1,9	-0,2	1,3	-3,2	2,1	7,6	1,6	1,7	1,9	-16,9	-3,4	15,7
22	GVZ	-0,8	-0,1	0,5	-30,5	-0,4	22,7	-28,8	-18,6	4,4	1,0	4,6	6,1	-2,2	3,8	19,7
23	Vorhaben: WOHANKA	-0,7	-0,3	0,3	-20,0	0,7	15,2	-24,7	-12,8	2,6	1,3	3,7	6,4	-14,9	-2,1	16,7
24	MP 1001	-1,1	-0,4	0,6	-40,8	-2,6	50,5	-26,8	-20,9	4,8	0,2	5,4	7,4	-12,6	4,5	22,2
25	MP 1002	-1,0	-0,2	0,4	-42,7	-10,0	22,6	-26,9	-9,4	3,6	1,2	3,0	5,9	-15,1	2,1	17,8
26	MP 1003	-1,1	-0,4	0,4	-57,4	-19,7	24,0	-27,3	-16,3	13,9	0,9	4,9	6,7	-13,7	1,7	21,6
27	MP 1004	-1,0	-0,3	0,3	-52,2	-20,3	5,8	-27,1	-12,3	2,1	1,8	3,7	5,5	-10,9	2,9	18,4
28	MP 1005	-1,1	-0,4	0,8	-65,6	-7,0	50,4	-26,1	-8,7	27,1	-1,5	4,0	6,6	-16,0	2,3	23,2
29	MP 1006	-0,9	-0,2	0,9	-55,0	8,1	57,4	-31,1	-10,1	30,8	-2,2	3,7	6,6	-14,3	3,1	21,0
30	MP 1007	-0,9	-0,1	0,6	-42,7	-9,3	32,9	-23,9	6,3	30,0	-2,7	0,5	4,7	-17,2	1,5	19,6
31	MP 1008	-0,9	-0,4	0,0	-7,6	-2,9	5,3	-22,4	-11,5	0,1	1,8	3,8	5,5	2,0	3,3	4,3
32	MP 1009	-1,3	-0,5	0,8	-71,3	-18,9	37,8	-29,4	-10,2	7,7	0,4	3,6	6,9	-1,4	3,1	6,8
33	MP 1010	-0,4	-0,1	0,4	-17,4	1,8	8,0	-25,5	-12,9	-0,2	1,3	3,3	5,4	-14,8	1,0	17,5
34	MP 1011	-0,8	-0,3	0,5	-46,8	-5,4	26,4	-27,5	-20,7	12,4	-0,3	5,1	7,1	-7,9	7,6	20,8
35	MP 1012	-0,6	-0,3	0,1	-14,6	-5,4	10,6	0,0	0,2	0,4	1,4	1,7	2,0	1,4	3,3	6,7

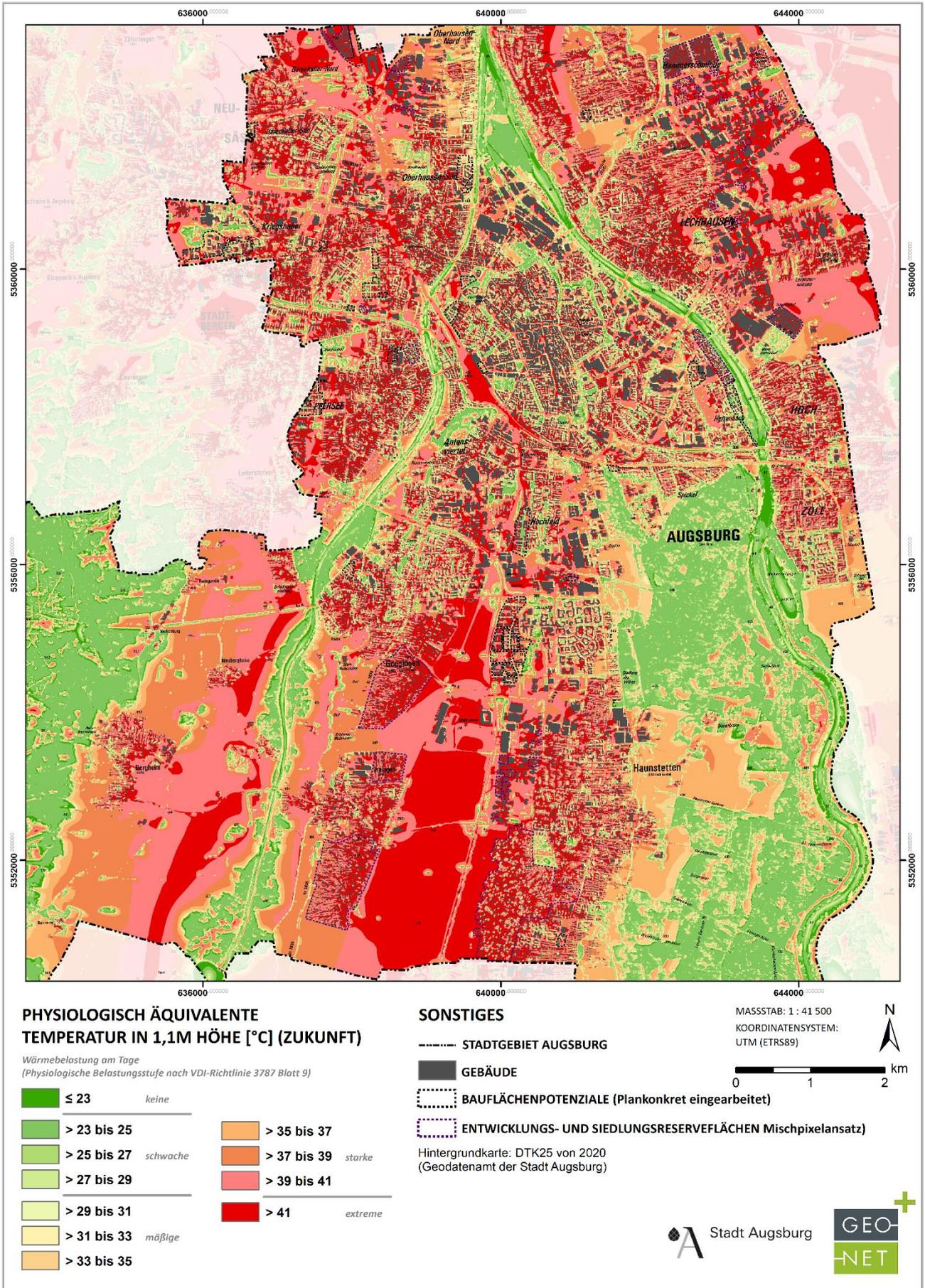


Abbildung 47: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

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 „starker Klimawandel (Zieljahr 2040)“

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 beiden Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 48). 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 10 m unmittelbar der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier nahegelegensten Eingabezellen nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte. Im Wirkraum ist die Temperaturdifferenz aus einzelnen Rasterzellenwerten im Wirkraum und dem Temperaturmittelwert aller Grünflächen für das 2 m Niveau von 04:00 Uhr flächenhaft und ebenfalls bilinear interpoliert dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

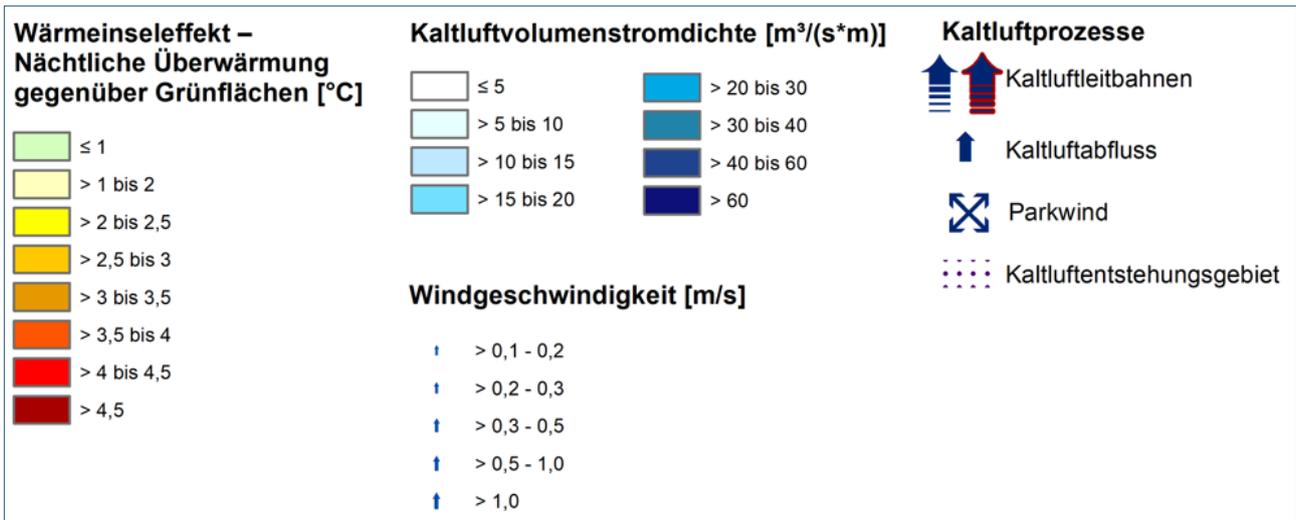


Abbildung 48: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten. Zukünftig neu entstandene Kaltluftleitbahnen sind in der Klimaanalysekarte des Szenarios rot umrandet dargestellt.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 17). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der A3-Karte auf eine Auflösung von 200 m aggregiert (A0 auf 100 m) 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 $> 28,15 m^3/(m^2h)$. Dieser Schwellwert bezeichnet die Summe des Mittelwertes der Kaltluftproduktionsrate und deren 0,75-facher Standardabweichung.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Augsburg 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 in-



tensiven 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.

In der Stadt Augsburg gibt es zudem eine Reihe von innerstädtischen Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in die bebaute Umgebung transportieren. Diese sogenannten Parkwinde, d.h. thermisch hervorgerufene Ausgleichsströmungen aus einer umbauten Grünfläche, treten auf größeren Grünflächen auf, die in eine deutlich wärmere Umgebung eingebettet sind. Da die Parkwinde im Vergleich zu Kaltluftabflüssen eher schwach sind, hängt die Reichweite dieser Ausgleichsströmungen auch stark von den Strömungshindernissen in der Umgebung ab. Breite Straßenzüge bzw. rauigkeitsarme Strukturen und eine strömungsparallele Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer Parkluft in den Siedlungsbereich.

Tabelle 17: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Windgeschwindigkeit- und richtung	auf 200 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiete	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 28,15 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
Parkwinde	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen, Abflussbereiche und Parkwinde erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 49 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Siebentischwald/Hochfeld/Innenstadt einmal mit und einmal ohne Darstellung der zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

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, Abflüssen oder Parkwinden einbezogen. Eine Berücksichtigung verschiedener Nutzungsstrukturen im Wirk- und



äußeren Stadtteile wie Hochzoll, Göggingen oder Haunstetten weisen größtenteils solch niedrige Überwärmungen auf.

Die über den Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) hinterlegte Kaltluftvolumenstromdichte deckt sich mit jener aus Abbildung 40 und ist gemeinsam mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten essenzieller Bestandteil der gutachterlich festgelegten Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde. In Augsburg gibt es heutzutage zwei **Kaltluftleitbahnen**. Hierzu zählt die südwestlich der Kernstadt gelegenen Auenbereiche der Wertach, an deren Ufern Kleingarten- und Parkanlagen (z.B. entlang der Ulandstraße) sowie rasenüberwachsene Sportplätze (z.B. Karl-Mögele-Sportanlage) als grüne Trittsteine fungieren und die im Gögginger Wäldle entstehende Kaltluft bis weit in die Innenstadt gen Nordosten transportieren ohne sie signifikant zu erwärmen. Auch die zweite Leitbahn, die vom Siebentischwald aus über die Siebentischanlagen und den Botanischen Garten Kaltluft nach Norden gen Innenstadt verlagert, verfügt über einen hohen Grünanteil. Beide Leitbahnstrukturen weisen an deren Rändern, dem Siedlungsraum zugewandt weit überdurchschnittliche¹⁴ Kaltluftvolumenströme von teils über $40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ auf, die neben der Breite von mindestens 50 m und den umliegenden bzw. vorgelagerten, durch violette Punkte ausgewiesenen Kaltluftentstehungsgebieten charakteristisch für Leitbahnstrukturen sind.

Neben den Kaltluftleitbahnen als linienhafte Strukturen wurden für Augsburg auch **Kaltluftabflüsse** identifiziert, welche flächenhaft über un bebauten Hangbereichen oder rein thermisch in Form von Flurwinden auftreten. Für das Stadtgebiet Augsburgs spielen diese aufgrund der Reliefunterschiede von Süd nach Nord eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte, orografiebedingte Kaltluftabflüsse sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und treten vornehmlich im südlichen Teil der Stadt auf, z.B. in Haunstetten, Göggingen, Inningen oder Bergheim. Reine Flurwindensysteme sind lediglich an zwei Orten innerhalb der Stadtgrenzen festzustellen – nördlich von Firnhaberau und Hammerschmiede. Im Nordwesten der Stadt (v.a. im Bereich westlich der Industrie und Gewerbegebiete Lechhausens) sind ebenfalls Kaltluftabflüsse zu finden, die sowohl relieffolgend als auch thermisch angetrieben sind.

Neben den genannten Leitbahn- und Abflussstrukturen wurden für Augsburg insgesamt zehn **Parkwinde** identifiziert. Hierbei wird auf einer umbauten Grünfläche Kaltluft produziert, die thermisch angetrieben in angrenzende Siedlungsbereiche vordringt. Parkwinde können beispielsweise auf Friedhöfen (z.B. Alter Ostfriedhof, Westfriedhof, Hermanfriedhof, Protestantischer Friedhof), Kleingartenanlagen (z.B. Kleingartenanlage Hochfeld), Sportplätzen (z.B. am Georg-Mayr-Weg), Parkanlagen (z.B. Griesle) oder anderen Arten von umbauten Grün- und Freiflächen (z.B. Wolfzahnau, Grünfläche Bärenkeller Nord, Freiflächen Lech-Nord) entstehen. Die von diesen Ausgleichsräumen ausgehenden Winde strömen in nahezu fast alle Richtungen und belüften die umgebende Bebauung weitreichend.

¹⁴ Die durchschnittliche KVSD liegt im Ist-Zustand auf den Grünflächen bei ca. $19,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$.

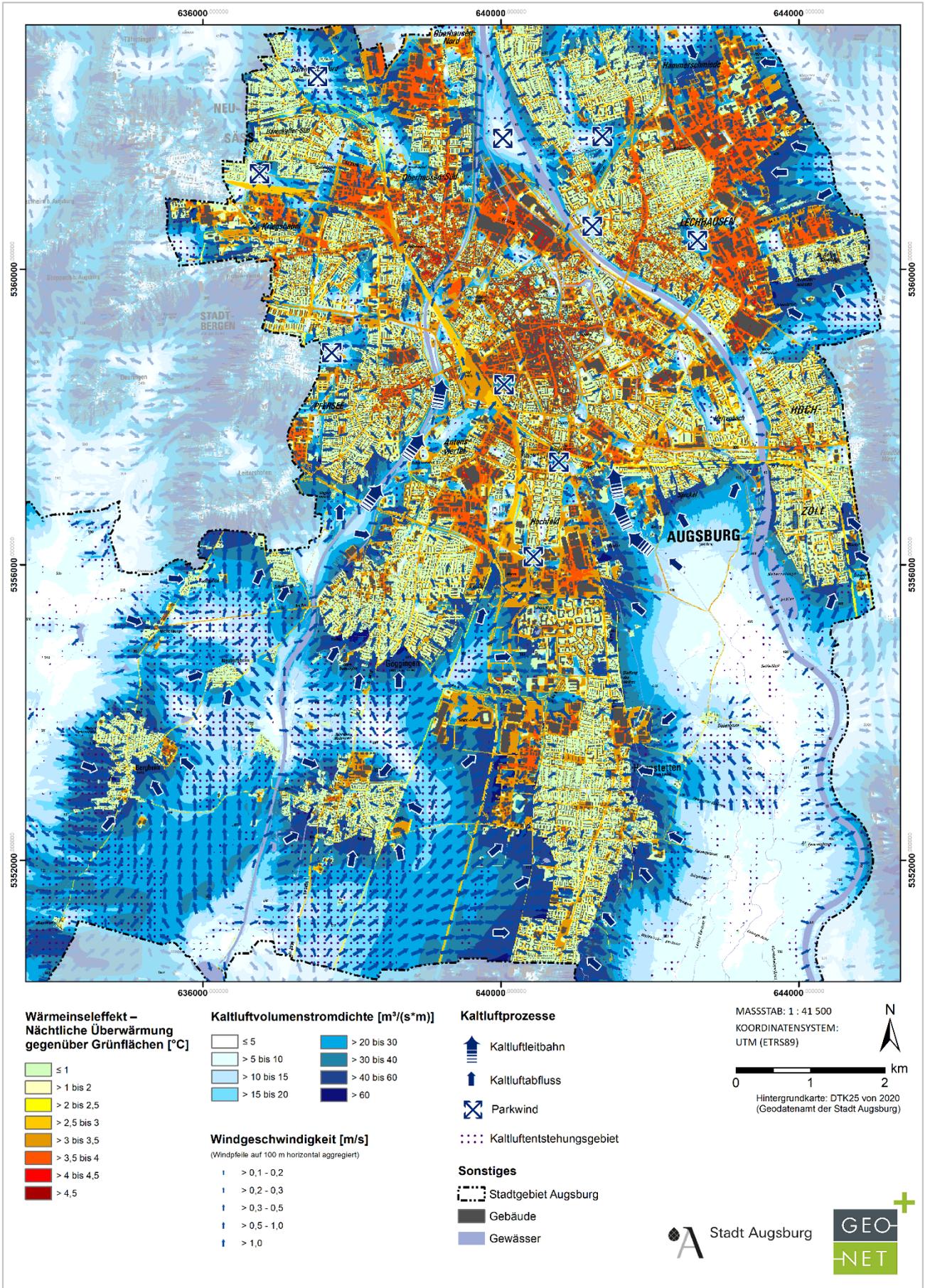


Abbildung 50: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



Durch die Einarbeitung des thermischen Klimawandelsignals und die plankonkreten Flächenentwicklungen sowie die optionalen Entwicklungen der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen wurde die Erstellung einer weiteren Klimaanalysekarte für das Zukunftsszenario notwendig (s. 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. In Bezug auf die nächtliche Überwärmung des Siedlungsraumes wird ersichtlich, dass diese im Vergleich zum Ist-Zustand nahezu konstant geblieben ist (Differenzmittelwerte: 1,87 K im Ist-Zustand zu 1,94 K in Zukunft). Zu begründen ist dies durch das Klimawandelsignal der Temperatur, welches nicht nur die Wirkraumflächen um 1,8 K erwärmt, sondern auch die Ausgleichsflächen. So erhöht sich auch das Flächenmittel aller Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet, das als Subtrahend zur Berechnung der Urbanen Wärmeinsel verwendet wird, in ähnlichem Maße wie der Siedlungsraum. Im Vergleich zum Ist-Zustand ist die Zahl der Wirkraumflächen erhöht, da die meisten Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen (insb. letztere) eine Änderung der Flächennutzung von einer Grün- und Freifläche zu einer Siedlungs- oder Gewerbefläche vollziehen. Die hierbei neu entstehenden Siedlungsbereiche (z.B. Haunstetten-Südwest) ordnen sich im Wertespektrum vergleichbarer Siedlungsräume bei einer Überwärmung bis maximal 2,5 K ein, während neue Industrie- und Gewerbeareale (z.B. in Hammerschmiede) bei Differenzwerten von mindestens 3,5 K starten.

Analog zum Ist-Zustand wurde die Kaltluftvolumenstromdichte des Zukunftsszenarios aus Abbildung 41 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 und Parkwinde) hinzugezogen. Hierbei zeigten sich die infolge der vollzogenen Flächenentwicklung veränderten Stadtstrukturen maßgebend für ein teils abgewandeltes Kaltluftprozessgeschehen. Mit Blick auf Leitbahnstrukturen bleiben auch infolge der intensiven Flächenentwicklungen in Augsburg die beiden im Ist-Zustand genannten Kaltluftleitbahnen nördlich des Gögginger Wäldles im Bereich der Wertach und jene im Bereich der Siebentischanlagen erhalten. Durch die zukünftig massive bauliche Einengung zwischen Göggingen und dem erweiterten Innovationspark wurde in der Klimaanalysekarte der Zukunft gar eine dritte Leitbahnstruktur ausgewiesen. Diese ist jedoch weniger ein Anzeichen für einen im Vergleich zur Gegenwart gen Innenstadt gesteigerten Kaltluftstrom – den umgebenen Siedlungsraum abkühlende Kaltluftabflüsse waren bereits im Ist-Zustand ausgewiesen worden. Vielmehr ist diese ein Anzeichen für eine bauliche Maximalentwicklung im betrachteten Bereich, da bei weiterer Überbauung im Umfeld die Klimafunktion dieser Flächen gänzlich verloren gehen könnte. Dass die verbliebenen Grünflächen in diesem Gebiet als besonders schützenswert einzuordnen sind, wird in Kapitel 8 der Bewertungskarten sowie der Planungshinweiskarte ersichtlich.

Bzgl. der Kaltluftabflüsse werden im Vergleich zum Status Quo ebenfalls Änderungen erkennbar. So führen die neuen Siedlungsbereiche zu einer Verschiebung der Kaltluftabflüsse in Luv-Richtung nach außen. Beispiele sind im Bereich der Flächenentwicklungen in Haunstetten-Südwest, Inningen und Göggingen im Süden der Stadt, aber auch im Bereich der Industrie- und Gewerbeentwicklungen in Lechhausen und Hammerschmiede im Nordosten Augsburgs ersichtlich.

Die im Ist-Zustand identifizierten Parkwinde bleiben auch in Zukunft vollständig erhalten. Infolge der Flächenentwicklung in Haunstetten-Südwest wird eine Grünfläche eingeschlossen, die fortan als elfte Parkwindstruktur ausgewiesen werden kann und umgebende Siedlungsstrukturen nahezu in alle Richtungen abkühlt.

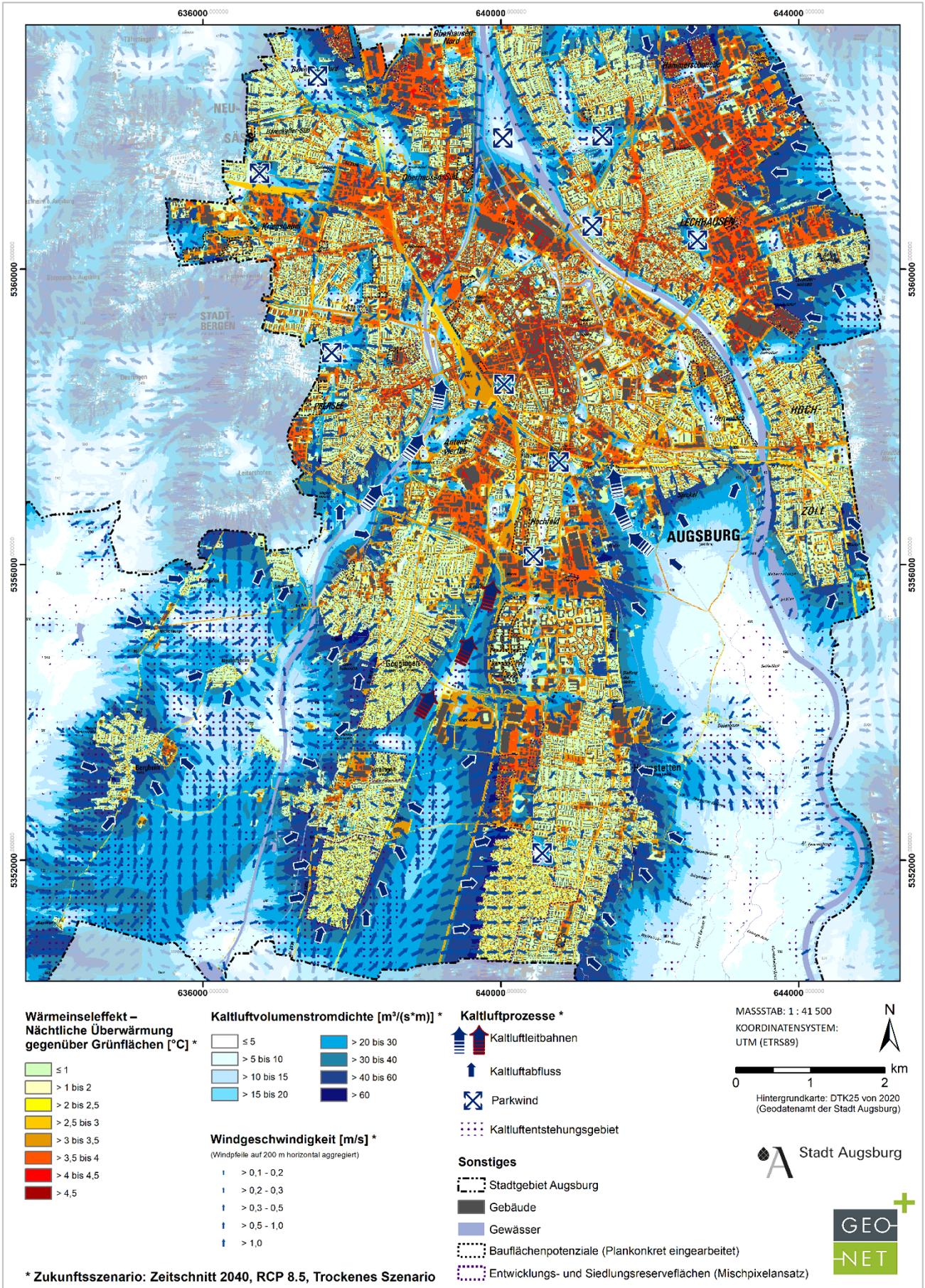


Abbildung 51: Klimaanalysekarte der Nacht im Zukunftsszenario 2040 für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



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 Schadstoffbelastungspotenzialen 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 vier Bewertungskarten („Nacht Ist“, „Tag Ist“, „Nacht Zukunft“ und „Tag Zukunft“) 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. Kapitel 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 Stadtraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer 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 nicht per se. 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 Außenbereich 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 50 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).

