

STADTKLIMAANALYSE LANDSHUT METHODIK UND ERGEBNISSE

ANHANG IV
Klimaanpassungskonzept Stadt Landshut
„Modellvorhaben Klimagerechter Städtebau“

FEBRUAR 2023

Auftraggeberin:
Stadt Landshut



Stadt
Landshut

Erstellt von:
Geo-Net Umweltconsulting
MUST Städtebau



Auftraggeberin

Stadt Landshut

Amt für Umwelt-, Klima- und Naturschutz
Luitpoldstr. 29a
84034 Landshut



Stadt
Landshut

Fördermittelgeber

Bayerisches Staatsministerium für
Wohnen, Bau und Verkehr
Franz-Josef-Strauß-Ring 4
80539 München



Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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



Kontaktpersonen: Janko Löbig, Jan Spickenbom

MUST Städtebau

Eigelstein 103-113
50688 Köln
Tel: (0221) 16 99 29 29
www.must.eu



Kontaktpersonen: Jan Benden, Bich-Hien Nguyen

Revision 02

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Klimatische Grundlagen	6
2.1. Wärmeinselseffekt.....	6
2.2. Ausgleichsströmungen.....	6
2.3. Regionale Klimatologie im Großraum Landshut.....	8
2.3.1. Großraumklima.....	8
2.3.2. Aktuelles Klima und beobachteter Klimawandel.....	8
2.3.3. Datengrundlage für die Bewertung des Klimawandels.....	10
2.3.4. Ergebnisse zum zukünftigen Klimawandel.....	13
3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse	20
3.1. Eingesetztes Stadtklimamodell.....	20
3.2. Meteorologische Randbedingungen.....	21
3.3. Eingangsdaten der Modellierung.....	23
3.4. Modellunsicherheiten.....	29
4. Modellergebnisse	31
4.1. Nächtliches Temperaturfeld.....	31
4.2. Kaltluftströmungsfeld.....	36
4.3. Thermische Belastung am Tag.....	42
5. Klimaanalysekarte	46
6. Planungshinweiskarte	49
6.1. Standardisierung der Parameter (z-Transformation).....	49
6.2. Bewertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenflächen (Wirkungsraum).....	49
6.2.1. Bewertung der Nachtsituation.....	50
6.2.2. Bewertung der Tagsituation.....	50
6.3. Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum).....	51
6.3.1. Bewertung der Grünflächen in der Nacht.....	51
6.3.2. Bewertung der Grünflächen am Tag.....	52
6.4. Ergebnisse der Bewertungskarten.....	52
6.4.1. Bewertungskarten Nacht.....	52
6.4.2. Bewertungskarten Tag.....	56
6.5. Gemeinsame Planungshinweiskarte.....	59
7. Zusammenfassung	64
Literaturverzeichnis	67

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind	6
Abb. 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel.....	7
Abb. 3: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Landshut im Zeitraum von 1881 bis 2020 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2021).....	9
Abb. 4: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Landshut (nach DWD 2021c).....	9
Abb. 5: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Landshut für den Zeitraum 1955 - 2020 basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Mühldorf (DWD 2021).....	10
Abb. 6: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013).....	12
Abb. 7: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.....	13
Abb. 8: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Landshut (alle RCP-Szenarien).....	14
Abb. 9: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Landshut (RCP 8.5).....	15
Abb. 10: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) (RCP 8.5).....	16
Abb. 11: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Landshut (RCP 8.5).....	17
Abb. 12: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Landshut (RCP 8.5).....	18
Abb. 13: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20 \text{ mm/d}$) in Landshut (alle Szenarien).....	18
Abb. 14: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30 \text{ mm/d}$ innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Landshut (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr; RCP 8.5).....	19
Abb. 15: Anzahl der Tage mit autochthoner Wetterlage.....	21
Abb. 16: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (Eigene Darstellung nach Groß 1992).....	22
Abb. 17: Digitales Geländemodell (DGM) - Modelleingangsdaten.....	24
Abb. 18: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformationen.....	25
Abb. 19: Exemplarische Referenzflächen für gewerbliche und wohnbauliche Nutzung und abgeleitete Mischpixelflächen als Eingangsdaten für das Zukunftsszenario der Modellrechnung.....	26
Abb. 20: Landnutzungsklassifizierung für das Stadtgebiet von Landshut – Status Quo.....	27
Abb. 21: Landnutzungsklassifizierung für das Stadtgebiet von Landshut – Zukunftsszenario.....	28
Abb. 22: Nächtliche bodennahe Lufttemperatur.....	32
Abb. 23: Nächtliche bodennahe Lufttemperatur – Zukunftsszenario.....	33
Abb. 24: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate.....	34
Abb. 25: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate – Zukunftsszenario.....	35
Abb. 26: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.....	36
Abb. 27: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom.....	37
Abb. 28: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Zukunftsszenario.....	38
Abb. 29: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld.....	40
Abb. 30: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld – Zukunftsszenario.....	41
Abb. 31: Wärmebelastung am Tag (PET).....	44
Abb. 32: Wärmebelastung am Tag (PET) – Zukunftsszenario.....	45
Abb. 33: Klimaanalysekarte der Stadt Landshut.....	47

Abb. 34: Klimaanalysekarte der Stadt Landshut – Zukunftsszenario.....	48
Abb. 35: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern.....	49
Abb. 36: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.....	51
Abb. 37: Bewertungskarte Nacht Stadt Landshut.....	54
Abb. 38: Bewertungskarte Nacht Stadt Landshut – Zukunftsszenario.....	55
Abb. 39: Bewertungskarte Tag Stadt Landshut.....	57
Abb. 40: Bewertungskarte Tag Stadt Landshut – Zukunftsszenario.....	58
Abb. 41: Gemeinsame Planungshinweiskarte Stadt Landshut - Tag und Nacht, Status Quo und Zukunftsszenario.....	62
Abb. 42: Gemeinsame Planungshinweiskarte Stadt Landshut - Tag und Nacht, Status Quo und Zukunftsszenario - Kartenlegende.....	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kenntagen in Landshut in der Vergangenheit (nach DWD 2020c bzw. für die Tropennächte DWD-Daten Bayern (DWD 2021a)).....	9
Tab. 2: Langjährige Änderung der Temperatur in Landshut ($P_{15} / 85 = 15. / 85.$ Perzentil, $P_{50} = \text{Median}$).....	15
Tab. 3: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Landshut ($P_{15} / 85 = 15. / 85.$ Perzentil, $P_{50} = \text{Median}$).....	16
Tab. 4: Langjährige Änderung der mittleren Niederschlagssumme in Landshut ($P_{15} / 85 = 15. / 85.$ Perzentil, $P_{50} = \text{Median}$).....	17
Tab. 5: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Landshut ($P_{15} / 85 = 15. / 85.$ Perzentil, $P_{50} = \text{Median}$).....	19
Tab. 6: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).....	42
Tab. 7: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung in Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation.....	50
Tab. 8: Einordnung der Wärmebelastung am Tag im Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation.....	50
Tab. 9: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Tagsituation.....	52
Tab. 10: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsfläche Bewertungskarten Nacht.....	53
Tab. 11: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Freiflächen Bewertungskarten Nacht.....	53
Tab. 12: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsraum Bewertungskarte Tag.....	56
Tab. 13: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Verkehrsflächen Bewertungskarte Tag.....	56
Tab. 14: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Grün- und Freiflächen Bewertungskarte Tag.....	56
Tab. 15: Flächenanteile Handlungsprioritäten im Wirkraum (Siedlungsflächen, öffentlicher Raum) und abgeleitete Planungshinweise in der gemeinsamen Planungshinweiskarte.....	59
Tab. 16: Stadtklimatischer Schutzbedarf im Ausgleichsraum (Grünflächen, Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen, Wälder) und abgeleitete Planungshinweise gemeinsame Planungshinweiskarte.....	60

1. Einleitung

Das Klima einer Stadt ist geprägt durch seine relative Überwärmung gegenüber dem ruralen Umland; durch Versiegelung und Bebauung erhitzen sich Flächen übermäßig stark und Kaltluftflüsse werden verändert mit Konsequenzen für die Gesundheit durch erhöhte Wärmebelastung. Innerhalb des Klimaanpassungskonzepts der Stadt Landshut nimmt die Hitzevorsorge daher eine bedeutende Rolle ein. In den stark verdichteten Räumen wie dem historischen Stadtkern werden bereits heute eine hohe Wärmebelastung wahrgenommen und auch in Zukunft steigende Temperaturen sowie häufigere Hitzeereignisse erwartet. Um Strategien bzw. Maßnahmen zur Minderung der Belastung und Anpassung an die erwarteten Klimaveränderungen zu entwickeln, bedarf es raumscharfer Informationen zur bioklimatischen Situation in Landshut. Zielsetzung der Stadtklimaanalyse ist die Erarbeitung und Bereitstellung von flächenhaften Daten und Informationen zur Beschreibung der klimatischen Situation an Tagen und Nächten mit besonders starker Wärmebelastung unter Berücksichtigung des aktuellen, sowie des zukünftigen Klimas.

Zum Landshuter Stadtklima konnten bislang Aussagen aus dem Gutachten zu Meteorologischen Messungen im Stadtgebiet Landshut (DWD, 1996) und der Klimaanalyse Bayern (LfU, 2021) abgeleitet werden. Für städtebauliche Planungsprozesse oder die gezielte Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist jedoch eine genaue und räumliche Kenntnis beispielsweise von überwärmten Siedlungsbereichen oder klimatisch bedeutsamen Grünflächen, sowie den nächtlichen Kaltluftprozessen nötig. Zur Aktualisierung und Fortschreibung der Erkenntnisse des Gutachtens von 1996 des DWD wurde daher für das gesamte Landshuter Stadtgebiet eine hochaufgelöste Rechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, die flächendeckende Aussagen zum klimatischen Geschehen ermöglicht. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Landshuter Stadtklimas. Ebenfalls wurde ein Zukunftsszenario mit dem Bezugsjahr 2050 erstellt, welches die möglichen Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels auf die Klimabedingungen in der Nacht- und der Tagsituation darstellt.

Der vorliegende Bericht erläutert zunächst die fachlichen Grundlagen (Kap. 2) sowie Methodik der Stadtklimaanalyse (Kap. 3) und geht anschließend auf die Ergebnisse der Modellrechnung ein (Kap. 4). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenfassung der Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „Klimaanalysekarte“ beleuchten (Kap. 5). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, Bewertungen der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen sowie der Bedeutung von Grün- und Freiflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarten; Kap. 6). Alle Ergebnisse werden dabei jeweils für die aktuelle Situation (Status Quo), sowie für ein Zukunftsszenario unter Einbeziehung eines „starken Klimawandels“ mit dem Bezugsjahr 2050 abgebildet. Die Basis bildet hierbei das Klimawandelszenario RCP 8.5 für den Bezugszeitraum 2041 bis 2070, welches im Vergleich zum Zeitraum von 1991 bis 2020 einer Zunahme der mittleren Sommertemperaturen um 1,9 °C entspricht (EURO-CORDEX). Das Szenario „starker Klimawandel“ gilt in Anbetracht der bisherigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen als am wahrscheinlichsten, während es auch im Sinne des Vorsorgeprinzips sinnvoll ist mit starken Auswirkungen des Klimawandels für die Bevölkerung zu rechnen.

Die Ergebnisse dieses Berichts bilden die Grundlage für die weiteren Analysen und die Entwicklung von Maßnahmen, die in dem Bericht „Klimaanpassungskonzept Stadt Landshut“ im Detail erläutert und dokumentiert sind. Das Projekt steht im Kontext des Modellvorhabens „Klimagerechter Städtebau“ des Bayerischen Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, welches die Stadt Landshut als eine von acht bayerischen Projektkommunen ausgewählt hat.

Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen

Das Schutzgut „Klima“ ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen ableiten, die der Erhaltung günstiger bioklimatischer Verhältnisse dienen bzw. auf eine Verbesserung des Stadtklimas in ungünstig bewerteten Teilräumen abzielen. Um diesen Leitgedanken langfristig verfolgen zu können, ist zudem erforderlich, die Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen.

Mit dem Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs BauGB) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach §1 (5) BauGB erklärt worden: „Die Bauleitpläne sollen [...] dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den **Klimaschutz und die Klimaanpassung**, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern [...].“ Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: „Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem **Klimawandel** entgegenwirken, als auch durch solche, die der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, Rechnung getragen werden.“

In Flächennutzungsplänen (FNP; vorbereitende Bauleitplanung) können z.B. Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen dargestellt werden, die der Anpassung an den Klimawandel dienen (§ 5 (2) S. 2c BauGB). So bietet sich durch den FNP beispielsweise die Möglichkeit der Sicherung von Freiflächen, die der Kaltluftproduktion dienen, sowie von Frischluft- und Ventilationsbahnen (Belüftungsachsen; vgl. Stadt Karlsruhe 2014). Im FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten zumeist 25 m bis 100 m), während in **Bebauungsplänen** (B-Plan; verbindlichen Bauleitplanung) das Mikroklima in den Vordergrund rückt (ca. 2 m bis 10 m; VDI 2015). Nach § 8 (2) BauGB sind B-Pläne aus dem FNP zu entwickeln, sodass die dort getroffenen Regelungen berücksichtigt werden müssen. B-Pläne bieten u.a. über folgende Festsetzungen die Möglichkeit stadtklimatischen Anforderungen zu begegnen (vgl. § 9 (1) BauGB):

- ↳ Gebäudekörperstellung und Maß der baulichen Nutzung (u.a. Grundflächenzahl, Geschossflächenzahl, Zahl der Vollgeschosse, Höhe der baulichen Anlage), jeweils auch mit dem Ziel klimarelevante Luftströmungen zu unterstützen und Belüftungsachsen zu sichern
- ↳ Öffentliche und private Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten, Sportplätze, Friedhöfe etc.)
- ↳ Begrünung von Straßenzügen, Parkplätzen und Gleistrassen

- ↳ Anpflanzen bzw. Erhalt von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen
- ↳ Dach- und Fassadenbegrünung

Ein weiteres Steuerungsinstrument ist die Erstellung von **Grünordnungsplänen** (GOP). Eine rechtliche Verpflichtung zur Aufstellung von GOP gibt es nicht, doch können ihre Inhalte durch die Integration in B-Pläne Rechtsverbindlichkeit erlangen. GOP ergeben sich aus dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), in dem auf die klimatische Wirkung der Landschaft verwiesen wird: „Zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts sind insbesondere Luft und Klima auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen [...]“ (§ 1 (3) Nr. 4 BNatSchG).

Nach § 11 (1) BauGB können Gemeinden, insbesondere zur Vorbereitung und Durchführung städtebaulicher Maßnahmen durch einen Vertragspartner, **städtebauliche Verträge** schließen. Diese können ein geeignetes Mittel zur Umsetzung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen in der Bauleitplanung sein, sofern sie frühzeitig in dem öffentlich-rechtlichen Vertrag vereinbart werden. Im Zuge der **Stadtsanierung** sind auch **informelle Planungsinstrumente**, wie ein **städtebaulicher Rahmenplan**, denkbar (§ 140 BauGB), um städtebauliche Vorgaben und Ziele zum Klima zu definieren.

Mit der Novellierung des *Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung* (UVPG) finden die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung verstärkt Eingang in die **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) als übergeordnetes umweltpolitisches Instrument.

2. Klimatische Grundlagen

2.1. Wärmeinseleffekt

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). 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 der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss).

Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo (Rückstrahlvermögen), sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der stärkeren Versiegelung bzw. des geringeren Grünanteils (und zudem meist der geringen Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Stadt herabgesetzt (Schönwiese 2008). Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer in urbanen Räumen zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Dieses Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als städtische Wärmeinsel bezeichnet. In Städten können viele Menschen von solch einer Überwärmung betroffen sein, sodass sich die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas ergibt, um auf die Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse hinwirken zu können.

2.2. Ausgleichsströmungen

Sommerliche Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (autochthone Wetterlagen), führen oftmals zu einer starken Hitzebelastung. Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen auf, d. h. Luftmassen aus dem Umland können bis in das Stadtgebiet hineinströmen (Flurwinde; Abb.1).

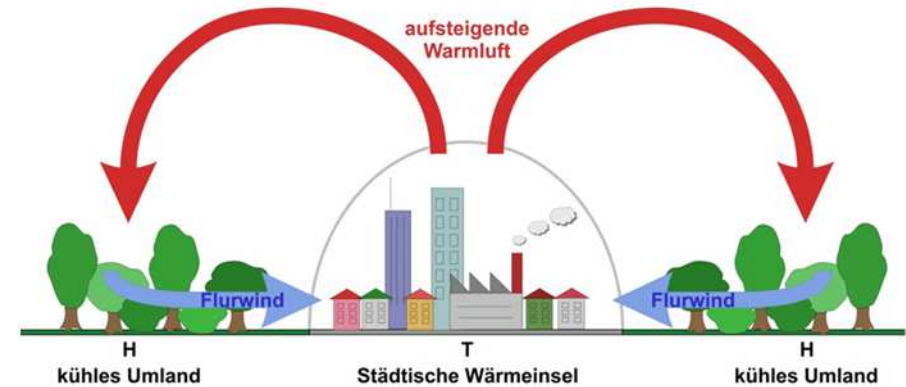


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung, da im Umland meist ein vergleichbares Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und somit die Luftschadstoffe verdünnen. Nachts hingegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für thermische Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und ist daher sensibel gegenüber Strömungshindernissen. Dies bedeutet, dass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann – insbesondere über sogenannte Kaltluftleitbahnen.

Infolge des Wärmeinseleffektes in der Nacht entstehende Flurwinde bilden die Realität nur zum Teil ab (Abb. 2). Bei großen Höhenunterschieden treten zusätzlich Berg- und Talwinde auf, kleinere Höhenunterschiede bewirken bereits Hangauf- bzw. Hangabwinde. Unter austauscharmen Bedingungen treten demnach sowohl thermische als auch reliefbedingte Strömungen gleichzeitig auf, die sich in Bezug auf Windgeschwindigkeit und Kaltluftvolumenstrom voneinander unterscheiden. Die thermisch hervorgerufenen Winde (Flurwinde) sind in der Regel schwächer als die Hang- und Bergwinde. Für Städte in hügeligen Gebieten, wie Landshut, bedeutet dies, dass die Flurwinde durch gleichzeitig auftretende Hangabwinden verstärkt oder auch überlagert werden können.

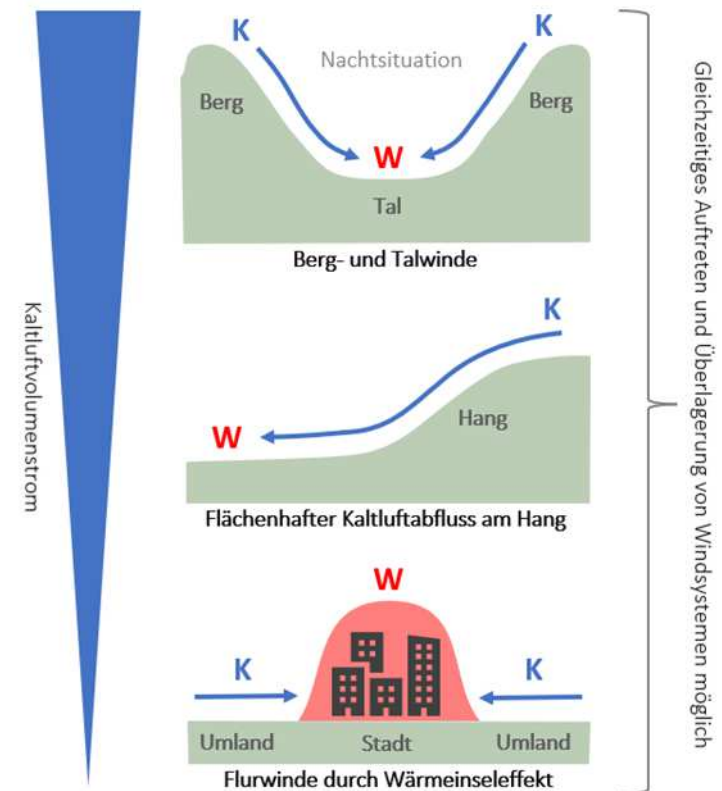


Abb. 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel

2.3. Regionale Klimatologie im Großraum Landshut

2.3.1. Großraumklima

Landshut befindet sich im unteren Isartal im Naturraum des unterbayerischen Hügellandes und den Isar-Inn-Schotterplatten in der Donauregion. Sie liegt klimatisch im Übergangsbereich des maritimen Klimas, geprägt durch milde Winter, kühle Sommer und eine höhere Luftfeuchtigkeit sowie des kontinentalen Klimas, welches sich wiederum auszeichnet durch kalte Winter, warme Sommer und eine geringe Luftfeuchtigkeit (Nagl 1997). Aufgrund der Übergangslage ist das Klima stark von den Großwetterlagen beeinflusst. Dies bedeutet, dass sich bei Auftreten von West- und Nordwestwetter der maritime Einfluss niederschlägt, welcher sich durch gemäßigte Temperaturen, hohe Luftfeuchte und Niederschlagsreichtum auszeichnet. Ostwetterlagen hingegen haben trockenes, wolkenarmes Wetter mit höheren Temperaturen im Sommer und niedrigeren im Winter zur Folge (Nagl 1997). Die sommerliche Durchschnittstemperatur in Landshut liegt bei 16,9 °C, während sie in den Wintermonaten bei -0,5 °C liegt (Durchschnitt für die Donauregion jeweils aus der Referenzperiode 1971 bis 2000) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021).

2.3.2. Aktuelles Klima und beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung der klimatischen Entwicklung in Landshut 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 aus. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- und Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Landshuts 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 Zeitraum weiterentwickelt, sodass bei älteren Zeitreihen höhere Messungenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngerer Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Die Jahresmitteltemperatur in der Referenzperiode 1971 – 2000 beträgt 8,5 °C. Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Landshut – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen bereits um 2 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in den letzten drei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 5 Jahreswerte allein in den letzten sieben Jahren (Abb. 3). Die beobachtete Erwärmung geht mit einer deutlichen Veränderung der Anzahl meteorologischer Kenntage einher. So ist die Anzahl an Sommertagen in Landshut um 14 Tage auf durchschnittlich 52 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 (Tab. 1). Eine entgegengesetzte Entwicklung zeigen Frost- bzw. Eistage, deren Anzahl im selben Zeitraum um 12 bzw. 7 Tage pro Jahr zurückgegangen ist. Tropennächte treten gegenwärtig vergleichsweise selten auf, sodass die beobachteten Änderungen statistisch nicht ausreichend belastbar sind.