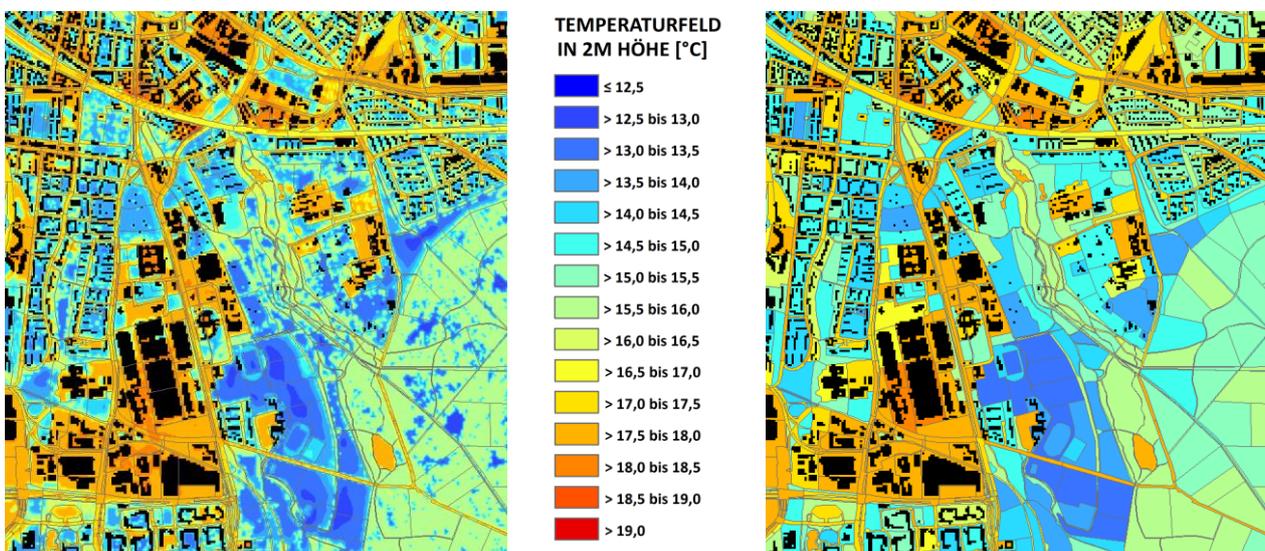


Abbildung 52: Links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie.



8.3 BEWERTUNGSKARTEN

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

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation sowie für Ist-Zustand und Zukunftsszenario 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 beiden 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 Kapitel 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).



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

Dabei ist

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

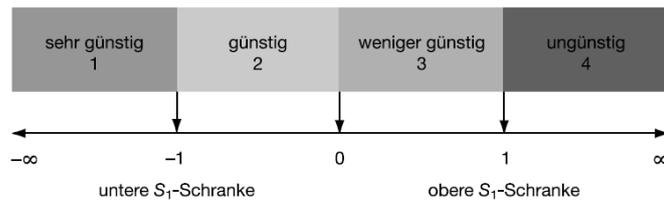


Abbildung 53: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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 beiden zu betrachtenden Situationen (Ist-Situation, Zukunftsszenario) 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 des Zukunftsszenarios berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für vier 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 vier Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Augsburg 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 18). Für die Tagsituation wurde eine Unterscheidung in Wirkraum 1 (Wohnen/Arbeiten) mit vorrangig stationärem Aufenthalt und Wirkraum 2 (Straßenraum) mit vornehmlich mobilem Aufenthalt des Langsamverkehrs wie Fußgängern und Radfahrern getroffen. Nachts steht der Schlafkomfort im Fokus, weshalb hier ausschließlich Wohn- und Gewerbeflächen bewertungsrelevant waren. Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.



Tabelle 18: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Betrachteter Parameter			Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Wirkraum 1	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>PET 14:00 Uhr (Ist/Zukunft)</i> bis -0,75 > -0,75 bis ≤ -0,25 > -0,25 bis ≤ 0,25 > 0,25 bis ≤ 0,75 > 0,75	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand)</i> bis 31,79 > -31,79 bis ≤ 34,47 > 34,47 bis ≤ 37,16 > 37,16 bis ≤ 39,85 > 39,85	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario)</i> bis 34,08 > 34,08 bis ≤ 36,69 > 36,69 bis ≤ 39,31 > 39,31 bis ≤ 41,92 > 41,92	Siedlung, Industrie/Gewerbe	
Tagsituation Wirkraum 2	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>PET 14:00 Uhr (Ist/Zukunft)</i> bis -0,75 > -0,75 bis ≤ -0,25 > -0,25 bis ≤ 0,25 > 0,25 bis ≤ 0,75 > 0,75	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand)</i> bis 31,56 > 31,56 bis ≤ 34,19 > 34,19 bis ≤ 36,82 > 36,82 bis ≤ 39,45 > 39,45	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario)</i> bis 33,51 > 33,51 bis ≤ 36,14 > 36,14 bis ≤ 38,75 > 38,75 bis ≤ 41,37 > 41,37	Öffentlichen Straßen, Wege und Plätze	
Nachtsituation Wirkraum	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>T 04:00 Uhr (Ist/Zukunft)</i> bis -1 > -1 bis ≤ -0,5 > -0,5 bis ≤ 0,5 > 0,5 bis ≤ 1 > 1	<i>T 04:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand)</i> bis 14,17 > 14,17 bis ≤ 14,97 > 14,97 bis ≤ 16,56 > 16,56 bis ≤ 18,14 > 18,14	<i>T 04:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario)</i> bis 15,98 > 15,98 bis ≤ 16,76 > 16,76 bis ≤ 18,33 > 18,33 bis ≤ 19,90 > 19,90	Siedlung, Industrie/Gewerbe	

8.3.2 AUSGLEICHSRAUM – METHODIK

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

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen bzw. Parkwinden 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 $\geq 22,09 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ($\geq 19,61 \text{ m}^3/[\text{s} \cdot \text{m}]$ im Zukunftsszenario) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,24 \text{ m/s}$ (identisch im Zukunftsszenario) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 27,89 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ($27,91 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ im Zukunftsszenario)
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹⁵

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

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

¹⁵ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

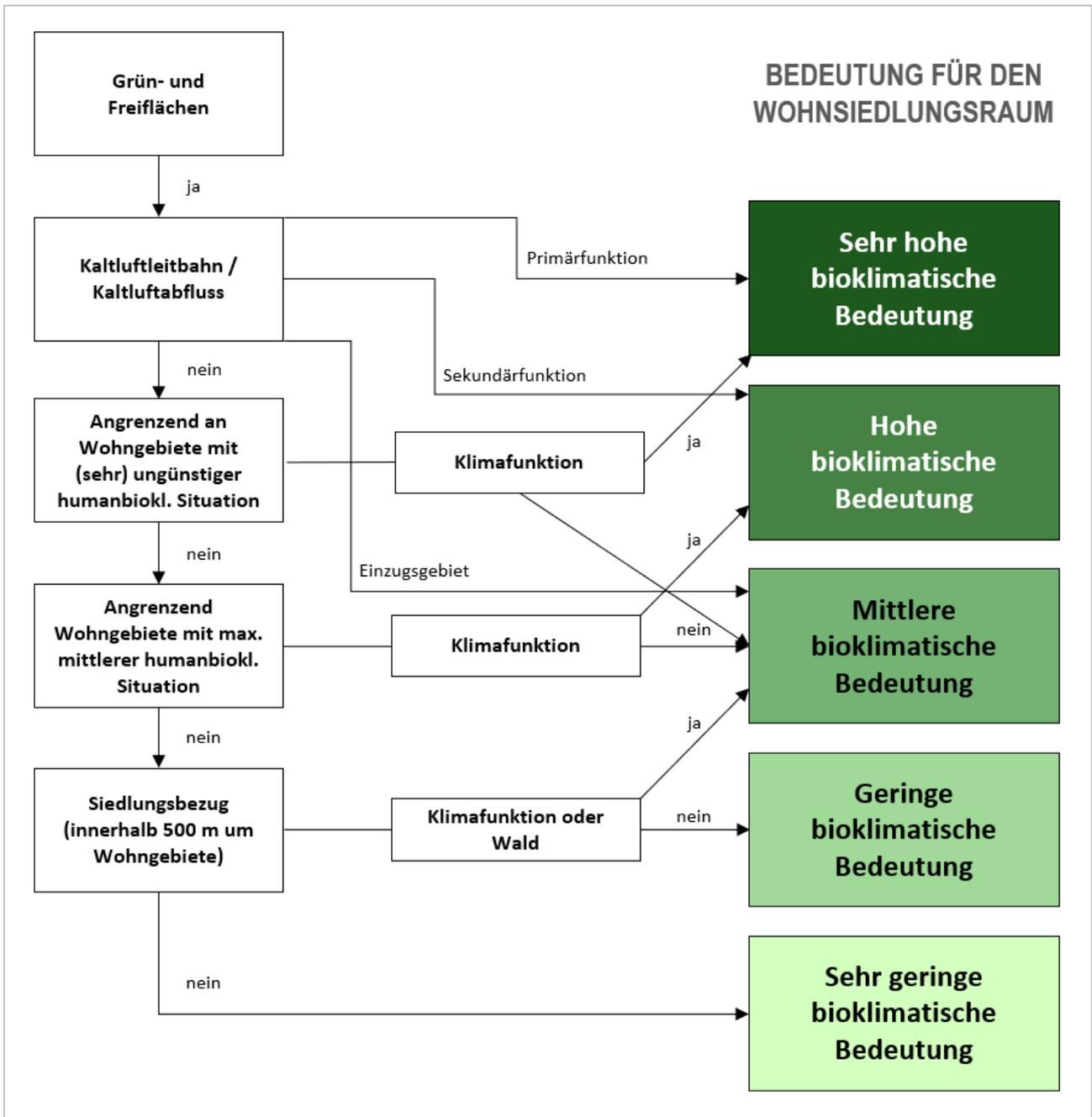


Abbildung 54: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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

Tabelle 19 listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario für alle Ausgleichsflächen im Augsburger Stadtgebiet auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.



Tabelle 19: 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 -0,8 > -0,8 bis ≤ -0,2 > -0,2 bis ≤ 0,4 > 0,4 bis ≤ 1 > 1	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand)</i> bis 24,71 > 24,71 bis ≤ 29,04 > 29,04 bis ≤ 33,36 > 33,36 bis ≤ 37,69 > 37,69	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Zukunftsszenario)</i> bis 26,44 > 26,44 bis ≤ 30,76 > 30,76 bis ≤ 35,08 > 35,08 bis ≤ 39,40 > 39,40	Grün-/Freiflächen, Wald

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 50 und Abbildung 51) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Zum einen zeigt der Kaltlufteinwirkbereich in hellblauer, rasterbasierter Schraffur an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann, zum anderen sind Wohnraumblocke mit Klimafunktion durch eine blaue Umrandung hervorgehoben (s. Abbildung 55).



Abbildung 55: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von 26,82 m³/(s*m) (Zukunft: 26,56 m³/(s*m)) oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von 0,23 m/s (für die Zukunft identisch) erreichen oder überschreiten. Sollten mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkbereiche ausgewiesen worden sein, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichsströmungen in den Siedlungskörper hinein.

8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON IST-ZUSTAND UND ZUKUNFTSSZENARIO

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 56 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Augsburg im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 4,0 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt sind durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen am Stadtrand, insbesondere jene am Rand der südlich gelegenen Siedlungsagglomerationen Bergheim, Inningen, Neuberghheim, Wel-



lenburg, Radegundis oder die Schafweidsiedlung 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.

Große Teile der weiter außen gelegenen Stadtteile Haunstetten, Göggingen, dem südlichen Hochzoll, dem äußeren Pfersee, Bärenkeller, Firnhaberau und teils Lechhausen zählen zu etwa einem Drittel (33,6 %) zu den Wirkungsräumen mit einer günstigen thermischen Situation. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen.

27,3 % der Wohn- und Gewerbeflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad oder Gebiete im Übergangsbereich von Innenstadt und weiter außen gelegenen Stadtteilen. Beispielhaft sind hierfür das nördliche Hochzoll, Herrenbach oder weite Teile des dem Lech zugewandten Lechhausen zu nennen.

Knapp ein weiteres Drittel (31,5 %) der Wohn- und Gewerbeflächen Augsburgs gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Darunter entfällt neben einigen zentrumsnahen Siedlungsräumen wie den Wohnblöcken im Bereich des Bahnhofs- und Bismarckviertels oder der Hallstraße der Großteil dieser Flächenkategorie auf die zahlreichen Industrie- und Gewerbegebiete Augsburgs. Exemplarisch sind hier weite Teile Lechhausens, der Riedinger Park und der Industriepark Augsburg, die Augsburger Messe, die Gewerbegebiete entlang der Berliner Allee oder jene im Bereich der Eichleitnerstraße zu nennen. 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.

Ca. 3,7 % der Wohn- und Gewerbeflächen sind durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Bewertungskarte der Nacht zeigt im Status Quo, dass nicht allein die Innenstadtbereiche in einem ca. 300 m großen Radius um den Rathausplatz oder die Siedlungsbereiche entlang der Maximilianstraße von einer ungünstigen thermischen Situation betroffen sind. Neben den bewohnten gilt dies auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen. Viele der Industrie und Gewerbebestände in Augsburg (z.B. MAN Energy Solutions SE, das Industriegebiet entlang der Aindlinger Straße in Lechhausen oder die LEW Lechwerke AG in Oberhausen) sind mit ungünstigen thermischen Bedingungen assoziiert.

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 8,4 % 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, der Kaltluftabflüsse und der Parkwinde. Zusätzlich gehören einige weitere innerstädtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, z.B. die Grünflächen am inneren Stadtgraben, die Amberger Wiese oder die Uferbereiche der Wertach zwischen der Innenstadt und Oberhausen.



Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 13,0 % innerhalb der Augsburger Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse. Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze (z.B. die östliche Karl-Mögerle-Sportanlage) oder an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen (z.B. zwischen Dr.-Schmelzing-Str. und Hammerschmiedeweg in Firnhaberau).

Mit 25,5 % entfällt ca. ein Viertel aller Ausgleichsflächen 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 südlichen Teil 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 mit 49,5 % fast die Hälfte und damit den größten Teil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Ackerflächen an der nördlichen und südlichen Stadtgrenze sowie Waldbereiche (z.B. Siebentischwald und Westliche Wälder), 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 3,7 % all jene Grün- und Freiflächen, die keinen nennenswerten Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten. Hierzu zählen vor allem Waldwege, aber auch die teils baumbestandenen Flächen rund um das Autobahnkreuz und den Autobahnsee im Norden des Augsburger Stadtgebietes.

Die größten Unterschiede im Vergleich zum Ist-Zustand sind in der nächtlichen Bewertungskarte des Zukunftsszenarios weniger durch das Klimawandelsignal als vielmehr durch die modellbasierte Einarbeitung der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen zu beobachten (s. Abbildung 57). Im Wirkraum bleibt die Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen, die bereits im Ist-Zustand existierten, nahezu identisch – durch die im klimatischen Zukunftsszenario 2040 berücksichtigten Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen erhöht sich dagegen die Größe des bebauten Areals von ca. 3906 ha auf 4319 ha. Diese neuen Wirkraumflächen erhielten im Rahmen der nächtlichen Bewertungskarte der Zukunft nun ebenfalls eine Beurteilung, wobei sich locker und weitgehend versiegelungsarme und ggf. am Stadtrand befindliche Siedlungsbereiche eher in den günstigeren bis mittleren Bewertungsklassen wiederfanden (z.B. Haunstetten-Südwest oder Süderweiterung Göggingen), großflächig versiegelte Flächen, vorrangig Gewerbe hingegen eher in den ungünstigeren (z.B. Hammerschmiede).

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 verwoben 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-Südwest, 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 20 zeigt des Weiteren die prozentualen Veränderungen der Bewertungsstufen in Wirk- und Ausgleichsraumflächen im Vergleich von Ist-Zustand zum Zukunftsszenario für das gesamte Stadtbild auf.

Tabelle 20: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand und im Zukunftsszenario.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1	Flächenanteil im Ist-Zustand [%]	Flächenanteil im Zukunftsszenario [%]
Nachtsituation	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	4,0	3,9
		2= günstig	33,6	30,8
		3= mittel	27,3	31,7
		4= ungünstig	31,5	28,8
		5= sehr ungünstig	3,7	4,8
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	3,7	3,5
		4= hoch	49,5	49,0
		3= mittel	25,5	23,7
		2= gering	13,0	13,4
		1= sehr gering	8,4	10,4
Tagsituation	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	8,6	8,8
		2= günstig	17,8	18,0
		3= mittel	35,7	34,0
		4= ungünstig	34,4	36,9
		5= sehr ungünstig	3,5	2,2
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	13,4	13,5
		2= günstig	16,4	16,6
		3= mittel	25,5	25,2
		4= ungünstig	35,2	35,4
		5= sehr ungünstig	9,5	9,3
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	16,6	16,9
		4= hoch	26,6	26,0
		3= mittel	12,8	11,4
		2= gering	12,1	13,6
		1= sehr gering	32,0	32,0

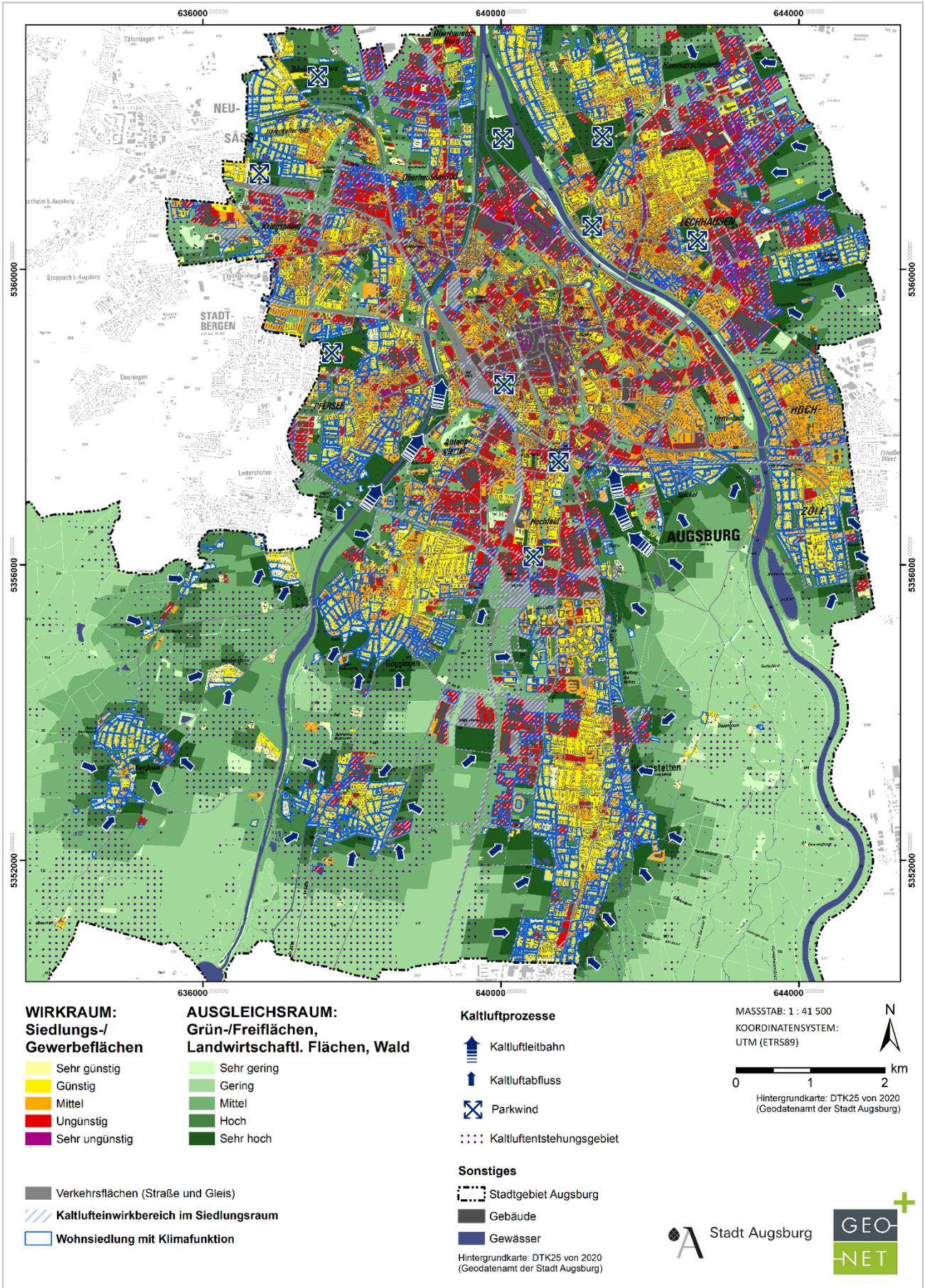


Abbildung 56: Bewertungskarte der Nachtsituation im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

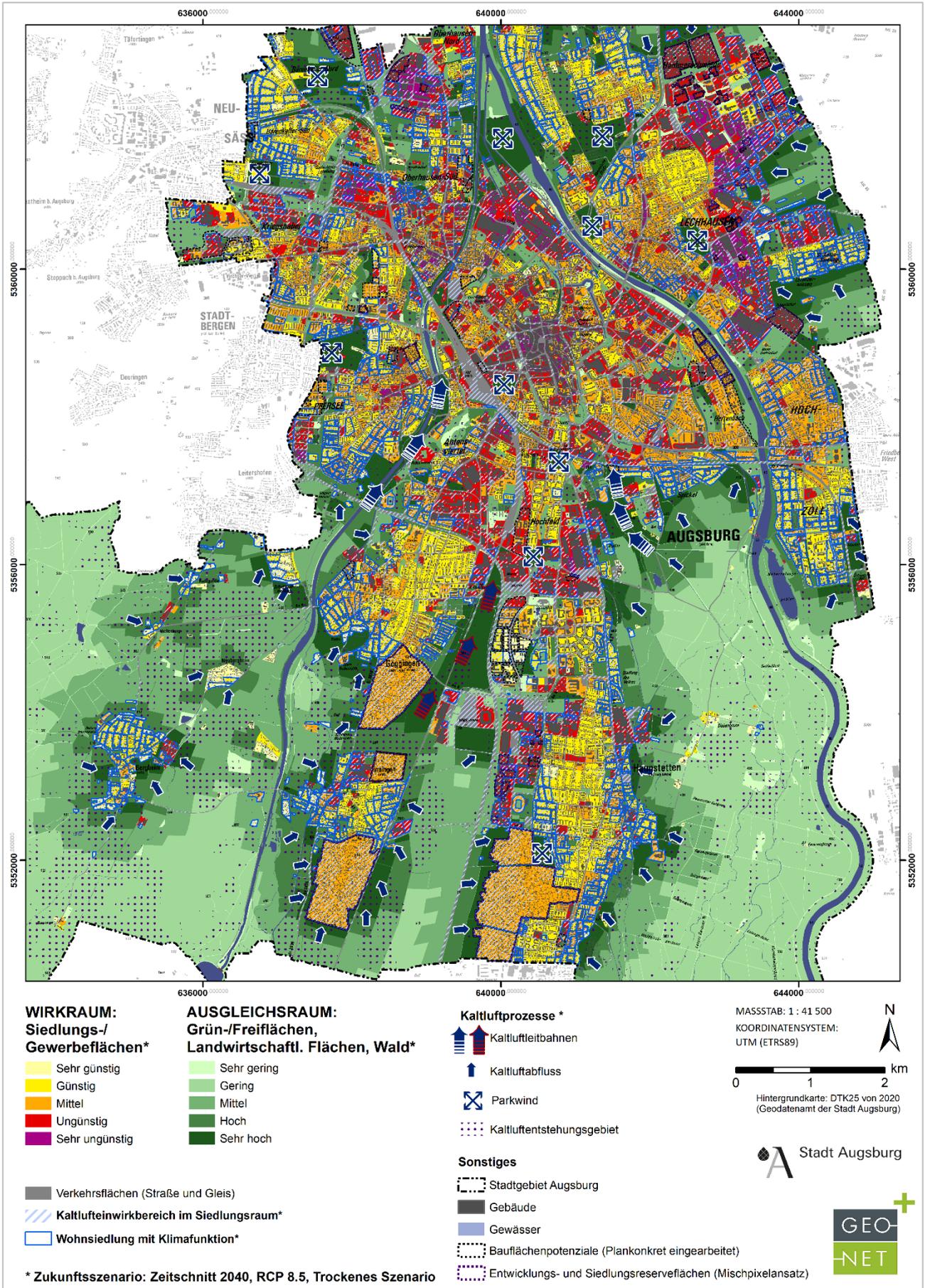


Abbildung 57: Bewertungskarte der Nachtsituation im Zukunftsszenario für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Augsburg, die im Ist-Zustand in Abbildung 58 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 Augsburg sind 8,6 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 13,4 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Vor allem die durchgrünten, zumeist wald- oder gewässernahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung (z.B. Universitätsviertel, das südliche Hochzoll, die Siedlungsräume am Äußeren Stadtgraben oder entlang des Lechs) gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün-(insbesondere Baum-) anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Beispiele für den Verkehrsraum mit günstiger thermischer Situation sind die zu großen Teilen mit Bäumen bestandenen Fuß- und Radwege entlang der Schießgrabenstraße/Konrad-Adenauer Allee, Teile der Prinzenstraße, erneut die entlang des Äußeren Stadtgrabens verlaufenden Straßen oder die an den Uferbereichen von Lech und Wertach vorliegenden Wegeverbindungen.

17,8 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Augsburg wurden der Kategorie der günstigen humanbioklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Beispielflächen befinden sich im Stadtjägerviertel, der Jakobervorstadt Nord oder im nördlichen Göggingen, aber auch an den Rändern anderer Stadtteile, insbesondere Oberhausen Nord oder Herrenbach. Prägnant treten auch einige grüne Innenhöfe hervor, wobei teils nicht nur eine günstige, sondern teilweise gar eine sehr günstige humanbioklimatische Situation erreicht werden konnte. Die Höfe profitieren sowohl von der Beschattung durch Baumpflanzungen als auch durch jene der Gebäudefassade selbst. Bei den Verkehrsflächen weisen 16,4 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf. Die längs des Kaulbaches verlaufende und von Alleebäumen eingerahmte Friedberger Straße ist ein Beispiel hierfür.

Mit 35,7 % ist der größte Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch etwa ein Viertel der Verkehrsflächen (25,5 %) heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Die Großzahl an Flächen in der Innenstadt sind mit dieser Klassifizierung belegt. Obwohl die Grünausstattung hier oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbebauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen. Dagegen finden sich auch im östlichen Lechhausen oder in Hochzoll viele Wirkraumflächen mittlerer Belastung, bei niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil. Durch die Lage in Lechnähe und auf der Wirkraumfläche befindlichen Bäumen kann gar mancherorts auf Gewerbearealen eine mittlere Klassifizierung erfolgen, wie beispielsweise auf Flächen im Schlachthofquartier oder im Ledvance-Areal.

Mit 34,4 % der Augsburger Wohn- und Gewerbeflächen und 35,2 % der Verkehrsflächen sind am Tage Großteile der Wirkraumflächenkulisse durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Bei den Wohn-



bauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen weiter außen gelegenen Stadtteile (z.B. Pfersee, Kriegshaber, Bärenkeller, Firnhabe-
rau, das südliche Göggingen und weite Teile Lechhausens), aber auch die südlichen Siedlungsagglomeratio-
nen (wie Bergheim, Inningen, Neubergheim oder die Schafweidsiedlung). Oft fehlen in diesen Gebieten groß-
kronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des ho-
rizontalen Rechengitters von 10 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den großen Industrie- und
Gewerbeareale am Stadtrand ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im
Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen
Versiegelungsgrades (z.B. rund um das Messezentrum, die WWK-Arena, das Gewerbegebiet rund um den
Kobelweg in Kriegshaber oder weite Teile der Industrie- und Gewerbeareale in Lechhausen). Zu den ungüns-
tigen Straßenzügen gehören z.B. die Maximilianstraße oder der Rathausplatz in der Innenstadt oder die Naga-
hama- bzw. Amagasaki-Allee, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Lang-
samverkehr mit sich bringen.

Der restliche Teil der Wohn- und Gewerbeflächen (3,5 %) sowie der Verkehrsflächen (9,5 %) 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 Ver-
schattung. Wie bereits in der Nacht, zeigt auch die Bewertungskarte des Tages, dass vor allem Gewerbeflä-
chen dieser Kategorie angehören. Prägendstes Beispiel ist hier erneut das großflächige Industrie- und Gewer-
beareal im Osten Lechhausens; auch das Wohnquartier im Bereich der Blücherstraße im selben Stadtteil steht
des Öfteren mit dieser ungünstigen Einordnung in Verbindung. Oftmals ist der an hoch belastete Wohn- und
Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation cha-
rakterisiert – u.a. die südliche Eichleitnerstraße oder die Bürgermeister-Miehle-Straße fallen in diese Katego-
rie.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner
klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbeson-
dere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (32,0 %)
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 Waldare-
ale des Siebentischwaldes oder der westlichen Wälder, die Wolfzahnau oder die baumbestandenen Uferbe-
reiche entlang von Lech und Wertach. Auch innenstadtnah gibt es sehr hoch bewertete Ausgleichsflächen
(z.B. Park am Roten Tor, die Grünbereiche am Inneren und Äußeren Stadtgraben oder die Parkanlagen rund
um die Senkelbachstraße), die einen idealen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten Zentrumsbereiche
darstellen.

Ein gutes Viertel (26,6 %) der Ausgleichsflächen ist einer hohen Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie
bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den genannten
Waldbereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichterem Baumbestand, sodass in diesen Arealen
etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch im Siedlungsraum sind
solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Fronhof oder Hermannfriedhof) und wirken ähnlich wie die Walda-
reale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.



Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (12,8 % der Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klima-ökologische 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 (26,6 %) oder sehr geringer (16,6 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen nördlich und südlich der Augsburger Kernstadt ausmachen.

Die Bewertungskarte des Tages der Zukunft ist in Abbildung 59 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal keinerlei eigene Auswirkungen auf die Klassifizierung hat, da er auf allen Flächen (egal ob Wirk- oder Ausgleichsraum) stattfindet. Anders als in der Nacht sind Änderungen der Klassifizierung der Ausgleichsraumflächen infolge der im klimatischen Zukunftsszenario 2040 berücksichtigten Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen kaum auszumachen, was auch an den Prozentsätzen in Tabelle 20 erkennbar wird. Bis auf geringfügige Flächenaufwertungen von der Klasse der mittleren zur hohen Aufenthaltsqualität bleiben alle weiteren Bewertungsgruppen nahezu konstant. 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 nur wenige, stark von der Entwicklung auf der jeweiligen Fläche abhängige Änderungen der Klassifikation festzustellen (s. Tabelle 20). Viele der neu hinzugefügten, durch den Mischpixelansatz approximierten und teils großflächigen Siedlungspotenzialflächen (z.B. Haunstetten-Südwest, Erweiterung Inningen oder Göggingen) sind zukünftig in der Wirkraumkategorie der ungünstigen Aufenthaltsqualität am Tage eingeordnet. Dies hat zur Folge, dass diese Klasse künftig mit 36,9 % den größten Anteil stellt und im Vergleich zum Ist-Zustand noch einmal einen Zuwachs um 2,5 % verzeichnet. Zwar wurden etwa im Bereich Lechhausens oder Hammerschmiede auch einige hochversiegelte Industrie- und Gewerbeflächen hinzugefügt, die die Einordnung rechtfertigen, dennoch bringt die Annäherung über den Mischpixelansatz allgemein eine Temperaturüberschätzung mit sich (s. Kapitel 6.2), die hier tendenziell zu einer etwas schlechteren Wirkraumbewertung geführt haben könnte.

Bei den konkret mittels B-Plänen eingearbeiteten Entwicklungsflächen wird hingegen offensichtlich, dass eine klimaangepasste Flächenentwicklung durchaus zu einer zukünftig besseren Wirkraumbewertung führen kann. So gelingt es etwa im Bereich des ehemaligen Bahnbetriebswerks westlich der Firnhaberstraße in Hochfeld die Bewertung der Tagsituation mit einer Vielzahl an Bäumen und unversiegelten Bereichen trotz zusätzlicher Bauwerke von mittel bis ungünstig auf mittel bis sehr günstig zu verbessern. Auch gänzlich neue Vorhaben auf heutigen Grünflächen können derart klimaangepasst ausgestaltet sein, dass sich diese Gebiete positiv vom Bestandssiedlungsraum abheben. Hier ist beispielhaft der B-Plan 298 in Oberhausen zu nennen (Südlich der Ahornerstraße, westlich der Äußeren Uferstraße), wo infolge der baulichen Entwicklung ebenfalls mindestens mittlere, überwiegend gar günstige bis sehr günstige Aufenthaltsqualitäten erreicht werden können.

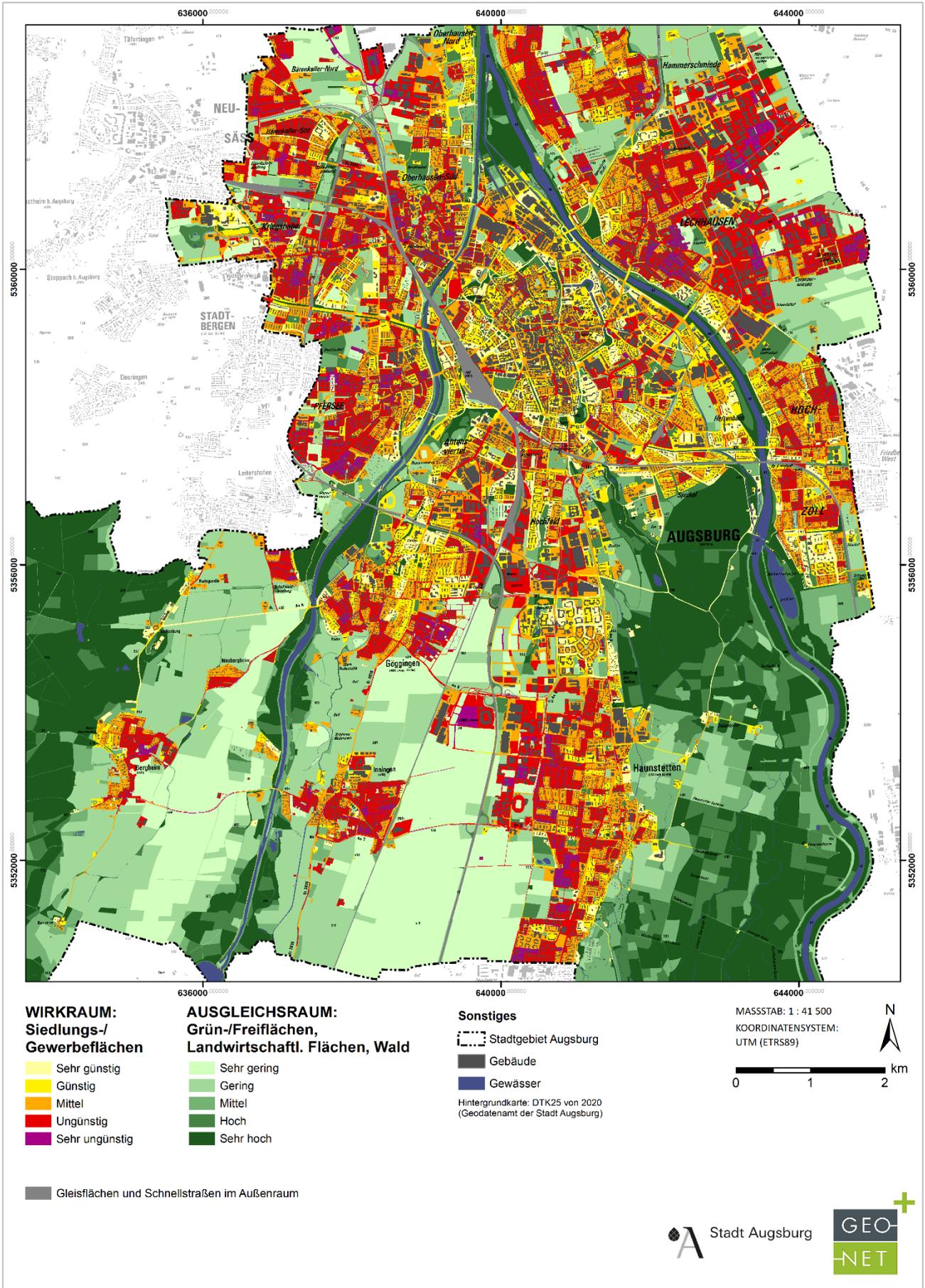


Abbildung 58: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.

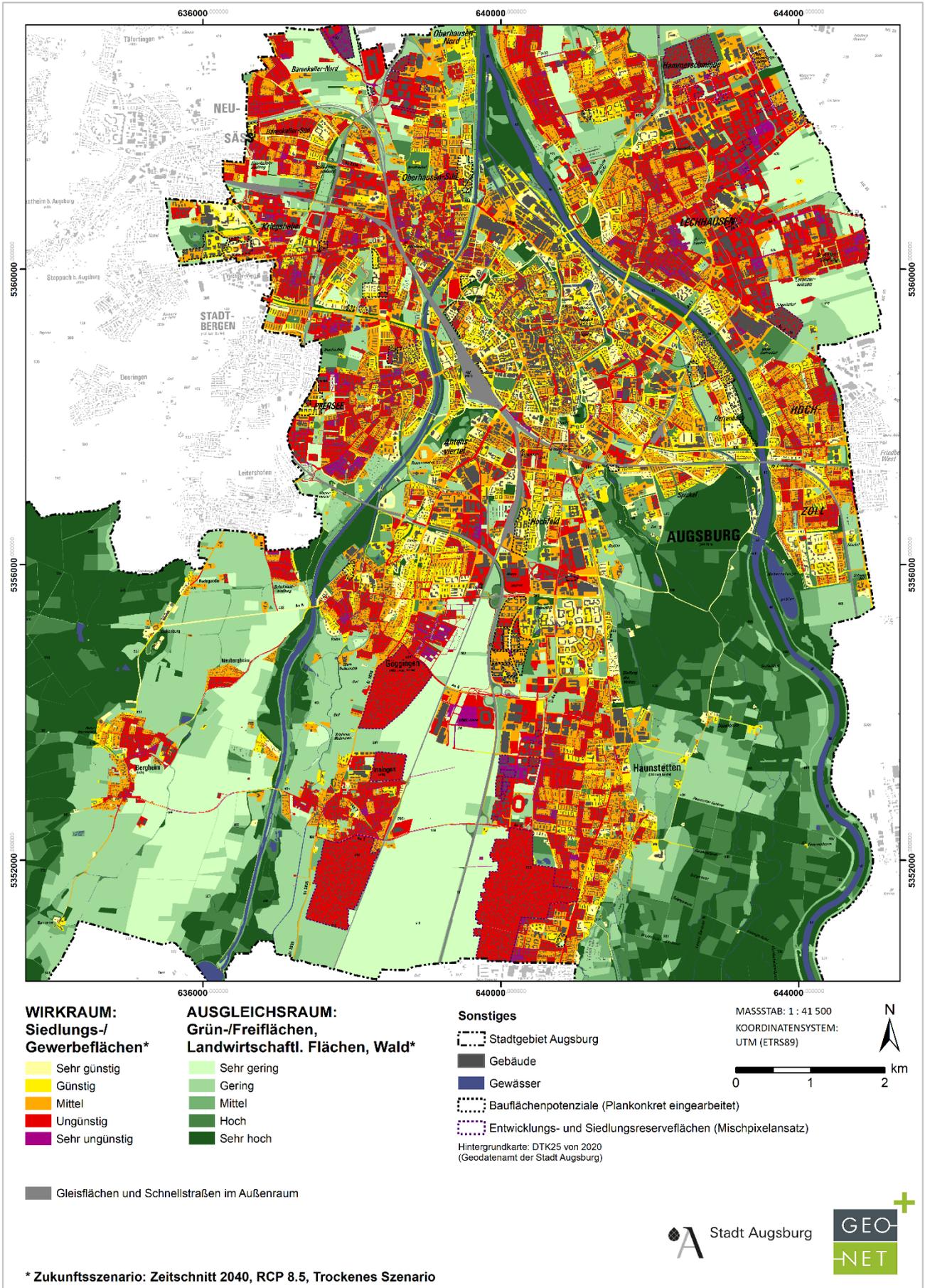


Abbildung 59: Bewertungskarte der Tagsituation im Zukunftsszenario für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der vier Bewertungskarten „Ist-Zustand Nacht“, „Ist-Zustand Tag“, „Zukunftsszenario Nacht“ und „Zukunftsszenario Tag“ (s. Kapitel 8.3) 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.

8.4.1 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 Gewerbebereich gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status Quo (s. Tabelle 21). Ein identisches Durchlaufen dieser Wirkraummatrizen der Bewertungskarten des Szenarios 2040 lieferte im Anschluss eine gesamthafte Tag-Nacht-Bewertungsklassifizierung 1-5 für die zukünftige Situation.

Tabelle 21: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohn- und Gewerbebereich.

Wohnsiedlung: (Nacht stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	2	3	3	4
	2	1	2	3	4	4
	3	2	2	3	4	5
	4	2	3	3	4	5
	5	3	3	4	5	5
Wirkraumbewertung: 1 = sehr günstig, 2 = günstig, 3 = mittel, 4 = ungünstig, 5 = sehr ungünstig						
Gewerbe: (Tag stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	1	1	2	2
	2	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	3	4
	4	3	4	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Wirkraumbewertung: 1 = sehr günstig, 2 = günstig, 3 = mittel, 4 = ungünstig, 5 = sehr ungünstig						



Je nachdem, ob bereits heutzutage oder erst in Zukunft eine für die Tag-Nacht-Kombination ermittelte Wirkraumbelastung vorherrscht, wurden Handlungsprioritäten vergeben. Da der Verkehrsraum nur für die Tagsituation ausgewertet wurde, konnten die Bewertungskennzahlen hier direkt in Handlungsprioritäten überführt werden (s. Tabelle 22).

Tabelle 22: Aus Bewertungskarten abgeleitete Handlungsprioritäten für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus den Matrizen Wohnen und Gewerbe (Bewertungskarten)	Wirkraumbewertung des Verkehrsraums (Bewertungskarten)	Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum
5= sehr ungünstig (Ist-Zustand)	5= sehr ungünstig (Ist-Zustand)	1
5= sehr ungünstig (Zukunft)	5= sehr ungünstig (Zukunft)	2
4= ungünstig (Ist-Zustand)	4= ungünstig (Ist-Zustand)	3
4= ungünstig (Zukunft)	4= ungünstig (Zukunft)	4
3= mittel (Ist-Zustand)	3= mittel (Ist-Zustand)	5
3= mittel (Zukunft)	3= mittel (Zukunft)	6
2= günstig oder 1= sehr günstig (Ist-Zustand oder Zukunft)	2= günstig oder 1= sehr günstig (Ist-Zustand oder Zukunft)	Keine

Zusätzlich sind im Wirkraum die Standorte vulnerabler Einrichtungen (Stand 2019) wie Krankenhäuser, Altenheime, Behinderteneinrichtungen, Schulen und Einrichtungen zur Kinderbetreuung (Kitas, Krippen, etc.) eingetragen. Darüber hinaus erfolgte über Schraffuren eine Kennzeichnung von Baublöcken mit einem gewichtigen bzw. hohem Anteil an (vulnerabler) Wohnbevölkerung, sodass kenntlich wird, wo sich thermische Belastungsräume mit hohen Bevölkerungsdichten überschneiden.

Die Auswertungen zu Bevölkerungsdichten wurden vom Amt für Statistik und Stadtforschung der Stadt Augsburg (kurz: Statistikamt) nach Vorgaben von GEO-NET durchgeführt. Hierfür lieferte GEO-NET die Wirkraumflächenkulisse des Ist-Zustandes zu, von deren 2493 Polygonen (entsprechend der Standard-Datenschutzvorgaben mit mindestens 10 gemeldeten Personen als bewohnt definierten Flächen mit mindestens 4 Wohnadressen) vom Statistikamt das bevölkerungsreichste Quartil an Flächen (623 Polygone) ausgewählt wurde (Gestrichelte Schraffur, s. Abbildung 60). Des Weiteren wurde aus diesem Datensatz nochmals obersten Quartils der größte Anteil der unter 7-Jährigen und ab 65-Jährigen an der Gesamtwohnbevölkerung herausgefiltert und für die Karte durch eine Kreuzschraffur belegt (156 Polygone).



Bereiche hoher Bevölkerungsdichte
Quartil höchster Dichte der untersuchten Flächen*

Bereiche hoher Bevölkerungsdichte und gleichzeitigem hohen Anteil an Kleinkindern und/oder Seniorinnen und Senioren
Das Quartil des größten Anteils an vulnerablen Gruppen aus dem Quartil der höchsten Dichte der untersuchten Flächen*

*Datengrundlage des Amts für Statistik und Stadtforschung (Stand 2021) für die Flächenkulisse des Siedlungsraumes des Ist-Zustands

Abbildung 60: PHK-Legendenteil zu demografischen Informationen.



Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den **stadtklimatischen Schutzbedarf** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum, wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt (s. Tabelle 23).

Tabelle 23: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Grünflächen						
Schritt 1	Bewertung in der Nacht					
	1	2	3	4	5	
Aufenthaltsqualität Tag	3	3	3	4	4	5
<i>Entlastungsraum</i>	4	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	5	5
Ausgleichsraumbedeutung: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch						
Grünflächen						
Schritt 2	Bewertung in der Nacht					
	1	2	3	4	5	
Aufenthaltsqualität Tag	1	1	2	3	4	5
<i>kein Entlastungsraum</i>	2	1	2	3	4	5
	3	2	2	3	4	5
	4	3	3	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Ausgleichsraumbedeutung: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch						

Der Durchlauf der Matrix findet in zwei Schritten statt, je nachdem, ob die betrachtete Fläche einen Entlastungsraum darstellt oder nicht. Entlastungsräume sind vom tagsüber belasteten Siedlungsraum (Wirkraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4) fußläufig gut erreichbare (Luftlinie 300 m), öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder von mindestens hoher Bedeutung am Tage (Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4). In Schritt 1 der Matrix werden neben Entlastungsräumen auch die wichtigsten potenziellen Entlastungsräume betrachtet, die dieselben Eigenschaften wie Entlastungsräume aufweisen, aber eine mittlere Bedeutung am Tag aufweisen (hier: Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte = 3; alle potenzielle Entlastungsräume in PHK haben Bewertungsklasse ≤ 3). Die Gesamtheit der (potenziellen) Entlastungsräume, die von der Bevölkerung an heißen Tagen aufgesucht werden können, wird auch als Punktschraffuren über den betreffenden Ausgleichsräumen der PHK als zusätzliche Information angezeigt.



	Entlastungsraum (mindestens hohe Bedeutung am Tag)
	Potenzieller Entlastungsraum (maximal mittlere Bedeutung am Tag)

Abbildung 61: PHK-Legendenteil mit Informationen zu (potenziellen) Entlastungsräumen.

Nach der Gegenüberstellung der Bewertung von Entlastungsräumen am Tage und der nächtlichen Bewertung wird letztere in einem zweiten Schritt den restlichen Ausgleichsraumflächenbewertungen des Tages gegenübergestellt. Die daraus resultierenden Schutzbedarfe und Planungshinweise sind in Tabelle 24 aufgeführt. In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.

Tabelle 24: 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)	
4= hoch (Ist-Zustand)	Hoch
4= hoch (Zukunft)	
3= mittel (Ist-Zustand)	Erhöht
3= mittel (Zukunft)	
2= gering oder 1= sehr gering (Ist-Zustand oder Zukunft)	Keiner

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte der Zukunft übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen, -abflüssen und Parkwinden sowie Augsburger Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden, Gleisflächen und Schnellstraßen im Außenraum (nicht bewertet) sowie Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Augsburg, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 62 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 25).



Tabelle 25: Flächenanteile der Handlungsprioritäten im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
1	4,6	Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation sind bei allen Vorhaben, möglichst proaktiv umzusetzen. Möglichkeiten der (klimagerechten) Gebäudekühlung sind zu prüfen.
2	1,2	
3	19,4	Bei allen baulichen Entwicklungen und bspw. im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende optimierende stadtklimatische Maßnahmen umzusetzen.
4	1,9	
5	37,6	
6	7,0	Klimaökologische Standards zur baulichen Entwicklung sind bei allen Vorhaben einzuhalten.
Keine	28,3	

Die Tabelle 25 zeigt zudem die Flächenanteile der verschiedenen Handlungsprioritäten auf. Mit 5,8 % sind die beiden höchsten Handlungsprioritäten zuvorderst im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerberaum zu finden. Aber auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Innenstadtbereichen 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 bis 5 machen mit insgesamt 58,9 % der Wirkraumflächen den größten Teil des Wirkraumes aus. Die in den Planungshinweisen genannten „klimaökologischen Standards“ meinen 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 Durchlüftungssachsen, 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 8.5 zusammengefasst. Diese sind auch bei Handlungspriorität 6 im Zuge baulicher Entwicklung einzuhalten und daher zu prüfen. Einige der im Zukunftsszenario hinzugefügten Entwicklungs- und Siedlungsreserverflächen (z.B. Haunstetten-Südwest, Erweiterung Inningen oder Göggingen) sind dieser Handlungspriorität zugeordnet. Durch eine geeignete Klimaanpassung in den betrachteten Zukunftsquartieren könnte es gelingen, in den Bereich „keiner vorrangigen Handlungspriorität“ vorzudringen, deren Flächenkulisse in der vorliegenden Analyse 28,3 % 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 26 stellt den Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Schutzbedarfsklasse.

Mit einem Anteil 40,0 % ist der Großteil des Augsburger Ausgleichsraum besonders schutzbedürftig. Hierzu zählen etwa die großflächigen, öffentlich begehbaren Waldbereiche des Siebentischwalds und der Westli-



chen Wälder, aber auch die Auen- und Uferbereiche von Lech und Wertach. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche oder viele der Parkwindareale 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 immerhin ein Viertel aller Ausgleichsflächen betrifft (25,3 %), ist zu achten und durch eine verbalargumentative oder modellhafte Untersuchung eine Klimaoptimierung des Planvorhabens zu erreichen. Etwa ein Fünftel (19,9 %) der Grün- und Freiflächen weisen noch immer einen erhöhten Schutzbedarf auf. Hierzu zählt z.B. der Großteil der südlich der Kernstadt anliegenden Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben (z.B. bei Gewerbeparks/Hochhäusern) eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten.

Tabelle 26: Flächenanteile der Schutzbedarfe im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Schutzbedarf in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
Sehr hoch	40,0	Bei geplanten Entwicklungen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) modellhaft nachzuweisen.
Hoch	25,3	Auf die Erhaltung der klimatischen Funktion ist zu achten. Je nach Vorhabengröße kann dies über eine qualitative Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung zur Optimierung der Planung erfolgen.
Erhöht	19,9	Auf die Erhaltung der klimatischen Funktion ist zu achten. Für größere Vorhaben (z.B. Gewerbepark, Hochhaus) sollte eine qualitative Stellungnahme zur Optimierung der Planung erfolgen.
Keiner	14,8	Die Flächen weisen aktuell für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf.

Ähnlich den demografischen Schraffuren im Wirkraum zur stärkeren Gewichtung der Handlungsprioritäten, existieren mit den (potenziellen) **Entlastungsräumen** auch im Ausgleichsraum zusätzliche Informationen bei der Betrachtung von Schutzbedarfen mit der Einschränkung, dass Entlastungsräumen lediglich die Tagsituation (resp. Schattenwirkung) zugrunde liegt und diese größtenteils bereits durch die Anwendung der Bewertungsmatrizen direkt in der Schutzbedarfskategorisierung enthalten sind. Die erneute visuelle Hervorhebung kann jedoch insb. bei Planvorhaben, die vornehmlich die Tagsituation betreffen, ergänzend hinzugezogen werden.

Potenzielle Entlastungsräume können perspektivisch zumeist durch Baumpflanzungen zu vollwertigen Entlastungsräumen aufgewertet werden. Diese braungepunkteten Flächen in Nachbarschaft zu Bestandssiedlungsräumen oder Entwicklungs- bzw. Siedlungsreserveflächen sind daher gut geeignet, bisher oder zukünftig belastetem Siedlungsraum einen nahen, hochwertigen Ausgleichsraum zur Verfügung zu stellen. Dabei ist



jedoch einzubeziehen, dass neue Baumpflanzungen durch ihre Hinderniswirkung in der Nacht durchaus strömungsabschwächend wirken können und daher auch Auswirkungen auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen bedingen.