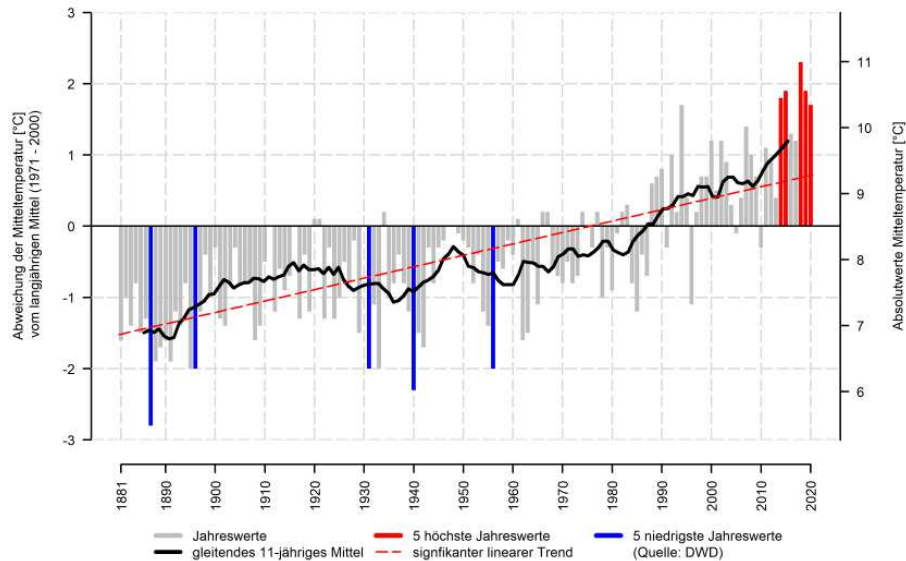


Abb. 3: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Landshut im Zeitraum von 1881 bis 2020 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2021)

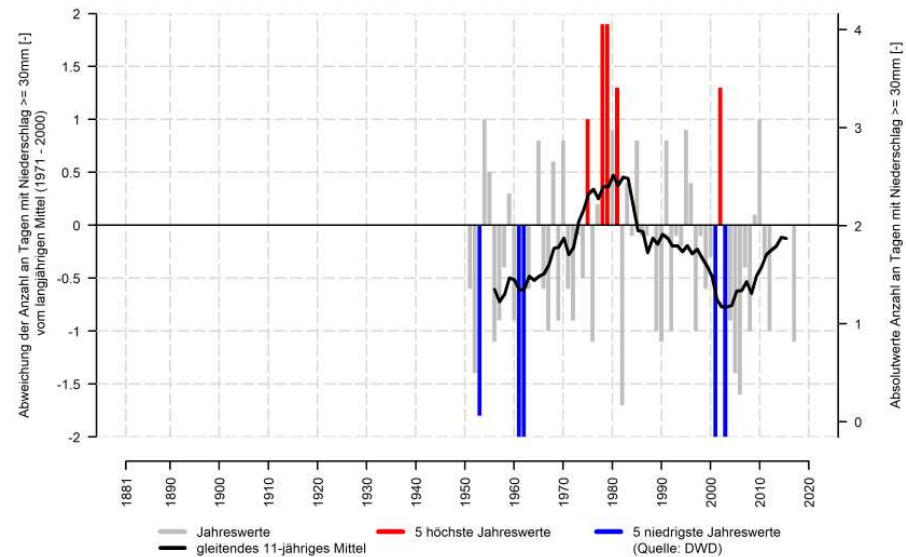


Abb. 4: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Landshut (nach DWD 2021c)

Variable	Zeitraum		
	1961-1990	1971-2000	1991-2020
tägliches Maximum der Lufttemperatur [°C]	12,9	13,3	14,1
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,1	8,5	9,3
tägliches Minimum der Lufttemperatur [°C]	3,9	4,3	5,0
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	38	43	52
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	5	7	12
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	0	1
Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	105	100	93
Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	30	26	23
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	787	791	780
Tage mit Niederschlag > 10 mm [n/Jahr]	22	23	22
Tage mit Niederschlag > 20 mm [n/Jahr]	6	6	6
Tage mit Niederschlag > 30 mm [n/Jahr]	2	2	2

Tab. 1: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kenntagen in Landshut in der Vergangenheit (nach DWD 2020c bzw. für die Tropennächte DWD-Daten Bayern (DWD 2021a))

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Mühldorf dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Landshut. In Mühldorf befindet sich die nächstgelegene Wetterstation des DWD mit einer ausreichend langen Datenreihe von mindestens 30 Jahren Messzeitraum. Die Daten der Wetterstation Landshut Reithof (ab 2008), sowie das Gutachten des DWD von 1996 wurden zu ergänzenden Auswertungen (Temperaturverhältnisse, Windströmungen) herangezogen. Sowohl in den Nachtstunden als auch am Tag überwiegt die Hauptwindrichtung West, während ebenfalls eine deutliche Windkomponente aus Ost zu identifizieren ist (Abb. 5). Zu beachten ist, dass diese Windrichtungsverteilung nicht die Windströmungsverhältnisse unter autochthonen Bedingungen (windstill, wolkenfrei) widerspiegeln, wie sie für die Stadtklimamodellierung zu Grunde gelegt wurde.

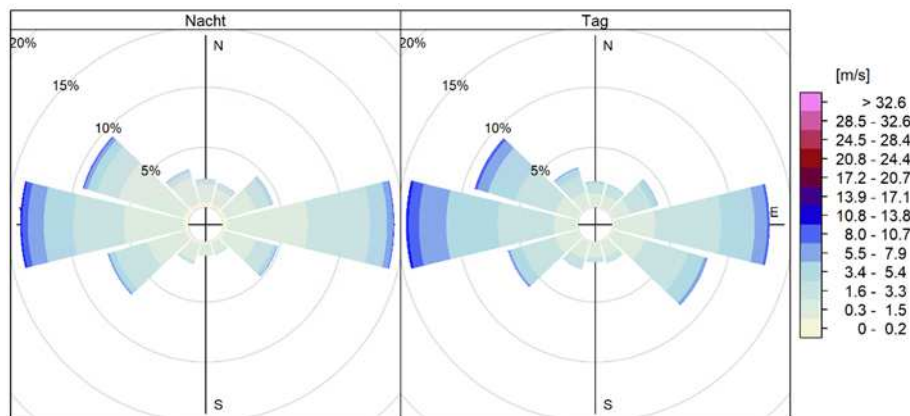


Abb. 5: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Landshut für den Zeitraum 1955 - 2020 basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Mühldorf (DWD 2021)

In Bezug auf den Niederschlag sind in der Vergangenheit geringfügige Auswirkungen durch den Klimawandel festzustellen. Über die letzten ca. 60 Jahre sind keine relevanten Veränderungen auszumachen und die mittlere jährliche Niederschlagsmenge schwankte um 787 mm (Tab. 1).

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 2021). 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 Landshut 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. Abb. 4), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.

2.3.3. Datengrundlage für die Bewertung des Klimawandels

Die Projektionen verschiedener Klimamodelle zeigen, dass sich der bereits heute beobachtete Trend der Erwärmung in Landshut zukünftig fortsetzt. So werden weiterhin steigende Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung bedingt eine Zunahme an in klimatologischen Kennwerten, wie Heißen Tagen (maximale Tagestemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$) und Tropennächten (Tagesminimumtemperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$), zudem gibt es Hinweise, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt.

Angesichts der zunehmenden Erwärmung ist davon auszugehen, dass die Belastung in heute bereits überwärmten Bereichen zukünftig weiter steigt – Maßnahmen zur Anpassung in diesen Räumen haben also eine weiter ansteigende Priorität. Zusätzlich muss infolge der Erwärmung mit weiteren Belastungsbereichen in Landshut gerechnet werden.

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 (ARS) und darüber hinaus, erstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt .

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter 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 mehrere Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Landshut ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d.h.

Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tab. A 1). 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 Modelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al. 2016).

Räumliche und zeitliche Auflösung

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 Landshut 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).

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; Abb. 3):

- ↳ 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.

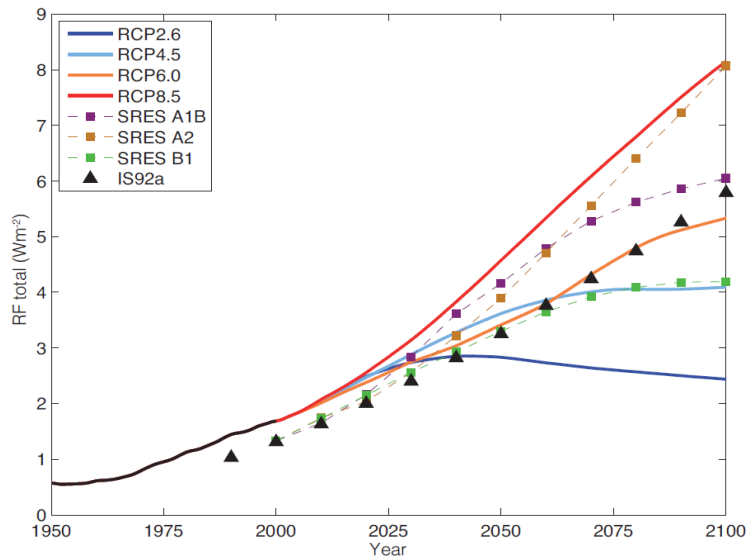


Abb. 6: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)

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 Landnut 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 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt.

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

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

- ➔ Referenzperiode: 1971 – 2000
- ➔ 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2021 – 2050
- ➔ 2. Zukunftsperiode (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 Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (vgl. Abb. 7).

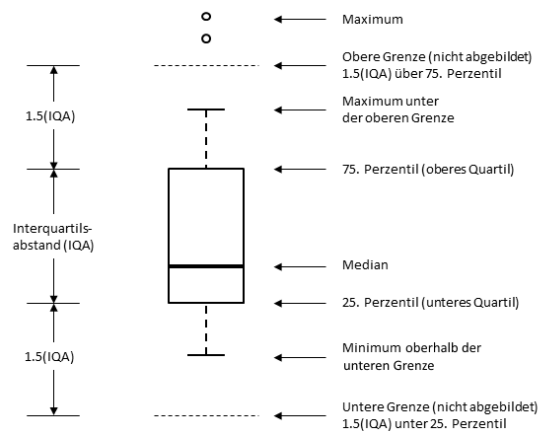


Abb. 7: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

2.3.4. Ergebnisse zum zukünftigen Klimawandel

Die Aussagen zum erwarteten Klimawandel in Landshut gelten für die nahe (2021 – 2050), mittlere (2041 – 2070) sowie ferne Zukunft (2071 – 2100) und stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt.

Die Projektionen verdeutlichen, dass sich der bereits heute beobachtete Trend einer Erwärmung in Landshut zukünftig fortsetzt. So werden weiterhin steigende Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung bedingt eine Zunahme an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten, zudem gibt es Hinweise, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt. Frost- und Eistage treten dagegen zukünftig seltener auf und sorgen für mildere Winter, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechsellern und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Für den Jahresniederschlag ist eine langfristig leicht steigende, wenn auch nicht signifikante Tendenz in Landshut zu erkennen. Entscheidender sind saisonale Verschiebungen des Niederschlags mit einem Trend zu geringeren Niederschlagsmengen im Sommer und höheren Werten im Winter und Frühjahr. Dieser Trend wirkt sich auch auf die klimatische Wasserbilanz aus, die über das Jahr gesehen leicht abnimmt und insbesondere in der saisonalen Betrachtung deutliche Veränderungen zeigt. So ist in den Winter- und Frühjahrsmonaten mit einem Anstieg der klimatischen Wasserbilanz zu rechnen. Aufgrund geringerer Niederschläge bei steigenden Verdunstungsraten ist dagegen im Sommer von einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz und einem Rückgang des natürlichen Wasserdargebots auszugehen. Die Projektionen der Klimamodelle legen folglich den Schluss nahe, dass in Zukunft mit einer vermehrten sommerlichen Trockenheit gerechnet werden muss. Besonders betroffen dürften dabei Gebiete sein, die heute bereits Trockenheitstendenzen aufweisen.

Starkniederschläge zählen zu den seltenen Ereignissen, sodass statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Aufgrund ihres enormen Schadenspotenzials sollten jedoch selbst geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. Die regionalen Klimamodelle projizieren für Niederschlagsereignisse ≥ 10 sowie ≥ 20 mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind. Für Starkniederschläge ≥ 30 mm/d sind valide Aussagen derzeit

kaum möglich, doch deutet sich langfristig eine Tendenz leicht steigender Auftretshäufigkeiten an. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist verbunden mit einer rückläufigen Anzahl von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d, woraus gefolgert werden kann, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt.

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, die 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. Daher sind in Landshut keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftretshäufigkeit von Stürmen ableitbar. Eine durch die zunehmende Erwärmung aufgeheizte Atmosphäre besitzt jedoch mehr latente Wärme, woraus sich ein Potenzial für heftigere Sturm- und Starkregenereignisse ergibt. Daher sollten Stürme, obwohl mit den derzeitigen Modellen keine zunehmende Häufigkeit nachweisbar ist, bei Klimaanpassungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden – nicht zuletzt angesichts des Ausmaßes und der Häufung jüngster Ereignisse (u.a. Sturmtief „Egon“ im Januar 2017, Sturmtief „Sabine“ im Februar 2020, Sturmtief „Ignatz“ im Oktober 2021).

Temperaturzunahme und Hitze

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der Jahresmitteltemperatur in Landshut bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den 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 (Tab. 2).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 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 Möglichenbereich 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 (Tab. 2) abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

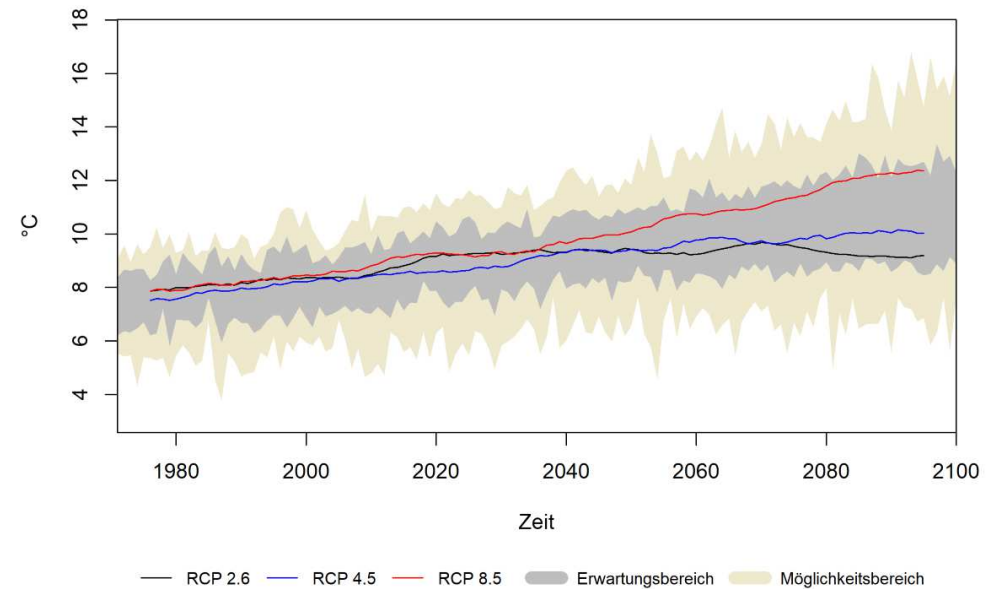


Abb. 8: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Landshut (alle RCP-Szenarien)

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst. Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien, wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (Abb. 9).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1	1,7	0,9	1,2	1,7	0,9	1,1	1,8
	RCP 4.5	0,9	1,2	1,7	1,2	1,8	2,5	1,6	2,3	2,8
	RCP 8.5	1,1	1,6	2,1	2,1	2,7	3,2	3,3	4,2	5,2
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,2	2,1	2,9	1,5	2,4	3	1,2	2,2	4,8
	RCP 4.5	1,9	2,6	4,6	2,5	3,5	5,9	3,4	4,7	5,9
	RCP 8.5	1,2	3,5	4,8	3,7	4,3	7,6	6,1	8,6	10,8
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1	1,3	2,3	0,9	1,2	2,2	0,5	1,2	2,3
	RCP 4.5	1,1	1,6	2,7	1,6	2,3	3,4	1,9	2,6	3,8
	RCP 8.5	1,3	1,8	2,8	2,1	3,4	4,2	4,3	5,2	7,4

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

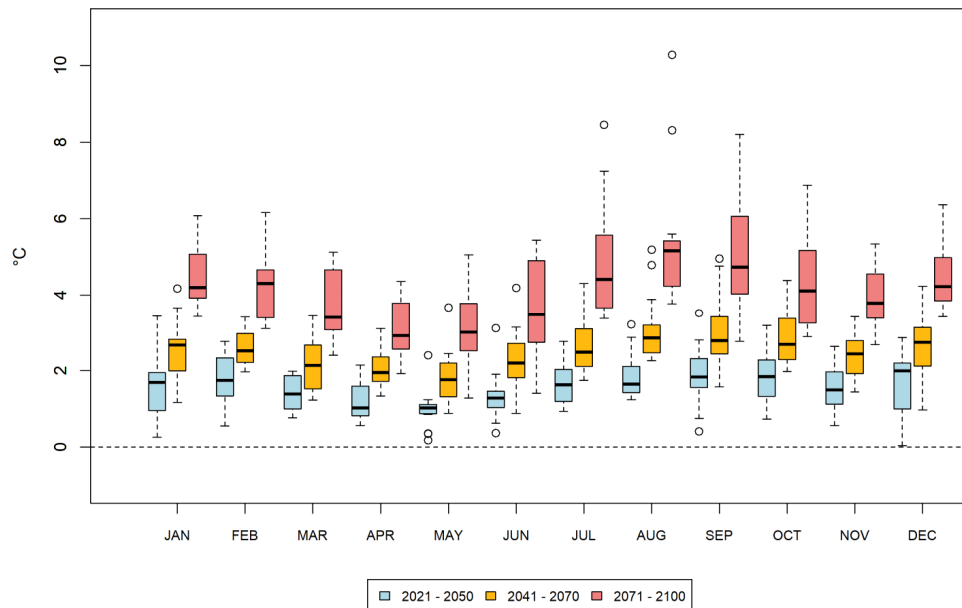


Abb. 9: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Landshut (RCP 8.5)

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen zukünftig deutlich zu (Tab. 3). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit 30 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode nur 7 mal jährlich auftraten (1971 – 2000) (Tab. 1). Tropennächte treten in Landshut derzeit nur unregelmäßig auf. In der nahen Zukunft (2021 – 2050) werden zusätzlich 1 bis 11 Tropennächte pro Jahr (Tab. 3), also bis zu 12 Tropennächte pro Jahr, erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode 7 bis 17 Tropennächte pro Jahr in Landshut möglich. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, der in großen Städten eine um bis zu 10 °C stärkerer Erwärmung gegenüber dem ländlichen Umland bewirkt (DWD). Demzufolge ist in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Landshut zukünftig länger andauern (Abb. 10). Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 bis 8 Tage.

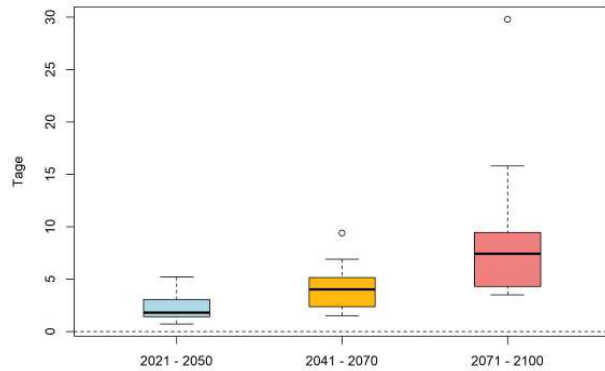


Abb. 10: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30$ °C) (RCP 8.5)

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage ($T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	8	13	22	9	13	21	9	13	18
	RCP 4.5	10	14	17	14	23	26	18	22	28
	RCP 8.5	12	16	21	21	29	42	42	48	67
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	3	4	11	3	3	10	3	5	11
	RCP 4.5	3	7	9	7	8	13	8	10	14
	RCP 8.5	4	6	11	9	14	19	19	30	36
Tropennächte ($T_{min} \geq 20^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	RCP 4.5	0	1	1	0	1	2	1	1	4
	RCP 8.5	0	1	2	1	3	5	7	11	17
Frosttage ($T_{min} < 0^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-25	-16	-13	-24	-21	-15	-26	-19	-14
	RCP 4.5	-29	-21	-15	-38	-30	-20	-48	-42	-30
	RCP 8.5	-32	-25	-20	-46	-40	-36	-69	-64	-60
Eistage ($T_{max} < 0^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-11	-9	-6	-11	-9	-8	-12	-10	-8
	RCP 4.5	-15	-11	-7	-19	-13	-8	-19	-15	-12
	RCP 8.5	-14	-12	-7	-19	-17	-11	-25	-23	-21

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

¹ In der Bandbreite vom 15. bis 85. Perzentil liegende Modellergebnisse

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an Frost- und Eistagen. In Landshut werden im langjährigen Mittel 100 Frosttage bzw. 26 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000, Tab. 1). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 60 Frosttage und 9 Eistage auftreten. Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechselln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Niederschlagsverschiebung

In Bezug auf die Jahresniederschlagssumme sind in Landshut 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 (Tab. 3). Mit Blick auf den Erwartungsbereich¹ zeigt sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen lassen – im Allgemeinen weicht der zukünftige mittlere Jahresniederschlag um weniger als 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Lediglich das RCP 8.5 Szenario berechnet für die ferne Zukunft im Zeitraum 2071-2100 eine Zunahme der Jahresniederschläge von bis zu etwa 13%. Insgesamt kann für Landshut eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden, die aufgrund der relativ geringen Änderungen jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann und wieviel es regnet (Frequenz und Intensität) 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

deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abb. 10). Die RCP-Szenarien 2.6 und RCP 4.5 weisen, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf. 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.