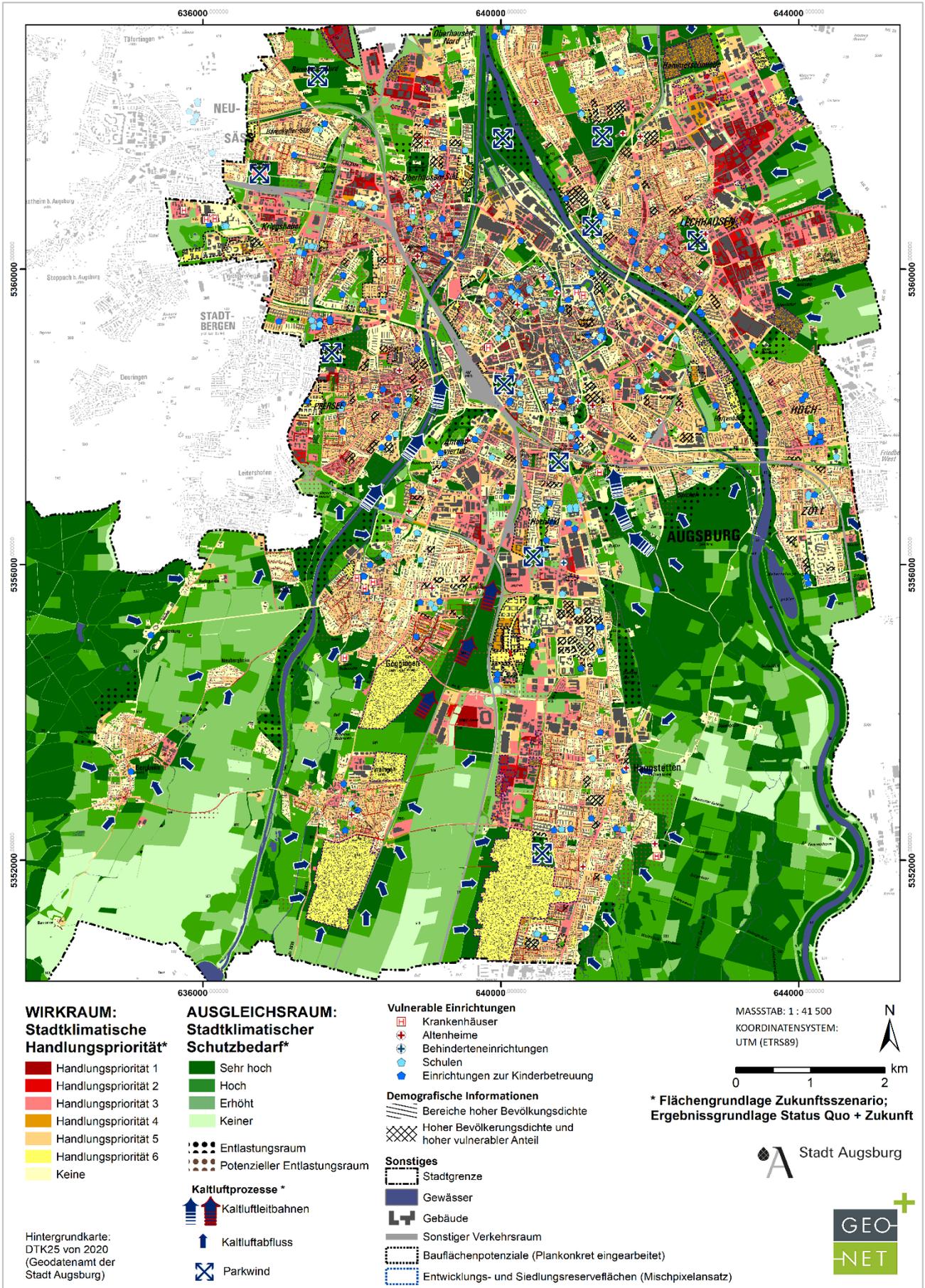


Abbildung 62: Planungshinweiskarte Stadtklima für einen Ausschnitt des Augsburger Stadtgebiets.



8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN

8.5.1 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 Augsburg wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmenets 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 27 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. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Augsburger 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 Augsburgs (z.B. Siebentischwald) oder die Auenbereiche von Lech und Wertach 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 auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

Neben ihrem Potenzial 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, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume 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 Trockenheitstoleranz 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).

Die Stadt Augsburg zeichnet das Vorhandensein einer Vielzahl größerer (z.B. Lech und Wertach) aber auch kleinerer Fließgewässer wie Gräben und Kanäle aus. Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen¹⁶ 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), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungs-

¹⁶ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



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

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei 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 die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Straßenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübel-



bäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren.



Tabelle 27: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Augsburg.

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

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



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

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



Bild: Verlängerung Linie 3, Augsburg (Quelle: Ruth Plössel/Stadt Augsburg)

<p>06</p> <p>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen
--	--

<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld
--	---



Bild: Königsplatz in Augsburg (Quelle: Ruth Plössel/Stadt Augsburg)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
<p>07 Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
<p>Bild: Kräutergarten im Park am Roten Tor in Augsburg (Quelle: Gregor Meusel, GEO-NET)</p>		
<p>08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltfluthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	
<p>Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: Miriam Lübbecke)</p>		



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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



Bild: 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

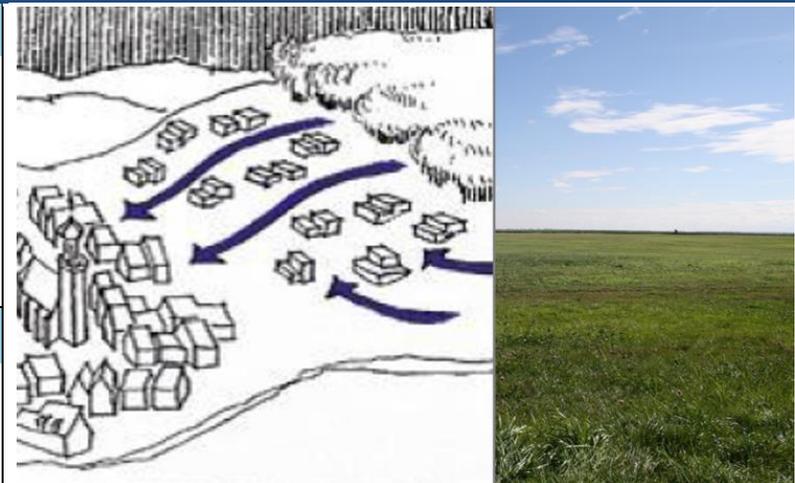


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: GEO-NET)



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>Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.), Zürich, 2020.)</p>
<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 	
<p>14 Entdichtung (Rückbau)</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen 	 <p>Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: Josephine Förster, GEO-NET)</p>
<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 	



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 wasserversorger 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), blaugrüne 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)



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

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



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19 Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Kurzerläuterung

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

Wirkung

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

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Bestand)

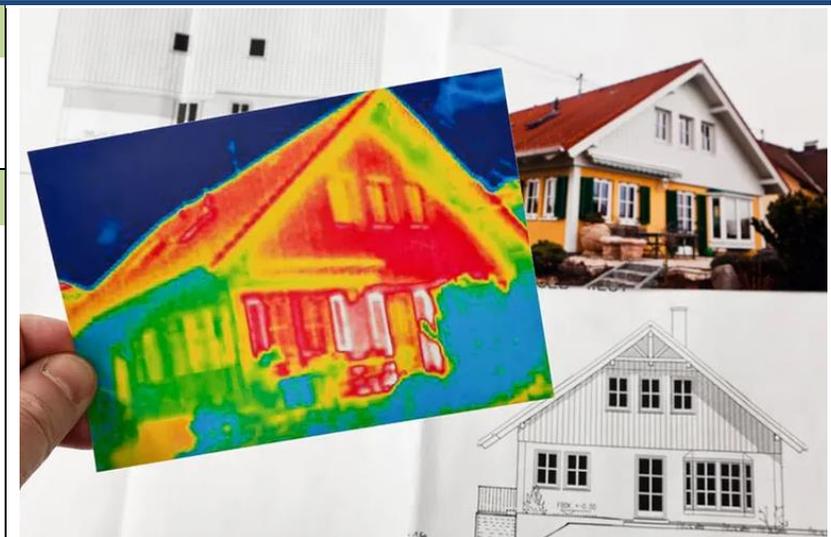


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: ginasanders/123RF.com)

20 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

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

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

Räumliche Umsetzung

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

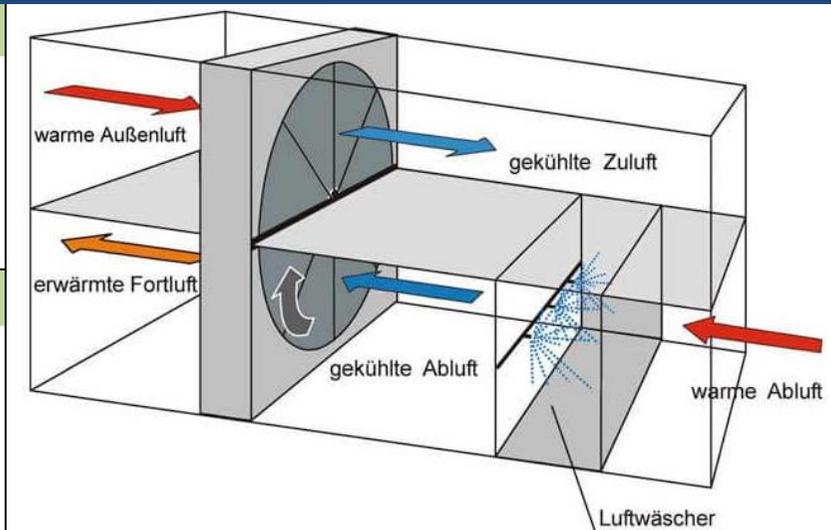


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>21 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum) 	 <p>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 	

8.5.2 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 Augsburg 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:

- „Wirkraum mit hoher bis mittlerer Handlungspriorität“: Pfersee Mitte
- „Wirkraum mit mittlerer Handlungspriorität auf Siedlungspotenzialfläche“: Hammerschmiede
- „Straßenraum hoher Handlungspriorität“: Neuburger Straße
- „Ausgleichsraum hohen Schutzbedarfs“: Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Pars-eval-Str.

WIRKRAUM MIT HOHER BIS MITTLERER HANDLUNGSPRIORITÄT: PFERSEE MITTE

Bei geplanten Flächenentwicklungen im Wirkraum, z.B. bei Nachverdichtungsvorhaben oder bei Vorhaben zur Anhebung des human-bioklimatischen Komforts sollte mit der Betrachtung des entsprechenden Ausschnitts in der Planungshinweiskarte gestartet werden (s. Abbildung 63).

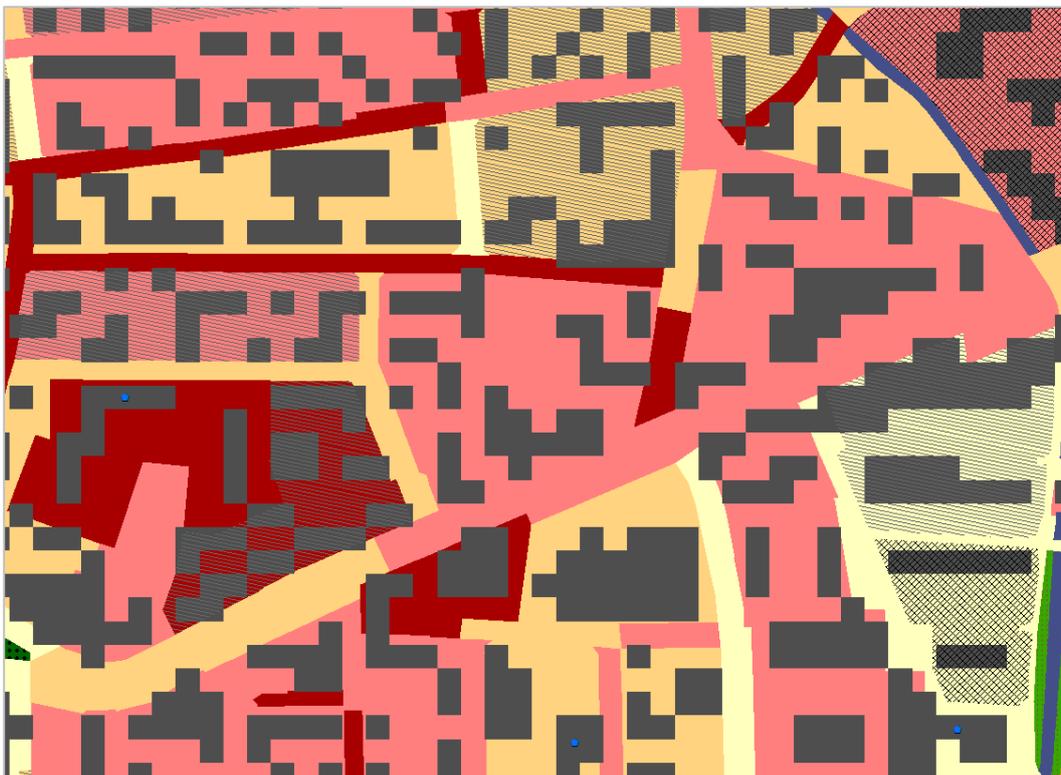


Abbildung 63: PHK-Ausschnitt für Pfersee-Mitte – Bereich Augsburgener Straße (Legende: s. Abbildung 62).



Der erste Fokusraum Pfersee-Mitte zeigt neben vereinzelt, weniger kritischen Wirkraumflächen vorrangig jene der Handlungsprioritäten 1, 3 und 5, die allesamt per Definition und Methodik (s. Kapitel 8.4.1) bereits im Ist-Zustand mit einer thermischen Belastung assoziiert sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden primär Karten des Status Quo in Augenschein genommen. Besonderes Augenmerk sollte zudem auf den beiden Blockflächen westlich der Kurhausstraße und nördlich der Elsässer Straße liegen, die mit zu den 25 % der Flächen mit dem größten Bevölkerungsanteil im Stadtgebiet zählen und den Handlungsprioritäten 1 bzw. 3 zugehörig sind.

Die der PHK hierarchisch direkt untergeordneten Karten sind die Bewertungskarten, welche für den Ist-Zustand in Abbildung 64 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.

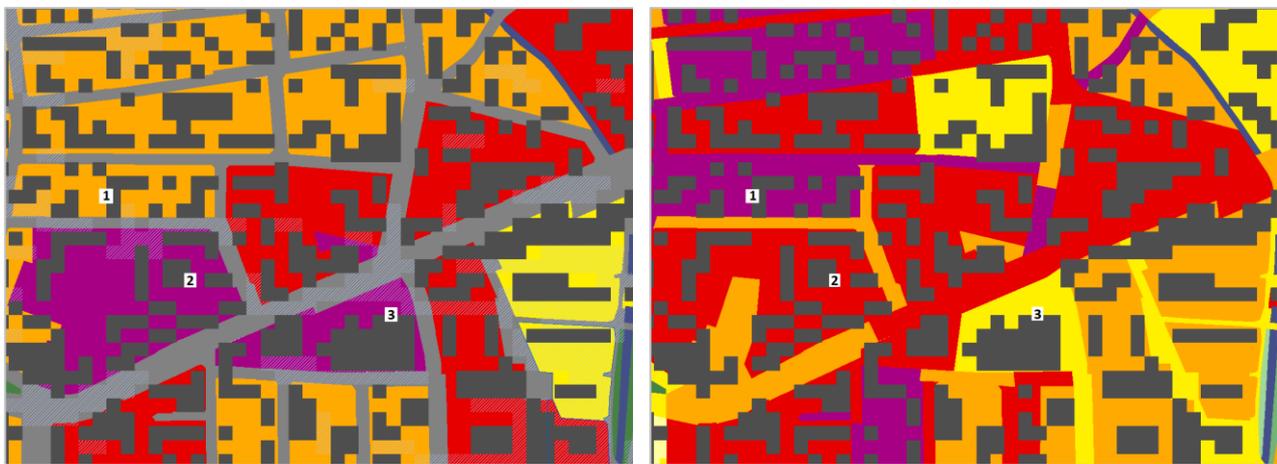


Abbildung 64: Bewertungskarte Nacht, Ist-Zustand (links) und Bewertungskarte Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt Pfersee-Mitte (Legenden s. Abbildung 56 bzw. Abbildung 58).

Exemplarisch findet eine Betrachtung dreier Wirkraumflächen auf den Bewertungskarten für den Raum Pfersee-Mitte statt:

- (1) Wirkraumfläche nördlich der Elsässer Straße
- (2) Wirkraumfläche westlich der Kurhausstraße
- (3) Wirkraumfläche der „Herz Jesu“-Kirche

Während Beispielfläche (1) am Tage eine mittlere humanbioklimatische Situation aufweist, wurde diese in der Nacht als sehr ungünstig eingestuft. Bei Beispielfläche (3) ist es nahezu umgekehrt (am Tage günstig, nachts sehr ungünstig) und Beispielfläche (2) weist sowohl tagsüber (ungünstig) als auch nachts (sehr ungünstig) eine problematische humanbioklimatische Situation auf.

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 (s. Abbildung 65 rechts), wodurch lokale Minima und Maxima

dieser gefühlten Temperatur in Erscheinung treten, die nachfolgend die Zuweisung ortsbezogener Maßnahmen für die Tagsituation zulassen. Im Bereich von Beispielfläche (3) sind nordöstlich und südwestlich der Kirche PET-Minima zu erkennen, die durch den Schattenwurf größkroniger Bäume zu erklären sind (s. Landnutzung und Luftbild in Abbildung 67). Auch der Schattenwurf der Kirche selbst mindert die PET lokal ab. Die Flächen (1) und (2) verfügen dagegen zumeist über niedrige Gebäudehöhen und auch sonst über kaum verschattende Vegetation. Zwar sind nördlich der Elsässer Straße einige wenige Baum- und Buschgewächse im Luftbild zu sehen, diese konnten im Modellraster von 10 m jedoch nicht berücksichtigt werden. Vor allem rund um die Bauwerke der Fläche (3) sind fast alle Oberflächen vollversiegelt, was die hohen PET-Werte und die ungünstige Einschätzung in der Bewertungskarte erklärt. Im Hinblick auf die Tagsituation sind demnach folgende, vorrangig Entsiegelungs- und Verschattungsmaßnahmen aus dem Katalog zu empfehlen: M01, M02, M03, M04, M10, M14. Bei älterer Bausubstanz und unzureichend geschützten Innenräumen können auch die Maßnahmen M16-M21 angewandt werden, wobei insbesondere M16 und M17 starke Synergien zum Komfort im Außenraum aufweisen.

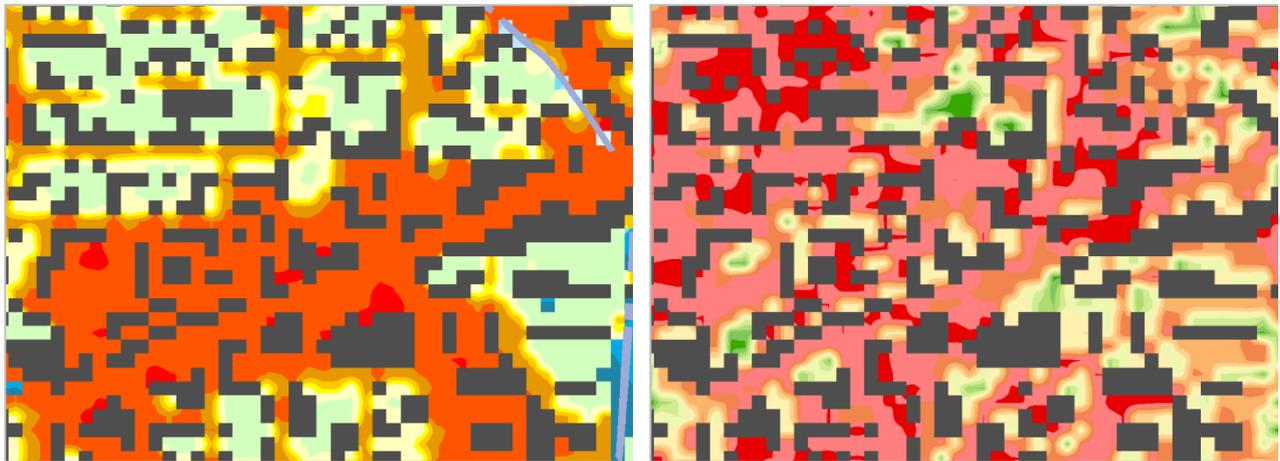


Abbildung 65: Klimaanalysekarte Nacht, Ist-Zustand (links) und PET Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt Pfersee-Mitte (Legenden s. Abbildung 50 bzw. Abbildung 46).



Abbildung 66: Landnutzung des Ist-Zustands (links) und zugehöriges Luftbild von 2020 (rechts) für den Ausschnitt Pfersee-Mitte (Legende der Landnutzung: s. Abbildung 33).



Für die Beurteilung der Nachtsituation der drei Beispielflächen wird der nächtlichen Bewertungskarte nachfolgend die Klimaanalysekarte oder falls nötig (z.B. bei einer genaueren Untersuchung des Kaltluftprozessgeschehens) die vier nächtlichen Einzelparameter (nächtliche Lufttemperatur, KVSD, KPR, Windfeld) betrachtet. Im Siedlungsraum ist die nächtliche Überwärmung der wichtigste Indikator, welcher sich auf den überwiegend wenig versiegelten und rasenbewachsenen Gartenflächen der Fläche (1) vergleichsweise gering zeigt und auch die immerhin mittlere humanbioklimatische Situation der nächtlichen Bewertungskarte rechtfertigt (vgl. Abbildung 65 und Abbildung 64, jeweils links). Die Fläche ist teils auch als ein Raum mit Klimafunktion ausgewiesen (Schraffur in der Bewertungskarte der Nacht), welche durch weitere Entsiegelung erhöht werden kann. Der in Landnutzung und Luftbild gleichermaßen (s. Abbildung 66) erkennbare hohe Versiegelungsanteil der Flächen (2) und (3) bedingt dagegen eine erhöhte Wärmespeicherung und damit eine hohe nächtliche Überwärmung sowie eine sehr ungünstige humanbioklimatische Bewertungsklassifizierung. Auch die Kronendächer der Bäume von Fläche (3) bringen nachts keine Verbesserung, sondern vermindern die nächtliche vertikale Ausstrahlung barriereartig. Das Beispiel zeigt anschaulich, dass auch im hochverdichteten Siedlungsraum vor allem in Bezug auf rauhigkeitsarme Entsiegelung/Begrünung und Baumpflanzungen stets Tag- und Nachtsituation gegeneinander abgewogen werden müssen.

Nach Betrachtung von Tag- und Nachtsituation aller zur Verfügung stehender Karten sind für den Untersuchungsraum Pfersee-Mitte die in Abbildung 67 aufgeführten Maßnahmen empfehlenswert.



Abbildung 67: Auszug von Maßnahmenvorschlägen für den Untersuchungsraum Pfersee-Mitte.

Die aufgeführten Maßnahmenverortungen beziehen sich vorrangig auf die drei Beispielflächen des Untersuchungsraumes und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Auch sind sie immer im Kontext der baulichen und rechtlichen Umsetzungsmöglichkeiten abzuwägen.

WIRKRAUM MIT MITTLERER HANDLUNGSPRIORITÄT AUF SIEDLUNGSPOTENZIALFLÄCHE: HAMMERSCHMIEDE

Das zweite Leitfadenbeispiel beschäftigt sich mit den beiden Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im nördlichen Teil der Hammerschmiede. In der Planungshinweiskarte (Abbildung 62) sind diese Flächen als Handlungspriorität 4 ausgewiesen, erfordern folglich bei baulichen Entwicklungen über den klimaökologischen Standard hinausgehende optimierende stadtklimatische Maßnahmen.



Abbildung 68: PHK-Ausschnitt der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im Norden der Hammerschmiede (Legende: s. Abbildung 62).

Da die Flächen auf heutigem Ackerland liegen und erst in den Karten des Zukunftsszenarios auftreten, werden in diesem Fall nach der PHK die Bewertungskarten der Zukunftssituation 2040 hinzugezogen, um im nächsten Schritt zu identifizieren, ob im geplanten Wirkraum vorrangig eine Belastung am Tage oder in der Nacht vorliegen wird (s. Abbildung 69). Da es sich um die Entwicklung eines Industrieareals handelt, sind für die beiden Wirkraumflächen infolge der großflächigen Versiegelung und Überbauung sowohl tagsüber als auch nachts ungünstige Bewertungseinstufungen erfolgt. Als Zwischenerkenntnis bleibt somit festzuhalten, dass für Angestellte am Tage Maßnahmen im Außenraum der Flächen angewandt werden müssen, um den humanbioklimatischen Komfort an Hitzetagen zu erhöhen. Sollte im geplanten Industriegebiet auch nachts gearbeitet werden, rückt das (auch am Tage nicht zu vernachlässigende) Innenraumklima weiter in den Fokus, das sowohl durch einen geringen Versiegelungsgrad im Quartier als auch durch Dach- und Fassadenbegrünung sowie weitere bautechnische Kühl- und Verschattungsmaßnahmen, aber auch durch schattenspendende Bäume im Außenraum geringgehalten werden kann. Somit ergeben sich folgende vorläufige Maßnahmen: M02, M03, M04, M06, M07, M10, M16-21.

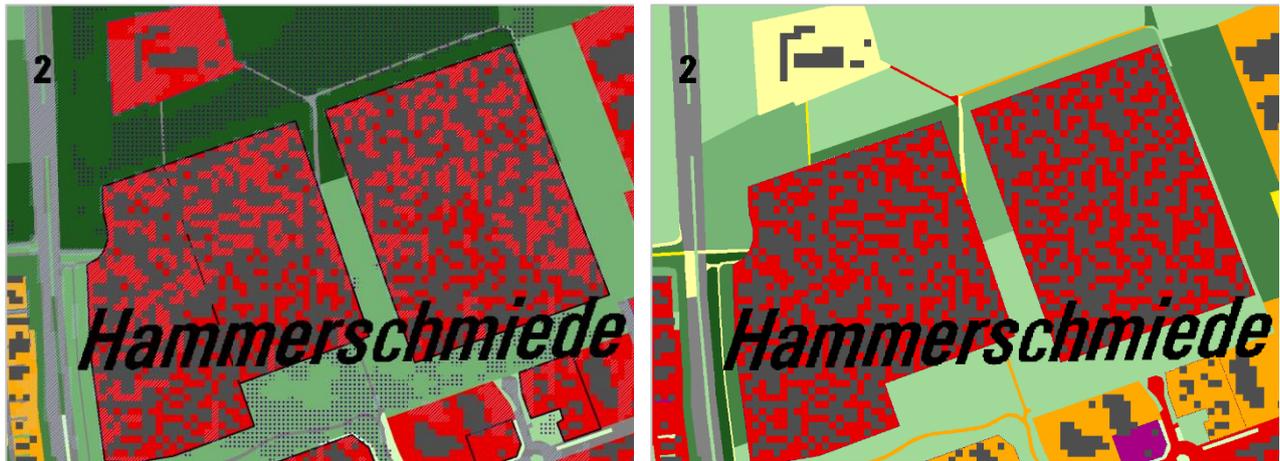


Abbildung 69: Bewertungskarte Nacht, Zukunftsszenario (links) und Bewertungskarte Tag, Zukunftsszenario (rechts) für den Ausschnitt der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im Norden der Hammerschmiede (Legenden s. Abbildung 57 bzw. Abbildung 59).