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			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	-46	18	61	-58	26	45	-9	15	43
	RCP 4.5	-2	28	76	-9	53	83	29	49	118
	RCP 8.5	19	55	83	-4	60	93	18	98	134

Tab. 4: Langjährige Änderung der mittleren Niederschlagssumme in Landshut (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

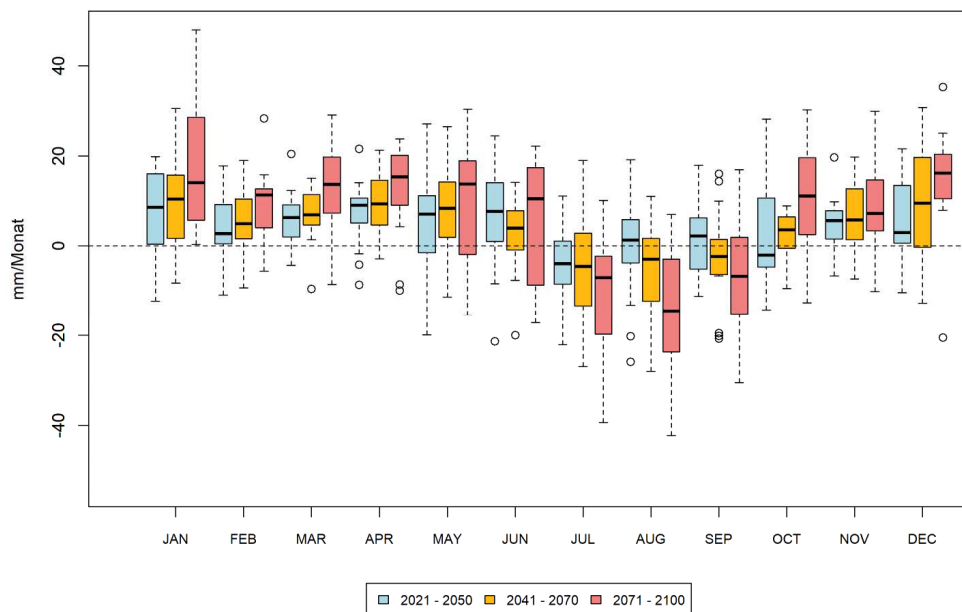


Abb. 11: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Landshut (RCP 8.5)

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 Landshut 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 (Abb. 12). 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, doch kann diese Tendenz die zukünftige Situation gerade in heute bereits von Wasserknappheit betroffenen Gebieten verschärfen. Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 vergleichbare Muster (Abb. 12), 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.

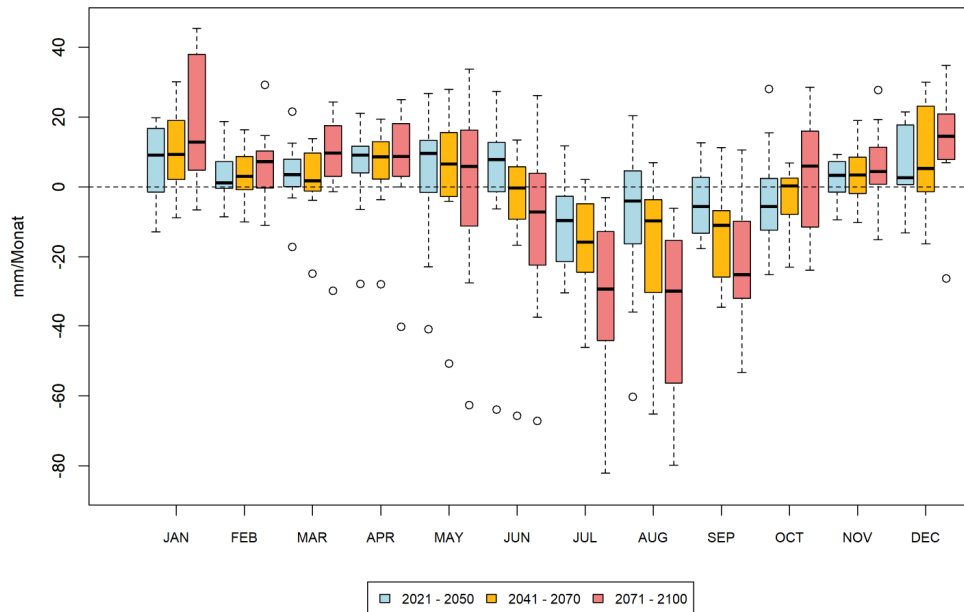


Abb. 12: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Landshut (RCP 8.5)

Starkniederschlag

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

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

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h

(Unwetterwarnung; DWD 2020d). 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

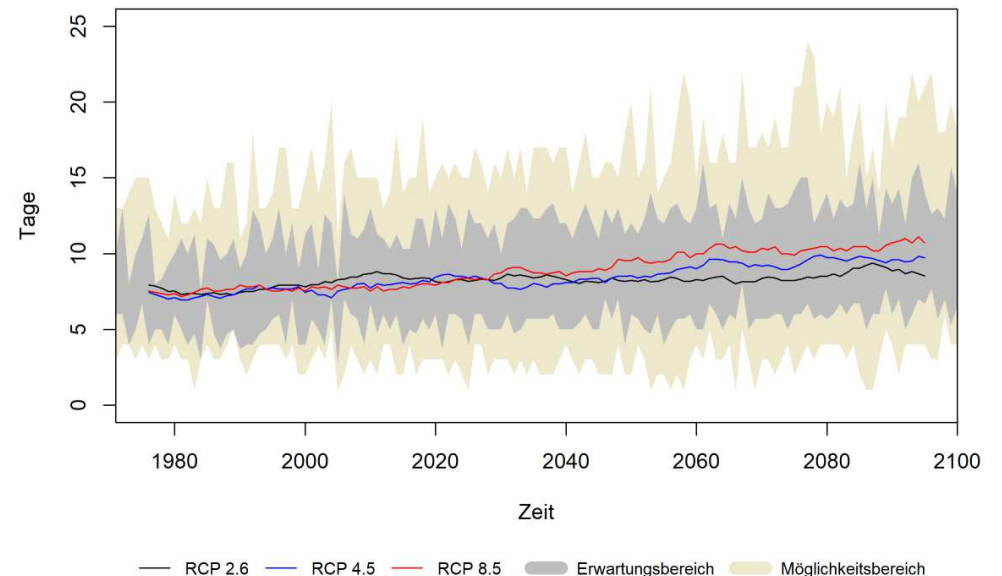


Abb. 13: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) in Landshut (alle Szenarien)

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 (Abb. 13). Aufgrund des enormen Schadenspotenzials

sollten jedoch (in absoluten 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. Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen. Starkniederschläge ≥ 30 mm/d treten momentan sehr selten auf 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 einem zusätzlichen Starkniederschlagsereignis pro Jahr gerechnet (Tab. 5).

Kenntag (Variable)	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Starker Niederschlag ($N \geq 10$ mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	2	3	-1	2	3	0	1	3
	RCP 4.5	0	2	4	0	3	5	2	5	6
	RCP 8.5	1	4	5	1	4	6	2	6	7
Stärkerer Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	1	0	0	1	0	1	2
	RCP 4.5	0	1	2	0	2	2	1	2	3
	RCP 8.5	0	1	2	1	2	3	1	3	5
Starkniederschlag ($N \geq 30$ mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	RCP 4.5	0	0	1	0	1	1	0	1	1
	RCP 8.5	0	1	1	1	1	1	1	2	2
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-6	-2	3	-5	-1	5	-4	-1	5
	RCP 4.5	-3	2	6	-3	1	6	-2	3	7
	RCP 8.5	-1	3	7	1	5	9	3	8	15

Tab. 5: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Landshut (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

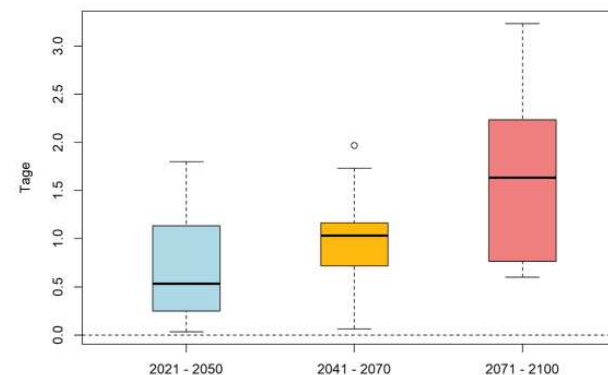


Abb. 14: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Landshut (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr; RCP 8.5)

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 anhand 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 Landshut 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.

3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse

In der Praxis spielen sich umweltmeteorologische Fragestellungen meist in der Größenordnung einer Stadt bzw. Region ab. Die dabei relevanten meteorologischen Phänomene weisen eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden auf. Als mesoskalige Phänomene werden dabei beispielsweise Flurwinde, Land-See-Winde oder die städtische Wärmeinsel bezeichnet, während der Einfluss von Hindernissen auf den Wind (z.B. Kanalisierung, Umströmung) oder die Wirkung verschattender Maßnahmen mikroskalige Effekte darstellen.

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen solch lokalklimatischer Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Zwar kann die Verteilung meteorologischer Größen wie Wind und Temperatur durch Messungen ermittelt werden, aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung (insbesondere in komplexen Umgebungen) in benachbarte Räume nur selten möglich. Entsprechend schwierig ist es, aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende (also flächenhafte) stadtklimatologische Bewertung vornehmen zu können.

3.1. Eingesetztes Stadtklimamodell

Für die Klimaanalyse der Stadt Landshut kam das Stadtklimamodell FITNAH-3D zum Einsatz. Numerische Modelle wie FITNAH-3D können deutlich besser zur Beantwortung stadtklimatologischer Fragestellungen herangezogen werden als rein aus Messkampagnen gewonnene Werte, indem sie physikalisch fundiert, die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH-3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 5 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen 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. Für tiefergehende Informationen zu FITNAH-3D wird u.a. auf Groß (1992) verwiesen.

3.2. Meteorologische Randbedingungen

Die Klimaanalyse legt eine sommerliche, autochthone Wetterlage als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde, die in Landshut an etwas mehr als jedem dritten Sommertag auftritt (Abb. 15). Diese autochthone Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt bzw. Region besonders gut ausprägen.

Die Bodenfeuchte wird mit 60 % angenommen, sodass der Vegetation Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Folglich liegt der Modellrechnung zwar eine hochsommerliche Situation mit thermischem Belastungspotential, aber dem Stand der Technik entsprechend keine absolute Extremsituation zugrunde.

In Landshut traten im langjährigen Mittel von 2008 bis 2020 rund 61 windschwache Strahlungsnächte auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abb. 14). In den drei Sommermonaten Juni, Juli

und August wurden im jährlichen Mittel knapp 26 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 28,3 % entspricht – etwa jede dritte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

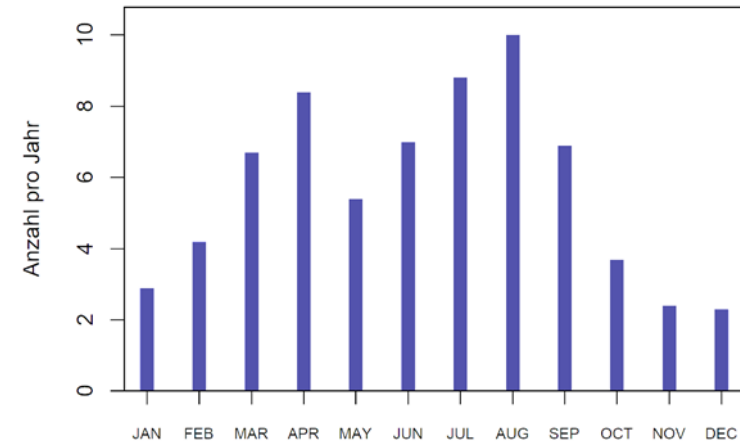


Abb. 15: Anzahl der Tage mit autochthoner Wetterlage

Charakteristisch für solch eine (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung von Flurwinden, d.h. durch den Temperaturunterschied zwischen kühleren Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetriebene Ausgleichsströmungen. In Abb. 16 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten 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 bebauete 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. Im Rahmen der Modellierung wird das regionale Strömungssystem in der betrachteten autochthonen Wetterlage über das Stadtgebiet Landshut hinaus berücksichtigt. Dieses wird in Form eines regionalen Antriebs auf Grundlage der für gesamt

Bayern vorliegenden, mesoskaligen Klimamodellierung (LfU, 2021) in das Modell implementiert.

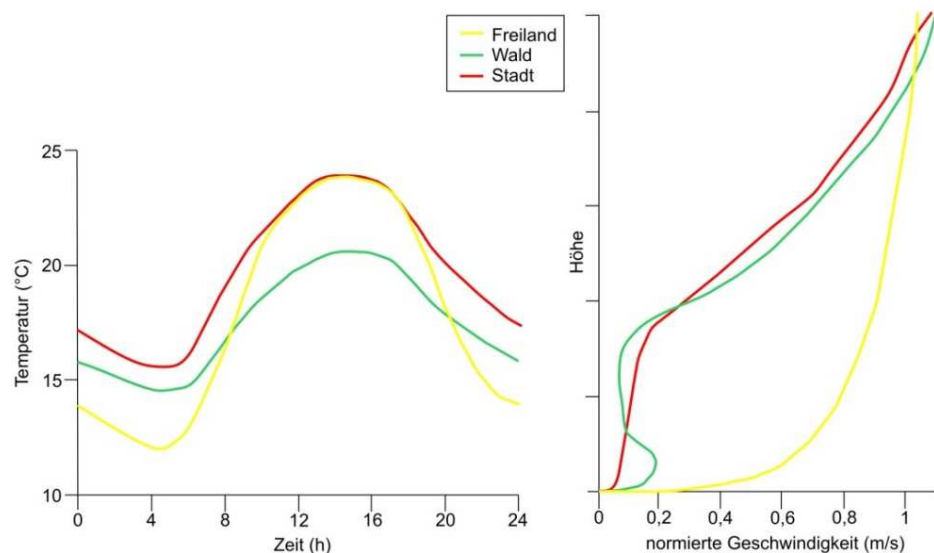


Abb. 16: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (Eigene Darstellung nach Groß 1992)

Im Sommer können auch wind- und austauschstärkere Bedingungen mit einer hohen thermischen Belastung auftreten (z.B. „Schwüle“). Während solcher Wetterlagen sind insbesondere in der Nacht noch höhere Temperaturen möglich als in den Strahlungswetterlage, die der Modellrechnung zugrunde lagen. Bei diesen austauschstärkeren (sogenannten allochthonen) Wetterlagen entwickeln sich jedoch keine ausgeprägten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland. Folglich bilden sich auch keine Bodeninversionen und damit auch keine größeren Flurwindssysteme bzw. Kaltluftflüsse aus, die durch planerisches Handeln unterstützt oder gestört werden könnten. Insofern besteht keine fachliche Notwendigkeit, diese explizit in einer Stadtklimaanalyse zu berücksichtigen. Gleichwohl ist festzuhalten, dass einstrahlungsreduzierende Maßnahmen auch bei diesen Wetterlagen wirksame Optionen zur Verbesserung des thermischen Wohlbefindens am Tage darstellen.

Für die Klimasimulation wird die Situation des 21. Juni (Sonnenhöchststand) mit einer 0/8 Bewölkung (wolkenloser Himmel) angenommen. Der Modellierungszeitraum erstreckt sich von 21:00 Uhr bis zum Folgetag um 14:00 Uhr, wobei sich die Auswertung der Ergebnisse auf die Zeitpunkte 04:00 Uhr für Nachtsituation und 14:00 Uhr für den Tag bezieht (vergleiche Tagesgang der Temperatur in Abb. 16). Die Starttemperatur der Modellierung beträgt 21 °C in 2 m über Grund. Damit repräsentiert die Modellrechnung eine meteorologische Situation, die jedes Jahr mehrfach auftritt. Grundlage der Starttemperatur der Modellrechnung für den Status Quo ist die Auswertung von Daten des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum von 1991 bis 2020.

Neben der Berechnung des Status Quo erfolgte ebenfalls die Modellierung des zukünftigen Klimas (Zukunftsszenario) unter Berücksichtigung eines „starken Klimawandels“ auf Basis des Klimawandelszenario RCP 8.5 für den Bezugszeitraum 2041 bis 2070, welches im Vergleich zum Vergleichszeitraum von 1991 bis 2020 einer Zunahme der mittleren Sommertemperaturen um 1,9 °C, bzw. um 2,7 °C im Referenzzeitraum 1971 bis 2000 entspricht (EURO-CORDEX). Neben der Eingangstemperatur der Klimamodellierung wurde ebenfalls die Bodenfeuchte von 60% (Status Quo) auf 30% im Zukunftsszenario reduziert, um die Auswirkungen des Klimawandel auf den Bodenwasserhaushalt und somit, unter anderem, auf die Wasserversorgung der Vegetation, realitätsnah darzustellen.

3.3. Eingangsdaten der Modellierung

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die von der Stadt Landshut zur Verfügung gestellt wurden:

Geländehöhe:

- ➔ Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2019)

Landnutzung

- ➔ CIR-Luftbilder (Stand 2018)
- ➔ ALKIS (Stand 2020)
- ➔ Gebäudeflächen (LoD1) (Stand 2021)

Strukturhöhe

- ➔ Digitale Geländemodell (DGM) in 1 m Auflösung (Stand 2019)
- ➔ Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2020)
- ➔ Gebäudehöhe (LoD1) (Stand 2021)

Versiegelungsgrad

- ➔ CIR-Luftbilder (Stand 2018)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Landshuts wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Alle Eingangsdaten wurden jedoch hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels verfügbarer Daten, wie beispielsweise in der Software ESRI ArcGIS integrierten aktuellen Luftbildern verglichen, sodass ein aktueller Stand gewährleistet werden kann.

Das Stadtgebiet Landshuts erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 21,5 km von Südwest nach Nordost und ca. 7,4 km in Nord-Süd-Richtung (an der breitesten Stelle), über eine Fläche von knapp 66 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von knapp 276 km² auf (21,6 km x 12,8 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede, sowie das Isartal mit Einfluss auf das Landshuter Stadtklima berücksichtigt

werden können. Außerhalb des Landshuter Stadtgebiets wurde dabei auf frei verfügbare Daten wie Urban Atlas (Copernicus Land Monitoring Service 2018, ALKIS-Daten), OpenStreetMap (Information zur Bebauungsstruktur, Stand 2021), sowie SRTM-Daten (Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet, Stand 2000) zurückgegriffen. Die Eingangsdaten für das Landshuter Umland sind weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen Landshut und seinem Umland hinreichend genau zu erfassen.

Geländehöhe

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 1 m-Auflösung in das für die Modellierung notwendige 5 m-Raster gemittelt wurde (Abb. 17).

Das Relief der Stadt Landshut wird durch das Isar-Inn Hügelland im Süden, die Altdorfer Hochterrasse und im zentralen Bereich durch das Isartal geprägt. Der südlich der Isar gelegene Stadtkern befindet sich auf einer Höhe von ca. 390 m ü. NHN. Von hier steigt die Gelände südlich schnell auf bis ca. 490 m in den Stadtteilen Achdorf und Berg an, während sich große Teile des Stadtgebietes innerhalb des Isartals befinden. Diese breite Tallage mit stark ansteigenden Hügeln, besonders im südlichen Stadtgebiet spiegeln sich auch in den lokalen Windsystemen wieder.

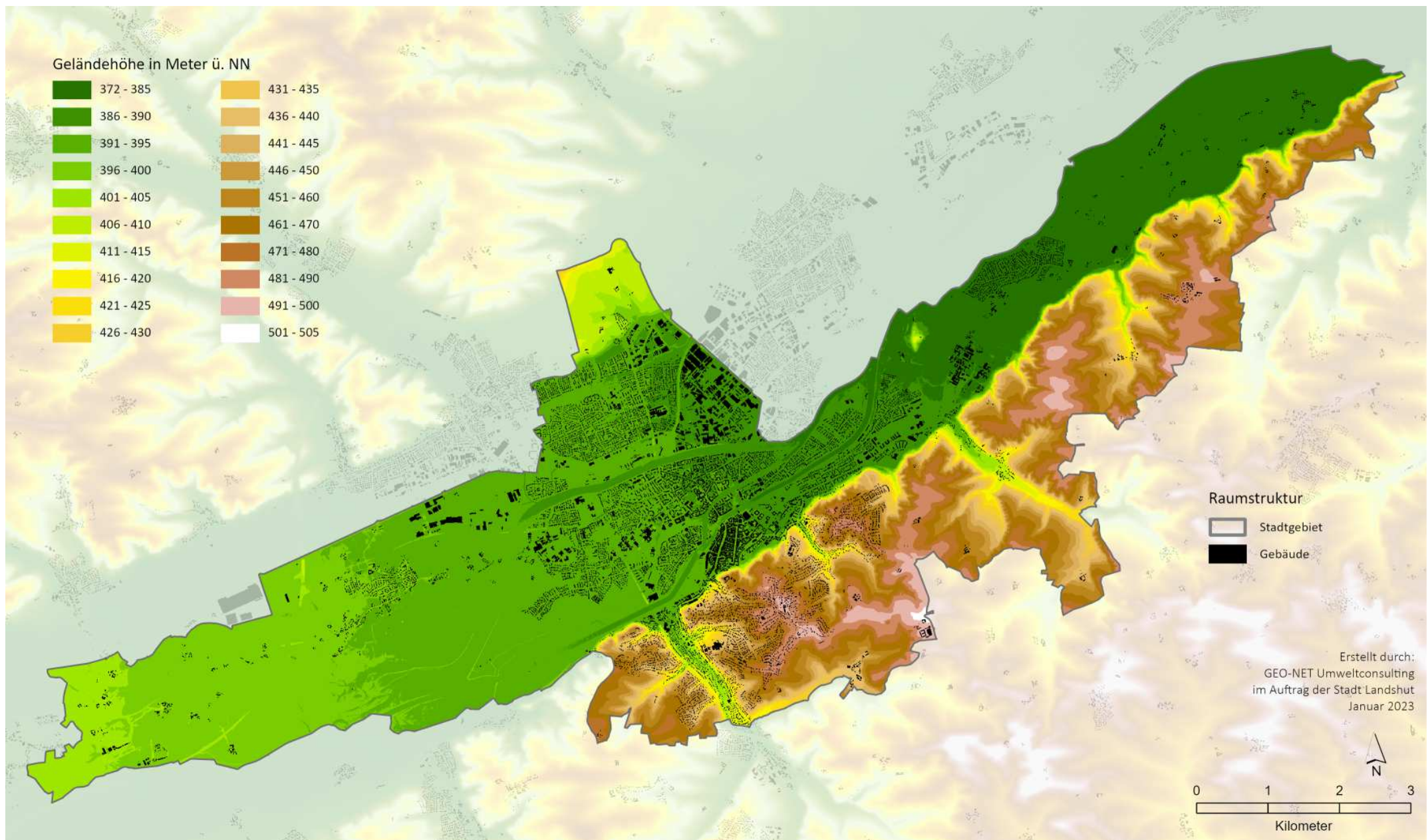


Abb. 17: Digitales Geländemodell (DGM) - Modelleingangsdaten

Landnutzung

Die Landshuter Landnutzung wird über verschiedene Nutzklassen definiert (Abb. 20), die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Nutzungsklassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 2,5 m Wuchshöhe werden drei verschiedene Untergründe unterschieden: Bäume über Versiegelung (z. B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z. B. Bäume in Parks) und Bäume über naturfernem Boden (z. B. Bäume an Gleisanlagen oder Sportplätzen).