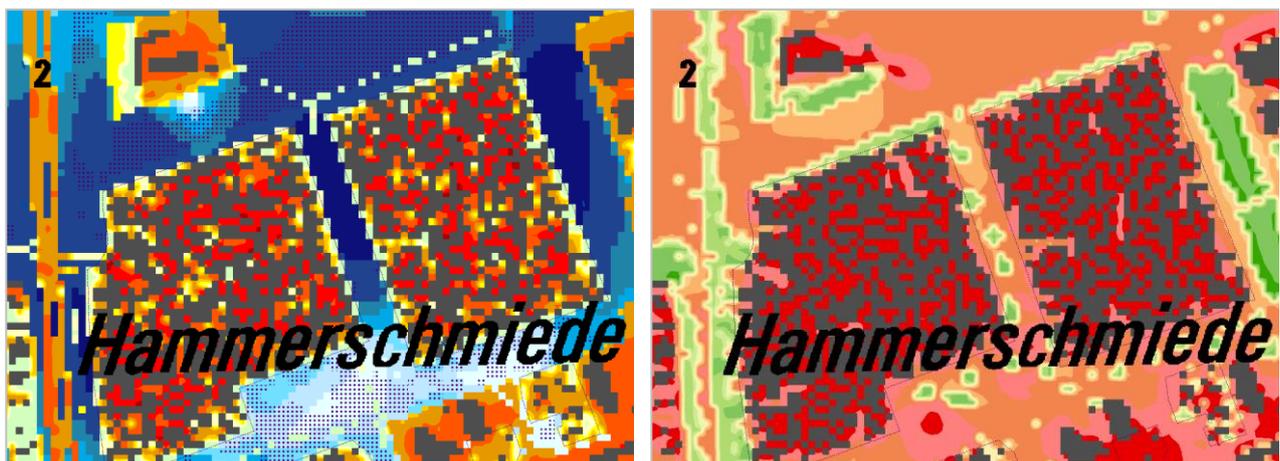


Abbildung 70: Klimaanalysekarte Nacht, Zukunftsszenario (links) und PET Tag, Zukunftsszenario (rechts) für den Ausschnitt der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im Norden der Hammerschmiede (Legenden s. Abbildung 51 bzw. Abbildung 47).

Die Wichtigkeit von Maßnahmen dieser Art unterstreicht ein Blick in die hierarchisch untergeordneten Karten KAK (für die Nacht) und der PET (für den Tag), welche in Abbildung 70 aufgetragen sind. Während die nächtliche Überwärmung im Vergleich zum Umland aufgrund des hohen Gebäudeanteils größtenteils im Bereich von 3,5 – 4,5 K liegt, führen Absorptions- und Reflexionsprozesse an den Gebäudefassaden auch am Tage zu extremer Wärmebelastung. Als zwei durch den Mischpixelansatz approximierte Flächen (MP1001, s. Kapitel 5.3 und Abbildung 72 für Nutzung und aktuelles Luftbild) ist infolge der zufälligen Pixelanordnung eine Überschätzung der Überwärmung nicht auszuschließen, dennoch wird erneut die o.g. Reihe von im Rahmen der späteren Planung anzuwendenden Maßnahmen offensichtlich, die die Wärmebelastung möglichst gering halten kann. Neben der Geringhaltung von Versiegelungsgrad und der Grünausgestaltung des Quartieres, ist insbesondere bei großen Bauvorhaben am Stadtrand (oder allgemein im Bereich von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen) auf die Aufrechterhaltung des Kaltluftprozessgeschehens zu achten. Da bereits die KAK der Zukunft eine geringere Kaltluftvolumenstromdichte im südlichen Lee der Fläche und damit eine geringere Belüftung des noch weiter südlich gelegenen Bestandsgewerbes aufzeigt, ist ein

Vergleich der Kaltluftvolumenstromdichten von Status Quo und Zukunftsszenario empfehlenswert (s. Abbildung 71). Auf der rechten Abbildungsseite wird die nahezu ungehinderte und gen Siedlungsraum beschleunigende Kaltluftströmung im Ist-Zustand sichtbar, welche infolge der Neubauten stark abgemindert wird. Baukörper sollten später idealerweise längs der Strömungsrichtung aufgestellt sein, um diese möglichst wenig abzubremesen. Der Effekt von raugkeitsarmen (Grün-)Schneisen wird zwischen den beiden Gewerbepotenzialen sichtbar, wo die Strömung durch Kanalisierungseffekte sogar nochmal zunimmt. Zusätzlich sollte die überbaute Fläche nach dem Motto „besser hoch als breit“ möglichst gering gehalten werden. Auf diese Weise gelingt eine Grünflächenvernetzung bis an die Bestandsbauten heran, was die kaltluftabschwächende Wirkung minimiert. Verknüpfte Maßnahmen in Bezug auf nächtliche Kaltluftprozesse sind M12, M13 und M15. Um späteren Planungen bzgl. Gebäudevolumina und landschaftsplanerischer Ausgestaltung nicht vorzugreifen wird in diesem Leitfadenbeispiel auf eine exakte Maßnahmenverortung wie (bspw. in Abbildung 67) verzichtet.

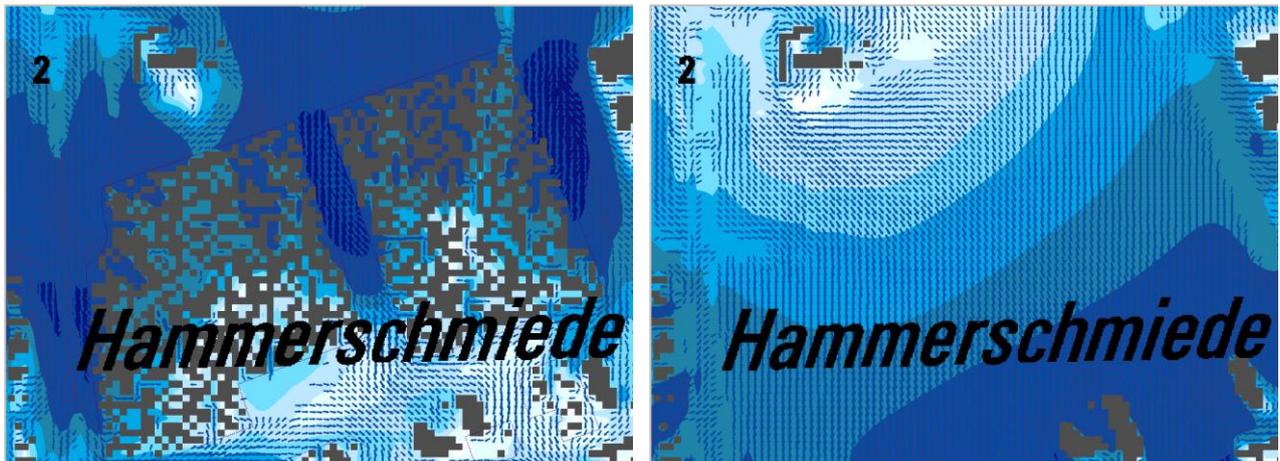


Abbildung 71: KVSD des Zukunftsszenarios (links) und des Ist-Zustandes (rechts) für den Ausschnitt der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im Norden der Hammerschmiede (Legende: s. Abbildung 41 bzw. Abbildung 40).

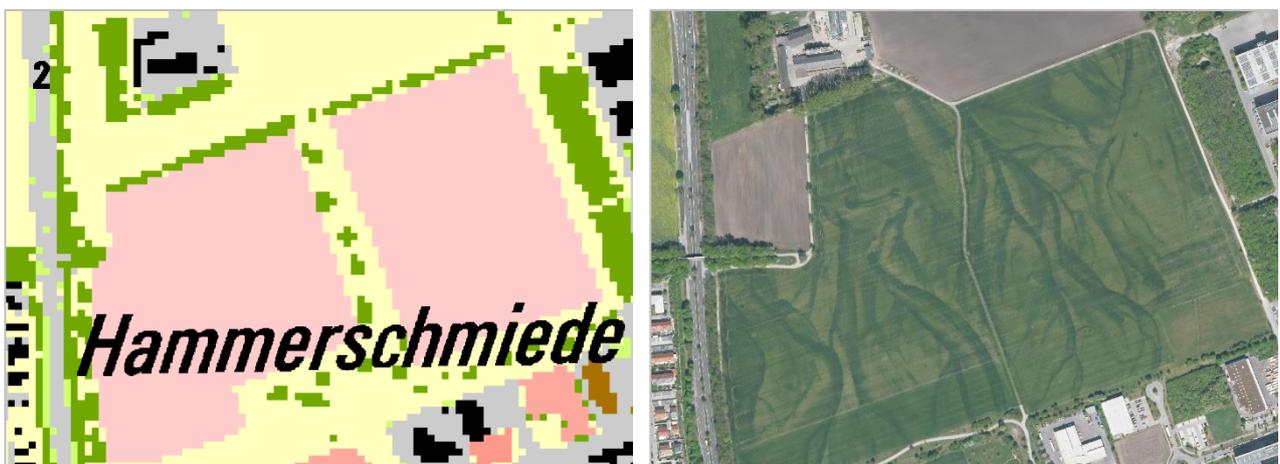


Abbildung 72: Landnutzung des Zukunftsszenarios (links) und das Luftbild von 2020 (rechts) für den Ausschnitt der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen im Norden der Hammerschmiede (Legende der Landnutzung: s. Abbildung 34).

STRAßENRAUM HOHER HANDLUNGSPRIORITÄT: NEUBURGER STRAßE

Ein Leitfadenbeispiel für einen Straßenraum liefert der Bereich der Neuburger Straße zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße. Im zugehörigen PHK-Ausschnitt weist der Verkehrsraum überwiegend Handlungspriorität 3 und 5 auf, ganz im Norden herrscht hingegen keine vorrangige Handlungspriorität (s. Abbildung 73).

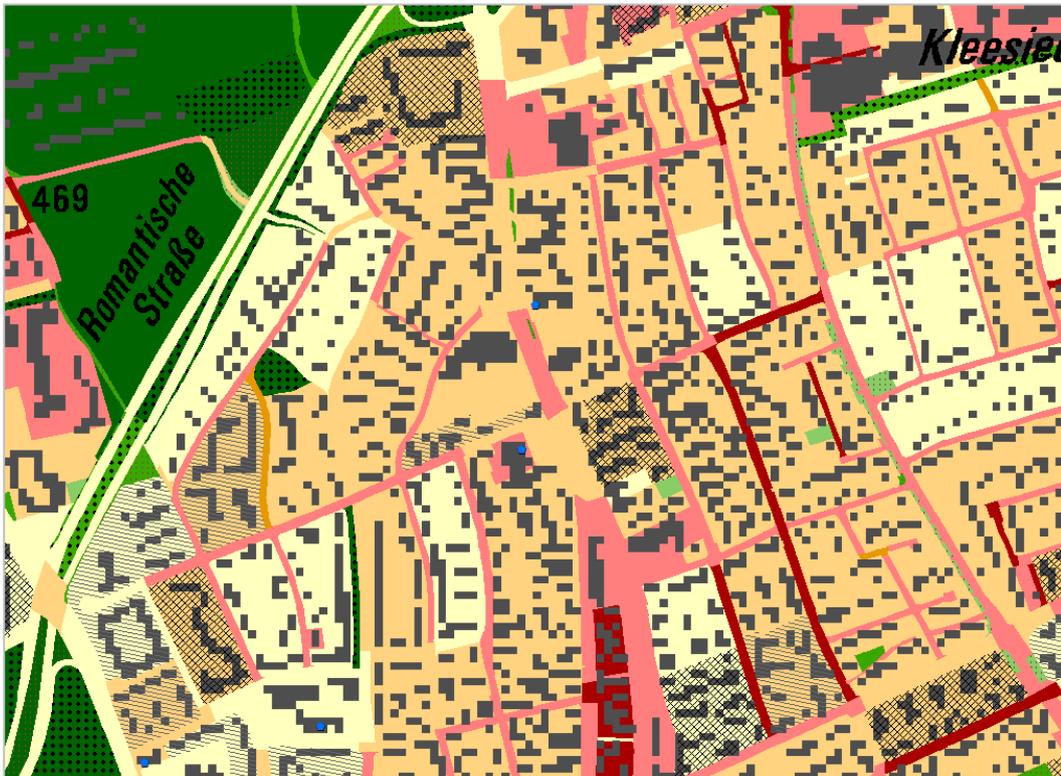


Abbildung 73: PHK-Ausschnitt der Neuburger Straße – Bereich zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße (Legende: s. Abbildung 62).

Für ein besseres Verständnis der ausgewiesenen Handlungsprioritäten und für die Entscheidungsfindung passender Maßnahmen werden im Folgenden in erster Linie die Bereiche vergleichsweise hoher (Priorität 3) und keiner Handlungspriorität gegenübergestellt. Hierfür werden im nächsten Schritt die Bewertungskarten von Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes betrachtet (s. Abbildung 74). Obwohl der Straßenraum nur am Tage eine Bewertung erfährt, können angrenzende, belastete Siedlungsräume auch nachts die Notwendigkeit lokaler hitzestressabschwächender Maßnahmen anzeigen. So weist etwa der Siedlungsraum zwischen Widderstraße und Neuburger Straße eine sehr ungünstige humanbioklimatische Situation in der Nacht auf, die teils auch am Tage wiederzufinden ist. Rund herum zeigt sich auch im Straßenraum am Tage eine ungünstige Bewertungsklassifizierung. Die Straßenabschnitte im Norden liegen dagegen zum einen nahe von sowohl am Tage (hohe Bedeutung) als auch in der Nacht (hohe bis sehr hohe Bedeutung) wichtigen Ausgleichsräumen, zum zweiten an Wirkräumen von lediglich mittlerer humanbioklimatischer Belastung, was erklärt, dass hier keine vorrangige Handlungspriorität vorliegt.

Auch die nächtliche Überwärmung nimmt im nördlichsten Teilstück des betrachteten Raums um 0,5-1 K ab (s. Abbildung 75 links). Gleiches gilt im Norden des Untersuchungsraums für die thermische Belastung am Tage, die mit ca. 23 bis 29 °C größtenteils im schwachen Bereich anzusiedeln ist (s. Abbildung 75 rechts). Mit Blick auf die Landnutzung und das Luftbild wird ersichtlich, dass in diesem Bereich vor allem die schatten spendenden Bäume für ein angenehmes Mikroklima am Tage verantwortlich sind (s. Abbildung 76). Die Nähe zu



den für Kaltluftproduktionsprozesse verantwortlichen, nördlich gelegenen Grünflächen sorgt hingegen in der Nacht für geringere Temperaturen.



Abbildung 74: Bewertungskarte Nacht, Ist-Zustand (links) und Bewertungskarte Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt der Neuburger Straße – Bereich zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße (Legenden s. Abbildung 56 bzw. Abbildung 58).



Abbildung 75: Klimaanalysekarte Nacht, Ist-Zustand (links) und PET Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt der Neuburger Straße – Bereich zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße (Legenden s. Abbildung 50 bzw. Abbildung 46).

Die in den Bewertungskarten hinterlegten Belastungen des südlichen Straßenabschnitts können ebenfalls durch die nächtliche KAK und die PET am Tage erklärt werden (s. Abbildung 75). In der Nacht ist großflächig eine Überwärmung zwischen 3,5 und 4 K gegenüber dem Mittelwert aller Grünflächen zu beobachten; am Tage ist bei PET-Werten von oftmals 39 °C, teils gar über 41 °C eine starke bis extreme physiologische Belastung festzustellen. Anders als im baumbestandenen nördlichen Teil der Neuburger Straße herrscht im Südteil vor allem eine hohe Flächenversiegelung ohne zusätzliche natürliche oder technische Verschattung vor (s. Abbildung 76). Im Straßenraum liegt wie bereits des Öfteren beschrieben die Aufenthaltsqualität am Tage und damit vor allem das Wohl des Langsamverkehrs im Fokus, durch die geschickte Wahl von Maßnahmen kann jedoch gleichzeitig auch die nächtliche Überwärmung minimiert und der Schlafkomfort in angrenzenden Quartieren erhöht werden.

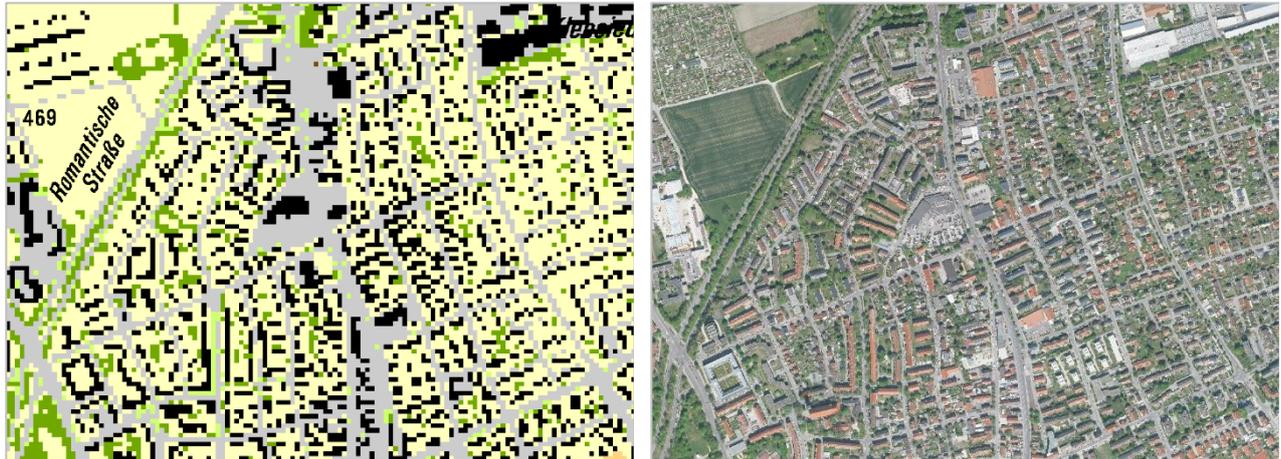


Abbildung 76: Landnutzung des Ist-Zustands (links) und zugehöriges Luftbild von 2020 (rechts) für den Ausschnitt der Neuburger Straße – Bereich zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße (Legende der Landnutzung: s. Abbildung 33).

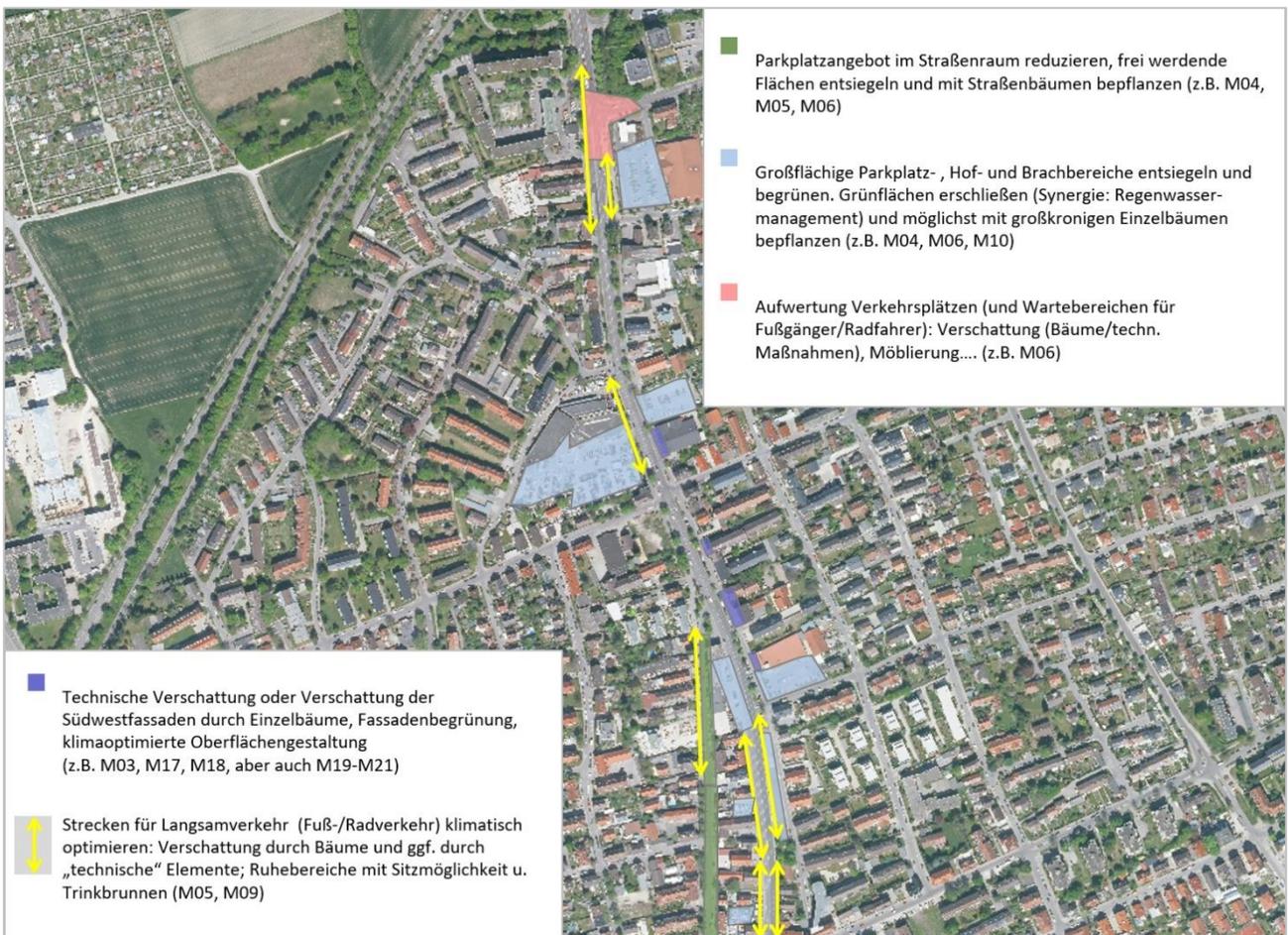


Abbildung 77: Maßnahmenvorschläge für den Untersuchungsraum der Neuburger Straße – Bereich zwischen Hans-Böckler-Straße und Klausstraße.

Abbildung 77 zeigt für den Fokusraum eine Vielzahl sinnvoller, lokal zugewiesener Maßnahmen zur Minimierung der Wärmebelastung auf, ohne Anspruch auf Vollständigkeit bei der Verortung zu erheben. Für die Tagsituation und den Schutz von Radfahrern und Fußgängern ist die alleearartige Anpflanzung von Bäumen



angeraten (M05, M06, ggf. M11), die durch die Installation von Trinkbrunnen oder „erlebbar Wasserflächen“ ergänzt werden kann (M09, M10). Die Bäume spenden nicht nur dem Langsamverkehr Schatten, sondern verschatten zusätzlich Gebäudefassaden, wodurch ein Beitrag für ein angenehmeres Innenraumklima 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, ggf. M19 und M20). 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.

AUSGLEICHSRaum HOHEN SCHUTZBEDARFS: GRÜNFLÄCHE ZWISCHEN VON-RICHTHOFEN-STR. UND VON-PARSEVAL-STR.

Mit der Grünfläche zwischen der Von-Richthofen-Straße und der Von-Parseval-Straße in Hochfeld rücken eine Grünfläche und eine Wirkraumumgebung in den Blickpunkt, die hinsichtlich der Planungshinweiskarte (ohne konkrete Planvorhaben im Untersuchungsraum) aktuell kaum Verbesserungspotenziale aufzuzeigen scheinen (s. Abbildung 78).

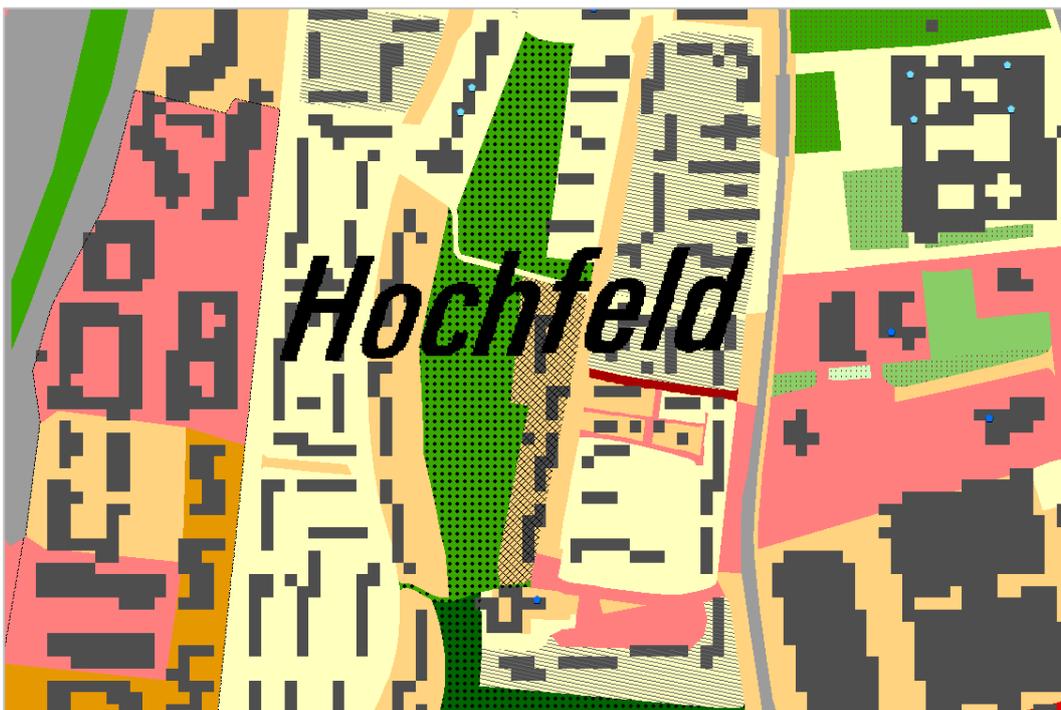


Abbildung 78: PHK-Ausschnitt für die Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Parseval-Str. (Legende: s. Abbildung 62).

Während der direkt angrenzende Siedlungsraum maximal Handlungspriorität 5 unterliegt, oftmals jedoch keine vorrangige Handlungspriorität (hellgelbe Färbung) aufzeigt, weisen die beiden großen Grünflächen zwischen den genannten Straßenzügen einen hohen Schutzbedarf auf und stellen der Umgebung folglich wichtige klimatische Funktionen bereit. Weiter südlich schließen zudem Grünflächen an, die an ein Parkwindsystem (nicht auf diesem Kartenausschnitt sichtbar) gekoppelt sind und folglich gar einen sehr hohen Schutzbe-

darf aufweisen. Die Grünflächen sind zudem als wichtige Entlastungsräume gekennzeichnet. Wie die Flächenbewertungen selbst folgt auch die Einstufung als Entlastungsraum direkt aus den Bewertungskarten. Jene von Tag- und Nacht-Situation des Ist-Zustandes sind in Abbildung 79 aufgetragen.