Zur Erfassung der Bäume wurden CIR-Luftbilder aus dem Jahr 2020 in den Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) überführt. Über einen Schwellenwert von 0,15 konnten Bäume automatisiert von vegetationslosen Flächen getrennt und in Kombination mit der Strukturhöhe auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass auch Bäume im privaten Bestand erfasst werden, die in der Regel im öffentlichen Baumkataster nicht erfasst sind. Allerdings ist es bei der vorgegebenen Modellauflösung nicht möglich einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von 2 m und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen (Abb. 18, Schritt 2). Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (2021), die auf Basis von digitalen Orthofotos (2020) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockfläche gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen beispielsweise zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (siehe Kap. 4), zum anderen als in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte).

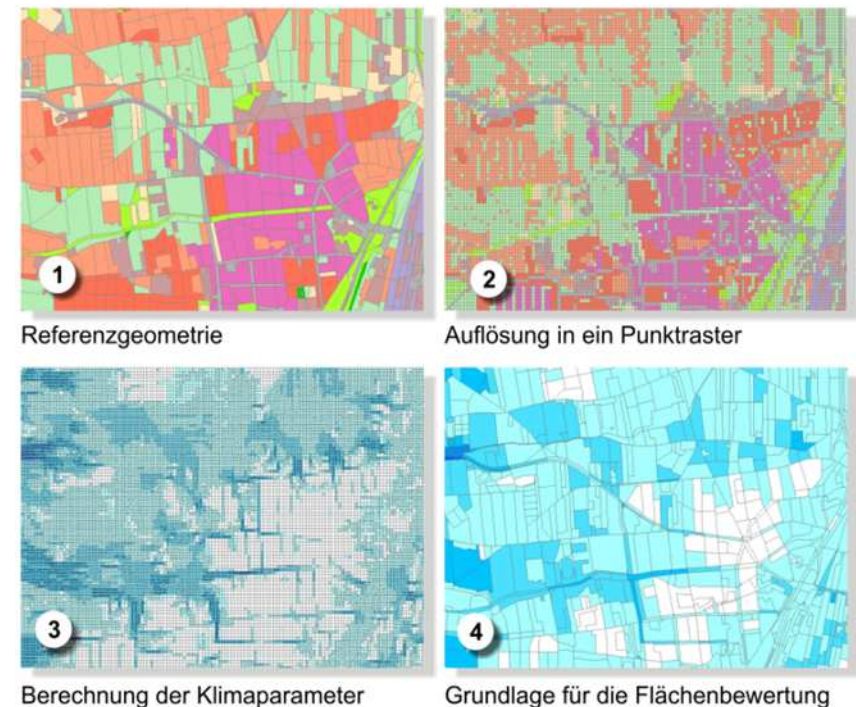


Abb. 18: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformationen

Flächenkulisse Zukunftsszenario (Entwicklungsflächen)

Um die Nutzungsstrukturen möglichst aktuell abzubilden, werden städtebauliche Entwicklungsflächen, die für eine mögliche zukünftige Bebauung ausgewiesen sind in die zukünftige Flächenkulisse (Bezugsjahr 2050) eingebunden. Dabei handelt es sich um perspektivisch absehbare Siedlungserweiterungen, die eine mögliche Entwicklung des zukünftigen Stadtbilds von Landshut abbilden sollen. Die Grundlage dafür ist der aktuelle Flächennutzungsplan (Stand 2022), sowie das Leerbaufächenregister. In Abstimmung mit dem Amt für Stadtentwicklung und Stadtplanung Landshut wurden potentielle Entwicklungsflächen, einschließlich einer zufälligen Auswahl von 50% der Leerbaufächen in die Modellrechnung für das Zukunftsszenario mit eingebunden (Abb. 19).

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine konkreten Bebauungspläne für diese Flächen vorlagen, kam der sogenannte „Mischpixel-Ansatz“ zum Einsatz. Dabei wird eine statistisch signifikante Menge von Rasterpixeln ähnlicher siedlungstypologischer Ausprägung ausgewählt, um die jeweilige Entwicklungsfläche möglichst repräsentativ in das Quartiersbild einzubetten. Für die zukünftig zu entwickelnden Gebiete werden Flächen aus der aktuellen Situation (Status Quo) ausgewählt, die am ehesten einem möglichen Bebauungszustand der Zukunft entsprechen. Die Bestimmung der unterschiedlichen Landnutzung erfolgte, differenziert nach Nutzung (Gewerbe, Wohnbebauung) auf Grundlage gegenwärtiger Referenzflächen, die sich im näheren Umfeld der Entwicklungsflächen befinden, und somit die prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Landnutzungen auf den Entwicklungsflächen annähern. Innerhalb der Entwicklungsflächen erfolgte die räumliche Verteilung der unterschiedlichen Landnutzungsklassen, einschließlich der Gebäudestruktur durch eine zufällige Generierung. Somit lassen sich die Entwicklungsflächen in das Modellumfeld übertragen, ohne dafür eine konkrete Konstruktion auf der jeweiligen Fläche erzeugen zu müssen.

Die Eingangsdaten wurden auf dieser Grundlage für den Status Quo und das Zukunftsszenario aufbereitet (Abb. 20, 21).



Abb. 19: Exemplarische Referenzflächen für gewerbliche und wohnbauliche Nutzung und abgeleitete Mischpixelflächen als Eingangsdaten für das Zukunftsszenario der Modellrechnung

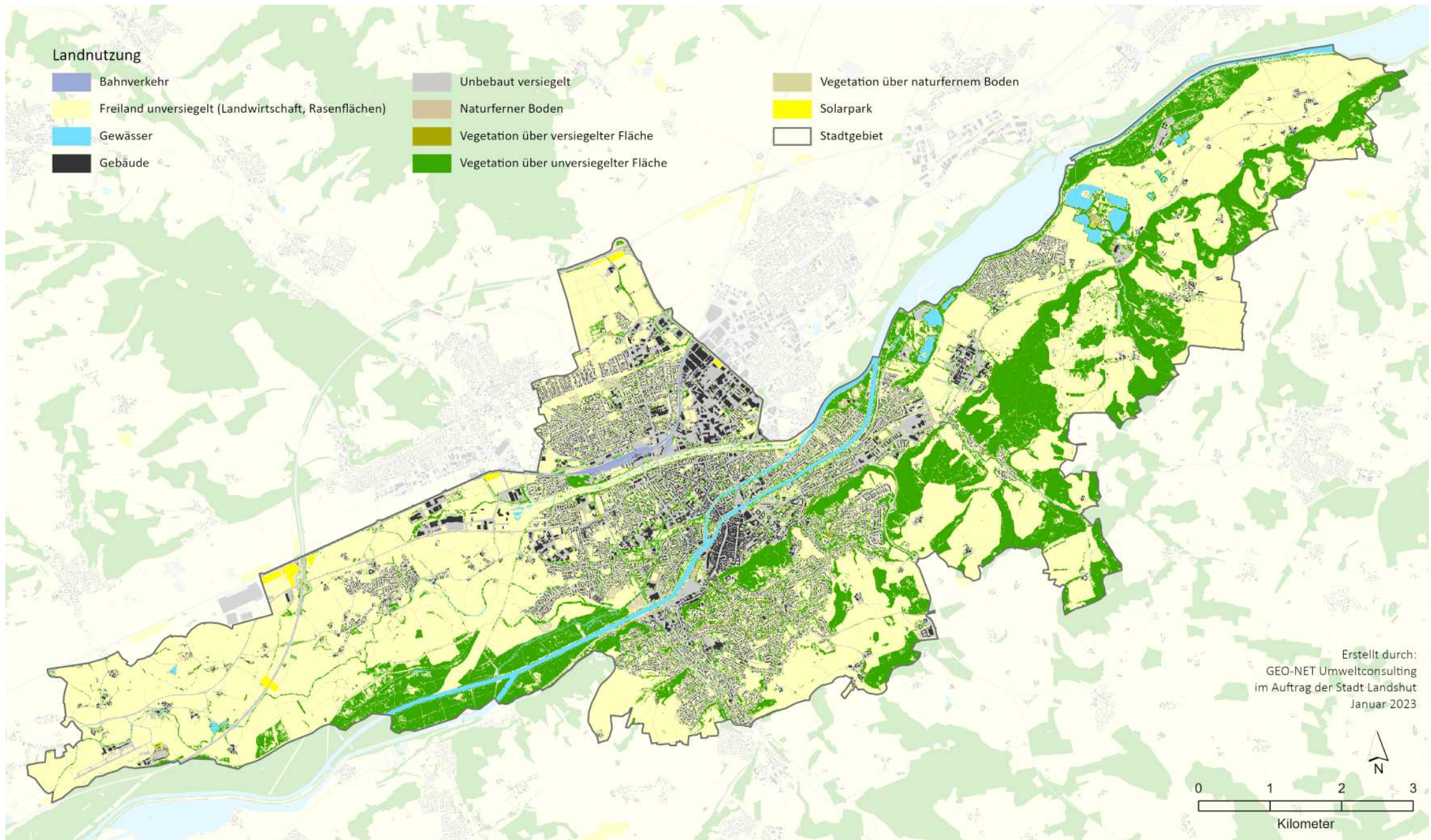


Abb. 20: Landnutzungsklassifizierung für das Stadtgebiet von Landshut – Status Quo

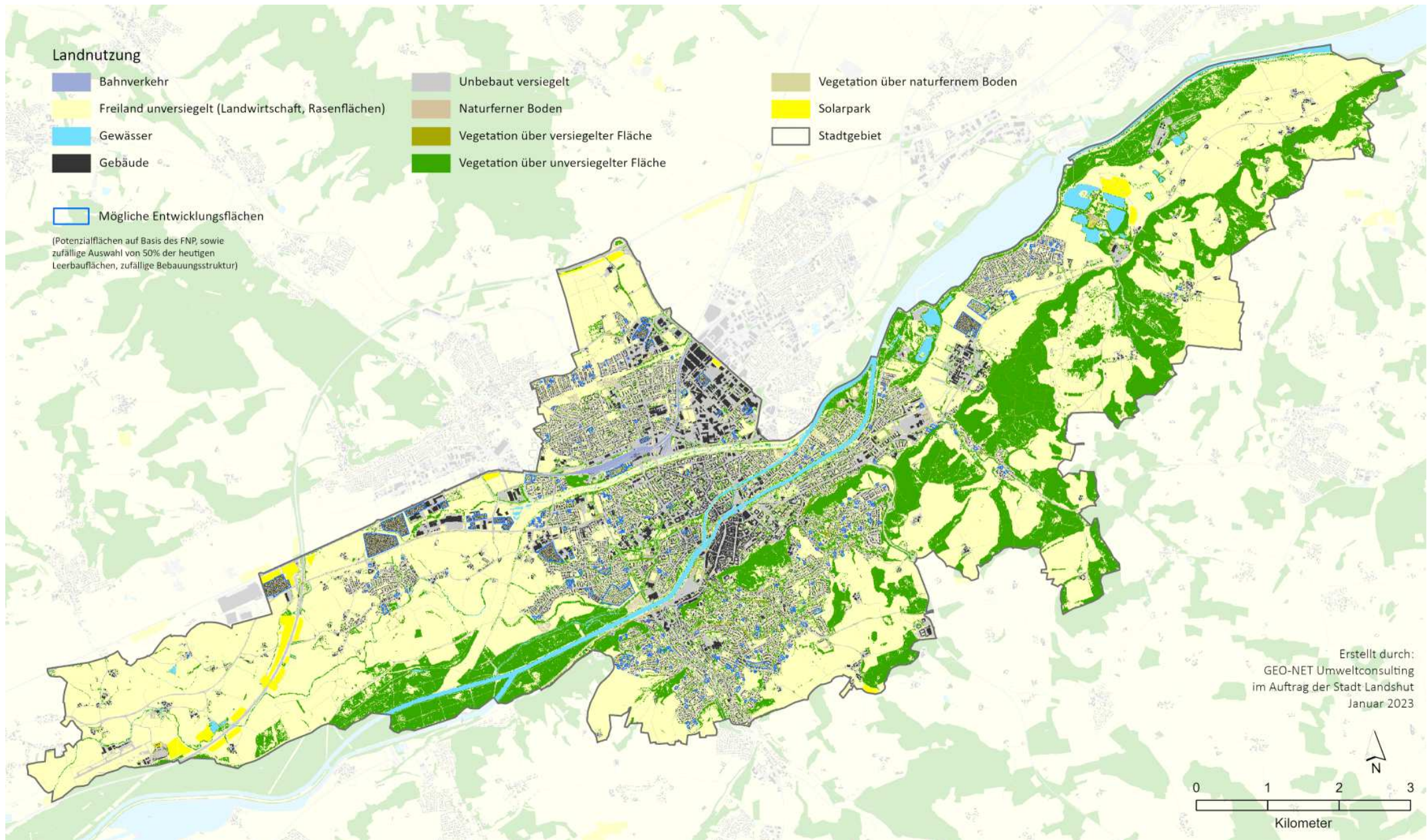


Abb. 21: Landnutzungsklassifizierung für das Stadtgebiet von Landshut – Zukunftsszenario

3.4. Modellunsicherheiten

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres flächendeckenden, das Prozessgeschehen abbildenden 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 sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dies 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 in das letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich diejenigen, welche zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. Es erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3783 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 vereinfachten Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E²-Vorhaben ist. Ein Nachweis für eine tatsächliche Verbesserung der Modellergebnisse steht somit noch aus und kann nach heutigem Erkenntnisstand am ehesten vom Modell PALM-4U erwartet werden, dass noch bis Ende 2022 mit BMBF³-Fördermitteln zu einem marktreifen Produkt reifen

soll und an dessen Erprobung GEO-NET im Rahmen der Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ intensiv beteiligt 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, wie im vorliegenden Fall, 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 in der Planungshinweiskarte aufgrund der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der PHK-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 Planungshinweiskarte zu vernachlässigen sind.

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

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

Grundsätzlich gilt: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Insbesondere in sich dynamisch entwickelnden Städten sollte der Erhebungszeitpunkt nur für einzelne, das Ergebnis nicht nachhaltig beeinflussende Datensätze mehr als 2-3 Jahre in der Vergangenheit liegen. Diese Prämisse ist für die vorliegende Analyse erfüllt. Widersprüchliche und veraltete Daten konnten zudem anhand des Abgleichs

² Forschung und Entwicklung

³ Bundesministerium für Bildung und Forschung

mit dem Orthofoto zum Teil korrigiert bzw. aktualisiert werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden. Es empfiehlt sich daher, den Fortschreibungsrhythmus der Klimaanalyse nicht an ein starres zeitliches Korsett, sondern an die Aktualisierung zentraler Eingangsdaten durch Dritte (insbesondere den Befliegungsturnus des Landes Bayern und die daraus abgeleiteten Produkte wie DOM, DGM und CIR-Luftbilder) zu koppeln. In den letzten 10 Jahren hat die fernerkundliche Erhebungsqualität noch einmal deutlich zugenommen. Die Aufnahmen aus Befliegungen haben heute eine räumliche Genauigkeit von wenigen Zentimetern, sodass sich in der vorliegenden Analyse allenfalls noch kleinere Unsicherheiten aus sichttoten Räumen (z.B. in Gebäudeschatten) ergeben. Schon mit der nächsten Generation (sog. TrueDOP) wird sich aber auch diese Unsicherheitsquelle auflösen.

Sämtliche Eingangsdaten wurden in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte in der Größenordnung Landshuts 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 Strukturtypen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die Wärmebelastung am Tag auswirkt. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. auf der Ebene der Planungshinweiskarte keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Auf Basis der 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, gleichwohl hier gewisse Unsicherheiten bestehen, 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. Allerdings stellt das Bauvolumen den dominierenden Einflussfaktor dar, sodass die fehlenden Daten unter dem Stichwort der Feinjustierung diskutiert werden müssen. Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten (z.B. zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte) in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C betragen kann, was wiederum 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 werden.

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 – insbesondere auf die Planungshinweiskarte – einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es eine Aufgabe der Stadtklimatologie in den kommenden Jahren sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern. Das größte Potential besteht in diesem Zusammenhang in der Optimierung der Berücksichtigung von Gebäude- und Bodeneigenschaften.

4. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen 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 geglättet⁴. Alle Ergebnisse werden für den Status Quo mit aktuellen Klimabedingungen und das Zukunftsszenario (Klimaszenario RCP 8.5) mit dem Bezugsjahr 2050 dargestellt.

4.1. Nächtliches Temperaturfeld

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen 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. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei einem Minimalwert von ca. 14 °C (Zukunftsszenario: 15,5 °C) über siedlungsfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp über 20,5 °C (Zukunftsszenario: 22 °C) in hoch versiegelten Bereichen eine Spannweite von mehr als 6 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet

liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,3 °C (Zukunftsszenario: 18,2 °C). Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. Mit einer Einwohnerzahl von 75466 (Stand 31.12.2022) ist Landshut eine Mittelstadt und weist dementsprechend eine weniger starke Überwärmung als Großstädte auf. Die höchsten nächtlichen Belastungen treten vorwiegend in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (z. B. Industriegebiet Landshut) und dem historischen Stadtkern auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum finden sich in stark durchgrüntem und landwirtschaftlichen Flächen, insbesondere im südlichen Isarhügelland (Abb. 22, 23). Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 14 – 16 °C auf. In Wäldern bzw. dicht bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte um 17 °C – 17,5 °C erreicht werden (z.B. Isaraue, Hofgarten). Dennoch nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Kaltluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser⁵ sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über größeren Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sein und deren Abkühlung verringern können (Isar). Die Abkühlung der Bodenoberfläche wirkt sich maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld aus. Als Maß für die Abkühlung dient die Kaltluftproduktionsrate, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht (Abb. 24, 25). Dementsprechend findet über versiegelten Flächen, aber auch über Gewässern (nahezu) keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über Freiflächen produziert, doch auch die mit Bäumen bestandenen Flächen sowie Grünflächen im Wohnumfeld dienen als Kaltluftentstehungsgebiete. Maßgeblich ist hierfür also die vorliegende Landnutzung.

⁴ Um die Karten anschaulicher zu gestalten, werden die Ergebnisse nicht rasterzellengenau dargestellt, sondern an den Übergängen der Rasterzellen geglättet (vereinfacht ausgedrückt: gemittelt). Dies geschieht automatisiert in der GIS-Software über das mathematische Verfahren der bilinearen Interpolation.

⁵ Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

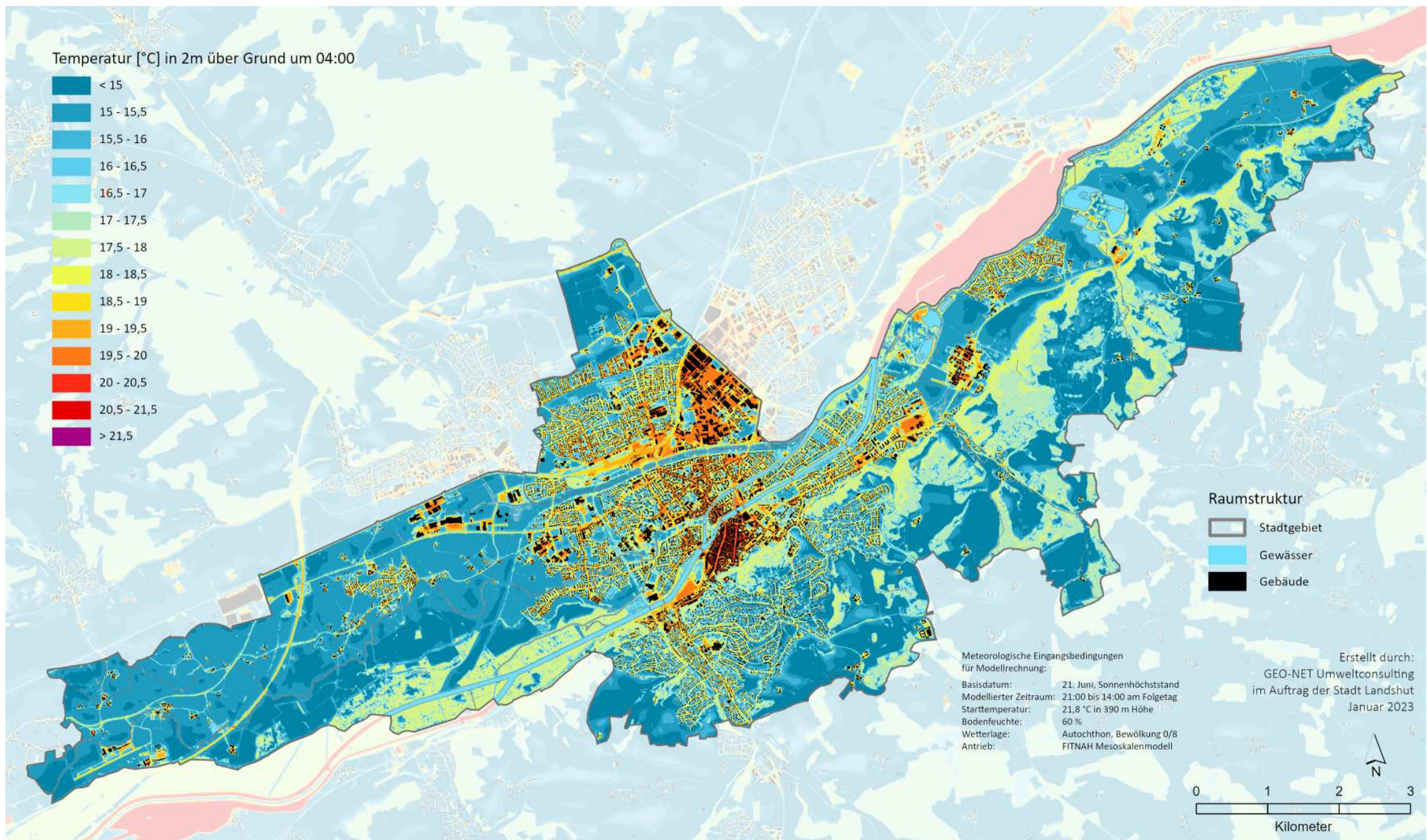


Abb. 22: Nächtliche bodennahe Lufttemperatur

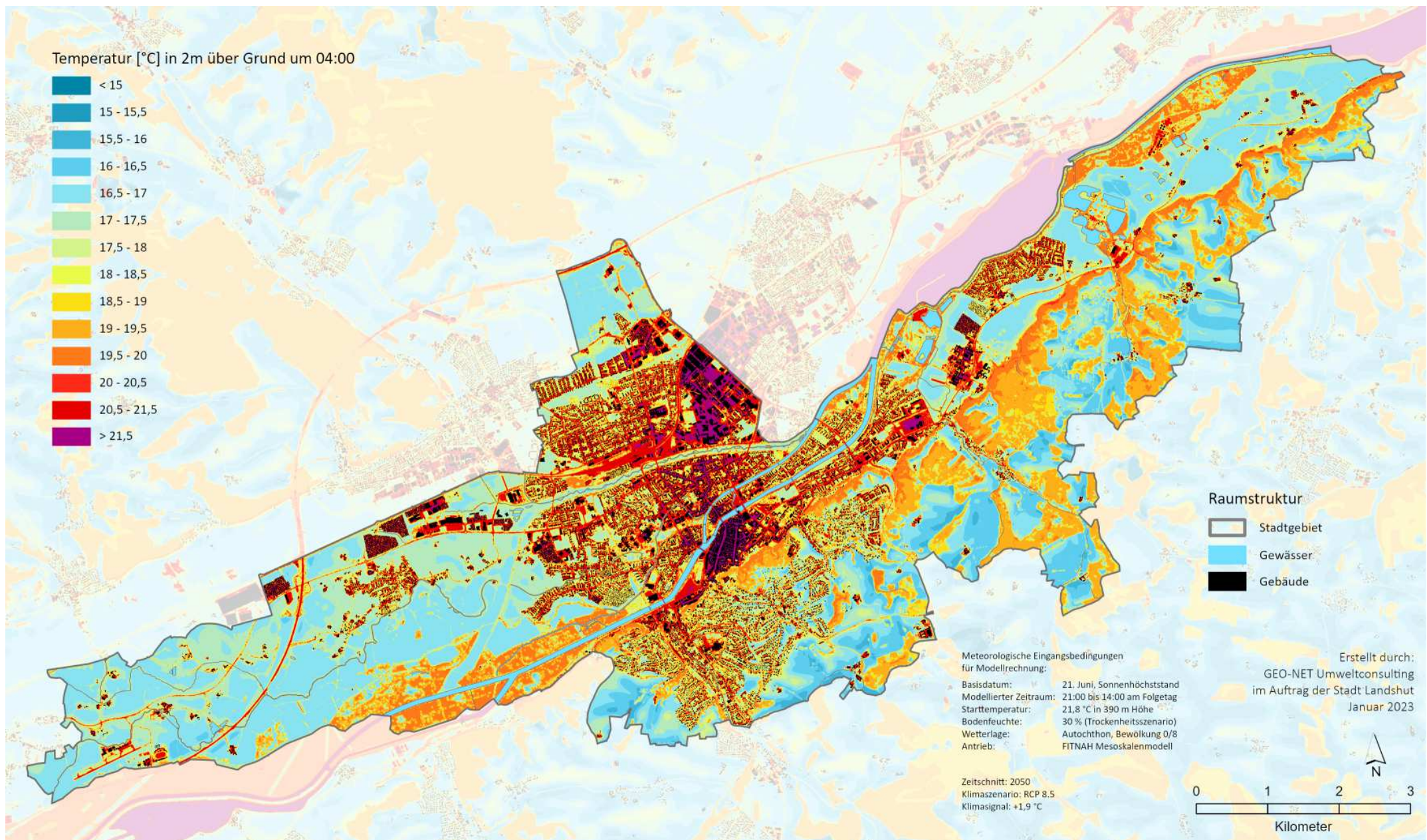


Abb. 23: Nächtlche bodennahe Lufttemperatur – Zukunftsszenario

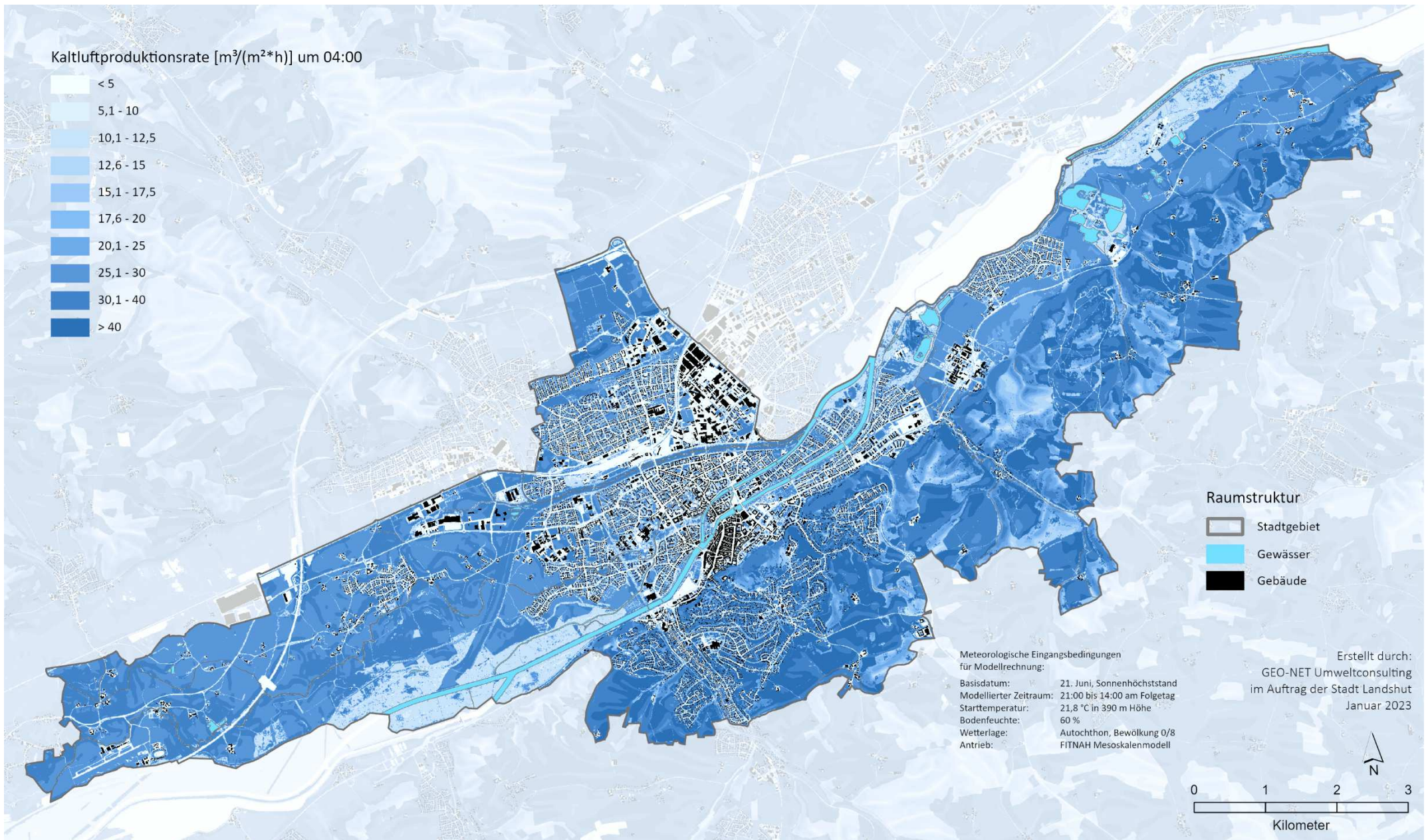


Abb. 24: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate

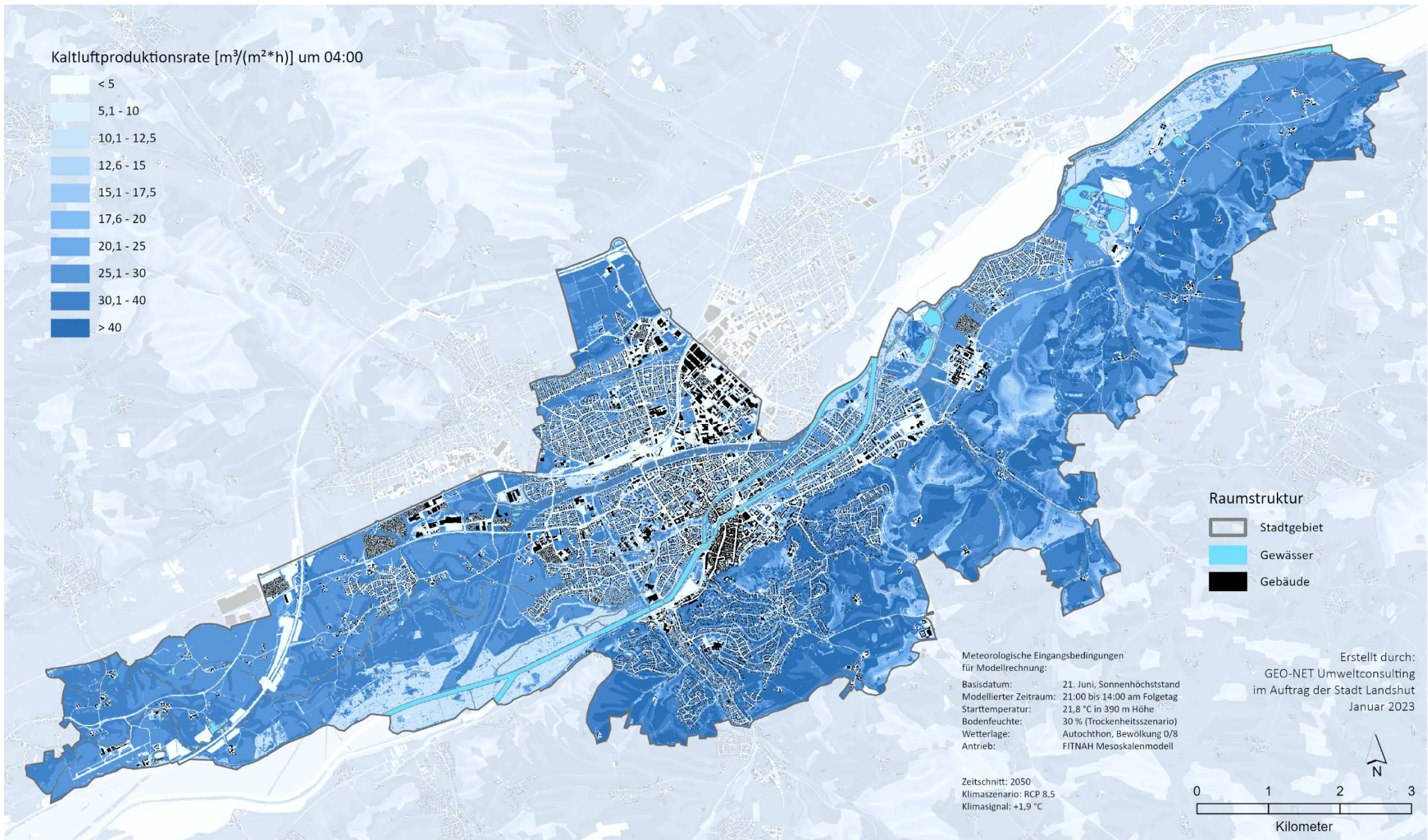


Abb. 25: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate – Zukunftsszenario

4.2. Kaltluftströmungsfeld

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung der Stadtkörper herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in urbanen Bereichen kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauscharmen 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 Grünfläche ein umfassender 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 beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 26).

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 Verlauf 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 luvseitig („vor“ dem Gebäude) markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder unterströmt, kommt es im Lee („hinter“ dem Gebäude) zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen und Verwirbelungen, die in Verbindung

mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße sowie Bebauungsdichte und dem zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

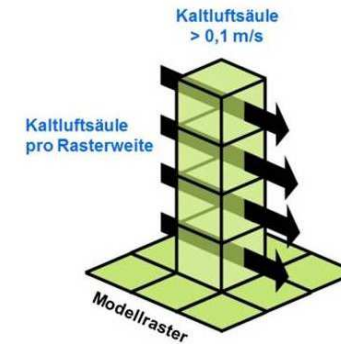


Abb. 26: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine große Variabilität und reicht von sehr gering bis zu maximalen Werten über $70 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Zukunftsszenario: $70 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Der Mittelwert im Landshuter Stadtgebiet liegt bei $13,1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Zukunftsszenario: $13,0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Die höchsten Kaltluftvolumenströme treten als Kaltluftabflüsse aus den Hanglagen der höher gelegenen Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen im südlichen Isarhügelland auf (Abb. 27, 28). Erhöhte Windgeschwindigkeiten und wichtiger Kaltluftzufluss ist vor allem auch in der Flutmulde und der Isar zu finden, welche als sogenannte Kaltluftleitbahnen funktionieren, die signifikant zur Durchlüftung der städtischen Bereiche von Osten und Westen beitragen. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem solche, auf das Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse. Insgesamt werden die Landshuter Siedlungsräume vergleichsweise gut durchströmt. Lediglich das Industriegebiet, Bereiche von Landshut West, Teile der Wolfgangssiedlung und Nikola zeigen einer relativ gering ausgeprägte Durchlüftung. Das hügelige Relief an der Süd- und Nordseite der Isar begünstigt grundsätzlich die Anströmung mit kühleren Luftmassen, während die Eindringtiefe durch unterschiedliche dichte Bebauung beeinflusst wird.

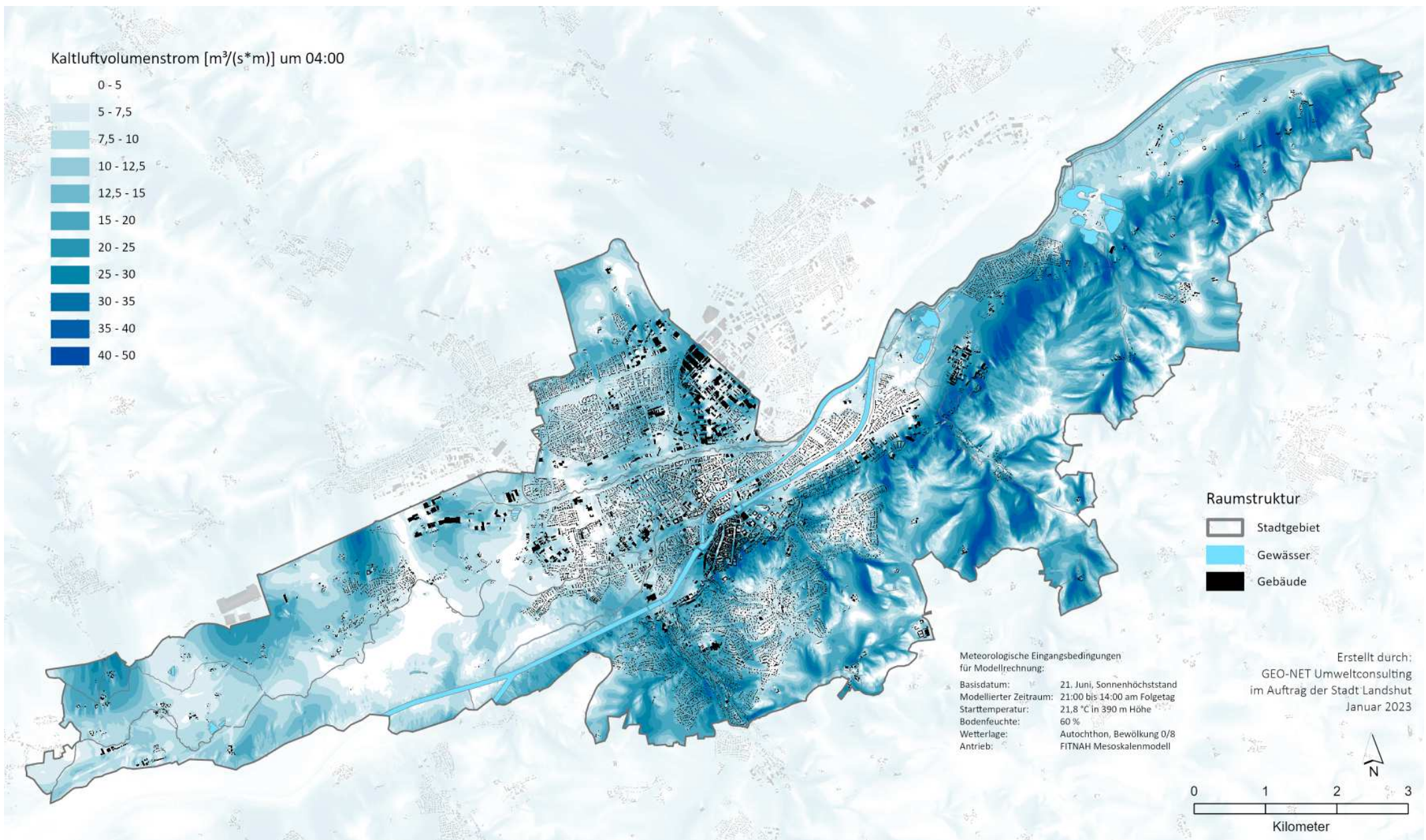


Abb. 27: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom

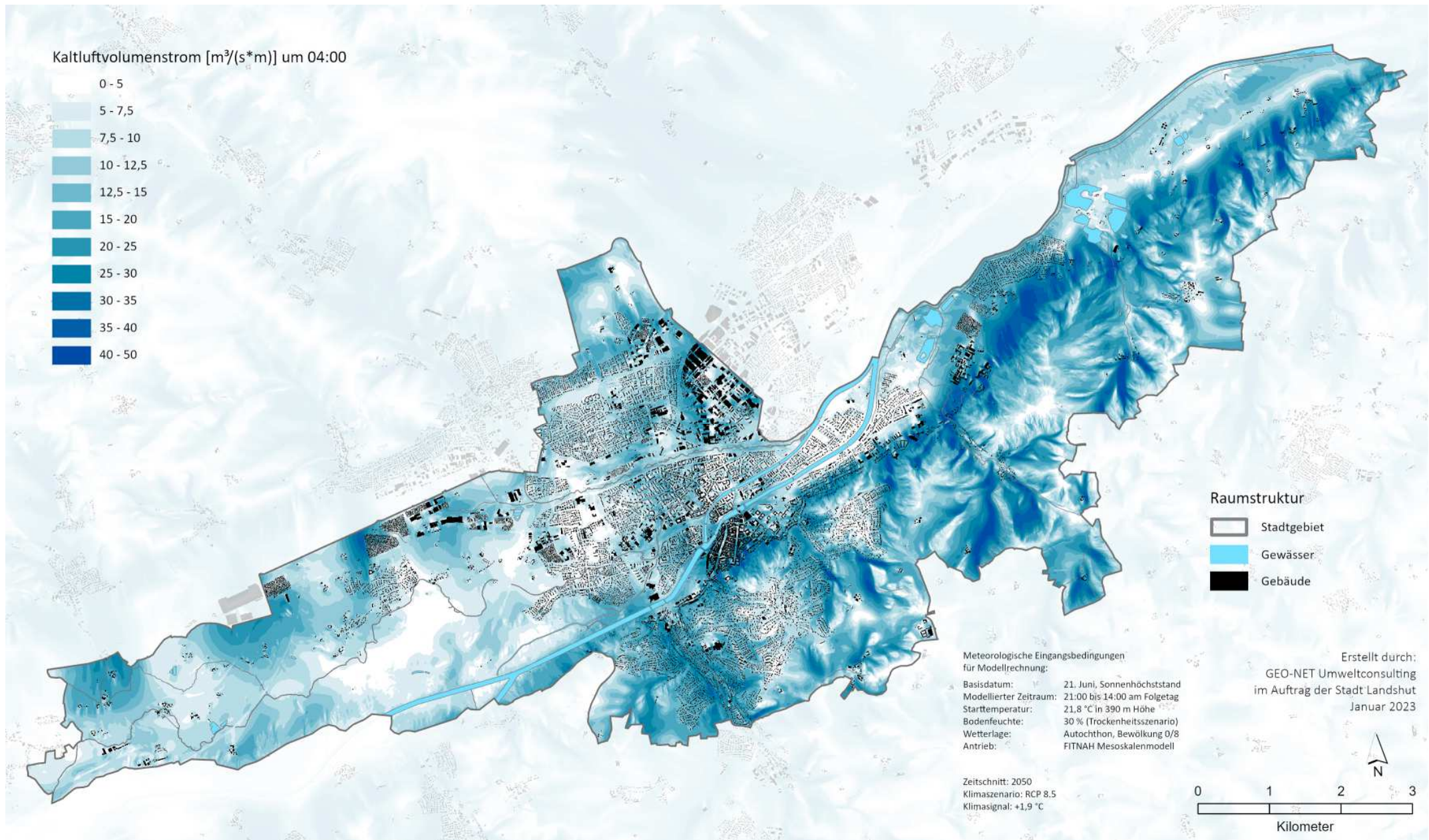


Abb. 28: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Zukunftsszenario

Abb. 29 (Status Quo) und Abb. 30 (Zukunftsszenario) zeigen flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie die Windrichtung (anhand einer Pfeilsignatur⁶) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Die potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen.

Die mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit für das gesamte Stadtgebiet unter autochthonen Wetterbedingungen in einer heißen Sommernacht betragen 0,26 m/s im Status Quo und 0,25 m/s im Zukunftsszenario.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeldes folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Landshuter Stadtgebiet sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis über 1,4 m/s im Bereich der genannten Ausgleichsräume vorzufinden (Kaltluftabflüsse beispielsweise aus den höher gelegenen Freiflächen und landwirtschaftlichen Flächen im Isarhügelland im Süden des Stadtgebiets). Auffällig sind die stark ausgeprägten Kaltluftflüsse an den südlichen Hängen in Richtung des Isartals, welche im Bereich der dort angrenzenden Stadtteile sowie in den Stadtteilen Achdorf und Berg für bedeutende Frischluftzufuhr sorgen. Sobald die bodennahen Windströmungen auf Hindernisse in Form von beispielsweise dichterem Bebauung treffen, ist die Durchlüftung stark vermindert. Wichtige Windströmungen sind ebenfalls aus den nördlich gelegenen Hügeln auf die Siedlungsgebiete im Bereich des Ortsteils Hascherkeller zu finden.