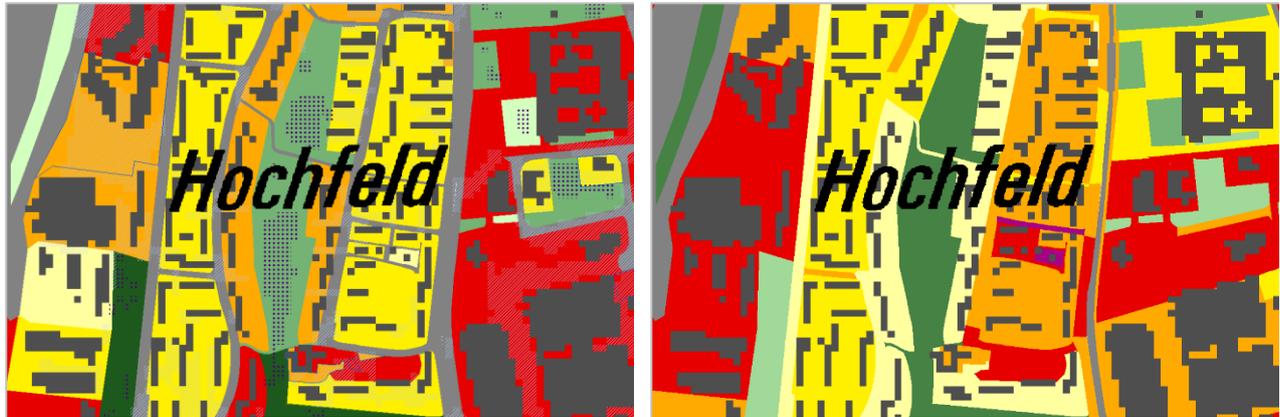


Abbildung 79: Bewertungskarte Nacht, Ist-Zustand (links) und Bewertungskarte Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt der Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Parseval-Str. (Legenden s. Abbildung 56 bzw. Abbildung 58).

Nachts sind die beiden Grünflächen zwischen der Von-Richthofen-Straße und der Von-Parseval-Straße lediglich der mittleren human-bioklimatischen Bedeutung zugeordnet. Zwar finden auf der Fläche wichtige Kaltluftentstehungsprozesse statt (s. violette Punktschraffur), das Flächenmittel der Kaltluftproduktionsrate der Gesamtfläche rechtfertigte jedoch knapp nicht die Ausweisung der Grünfläche als Grünraum mit Klimafunktion, wodurch keine Einordnung in eine (sehr) günstige Bedeutung erfolgen konnte. Darüber hinaus ist der räumlich anschließende Siedlungsraum in der Nacht mit einer mittleren bis günstigen humanbioklimatischen Situation hinterlegt. Sowohl die Ausweisung als Grünraum mit Klimafunktion als auch der Anschluss an hochgradig belasteten Siedlungsraum hätten eine höhere Einstufung der humanbioklimatischen Gunstwirkung der nächtlichen Bewertungskarte zur Folge gehabt. Wirkraum-Überwärmung und das Kaltluftprozessgeschehen auf den Grünflächen werden auf den hierarchisch untergeordneten Rasterkarten KAK (s. Abbildung 80 links) und den Einzelparameterkarten deutlich. Während die angrenzenden Siedlungswirkräume eine lediglich um bis zu 1 K gegenüber dem Grünraummittel wärmere Umgebung aufzeigen, sind die Straßenräume mit 3,5-4 K deutlich überwärmter. Neben Kaltluftproduktionsvorgängen wird deutlich, dass die Bäume am Rand der Grünflächen eine größere Beschleunigung des Kaltluftvolumenstroms hin zum Siedlungsraum verhindern (s. vergleichend Landnutzung und Luftbild in Abbildung 81), aber durch die im Kronendach gebildete Kaltluft dennoch einen Mehrwert für angrenzende Wohnflächen während der Nachtsituation bereithalten.

Die in der Nacht noch als Strömungshindernis wirkenden Bäume führen am Tage durch deren Verschattungspotenzial zu PET-Werten von teils unter 23 °C (s. Abbildung 80 rechts), was auf den betrachteten Grünflächen am Tage in der Bewertungskarte durch eine hohe Aufenthaltsqualität bescheinigt wird (s. Abbildung 79 rechts). Auch der angrenzende Siedlungsraum ist vielerorts mit Bäumen bestanden, wodurch in den meisten Fällen sehr günstige und günstige und seltener mittlere oder (sehr) ungünstige Aufenthaltsqualitäten aufgezeigt werden.

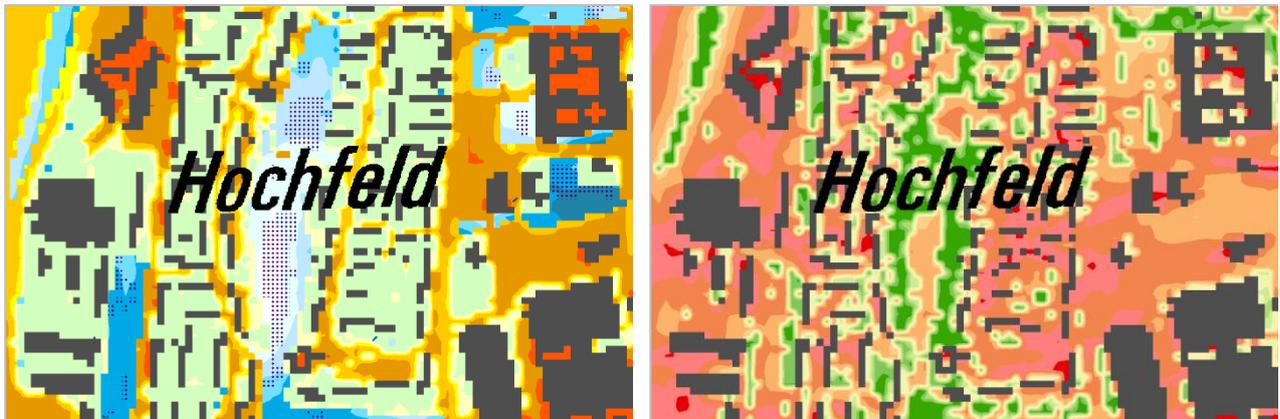


Abbildung 80: Klimaanalysekarte Nacht, Ist-Zustand (links) und PET Tag, Ist-Zustand (rechts) für den Ausschnitt der Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Parseval-Str (Legenden s. Abbildung 50 bzw. Abbildung 46).



Abbildung 81: Landnutzung des Ist-Zustands (links) und zugehöriges Luftbild von 2020 (rechts) für den Ausschnitt der Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Parseval-Str (Legende der Landnutzung: s. Abbildung 33).

Mögliche im hier betrachteten Raum des vierten Leitfadenbeispiels anzuwendende Maßnahmen sind in Abbildung 82 aufgetragen. Die Untersuchung der zentralen Grünflächen ergab, dass diese für ihre Größe in Bezug auf Tag- und Nachtsituation (Verschattung und Kaltluftentstehung) heutzutage bereits sehr gut ausgestattet sind. Bei zukünftigen Planvorhaben auf diesen Flächen ist dieser Zustand beizubehalten und zu schützen (M08). Insbesondere die Aufenthaltsqualität während der Tagsituation kann durch Möblierungsangebote im Baumschatten (M06) oder durch die Ergänzung von Trinkwasserbrunnen (M09) im Untersuchungsraum weiter gesteigert werden. Diese Maßnahmen wären insbesondere unter dem Gesichtspunkt wichtig, dass in der Planungshinweiskarte auf anliegenden Wirkraumflächen das Vorhandensein vulnerabler Bevölkerungsgruppen angezeigt wird. Sowohl die Strich- und Kreuzschraffuren als auch die Markierungen (blaue und hellblaue Fünfecke) für Schulen und Einrichtungen der Kinderbetreuung zeigen dies an (s. Kapitel 8.4.1). So ist auch eine klimaangepasste Ausgestaltung des Schulweges zu berücksichtigen, indem Kreuzungsbereiche oder Wegebeziehungen des Langsamverkehrs



(bestenfalls durch Bäume) verschattet werden. Die meisten der benachbarten Wirkräume weisen heutzutage eine geringe Handlungspriorität auf. Punktuell sind jedoch klimaökologisch weniger angepasste Wirkräume zu finden, die durch gezielte Entsiegelung lokale Beiträge zum nächtlichen urbanen Kaltluftprozessgeschehen leisten (M04), und durch zusätzliche Einzelbäume die Aufenthaltqualität am Tage steigern können. Darüber hinaus sind nach Möglichkeit (z.B. unter Berücksichtigung der Eigentumsverhältnisse) stets gebäudetechnische Maßnahmen zur Verbesserung des klimaökologischen Komforts im Innen- und Außenraum zu prüfen (M03, M14, M16-M21).

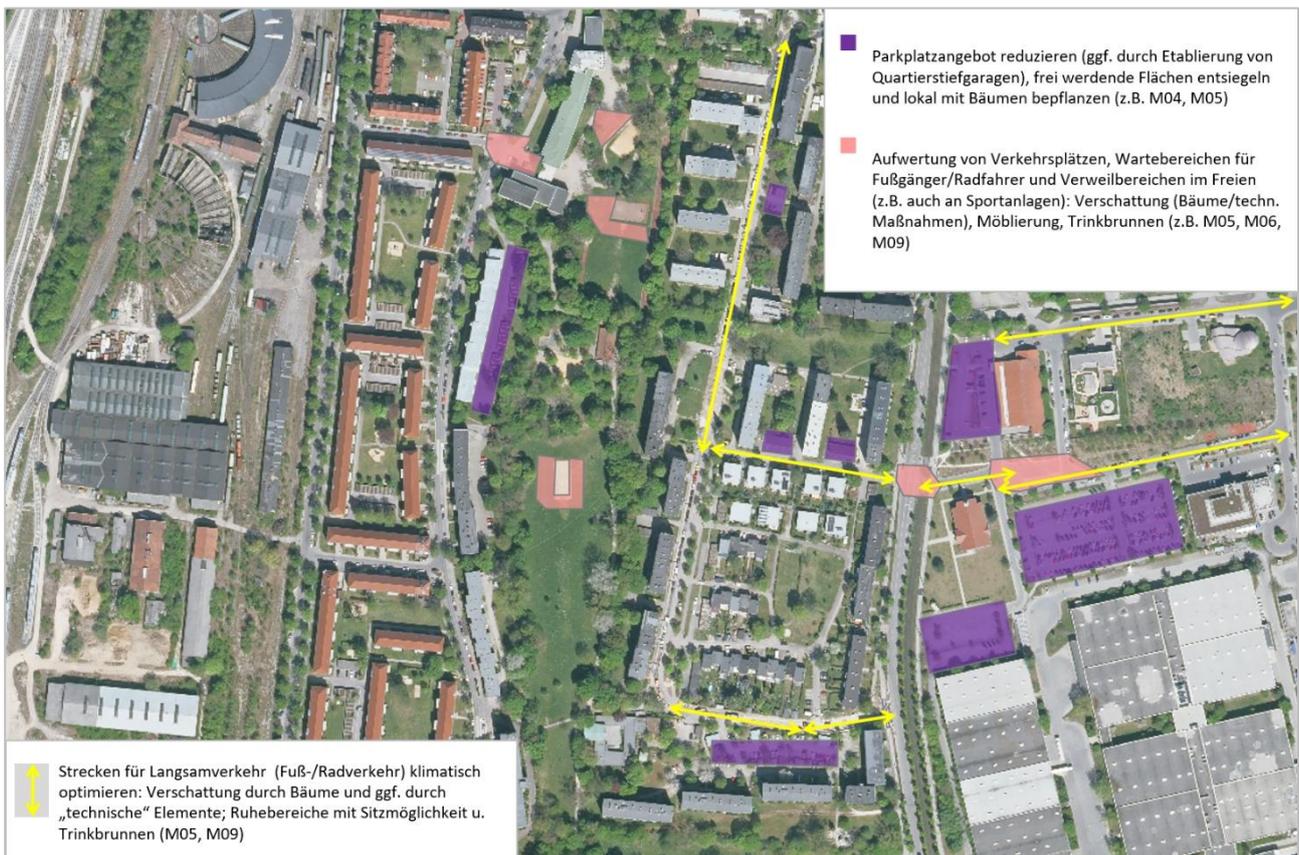


Abbildung 82: Maßnahmenvorschläge für den Untersuchungsraum der Grünfläche zwischen Von-Richthofen-Str. und Von-Parseval-Str.

8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung in Form von 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 knapp 22.000 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 60 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen für Status Quo und Zukunftsszenario (u.a. Nutzung und Strukturhöhe), Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Zugang zu Grünflächen oder Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (s. Abbildung 83 bzw. Tabelle 28 für den gesamten Metadatensatz).

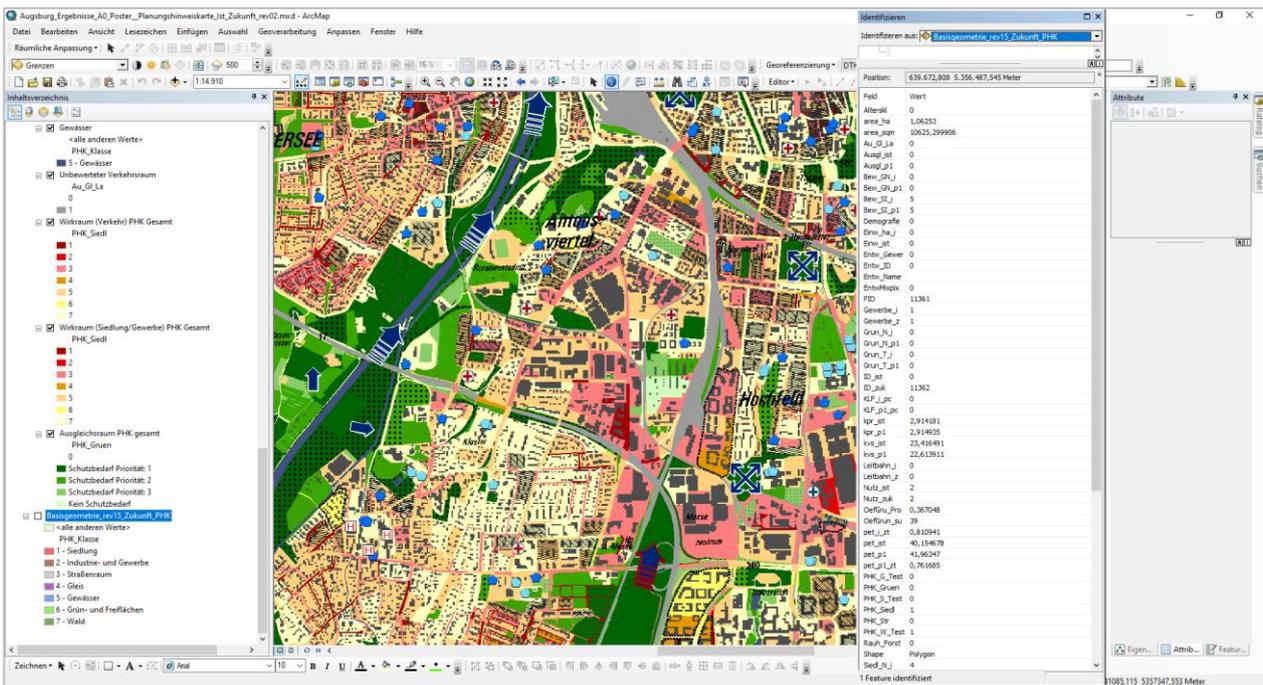


Abbildung 83: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiskarte innerhalb des Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.



Tabelle 28: Metadatenatz zum Vektordatenatz (PHK, Bewertungskarten).

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
ID_zuk	-	Interne laufende Nummer des Zukunfts-Szenarios
Nutz_ist	-	Landnutzungsklasse Ist-Zustands: 1 = Siedlung 2 = Gewerbe 3 = Straße 4 = Gleis 5 = Gewässer 6 = Frei-/Grünfläche 7 = Wald Methodik: Zonale Statistik (ZS) „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)
Nutz_zuk	-	Nutzklasse des Zukunfts-Szenarios; Klassen: s. „Nutz_ist“ Methodik: Direkt aus der Basisgeometrie der Zukunft entnommen
Gewerbe_i	-	1 – für alle Flächen mit „Nutz_ist“ = 2
Gewerbe_z	-	Wie „Gewerbe_i“ und zusätzlich alle gewerblichen Entwicklungsflächen
Wirk_N_i	-	Wirkraum Nacht ist-Zustand = 1: Wohn- und Gewerbeflächen ohne Verkehrsraum Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)
Wirk_N_z	-	Wirkraum Nacht Zukunfts-Szenarien = 1: Wohn- und Gewerbeflächen ohne Verkehrsraum Übernahme direkt aus Basisgeometrie rev15
Wirk_T_i	-	Wirkraum Tag Ist-Zustand = 1: Wohn- und Gewerbeflächen sowie Plätze (Straßen in separatem Shape) Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)
Wirk_T_z	-	Wirkraum Tag Zukunfts-Szenarien = 1: Wohn- und Gewerbeflächen (Straßen und Plätze in separater Spalte „Verkr_T_z“) Übernahme direkt aus Basisgeometrie rev15
Au_Gl_La	-	Autobahn, Gleise, große Landstraße (Ist und Zukunft identisch) Übernahme direkt aus Basisgeometrie rev15
t04_ist	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_t04_rev03.tif
wg_ist	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_WG_rev03.tif



kvs_ist	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_kvs_rev03.tif
kpr_ist	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_kpr_rev03.tif
pet_ist	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_PET_rev04.tif
t04_p1	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_t04_rev07.tif
wg_p1	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_WG_rev07.tif
kvs_p1	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtlicher Kaltluftvolumenstrom um 04:00 morgens, Zukunftsszenario Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_kvs_rev07.tif
kpr_p1	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Zukunftsszenario Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_kpr_rev07.tif
pet_p1	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Zukunftsszenario Methodik: ZS „mean“ von 2_21_057_p1_PET_rev09.tif
area_sqm	m ²	Fläche des Features in Quadratmeter
KLF_i_pc	-	Kaltluftfunktion (Ist-Zustand) = 1 Methodik: Prozentualer Anteil des Kaltlufteinwirkbereichs am Baublock (nur Wirkraum) im Ist-Zustand -> Ausweisung als Fläche mit Kaltluftfunktion, wenn dieser Anteil >=50 %
KLF_p1_pc	-	Kaltluftfunktion (Zukunft) = 1 Methodik: Prozentualer Anteil des Kaltlufteinwirkbereichs am Baublock (nur Wirkraum) im Zukunftsszenario -> Ausweisung als Fläche mit Kaltluftfunktion, wenn dieser Anteil >=50 %
Leitbahn_i	-	Leitbahn im Ist-Zustand: 1 = Primärfunktion 2 = Einzugsgebiet/Sekundärfunktion 3 = Einzugsgebiet indirekt
Leitbahn_z	-	Leitbahn im Zukunftsszenario: 1 = Primärfunktion 2 = Einzugsgebiet/Sekundärfunktion 3 = Einzugsgebiet indirekt



Zugang_i	-	<p>Zugang von Grünflächen im Ist-Zustand:</p> <p>1 = öffentliches Grün (Parks, Spielplätze, Friedhöfe, Freibäder etc. mit Klasse 6 aus „Nutz_ist“ und mindestens 20 % begehbarem Flächenanteil oder mindestens 0,5 ha und begehbarer Anteil > 10%)</p> <p>2 = Wald (Klasse 7 aus „Nutz_ist“ und mindestens 20 % begehbarem Flächenanteil oder mindestens 0,5 ha und begehbarer Anteil > 10%)</p> <p>0 = sonstiges Grün (Acker, Freiland etc.)</p>
Zugang_z	-	<p>Zugang von Grünflächen im Zukunftsszenario:</p> <p>1 = öffentliches Grün (Parks, Spielplätze, Friedhöfe, Freibäder etc. mit Klasse 6 aus „Nutz_zuk“ und mindestens 20 % begehbarem Flächenanteil oder mindestens 0,5 ha und begehbarer Anteil > 10%)</p> <p>2 = Wald (Klasse 7 aus „Nutz_zuk“ und mindestens 20 % begehbarem Flächenanteil oder mindestens 0,5 ha und begehbarer Anteil > 10%)</p> <p>0 = sonstiges Grün (Acker, Freiland, etc.)</p>
t04_i_zt	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für die Ist-Situation (Werte von Siedlung/Gewerbe; nicht enthalten: Flächen „Au_Gl_La“, Gewässer, Grün-/Freiflächen und Verkehrsräume)
t04_p1_zt	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für das Zukunftsszenario (Werte von Siedlung/Gewerbe; nicht enthalten: Flächen „Au_Gl_La“, Gewässer, Grün-/Freiflächen und Verkehrsräume)
pet_i_zt	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für die Ist-Situation (Werte von Siedlung/Gewerbe, Grün/Freiflächen und Verkehr wurden unabhängig voneinander berechnet, heißt Mittelwerte und Standardabweichungen unterscheiden sich für Siedlung/Gewerbe, Grün/Freiflächen und Verkehr; nicht enthalten: Flächen „Au_Gl_La“ und Gewässer)
pet_p1_zt	-	Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr für das Zukunftsszenario (Werte von Siedlung/Gewerbe, Grün/Freiflächen und Verkehr wurden unabhängig voneinander berechnet, heißt Mittelwerte und Standardabweichungen unterscheiden sich für Siedlung/Gewerbe, Grün/Freiflächen und Verkehr; nicht enthalten: Flächen „Au_Gl_La“ und Gewässer)
Grun_N_i	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums in der Nacht, Ist-Zustand:</p> <p>5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering</p> <p>Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)</p>
Grun_N_p1	-	Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums in der Nacht, Zukunftsszenario, Klassen s. „Grun_N_i“



Siedl_N_i	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe) in der Nacht im Ist-Zustand:</p> <p>1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig</p> <p>Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)</p>
Siedl_N_p1	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe) in der Nacht im Zukunftsszenario, Klassen s. „Siedl_N_i“</p>
Grun_T_i	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums am Tag im Ist-Zustand:</p> <p>5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering</p> <p>Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)</p>
Grun_T_p1	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums am Tag, Zukunftsszenario, Klassen s. „Grun_T_i“</p>
Siedl_T_i	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe) am Tag im Ist-Zustand (Straßenraum in eigener Spalte "Verkr_T_i"):</p> <p>1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig</p> <p>Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)</p>
Siedl_T_p1	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohn und Gewerbe) am Tag im Zukunftsszenario (Straßenraum in eigener Spalte „Verkr_T_p1“), Klassen s. „Siedl_T_i“</p>
Bew_GN_i	-	<p>Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraums am Tag und in der Nacht für die Ist-Situation, Klassen s. „Grun_N_i“</p>
Bew_GN_p1	-	<p>Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraum am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario, Klassen s. „Grun_N_i“</p>
PHK_Gruen	-	<p>Gesamthafte Bewertung des Ausgleichsraum über alle Szenarien (Ist-Zustand und Zukunftsszenario):</p> <p>1 = sehr hoher Schutzbedarf 2 = hoher Schutzbedarf 3 = erhöhter Schutzbedarf 4 = kein besonderer Schutzbedarf</p>



Bew_SI_i	-	Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht für die Ist-Situation, Klassen s. „Siedl_N_i“
Bew_SI_p1	-	Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht für das Zukunftsszenario, Klassen s. „Siedl_N_i“
PHK_Siedl	-	Gesamthafte Bewertung des Wirkraums (Siedlungsraum/Gewerbe) über alle Szenarien (Ist-Zustand und Zukunftsszenario): 1 = Handlungspriorität 1 2 = Handlungspriorität 2 3 = Handlungspriorität 3 4 = Handlungspriorität 4 5 = Handlungspriorität 5 6 = Handlungspriorität 6 7 = keine vorrangige Handlungspriorität
Ausgl_ist	-	1 = Öffentliches Grün und Wald („Zugang_i“ ≥ 1) in 300 m Luftlinie zu belasteten Siedlungsraum* („Siedl_T_i“ ≥ 4) mit mindestens hoher Bedeutung am Tag („Grun_T_i“ ≥ 4) 2 = Öffentliches Grün und Wald („Zugang_i“ ≥ 1) in 300 m Luftlinie zu belasteten Siedlungsraum* („Siedl_T_i“ ≥ 4) mit maximal mittlerer Bedeutung am Tag („Grun_T_i“ ≤ 3) (*300 m Puffer um Siedlungsraum und dann "schneiden" in lagebezogener Auswahl)
Ausgl_p1	-	1 = Öffentliches Grün und Wald („Zugang_z“ ≥ 1) in 300 m Luftlinie zu belasteten Siedlungsraum* („Siedl_T_p1“ ≥ 4) mit mindestens hoher Bedeutung am Tag („Grun_T_p1“ ≥ 4) 2 = Öffentliches Grün und Wald („Zugang_z“ ≥ 1) in 300 m Luftlinie zu belasteten Siedlungsraum* („Siedl_T_p1“ ≥ 4) mit maximal mittlerer Bedeutung am Tag („Grun_T_p1“ ≤ 3) (*300 m Puffer um Siedlungsraum und dann „schneiden“ in lagebezogener Auswahl)
area_ha	ha	Fläche des Polygons in Hektar
VR_N_i	-	1 = Verkehrsraum in der Nacht für den Ist-Zustand (alle Nutzungsflächen „Nutz_ist“ der Klasse 3 und 4) Methodik: ZS „Majority“ der Nutzung aus Basisgeometrie rev12 (=1)
VR_N_z	-	1 = Verkehrsraum in der Nacht für das Zukunftsszenario (alle Nutzungsflächen „Nutz_zuk“ der Klasse 3 und 4)
VR_T_i	-	1 = Verkehrsraum am Tag für den Ist-Zustand (alle Nutzungsflächen der Klasse 3 außer bewertungsfreies „Au_GL_La“=1) Methodik: ZS „Majority“ der Nutzung aus Basisgeometrie rev12 (=1)
VR_T_z	-	1 = Verkehrsraum am Tag für das Zukunftsszenario (alle Nutzungsflächen der Klasse 3 außer bewertungsfreies „Au_GL_La“=1)



Verkr_T_i	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Verkehr) am Tag im Ist-Zustand:</p> <p>1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig</p> <p>Methodik: ZS „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)</p>
Verkr_T_p1	-	<p>Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Verkehr) am Tag im Zukunftsszenario, Klassen s. „Verkr_T_i“</p>
Entw_ID	-	<p>ID für jede Entwicklungsfläche (mehrere Baublöcke können zur selben Entwicklungsfläche gehören)</p>
Entw_Name	-	<p>Name der Entwicklungsfläche</p>
EntwMixpix	-	<p>1 = Modellansatz "Mischpixel" für die Entwicklungsflächen</p>
Entw_Gewerb	-	<p>1 = Gewerbe-Entwicklungsfläche</p>
PHK_Str	-	<p>Gesamthafte Bewertung des Wirkraums (Verkehr) über alle Szenarien (Ist und Zukunft):</p> <p>1 = Handlungspriorität 1 2 = Handlungspriorität 2 3 = Handlungspriorität 3 4 = Handlungspriorität 4 5 = Handlungspriorität 5 6 = Handlungspriorität 6 7 = keine vorrangige Handlungspriorität</p>
StrWirk_i	-	<p>0 = Straße ist nur im Zukunftsszenario vorhanden 1 = Straße auch im Ist-Zustand vorhanden</p>



Quellenverzeichnis

AN DER HEIDEN, M.; MUTERS, 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 URBALE STURZFLUTEN UND ÜBERHITZTE STÄDTE.