Kleinere (innerstädtische) Grünflächen können lokal für Entlastung sorgen, indem die umliegende Bebauung von deren Kaltluftproduktion und kleinräumigen Strömungen profitiert. Diese sind in begrünten Gärten und Innenhöfen zu erkennen, insbesondere wenn diese im Umfeld stark überwärmter (Gewerbe-) Flächen liegen. Weiterhin ist im innerstädtischen Kontext die kühlende Wirkung des Stadtparks sowie des Hauptfriedhofs auf die angrenzenden Strukturen hervorzuheben. Durch die Kaltluftproduktion entstehen dort lokale Strömungen, die sich positiv auf die thermische Belastungssituation in der anrainenden Siedlungsstruktur auswirkt.

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 (insbesondere in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).

Der Vergleich der Kaltluftvolumenströme und Windgeschwindigkeiten zwischen dem Status Quo und dem Zukunftsszenario zeigt, dass die Maximal- und Mittelwerte sich nur geringfügig unterscheiden. Es ist allerdings zu beachten, dass mögliche Bauvorhaben das Strömungsgeschehen und somit die Durchlüftung und die Kaltluftzufuhr in Zukunft lokal abändern können.

⁶ Die Pfeile wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in einer geringen räumlichen Auflösung abgebildet.

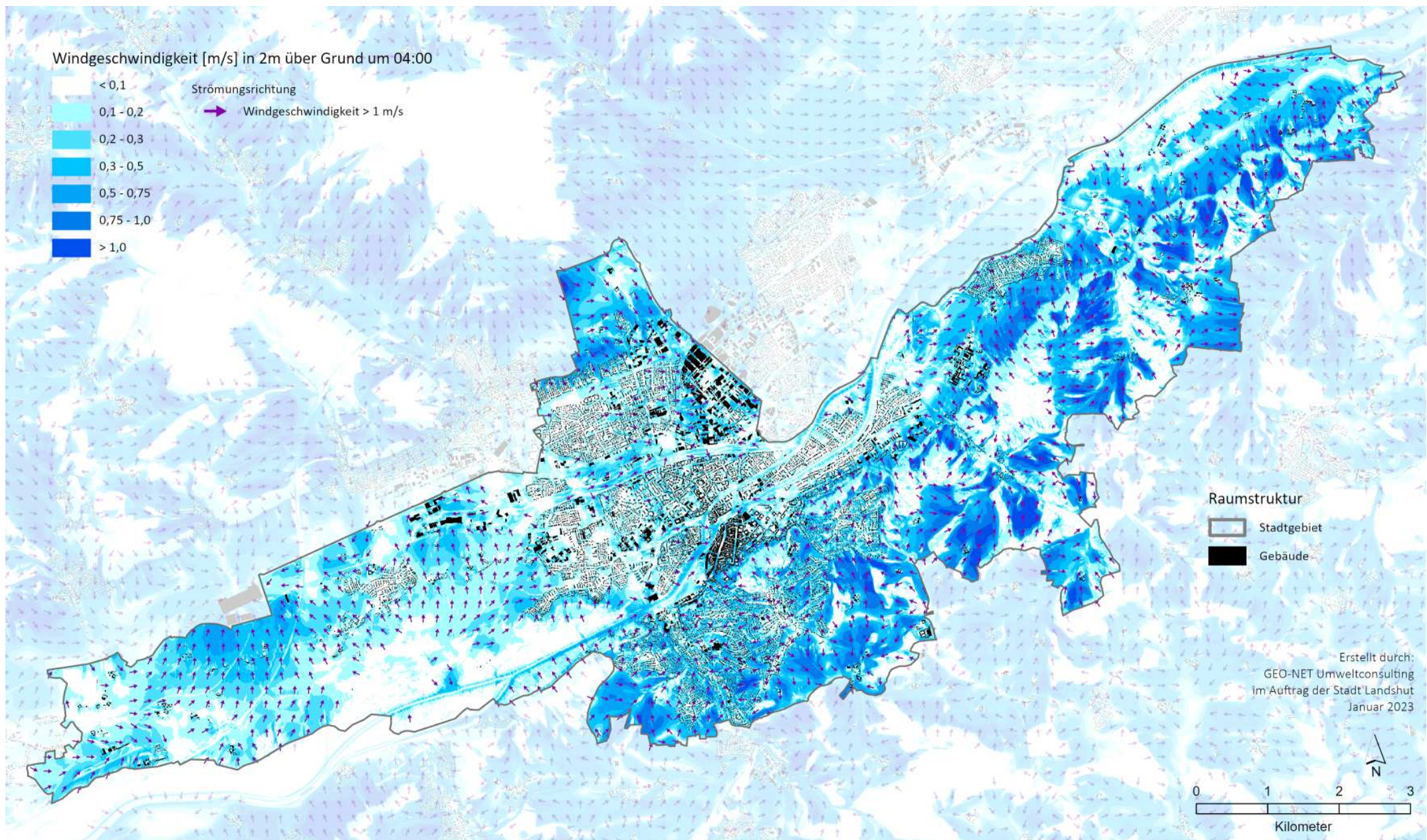


Abb. 29: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld

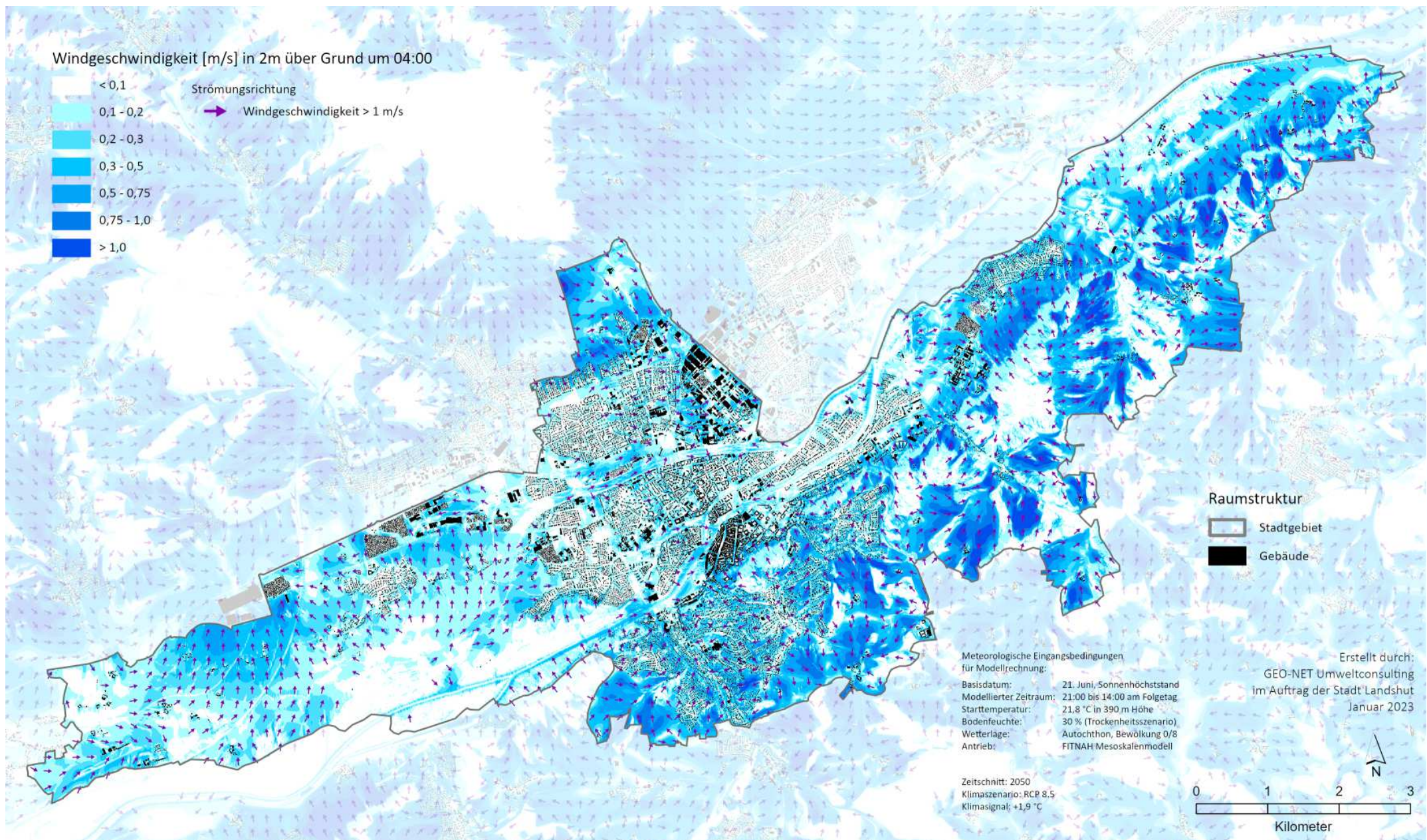


Abb. 30: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld – Zukunftsszenario

4.3. Thermische Belastung am Tag

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, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit der Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen⁷.

In der vorliegenden Stadtklimaanalyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis und Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können⁸. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einem „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen 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 physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 6).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf (Abb. 31, 32). Flächenhaft heben sich bewaldete Gebiete mit den geringsten PET-Werten von meist weniger als 23 °C ab (keine Wärmebelastung). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können, wie z. B. der Hofgarten und der Stadtpark, sowie die Isarauen). Auch Gewässer

weisen vergleichsweise geringe PET-Werte auf und wirken tagsüber kühlend auf ihr nahes Umfeld (beispielsweise die Isar).

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. Dabei zeigt sich ein klarer Zusammenhang zum Baumbestand – je stärker begrünt (vorwiegend Bäume) ein Siedlungsraum, desto geringer ist die Wärmebelastung am Tage. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten, dem historischen Stadtkern, dem Industriegebiet und im Straßenraum zu finden (vereinzelt mehr als 41 °C PET; extreme Wärmebelastung). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte (z. B. landwirtschaftliche Flächen und Grünflächen im Umland). Innerhalb des Stadtgebiets stellen auch kleinere Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar (z.B. die Isarauen, der Stadtpark oder der Hauptfriedhof).

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

Tab. 6: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

⁷ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“, vgl. Jendritzky 1990).

⁸ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universal Thermal Climate Index).

Die Mittelwerte für die PET liegen für das gesamte Stadtgebiet bei 35,6 °C für den Status Quo und 36,0 °C für das Zukunftsszenario, während die Maximalwerte 48,4 °C für den Status Quo und 48,6 °C für das Zukunftsszenario betragen. Auch wenn die Variation zwischen beiden Modellrechnungen nicht sehr groß erscheint, zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Wärmebelastung in dicht bebauten Bereichen mit geringem Baumbestand, wie der Altstadt, dem Industriegebiet und Teilen der nördlich der Flutmulde gelegenen Siedlungsflächen.

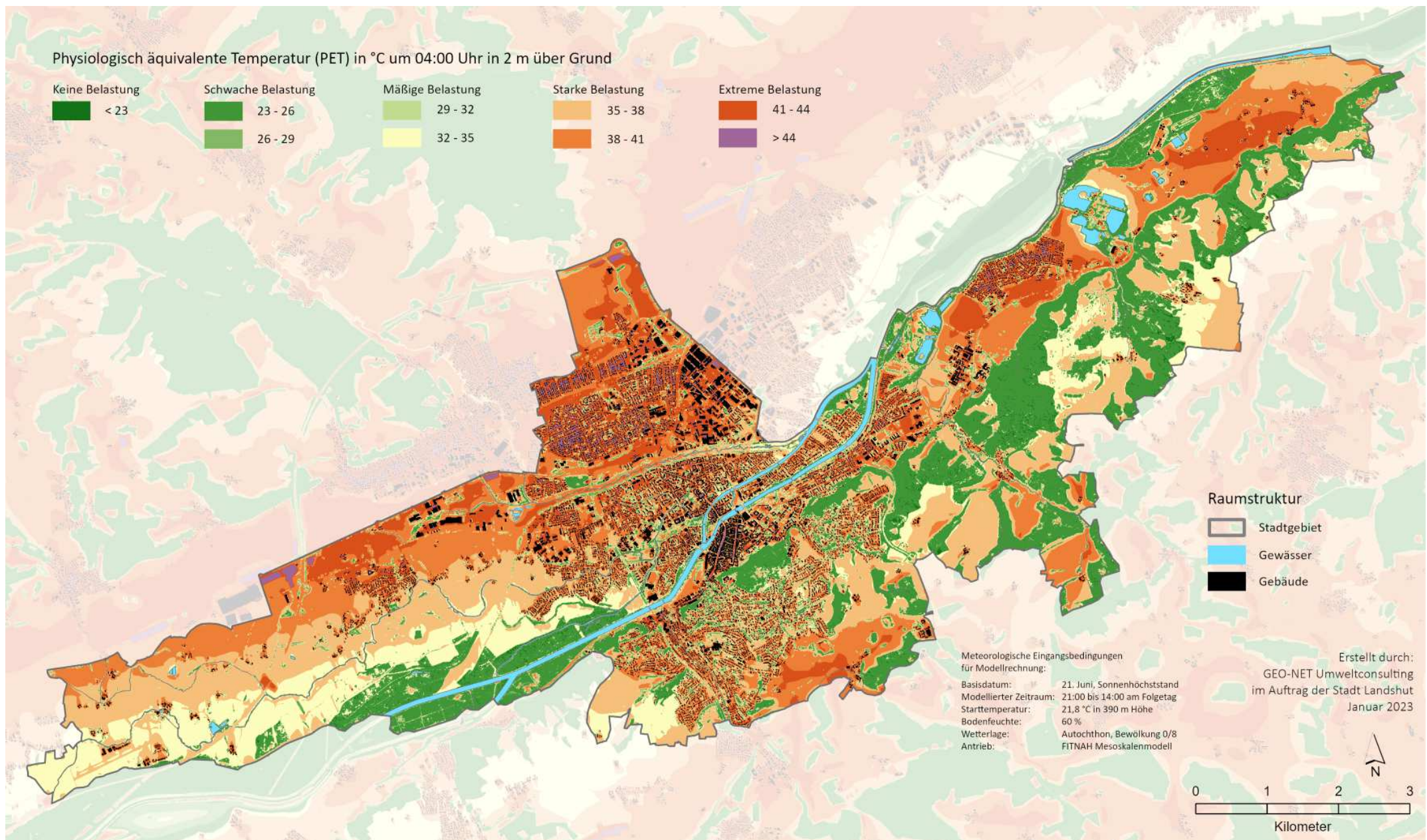


Abb. 31: Wärmebelastung am Tag (PET)

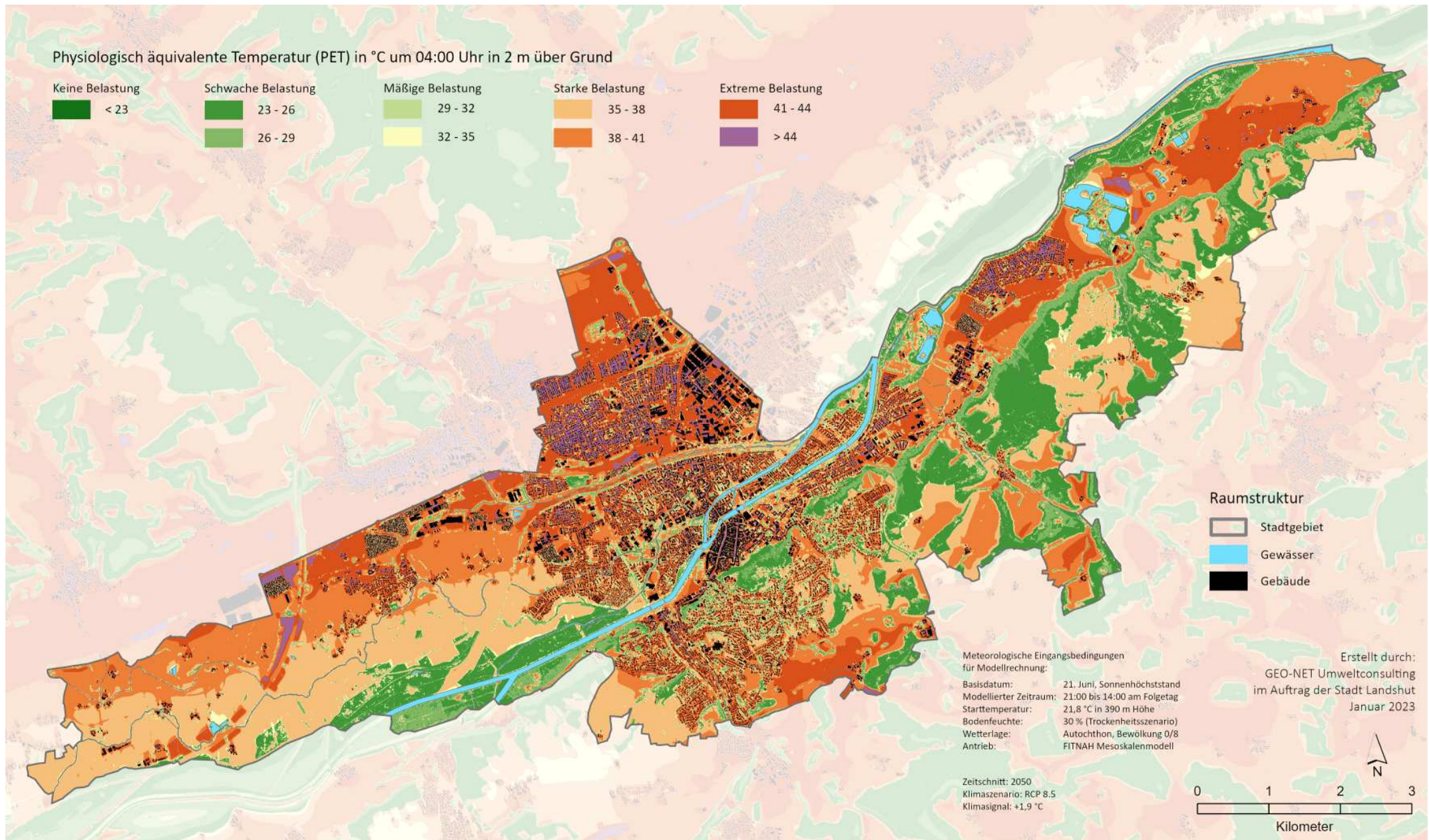


Abb. 32: Wärmebelastung am Tag (PET) – Zukunftsszenario

5. Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14:00 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter (vgl. Kap. 4.3), sodass die Karte der PET als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden kann (Abb. 33, 34).

In der Klimaanalysekarte (Abb. 32, 33) sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen die nächtliche Überwärmung im Vordergrund (Lufttemperatur in 2 m ü. Gr.). Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 200 m aggregiert, sodass kleinräumige Windsysteme aus der Karte nicht ersichtlich werden (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Straßenabschnitten). Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Landshut eine wichtige Rolle spielen: Kaltluftentstehungsgebiete, Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüsse.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftproduktion, unabhängig davon, ob die produzierte Kaltluft den Siedlungsraum erreicht oder nicht. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mindestens $29,7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Zukunftsszenario: $28,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) Kaltluft produzieren (bezogen auf 04:00 Uhr nachts). Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander verbinden und einen elementaren Bestandteil des Luftaustausches darstellen. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, sollten als Faustregel jedoch mindestens 50 m breit sein (Mayer et al. 1994). Insbesondere entlang von Grünachsen dringt Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt

sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Kaltluftabflüsse treten flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf und spielen in hügeligen Bereichen eine wichtige Rolle. Aufgrund der relativ höheren Dichte von Kaltluft setzt sich diese, 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.

Zu den bedeutenden Kaltluftstrukturen in Landshut sind unter anderem die Kaltluftabflüsse im Bereich der Hügel im südlichen Stadtgebiet zu zählen, die insbesondere die höher gelegenen Stadtteile Achdorf, Berg und Moniberg mit kalter Luft versorgen und bioklimatisch begünstigen. Diese Kaltluftabflüsse am Hang dringen auch in die unterhalb im Isartal angrenzenden Stadtteile, wie die Altstadt, Peter und Paul, sowie Schönbrunn vor, wo sie allerdings nach relativ kurzer Distanz (ca. 100 m bis 200 m) deutlich verlangsamt werden. Großflächig treten wichtige Kaltluftströmungen auf den Freiflächen südlich von Auloh auf, welche von den prägnanten Kaltluftabflüssen an den südlichen Hängen gespeist werden. Weitere bedeutende Kaltluftflüsse treten im Bereich von Landshut-West und Hascherkeller im Norden von den Freiflächen auf die Siedlungsflächen gerichtet auf. Die Flutmulde und die Isar transportieren auf Grund ihrer geringen Strömungshindernisse kalte Luft aus dem Umland bis in dichter bebaute Bereiche im Stadtgebiet und erfüllen somit eine wichtige Funktion als Kaltluftleitbahn. Auch der Stadtpark ist als innerstädtische Kaltluftquelle und Kaltlufttransportweg in seiner Funktion hervorzuheben.

Im Zukunftsszenario (Klimaszenario RCP 8.5, Bezugsjahr 2050) zeigt sich der Anstieg der nächtlichen Lufttemperatur in allen Bereichen des Siedlungsraums und verstärkt dadurch die Wärmeinselproblematik. Insbesondere die Altstadt, das Industriegebiet und der Stadtteil Nikola weisen ungünstige nächtliche Lufttemperaturen von über $21 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. Insbesondere die Stadtteile Achdorf, Berg und Moniberg zeigen sich auch im Zukunftsszenario deutlich begünstigt, obwohl sich auch hier die Temperatur auf teilweise über $17 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht.

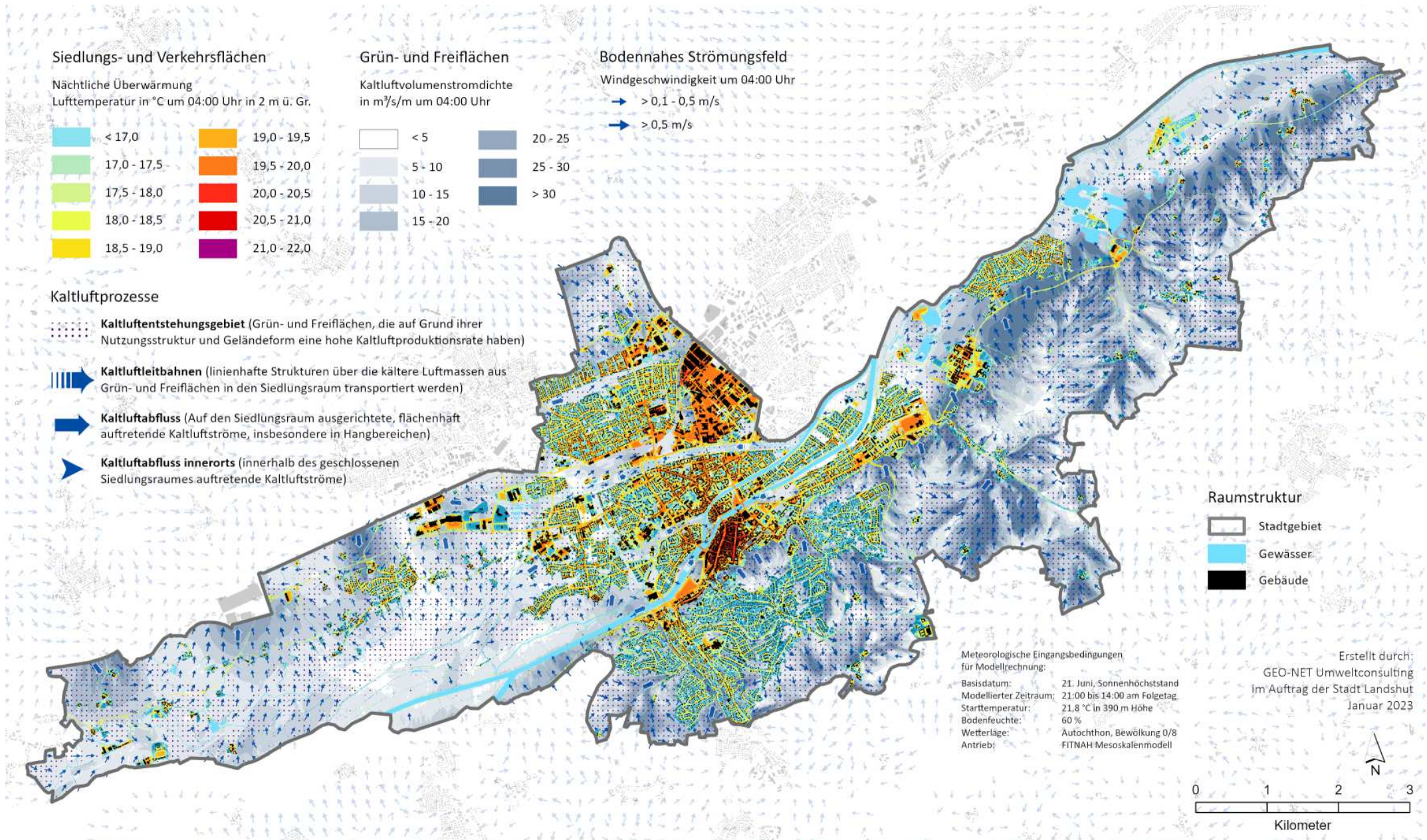


Abb. 33: Klimaanalysekarte der Stadt Landshut

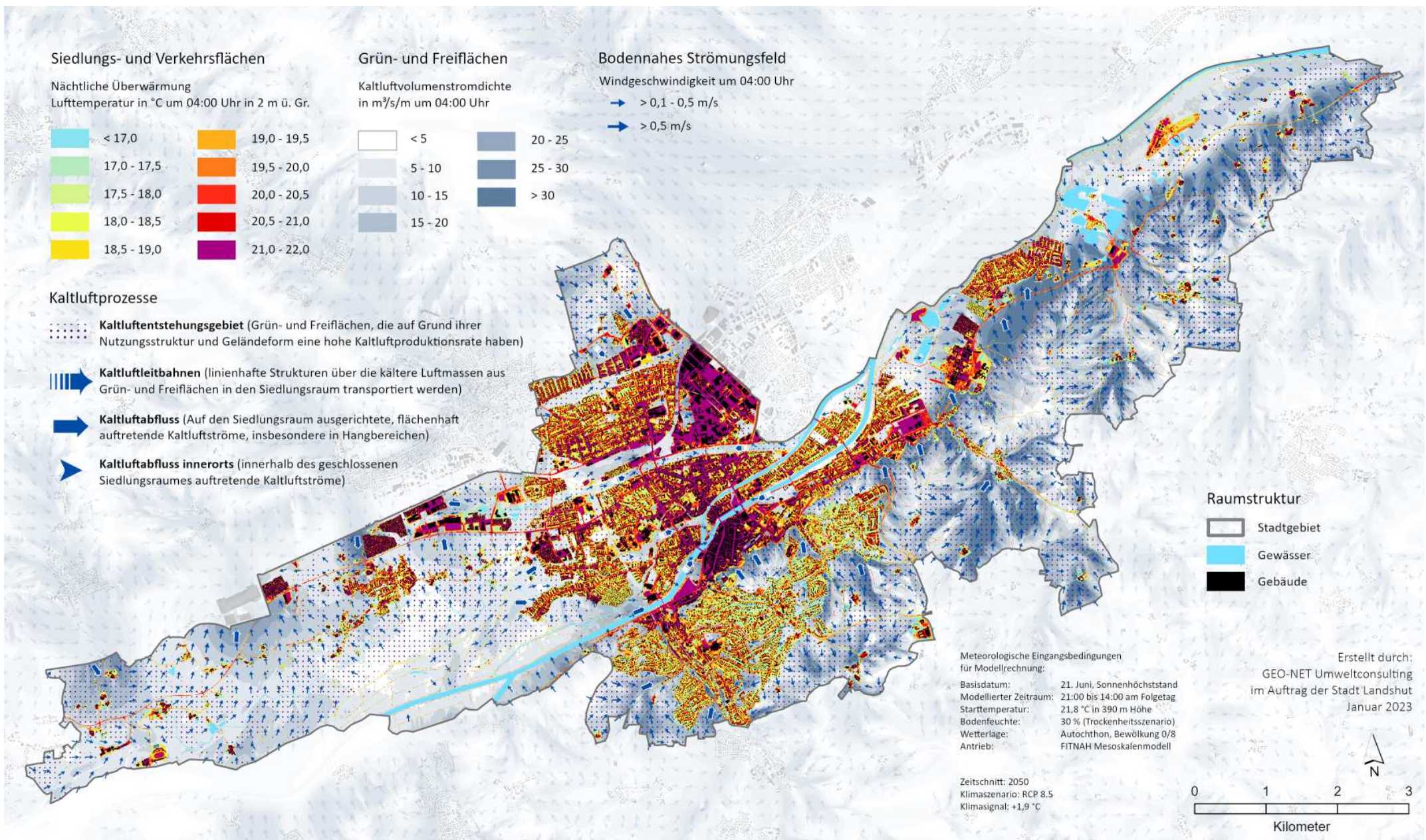


Abb. 34: Klimaanalysekarte der Stadt Landshut – Zukunftsszenario

6. Planungshinweiskarte

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

Dabei wurde eine gemeinsame Planungshinweiskarte für die Nacht- und Tagsituation, sowie den Status Quo und das Zukunftsszenario erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Siedlungsraum (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 Bewertung beruht auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

Ausgehend von ihrer Bewertung wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Welche Maßnahmen zur Verbesserung der stadtklimatischen Situation infrage kommen, wird beispielhaft in dem Bericht „Klimaanpassungskonzept Stadt Landshut“ aufgezeigt.

6.1. Standardisierung der Parameter (z-Transformation)

Für die Bewertung meteorologischer Größen bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie *Hoch* und *Niedrig* oder *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale Wertenniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a). Erstrebenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um diese Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine z-Transformation

standardisiert. Das Ergebnis der z-Transformation sind sog. "z-Werte", die die Standardabweichungen vom Mittelwert darstellen. Ein z-Wert von 0 entspricht genau dem Mittelwert, ein z-Wert von 1 bedeutet, dass der Wert eine Standardabweichung über dem Mittelwert liegt (Abb. 35).

Für die gesamte Planungshinweiskarte umfasst die z-Transformation - zusammengefasst in einer gemeinsamen Statistik - alle Werte der aktuellen klimatischen Situation (Status Quo) und der möglichen zukünftigen Klimaänderungen (Zukunftsszenario) für die temperaturbezogenen Parameter PET und nächtliche Lufttemperatur. Die dabei entstehenden Klassengrenzen werden dabei sowohl auf den Status Quo, als auch auf das Zukunftsszenario angewendet.

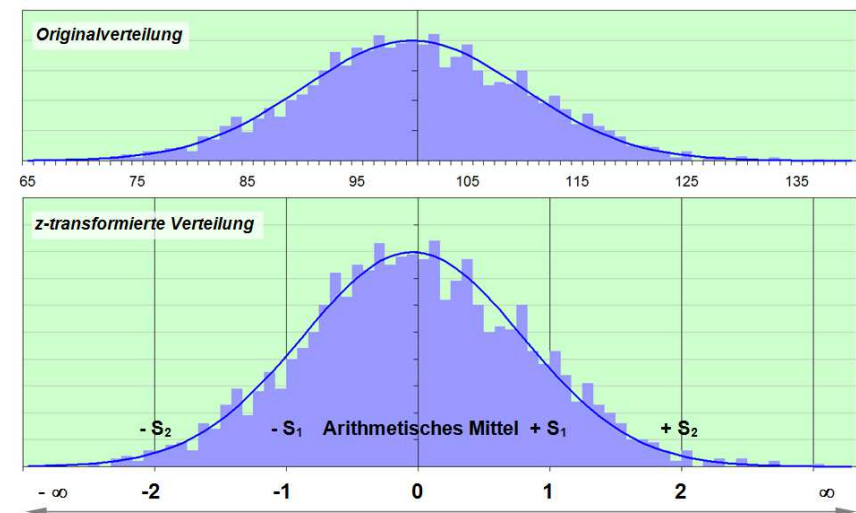


Abb. 35: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

6.2. Bewertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenflächen (Wirkungsraum)

Die Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen sowie der Straßenraum stellen den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Unter Gewerbeflächen werden hier unbewohnte Flächen verstanden (bzw. dominiert die

gewerbliche Nutzung der Fläche), d.h. neben „klassischen“ Industrie- und Gewerbegebieten zählen auch Schulen zu dieser Kategorie. Für Autobahnen und Gleisflächen wird keine Bewertung vorgenommen, da sie keinen Aufenthaltsraum darstellen und i.d.R. nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Wohngebieten liegen bzw. baulich von diesen getrennt sind. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation im Wirkungsraum geschildert.

6.2.1. Bewertung der Nachtsituation

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt, da ein Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, S. 25). Daher sei in den Sommermonaten eine möglichst starke Abkühlung der Luft im Umfeld der Schlafräume (außen) anzustreben. Diesen Gedanken greift das Climate Service Center Germany mit dem „Schlecht-Schlaf-Index“ auf, der über Nächte, in denen die Temperatur im Außenraum 18 °C nicht unterschreitet, definiert ist (GERICS 2019). Sinkt die nächtliche Temperatur nicht unter 20 °C wird von einer Tropennacht gesprochen, die gemeinhin als besonders belastend gilt. Gesetzliche Grenzwerte oder verbindliche Bewertungsskalen zur thermischen Belastung gibt es jedoch weder für den Außenraum noch für den Innenraum.

Für die gemeinsame Planungshinweiskarte erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zu Grunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 7). Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, jedoch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Mittlerer z-Wert	Lufttemperatur in der Nacht [°C]	Qualitative Einordnung
Bis -1	Bis 16,6	1 = Sehr günstig
> -1 bis -0,33	> 16,6 bis 17,8	2 = Günstig
> -0,33 bis 0,33	> 17,8 bis 18,9	3 = Mittel
> 0,33 bis 1	> 18,9 bis 20,1	4 = Ungünstig
> 1	Größer 20,1	5 = Sehr ungünstig

Tab. 7: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung in Siedlungs-, Gewerbe - und Straßenraum mittels z-Transformation.

6.2.2. Bewertung der Tagsituation

Zur Erstellung der Bewertungskarte Aufenthaltsqualität am Tag (kurz PHK Tag) wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.3). Die Bewertung der thermischen Belastung in Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet Landshuts wurde mittels einer z-Transformation in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 8). Die Klassengrenzen spiegeln die lokalen Verhältnisse in Landshut während der betrachteten autochthonen Wetterlage wider. Folglich stimmen sie nicht exakt mit den physiologischen Belastungsstufen der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 überein, zeigen jedoch einen deutlichen Zusammenhang. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität außerhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht bestimmt werden.

Mittlerer z-Wert	PET [°C]	Qualitative Einordnung
Bis -1	Bis 32,8	1 = Sehr günstig
> -1 bis -0,33	> 32,8 bis 36,4	2 = Günstig
> -0,33 bis 0,33	> 36,4 bis 40,0	3 = Mittel
> 0,33 bis 1	> 40,0 bis 43,6	4 = Ungünstig
> 1	Größer 43,6	5 = Sehr ungünstig

Tab. 8: Einordnung der Wärmebelastung am Tag im Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation.

6.3. Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)

In der Planungshinweiskarte steht die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es im Hinblick auf planerische Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Stadtgebiet. Der während einer autochthonen Sommernacht über Grünflächen entstehenden Kaltluft wird nur dann eine planerische Relevanz zugesprochen, wenn sie in Zusammenhang mit Siedlungsräumen steht, die von ihrer Ausgleichsleistung profitieren. Erfüllt eine Grünfläche dagegen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellt keinen Ausgleichsraum dar, ist ihre klimaökologische Bedeutung geringer einzustufen. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden. Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt bewertet und in vier Stufen von *Geringe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt.

6.3.1. Bewertung der Grünflächen in der Nacht

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltfluthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüssen stehende Grünflächen eine *Sehr hohe Bedeutung*, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Kernbereich), und eine *Hohe Bedeutung*, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet). Auch bei den weiteren Grünflächen spielen der Siedlungsbezug und die Funktion des Kaltfluthaushalts 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 (Abb. 36) zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- ➔ Hohe Kaltluftfunktion: Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 12,37 \text{ m}^3(\text{s} \cdot \text{m})$, überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 29,7 \text{ m}^3(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ oder überdurchschnittlich hohe bodennahe Windgeschwindigkeit $0,2 \text{ m/s}$
- ➔ Angrenzender Nahbereich zu Siedlungsräumen: Entfernung bis 30 m Luftlinie

- ➔ Siedlungsbezug: Entfernung bis 600 m Luftlinie

Als Lesehilfe des Bewertungsschlüssels kann folgendes Beispiel dienen: Für eine Grünfläche, die nicht Teil einer Kaltluftleitbahn bzw. eines Kaltluftabflusses ist und im Nahbereich von Wohngebieten mit hoher Belastung liegt, gilt folgende Zuordnung:

- ➔ Die Fläche weist eine hohe Kaltluftfunktion auf
→ sie besitzt eine *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung*
- ➔ Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf
→ sie besitzt eine *Hohe bioklimatische Bedeutung*

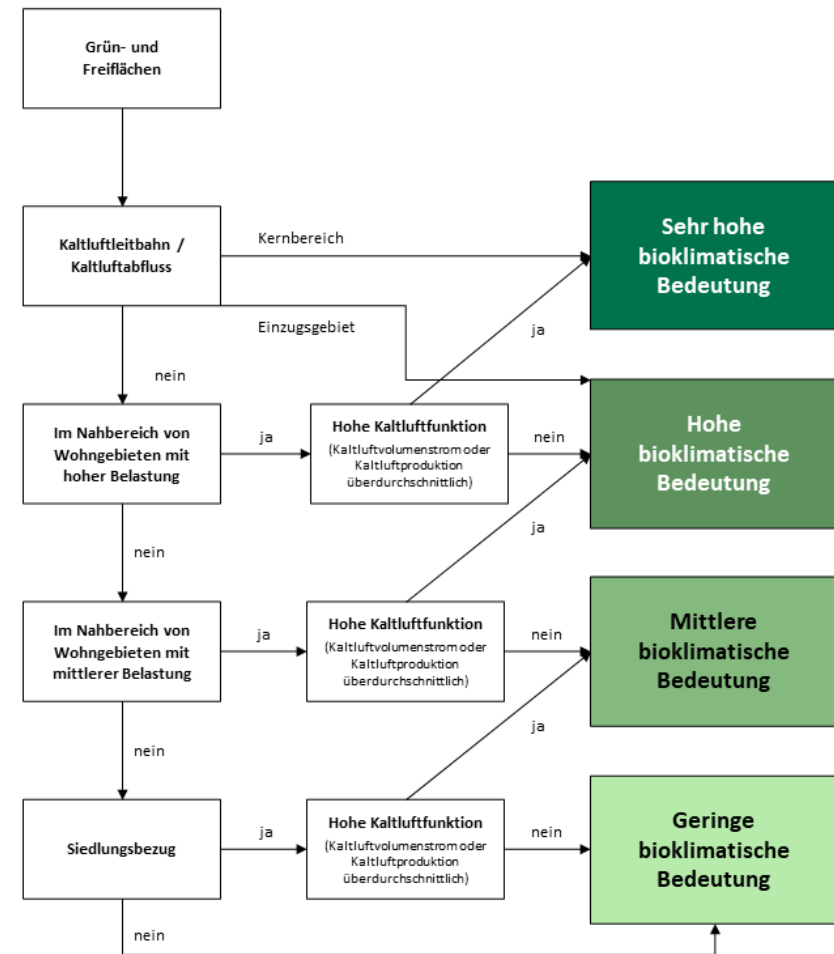


Abb. 36: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

6.3.2. Bewertung der Grünflächen am Tag

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen allein auf der modellierten Wärmelast (PET; Tab. 9). Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

PET [°C]	Bioklimatische Bedeutung
Bis 27,6 °C	Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
27,6 °C bis 31,8 °C	Hohe bioklimatische Bedeutung
31,8 °C bis 36,1 °C	Mittlere bioklimatische Bedeutung
36,1 °C bis 40,3 °C	Geringe bioklimatische Bedeutung
Größer 40,3 °C	Sehr geringe bioklimatische Situation

Tab. 9: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Tagsituation.

6.4. Ergebnisse der Bewertungskarten

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Landshuter Stadtklimaanalyse und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist die Inwertsetzung der Ergebnisse, z.B. in Form der beiden Bewertungskarten, jeweils für die Tag- und die Nachtsituation, sowie der daraus entstehenden gemeinsamen Planungshinweiskarte (PHK). In diesen wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als „Wirkungsraum“ sowie der Grünflächen als „Ausgleichsraum“ hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation vorgenommen und mit allgemeinen Planungshinweisen verbunden. Die Bewertung beruht auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

6.4.1. Bewertungskarten Nacht

In der Bewertungskarte „Nacht“ orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt des Stadtgebiets, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen bzw. den für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden (Abb. 37, 38), in denen möglichst keine Strömungshindernisse geschaffen bzw. bei geplanten baulichen Entwicklungen unbedingt auf den Erhalt der Leitbahn-Funktion hingewirkt werden sollte. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur ausgerichtet, (siedlungsferne) Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind von geringerer Bedeutung. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung jedoch ggf. neu vorgenommen werden.

Neben den Kaltluftleitbahnen ist in der Karte das Strömungsfeld in Pfeilsignatur dargestellt, um das Strömungssystem außerhalb der Siedlungsräume abzubilden und damit mögliche klimaökologische Konflikte bei etwaigen größeren Vorhaben erkennen zu können.

Die Bewertung des Siedlungsraums basiert auf der nächtlichen Überwärmung, sodass die hochversiegelten Gewerbegebiete die ungünstigsten Bedingungen aufweisen. Der

Fokus in der Bewertungskarte Nacht liegt jedoch auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit der Wohnbebauung. In den dichter bebauten Bereichen des Landshuter Stadtgebiets treten teilweise ungünstige bioklimatische Bedingungen auf, zu deren Verbesserung proaktiv Maßnahmen angegangen werden sollten. Im überwiegenden Teil der Landshuter Wohngebiete ist ein mittleres oder günstiges Belastungsniveau (aufgrund aufgelockerter Strukturen und guter Durchlüftung) vorzufinden. Proaktive Maßnahmen zur Verbesserung sind daher nicht vorrangig umzusetzen, sollten aber bei sich bietender Gelegenheit geprüft werden (beispielsweise bei Straßensanierungen). Zudem sollte bei Nachverdichtungen auf die begleitende Umsetzung optimierender Maßnahmen hingewirkt werden (z.B. Verschattungsmaßnahmen für Gebäudefassaden).

Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund (aufgrund dessen wird von einer Darstellung des Straßenraums in der Bewertungskarte Nacht abgesehen), jedoch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

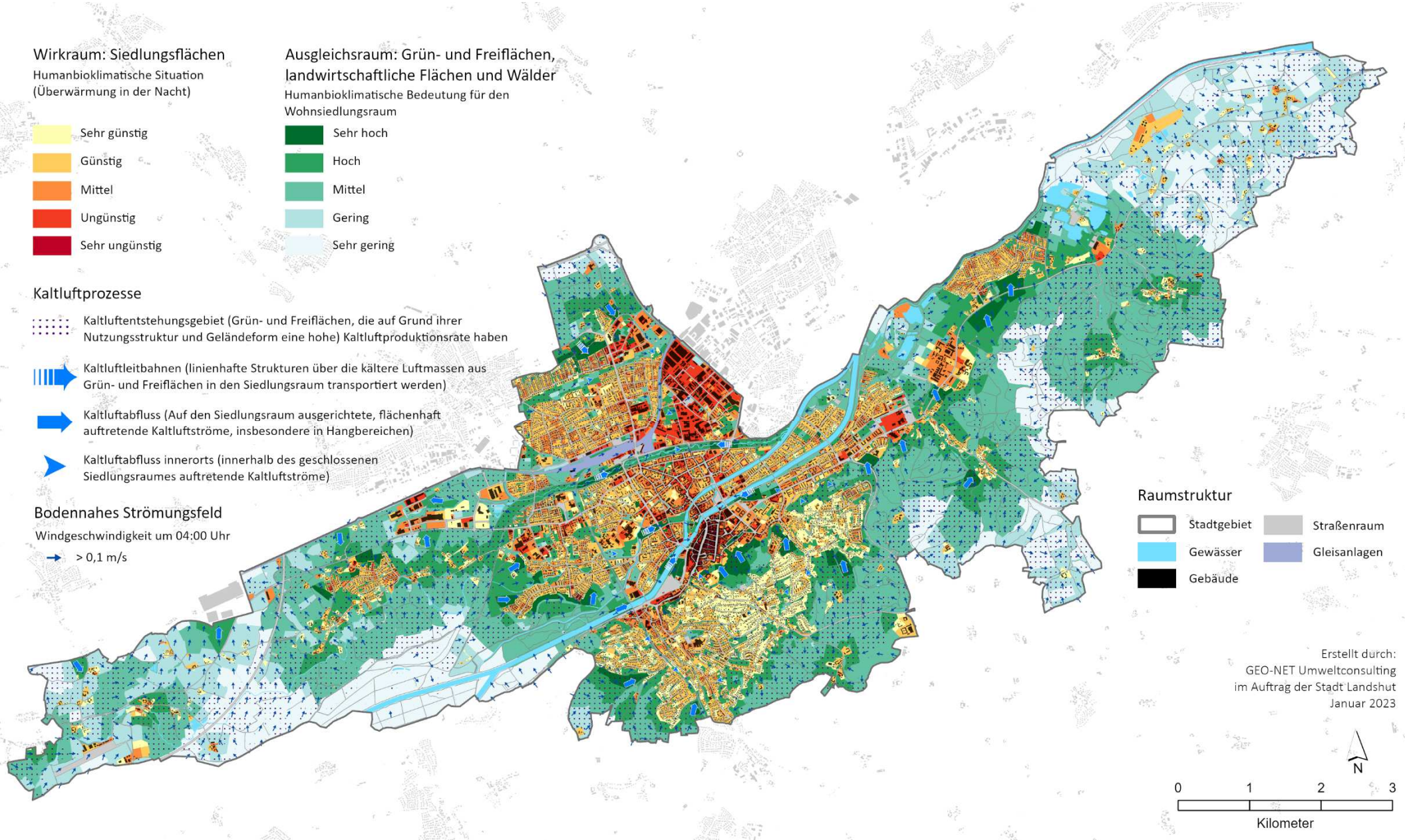
Infolge des Klimawandels ist in Landshut zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrt auftretenden Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorherrscht. Tab. 10 und 11 zeigen die Veränderung der Flächenanteile der humanbioklimatischen Bewertung für den Status Quo und das Zukunftsszenario. Demnach ist zu erwarten, dass sich insbesondere im Siedlungsraum die bioklimatischen Verhältnisse in der Nachtsituation in Zukunft weiter verschlechtern.