BECKMANN S., HIETE M., BECK C. (2021): THRESHOLD TEMPERATURES FOR SUBJECTIVE HEAT STRESS IN URBAN APARTMENTS — ANALYSING NOCTURNAL BEDROOM TEMPERATURES DURING A HEAT WAVE IN GERMANY. CLIMATE RISK MANAGEMENT, VOLUME 32. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CRM.2021.100286](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.

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).

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.

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 INTERGOVERN-MENTAL 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 RESEARCH AND ASSESSMENT. NATURE 463, 747–756.

PETERS G.P., ANDREW R.M., BODEN T., CANADELL J.G., CIAIS P., LE QUÉRÉ C., MARLAND G., RAUPACH M.R., WILSON C. (2012): THE CHALLENGE TO KEEP GLOBAL WARMING BELOW 2 °C. NAT. CLIM. CHANGE 3, 4–6.

PIANI C., HAERTER J.O., COPPOLA E. (2010): STATISTICAL BIAS CORRECTION FOR DAILY PRECIPITATION IN REGIONAL CLIMATE MODELS OVER EUROPE. THEOR APPL CLIMATOL 99:187–192

PINTO J. G., RYERS M. (2017): WINDE UND ZYKLONEN. IN: BRASSEUR 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 – STADTPLANUNGSAMT (2020): STADTENTWICKLUNGSKONZEPT AUGSBURG. (STEK), [HTTPS://WWW.AUGSBURG.DE/BUERGERSERVICE-RATHAUS/STADTPLANUNG/STADTENTWICKLUNG/STADTENTWICKLUNGSKONZEPT/](https://www.augsburg.de/buergerservice-rathaus/stadtplanung/stadtentwicklung/stadtentwicklungskonzept/)

STADT AUGSBURG – UMWELTAMT (2022): KLIMAWANDEL-ANPASSUNGSKONZEPT FÜR DIE STADT AUGSBURG (KASA)-TEIL 2: STRATEGIEN, 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/klimaaanpassung.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. PROGNOSTISCHE MESOSKALIGE WINDFELDMODELLE - EVALUIERUNG FÜR DYNAMISCH UND THERMISCH BEDINGTE STRÖMUNGSFELDER.

VDI (2020): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.4: UMWELTMETEOROLOGIE. METHODEN ZUR BESCHREIBUNG VON STARK- UND SCHWACHWINDEN IN BEBAUTEN GEBIETEN UND DEREN BEWERTUNG.

VDI (2020A): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.8: UMWELTMETEOROLOGIE. STADTENTWICKLUNG IM KLIMAWANDEL.

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 30.03.2023

Erstellt von:



Gregor Meusel (M. Sc. Meteorologie)



Ulrike Vogelsberg (Dipl. Meteorologie)

Geprüft von:



Eva Hohlfeld (Dipl. Geographie)

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 Augsburg

METHODIK

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

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



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

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

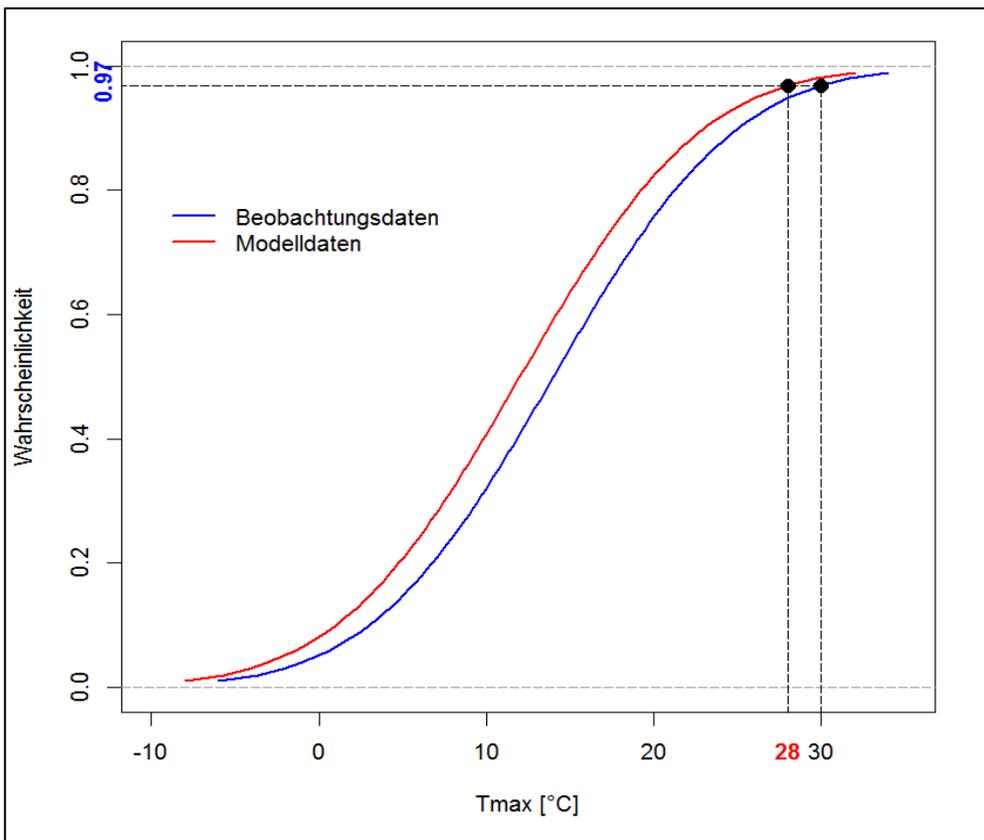


Abbildung A 1: Methode der Adjustierung von Schwellenwerten für Kenntage. Die blaue Zahl auf der y-Achse zeigt das berechnete Perzentil des Schwellenwertes und die rote Zahl auf der x-Achse zeigt den adjustierten Schwellenwert

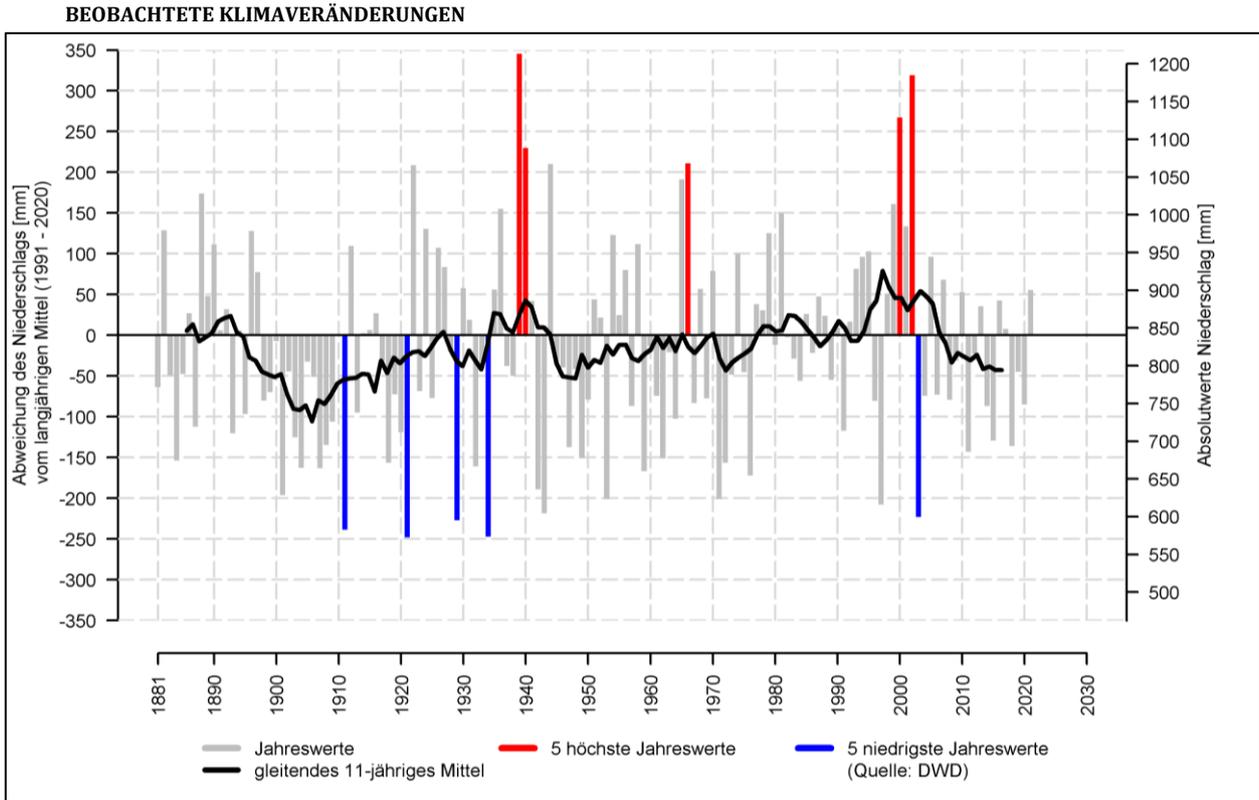


Abbildung A 2: Entwicklung des Niederschlags in Augsburg (Quelle: nach DWD 2022b)



TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

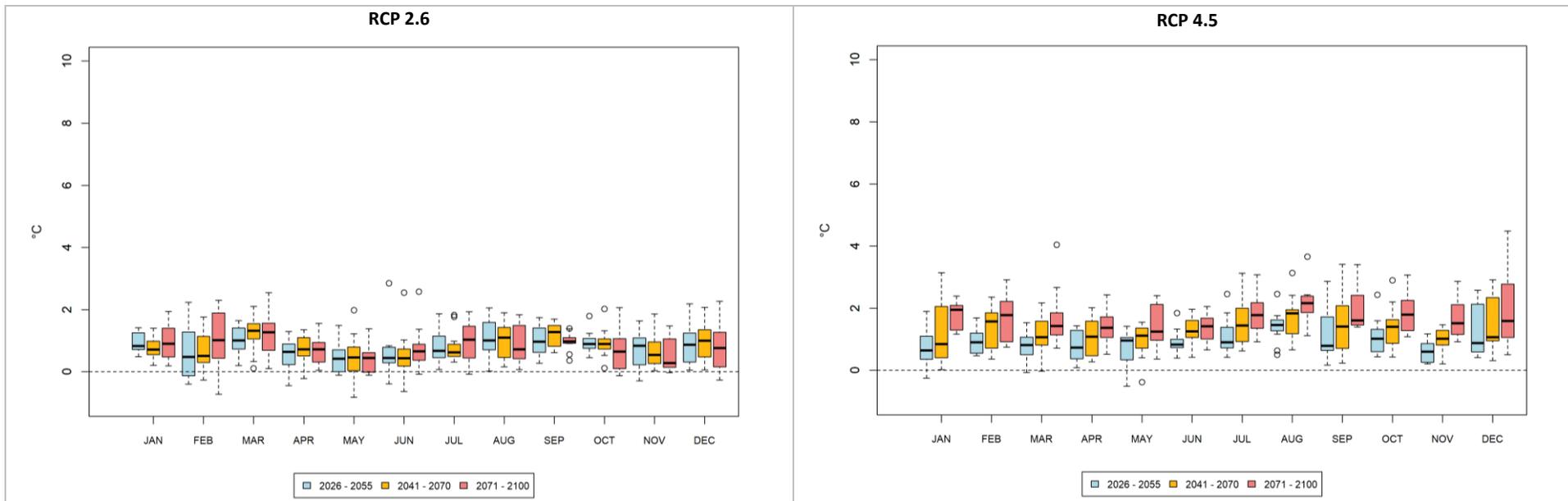


Abbildung A 3: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Augsburg für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

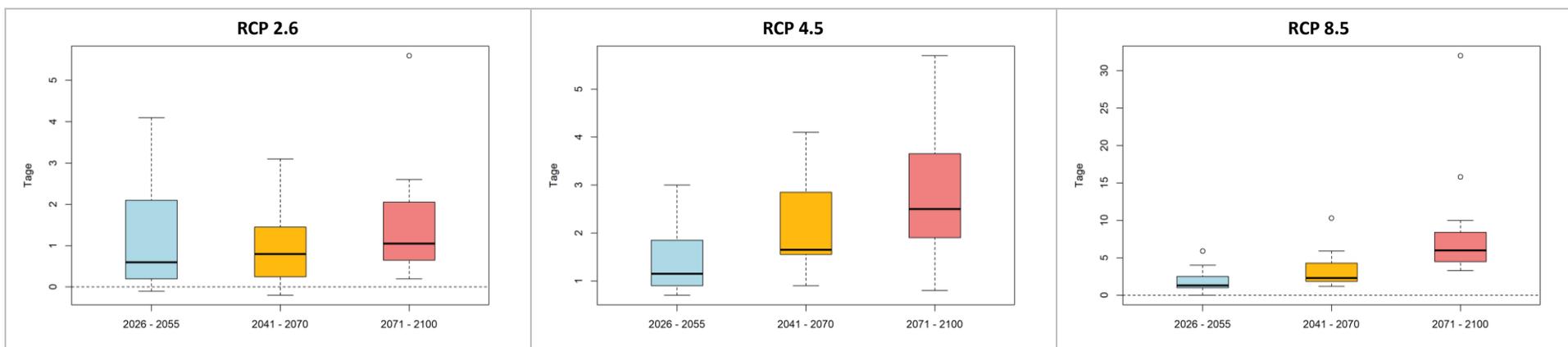


Abbildung A 4: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in Augsburg in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

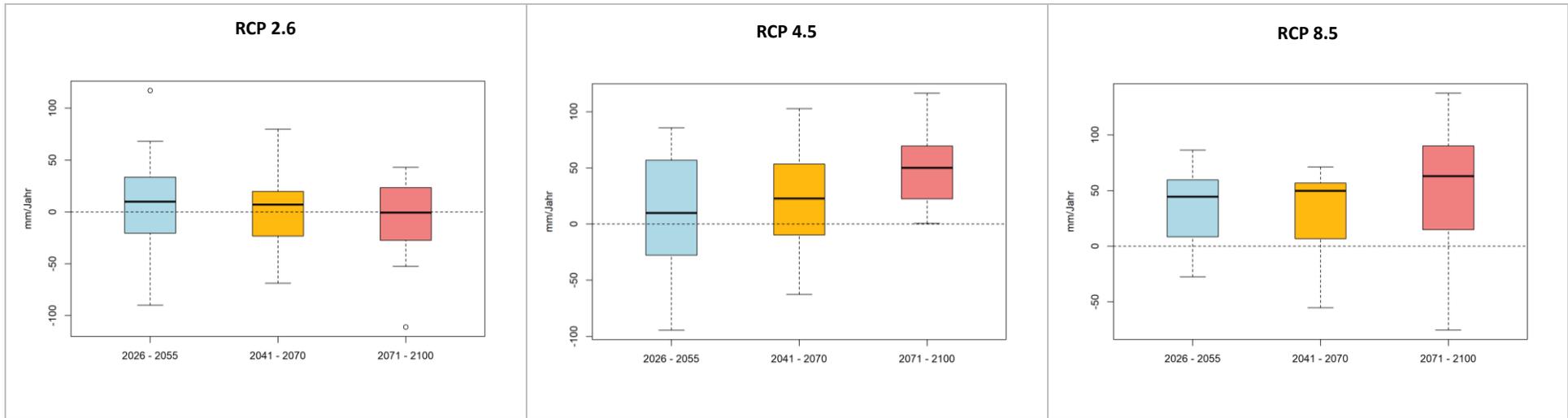


Abbildung A 5: Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in Augsburg in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

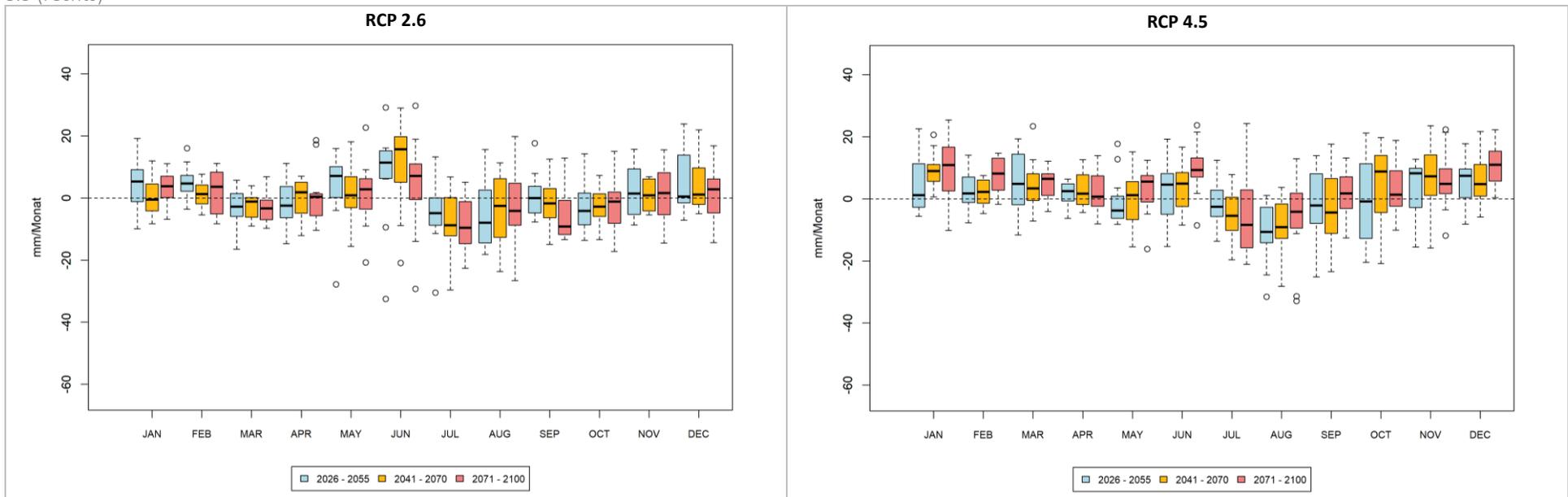


Abbildung A 6: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Augsburg für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)



TROCKENHEIT

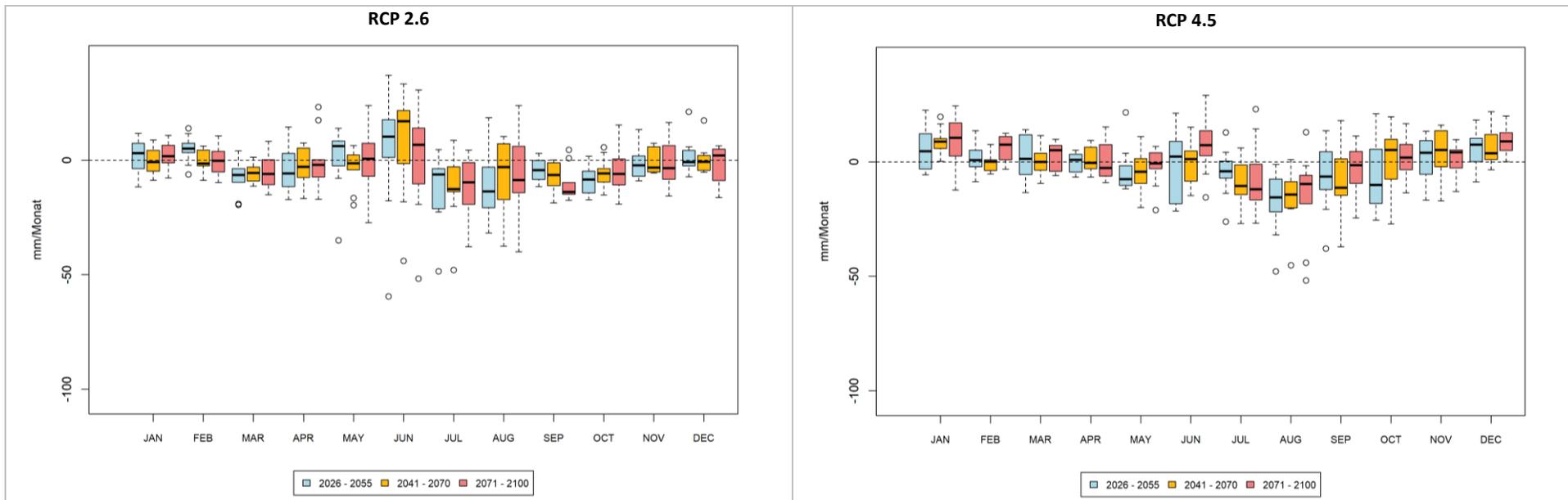


Abbildung A 7: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Augsburg für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

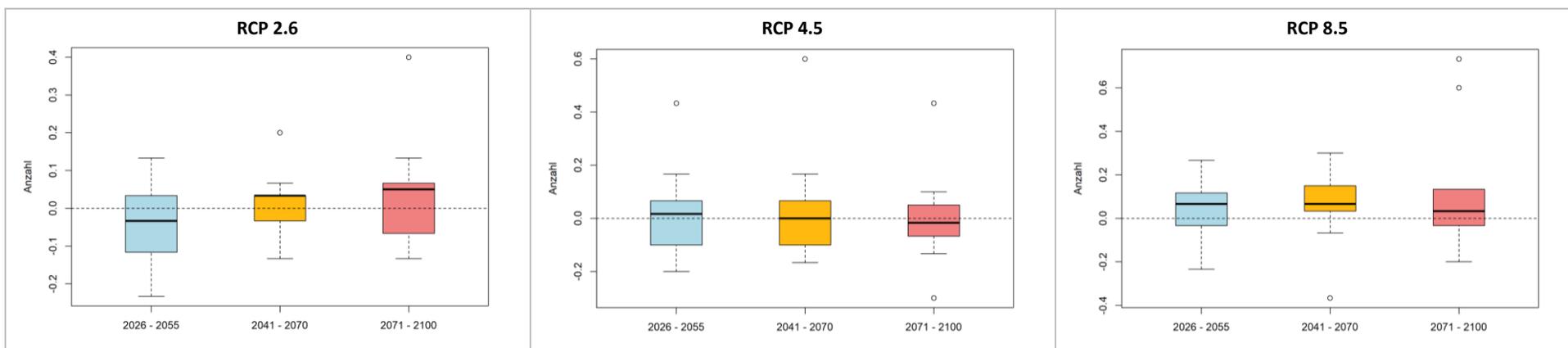


Abbildung A 8: Änderung der langjährigen mittl. Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit < 1 mm Niederschlag) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Augsburg (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG (N ≥ 10 MM/D)

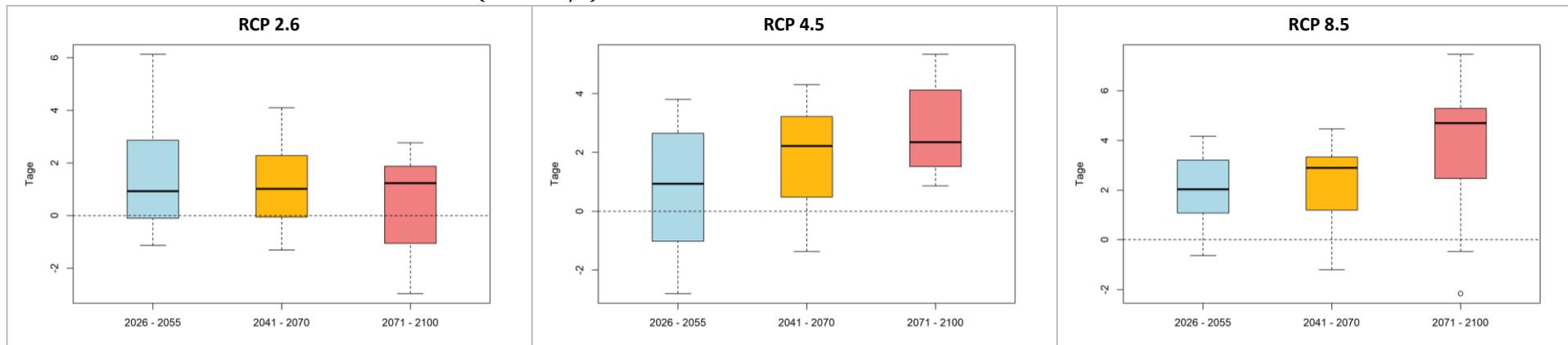


Abbildung A 9: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 10$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Augsburg (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG (N ≥ 20 MM/D)

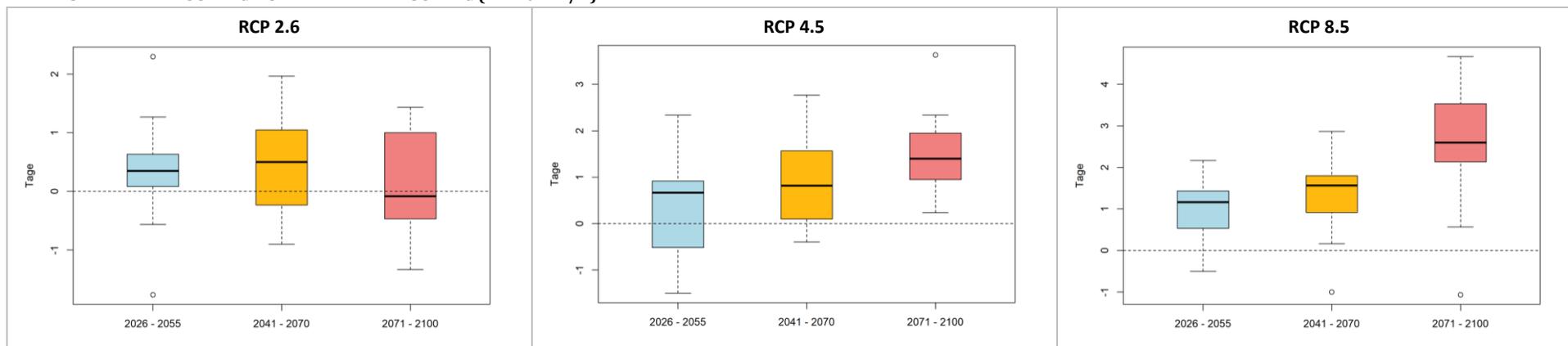


Abbildung A 10: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 20$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Augsburg (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



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

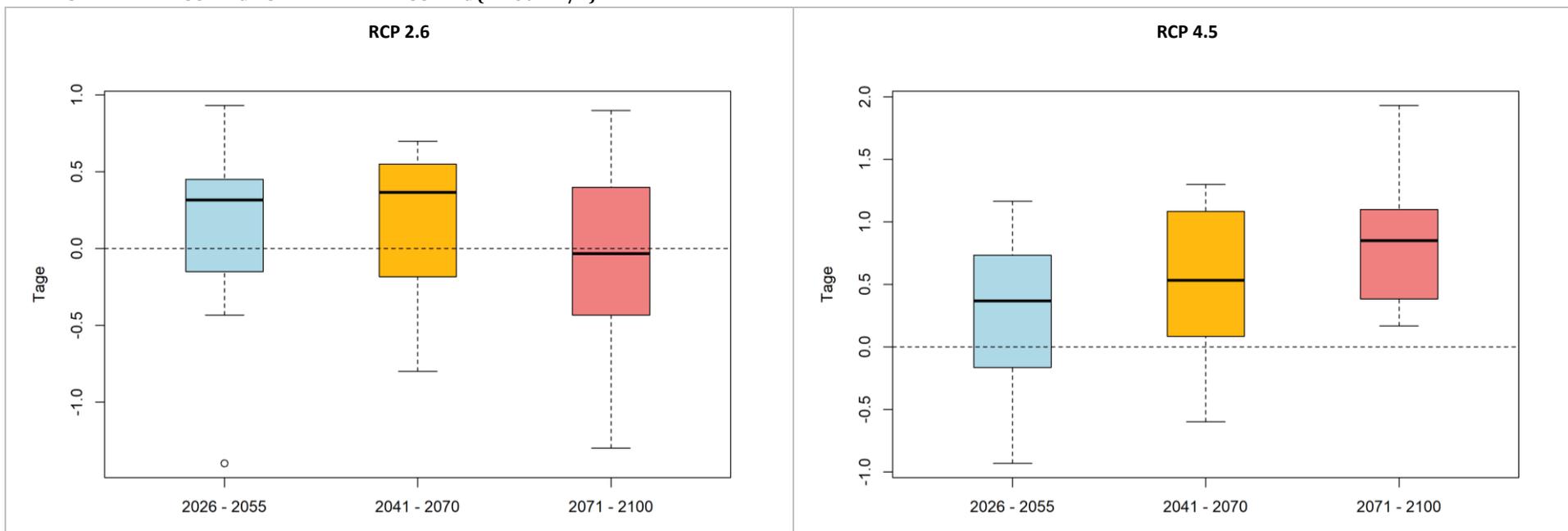


Abbildung A 11: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Augsburg (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) sowie 4.5 (rechts)

STURM

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



Anhang II: Änderung der Modellparameter im Zukunftsszenario gegenüber dem Status Quo

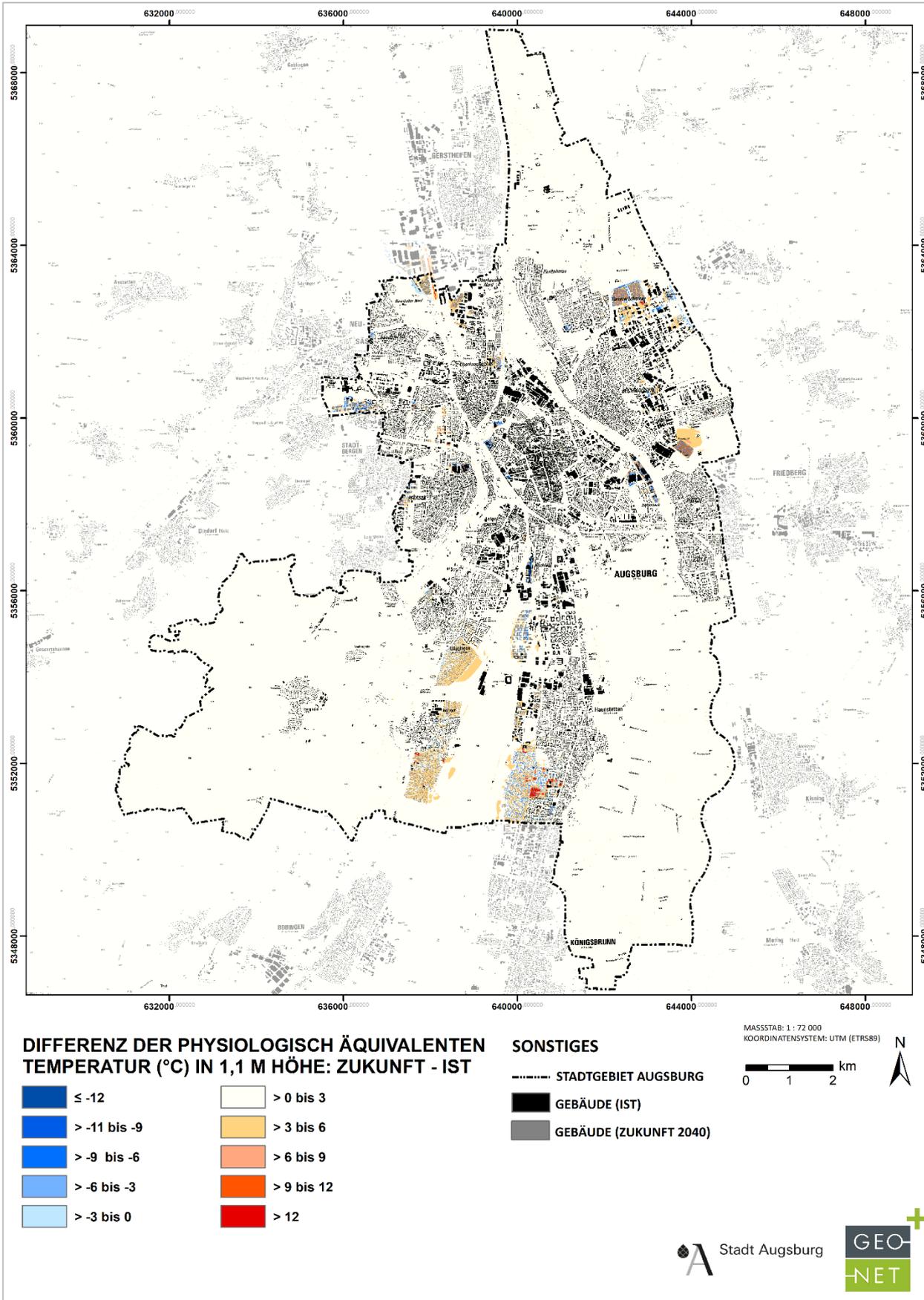


Abbildung A 12: Änderung der PET von 14 Uhr am Tage im Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario für das Augsburger Untersuchungsgebiet.

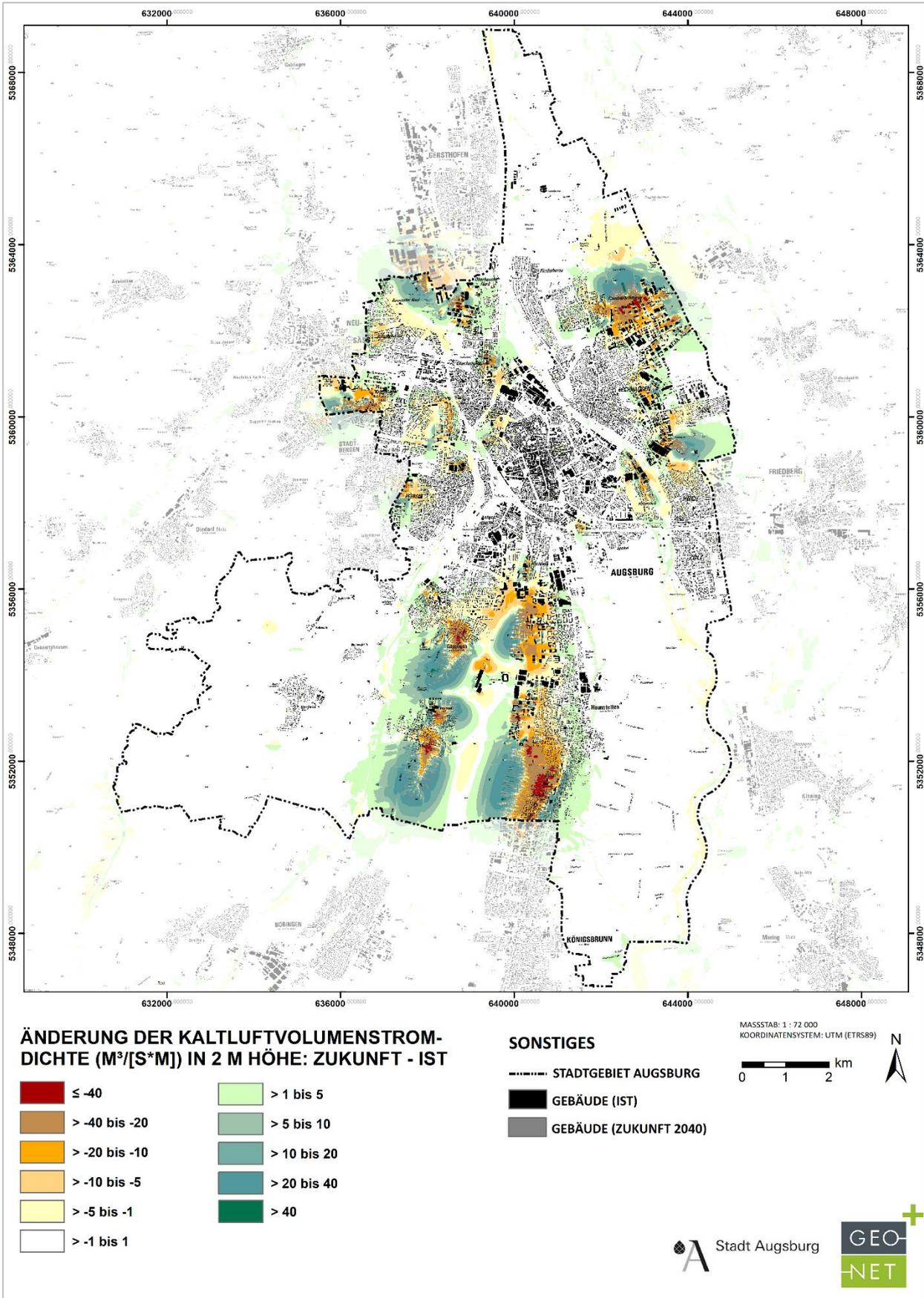


Abbildung A 13: Änderung der nächtlichen Kaltluftvolumenstromdichte im Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario für das Augsburger Untersuchungsgebiet.

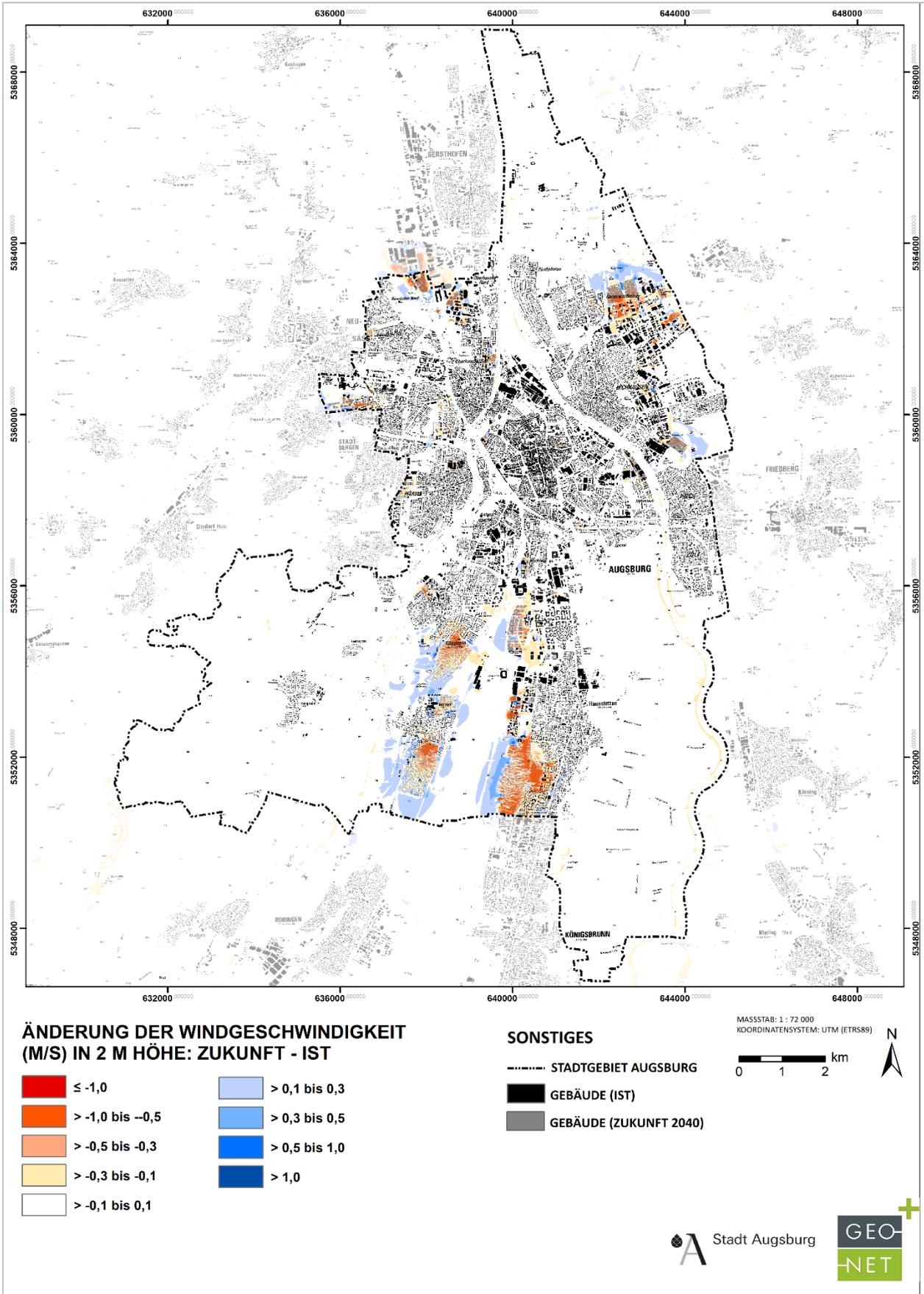


Abbildung A 14: Änderung des nächtlichen bodennahen Windfeldes im Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario für das Augsburger Untersuchungsgebiet.

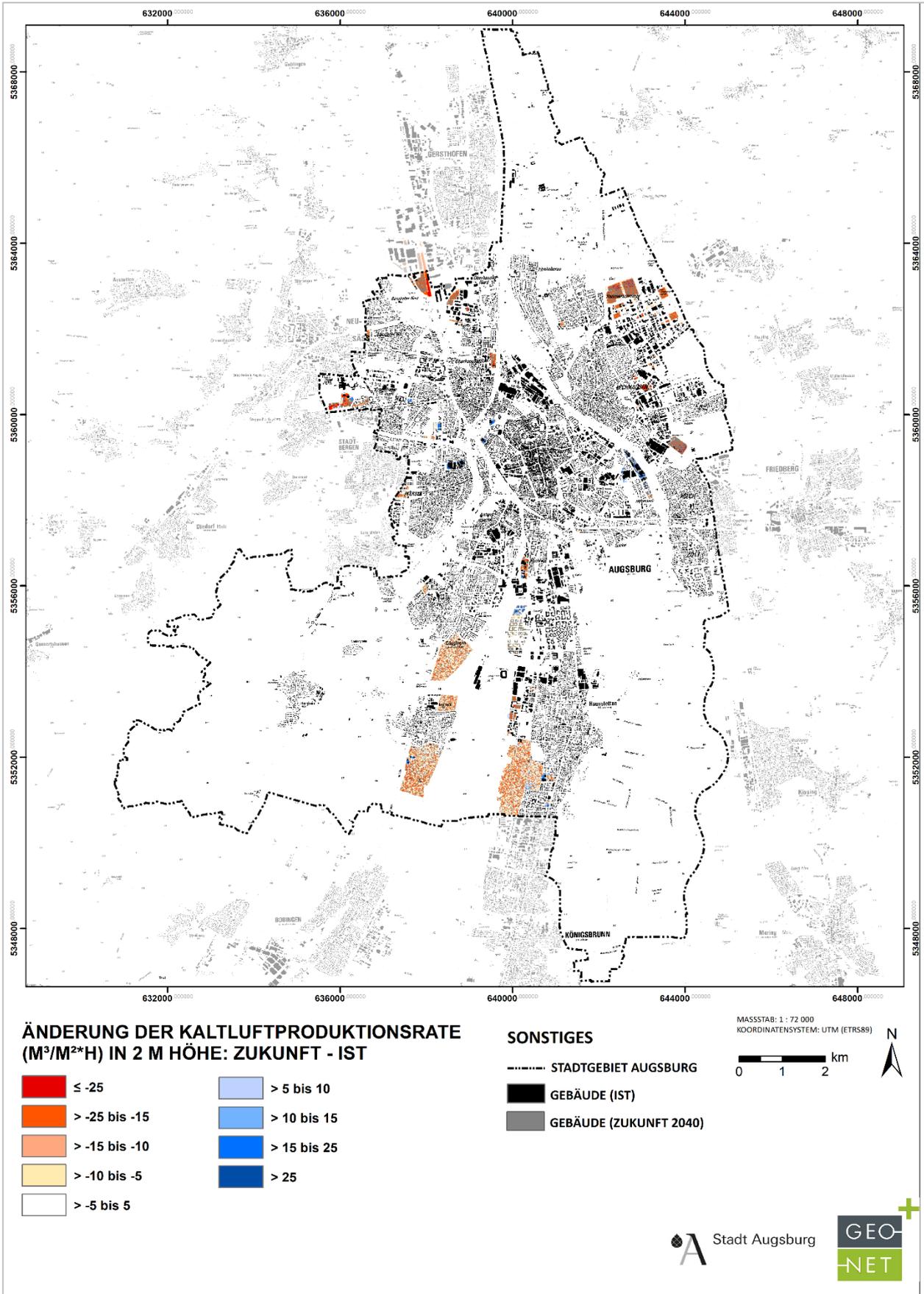


Abbildung A 15: Änderung der nächtlichen Kaltluftproduktionsrate im Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario für das Augsburger Untersuchungsgebiet.

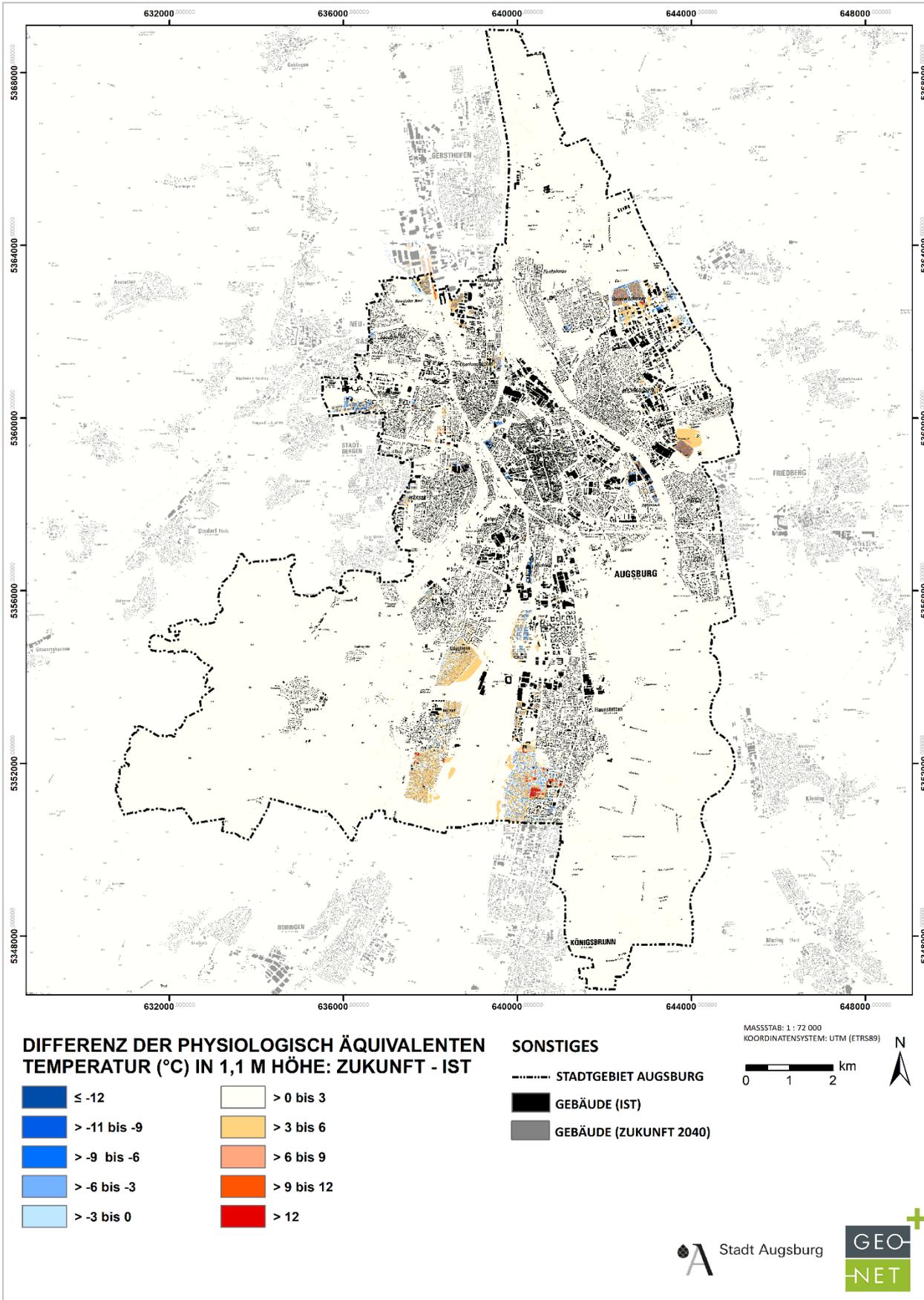


Abbildung A 16: Änderung der PET von 14 Uhr am Tage im Vergleich von Ist-Zustand und Zukunftsszenario für das Augsburger Untersuchungsgebiet.



Anhang III: Wichtige Information für die Stadt- bzw. Bauleitplanung

Der Abschlussbericht zur Stadtklimaanalyse Augsburg umfasst in vielen Kapiteln wichtige an Stadt- und Bauleitplanung zu adressierende Hinweise und Informationen. Dieser Abschnitt bildet eine Zusammenschau der nützlichsten Angaben und verweist auf die entsprechenden Seiten im Bericht.

Kaltluftströmung und Strömungshindernisse: *„Der bodennahe Zufluss [von] „Kaltluft“ [in Richtung überwärmter Quartiere] erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.“* – S. 12

Kaltluft und (bauliche) Umgebung im Klimawandel: *„Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand [, dass es keine VDI-gesteuerten Festlegungen zur Kaltluftdefinition in Bezug auf umgebenden Siedlungsraum und den Klimawandel gibt] 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.“* – S. 12

Starkregen im Klimawandel: *„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.“* – S. 28

Ableitung von Vegetationsinformation: *Arbeitsschritte (GIS-basiert) zur Identifikation von Baumstandorten aus von CIR-/RGBI-Orthofotos abgeleiteten NDVI-Werten und der Strukturhöhe* – S. 51

Versiegelungsgrad und Art der Versiegelung: *„Je nach [...] Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Augsburger Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur [...] über siedlungsfernen Freiflächen und [...] in hochversiegelten Bereichen eine Spannweite von 6,9 °C. [Dies stellt den für Augsburg quantifizierten Wärmeinseleffekt dar.]“* – S. 69

Bebauungsdichte als Hitzetreiber: *„Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig.“* – S. 69

Untergründe auf Sportplätzen: *„[...] aber auch rasenbasierte Sportplätze (z.B. Sportplätze Georg-Mayr-Weg [...]) verfügen über ähnliche Eigenschaften wie Parks und sind gleichermaßen mit Kaltluftentstehungsprozessen assoziiert.“* – S. 70

Kaltluft vs. Frischluft: *„Nachts fällt hier [in Wäldern] 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.“* – S. 70



Ausrichtung der Baukörper: „[...] da neu errichtete Gebäude oder Bäume als Strömungshindernisse fungieren und damit die Winde abbremsen bzw. umlenken.“ – S. 77

Kaltluft & Doppelte Innenentwicklung innerstädtischer Brachflächen: „Die größten mittleren Zunahmen [der Kaltluftproduktionsrate] sind auf den B-Planflächen 299 (Südlich der Tunnelstraße, westlich des Babenhauser Weges) (+ 8,8 m³/m²*h) und 449 A (Südlich der Max-Hempel-Straße) (+8,6 m³/m²*h) zu beobachten. Auf ersterem entsteht auf der heutigen Brachfläche Dayton-Ring Ecke Tunnelstraße ein durchgrüntes Wohnquartier, auf letzterem wird ein asphaltierter Parkplatz nebst Gewerbehalle durch Wohnbebauung in klimangepasstem Umfeld substituiert.“ – S. 85

Baumbestand in Parks: „Auch in Parks (z.B. Windprechtpark, Park am Roten Tor, Griesle oder der Wittelsbacher Park) oder auf Friedhöfen (z.B. Hermanfriedhof, Westfriedhof, Neuer Ostfriedhof oder Alter Friedhof) herrschen unter größeren Baumgruppen größtenteils PET-Werte von unter 23 °C vor [→ hoher Aufenthaltskomfort, geringe Wärmebelastung].“ – S. 90

Aufwertung von Entlastungsräumen: „Potenzielle Entlastungsräume können perspektivisch zumeist durch Baumpflanzungen zu vollwertigen Entlastungsräumen aufgewertet werden. Diese braungepunkteten Flächen in Nachbarschaft zu Bestandssiedlungsräumen oder Entwicklungs- bzw. Siedlungsreserveflächen sind daher gut geeignet, bisher oder zukünftig belastetem Siedlungsraum einen nahen, hochwertigen Ausgleichsraum zur Verfügung zu stellen. Dabei ist jedoch einzubeziehen, dass neue Baumpflanzungen durch ihre Hinderniswirkung in der Nacht durchaus strömungsabschwächend wirken können und daher auch Auswirkungen auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen bedingen.“ – S. 126

Verdunstung und Verschattung in Kombination: „Besonders wertvoll zeigen sich all jene Flächen, die die Schattenwirkung von Bäumen und die an Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse kombinieren.“ – S. 90

Schattenwirkung von Gebäuden (Innenstadt): „Auch der Rathausplatz und die Maximilianstraße gehören zu den stark überwärmten innerstädtischen Flächen. Letztere profitiert zum Modellausgabezeitpunkt [14 Uhr] jedoch bereits von der gen Osten sichtbaren Schattenwirkung der westlich des Straßenraums gelegenen Gebäude, die die PET hier auf teils 30 °C absenken kann.“ – S. 90

Baumbestand im Straßenraum: „So erscheinen baumbestandene Alleen wie die Schießgrabenstraße/Konrad-Adenauer-Allee, die Jakoberwallstraße/Vogelmauer oder der Straßenbereich von Remboldstraße im Süden bis Oberer Graben im Norden mit PET-Werten unter 29 °C deutlich kühler als die stark versiegelten und nur geringfügig verschatteten Siedlungsbereiche.“ – S. 90

Aufrechterhaltung des Kaltluftprozessgeschehens: „Neben der Geringhaltung von Versiegelungsgrad und der Grünausgestaltung [...], ist insbesondere bei großen Bauvorhaben am Stadtrand (oder allgemein im Bereich von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen) auf die Aufrechterhaltung des Kaltluftprozessgeschehens zu achten.“ – S. 149