Humanbioklimatische Situation (Wohnen und Gewerbe)	Flächenanteil [%]	
	Status Quo	Zukunftsszenario
1 = Sehr günstig	20,3%	0,0%
2 = Günstig	44,1%	3,5%
3 = Mittel	23,2%	31,4%
4 = Ungünstig	11,9%	38,5%
5 = Sehr ungünstig	0,5%	26,6%

Tab. 10: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsfläche Bewertungskarten Nacht.

Humanbioklimatische Bedeutung der Freiflächen	Flächenanteil [%]	
	Status Quo	Zukunftsszenario
1 = Sehr hoch	21,9%	22,3%
2 = Hoch	17,1%	17,3%
3 = Mittel	39,7%	37,2%
4 = Gering	17,8%	12,6%
5 = Sehr gering	3,5%	10,5%

Tab. 11: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Freiflächen Bewertungskarten Nacht.



Wirkraum: Siedlungsflächen
Humanbioklimatische Situation
(Überwärmung in der Nacht)

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

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder
Humanbioklimatische Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum

- Sehr hoch
- Hoch
- Mittel
- Gering
- Sehr gering

Kaltluftprozesse

- Kaltluftentstehungsgebiet (Grün- und Freiflächen, die auf Grund ihrer Nutzungsstruktur und Geländeform eine hohe Kaltluftproduktionsrate haben)
- Kaltluftleitbahnen (linienhafte Strukturen über die kältere Luftmassen aus Grün- und Freiflächen in den Siedlungsraum transportiert werden)
- Kaltluftabfluss (Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme, insbesondere in Hangbereichen)
- Kaltluftabfluss innerorts (innerhalb des geschlossenen Siedlungsraumes auftretende Kaltluftströme)

Bodennahes Strömungsfeld

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

Raumstruktur

- Stadtgebiet
- Straßenraum
- Gewässer
- Gleisanlagen
- Gebäude

Erstellt durch:
GEO-NET Umweltconsulting
im Auftrag der Stadt Landshut
Januar 2023

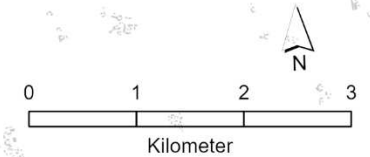


Abb. 37: Bewertungskarte Nacht Stadt Landshut

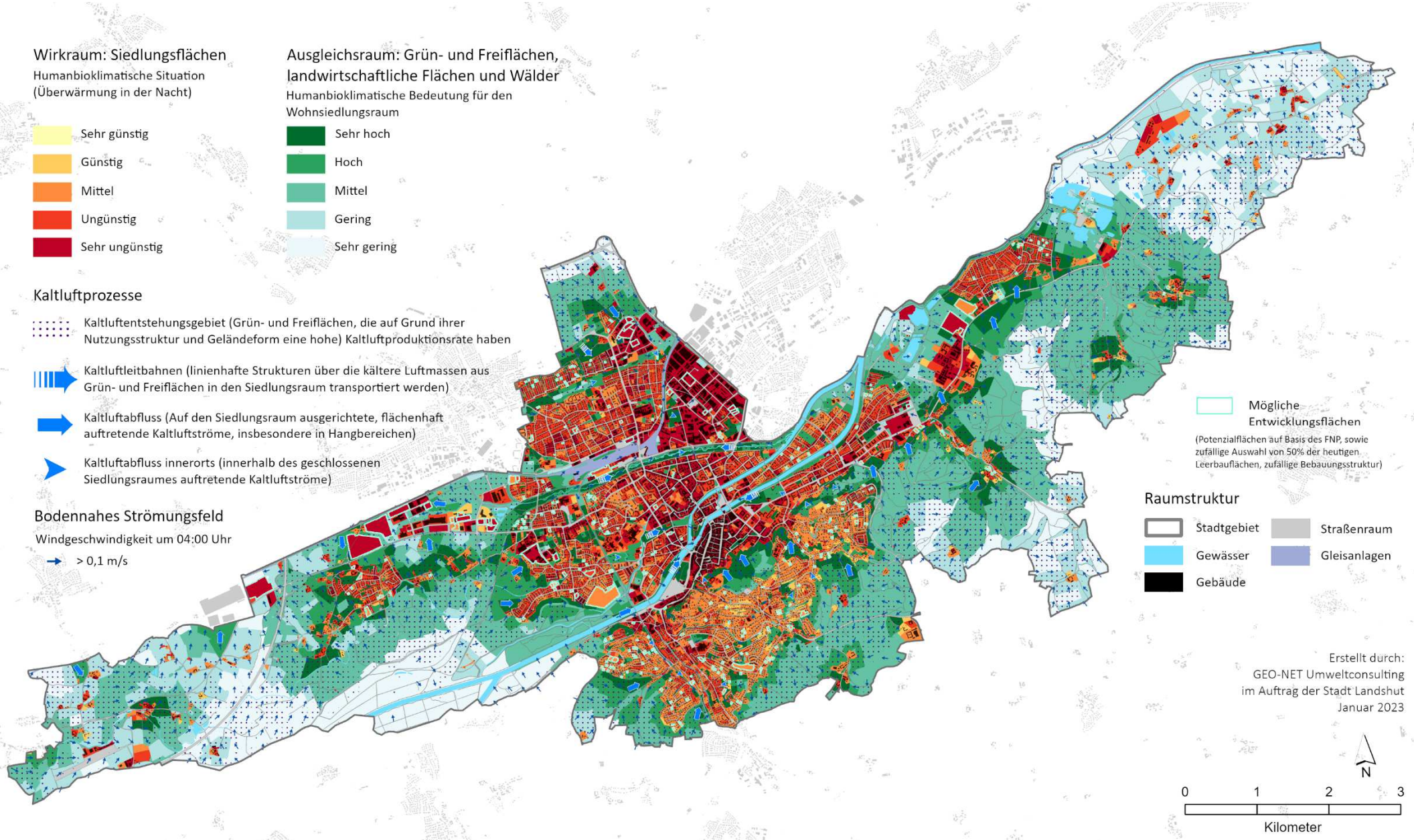


Abb. 38: Bewertungskarte Nacht Stadt Landshut – Zukunftsszenario

6.4.2. Bewertungskarten Tag

Die Bewertungskarte „Tag“ betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden auf den Siedlungsflächen (Abb. 39, 40). Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung. In den Vordergrund rücken zudem der Straßenraum für Wegebeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen. Die Bewertungen einzelner Flächen weichen teilweise von der Nachtsituation ab, was durch eine andere Farbwahl kenntlich gemacht werden soll.

Dies wird gerade bei den Grünflächen deutlich, deren Bedeutung dann am höchsten ist, wenn sie eine hohe Aufenthaltsqualität durch verschattete Bereiche bieten, fußläufig erreichbar und zudem öffentlich zugänglich sind (Hauptausgleichsräume).

Die höchsten Belastungen im Siedlungsraum treten in hochversiegelten Räumen mit geringer Grünausstattung auf, insbesondere in Gewerbegebieten und auf Plätzen. Im Vergleich zur Nachtsituation verschlechtert sich die Tagsituation im Zukunftsszenario nicht so stark. Dennoch zeigen insbesondere dicht bebaute und hoch versiegelte Bereiche, die schon im Status Quo stark wärmebelastet sind, wie das Industriegebiet und die Altstadt, sowie große Teile des Straßenraums deutlich ungünstigere humanbioklimatische Bedingungen im Zukunftsszenario.

Humanbioklimatische Situation (Wohnen und Gewerbe)	Flächenanteil [%]	
	Status Quo	Zukunftsszenario
1 = Sehr günstig	5,8%	3,3%
2 = Günstig	20,7%	11,9%
3 = Mittel	41,6%	40,7%
4 = Ungünstig	31,0%	40,1%
5 = Sehr ungünstig	0,9%	4,0%

Tab. 12: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsraum Bewertungskarte Tag.

Humanbioklimatische Situation der Straßen und Plätze (ohne Autobahn)	Flächenanteil [%]	
	Status Quo	Zukunftsszenario
1 = Sehr günstig	16,4%	13,0%
2 = Günstig	20,1%	15,1%
3 = Mittel	34,2%	30,2%
4 = Ungünstig	28,8%	38,4%
5 = Sehr ungünstig	0,5%	3,4%

Tab. 13: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Verkehrsflächen Bewertungskarte Tag.

Humanbioklimatische Bedeutung der Freiflächen	Flächenanteil [%]	
	Status Quo	Zukunftsszenario
1 = Sehr hoch	9,7%	16,4%
2 = Hoch	29,6%	37,9%
3 = Mittel	28,8%	14,4%
4 = Gering	4,4%	5,5%
5 = Sehr gering	27,6%	25,8%

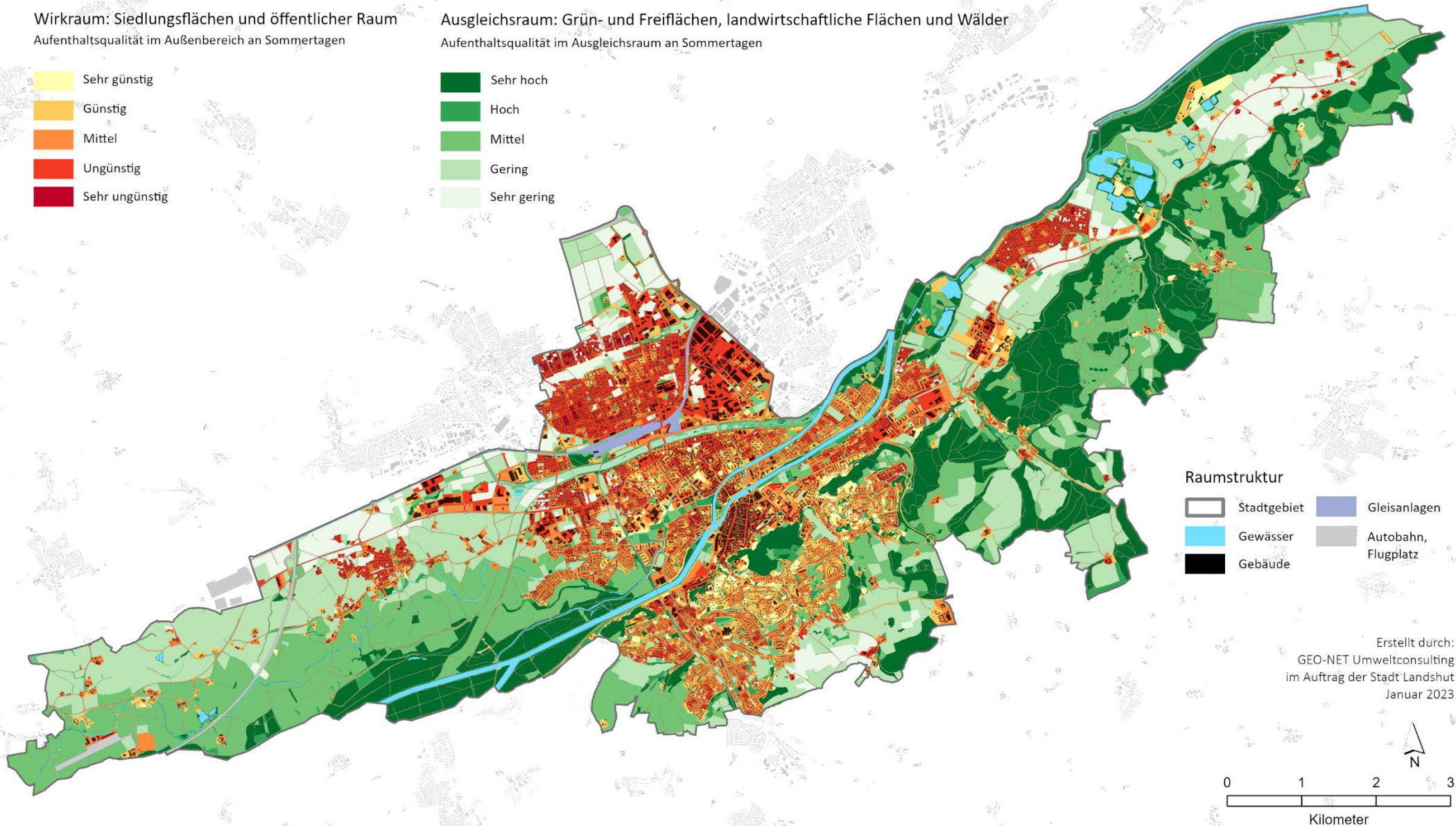
Tab. 14: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Grün- und Freiflächen Bewertungskarte Tag.

Wirkraum: Siedlungsflächen und öffentlicher Raum
Aufenthaltsqualität im Außenbereich an Sommertagen

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

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder
Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum an Sommertagen

- Sehr hoch
- Hoch
- Mittel
- Gering
- Sehr gering



Raumstruktur

- Stadtgebiet
- Gleisanlagen
- Gewässer
- Autobahn, Flugplatz
- Gebäude

Erstellt durch:
GEO-NET Umweltconsulting
im Auftrag der Stadt Landshut
Januar 2023

Abb. 39: Bewertungskarte Tag Stadt Landshut

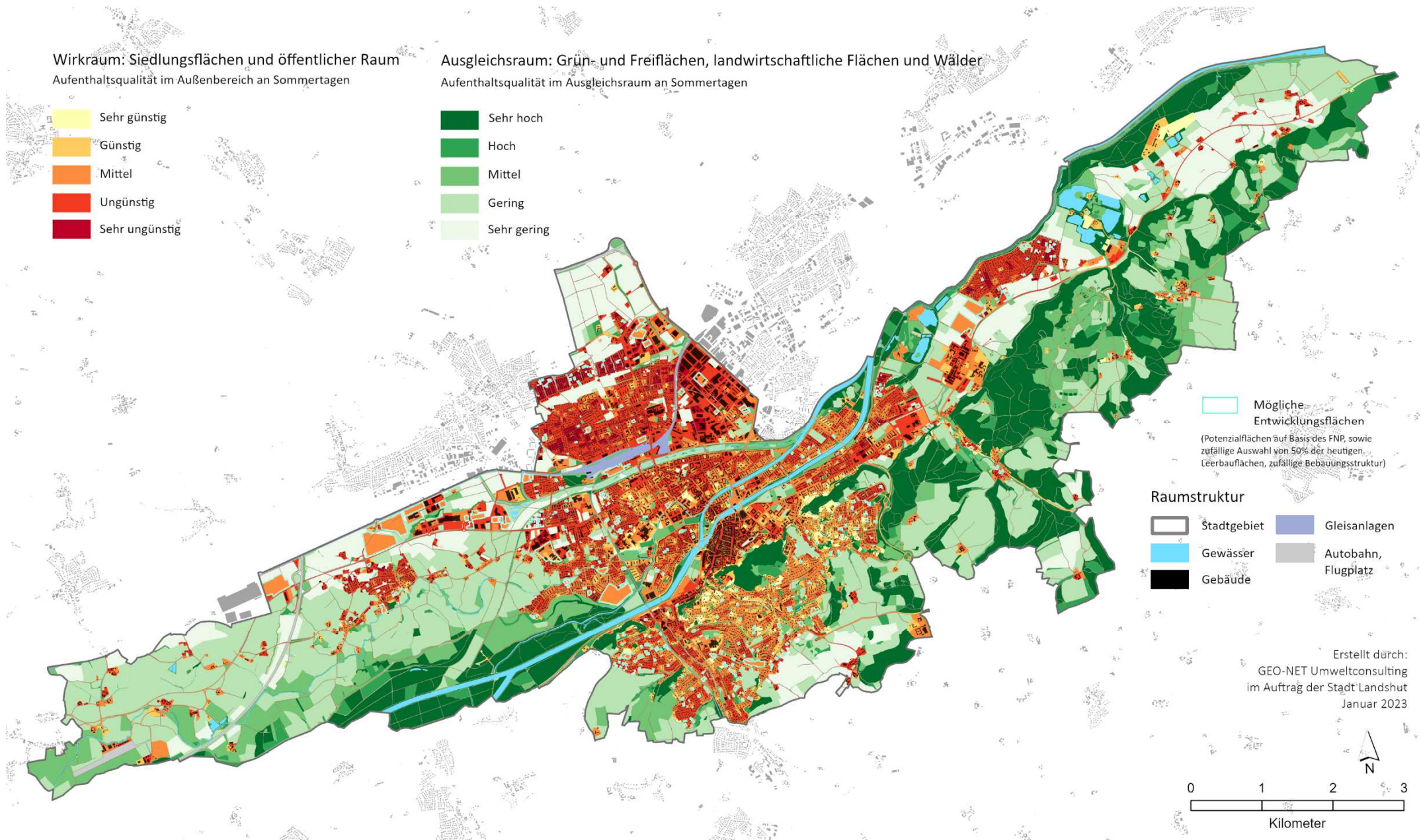


Abb. 40: Bewertungskarte Tag Stadt Landshut – Zukunftsszenario

6.5. Gemeinsame Planungshinweiskarte

Für die gemeinsame Planungshinweiskarte werden die Ergebnisse aus der Bewertungskarte Tag und der Bewertungskarte Nacht, sowie aus dem Status Quo und dem Zukunftsszenario miteinander verschnitten. Für die Bewertung der Flächen werden folgende in den Bewertungskarten ermittelte Faktoren einbezogen:

- ➔ Nächtliche Überwärmung im Siedlungsraum
- ➔ Thermische Belastung am Tag, dargestellt durch die PET, im Siedlungsraum
- ➔ Bewertung der Rolle der Freiflächen im nächtlichen Kaltlufthaushalt der Stadt Lands-hut
- ➔ Funktion der Freifläche als Ausgleichraum am Tag

Die thermische Belastungssituation pro Fläche im Siedlungsraum in der Nacht- wie der Tagsituation wird in Handlungsprioritäten für die jeweiligen Raumeinheit übersetzt. Flächen die tagsüber eine hohe Wärmebelastung (PET) aufweisen und auch in der Nacht nur geringfügig abkühlen, erhalten somit die höchste Handlungspriorität (1 oder 2; vgl. Tab 15). Entsprechende Flächen sind beispielsweise in der Altstadt Lands-huts, dem Industriegebiet, sowie in Bereichen des Stadtteils Nikola zu finden (Geringe Verschattung am Tag und hohe nächtliche Überwärmung).

Die Handlungspriorität stellt somit eine graduelle Abstufung zur Identifizierung der Wärmebelastung am Tag und in der Nacht, sowie im Status Quo und dem Zukunftsszenario dar. Die allgemeinen Planungshinweise stellen in Zusammenhang mit der Handlungspriorität Handlungsempfehlungen zur Einbindung von stadtklimatischen Maßnahmen bei möglichen Bauvorhaben auf den Flächen dar. Grundgedanke ist dabei unter Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel eine stadtklimatische Verbesserung der Flächen anzustreben.

Stadtklimatische Handlungspriorität im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Handlungspriorität 1	0,6	Zusätzlich zu den unten genannten Empfehlungen sind Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation im Bestand anzustreben. Bei Neubauten ist die Möglichkeit einer klimagerechten Gebäudekühlung zu prüfen.
Handlungspriorität 2	16,3	
Handlungspriorität 3	6,7	Bei Nachverdichtungen, Umbauten und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende, optimierende Maßnahmen umzusetzen (beispielsweise Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen) ⁹ .
Handlungspriorität 4	26,8	
Handlungspriorität 5	14,0	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.).
Handlungspriorität 6	23,9	
Keine vorrangige Handlungspriorität	11,9	

Tab. 15: Flächenanteile Handlungsprioritäten im Wirkraum (Siedlungsflächen, öffentlicher Raum) und abgeleitete Planungshinweise in der gemeinsamen Planungshinweiskarte.

⁹ Als klimaökologische Standards sind u.a. eine möglichst geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung auf niedrigen Gebäuden mit Flachdach möglich.

Die Grün- und Freiflächen werden anhand ihrer Funktion in Bezug auf den Kaltlufthaushalt Landshuts in der Nacht und ihre Rolle als Ausgleichsraum am Tag in Klassen des Schutzbedarfs eingeteilt (Tab. 16). Somit erhalten Kaltluft liefernde Flächen mit einer hohen Ausgleichsfunktion am Tag in der gemeinsamen Planungshinweiskarte einen sehr hohen Schutzbedarf.

Stadtklimatischer Schutzbedarf des Ausgleichsraums	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
Sehr hoher Schutzbedarf	25,0	Bei Eingriffen in die Flächen ist die jeweilige stadtklimatische Funktion zu erhalten (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten (städtische Fachstelle, bei Bedarf externe Expertise) ¹⁰ .
Hoher Schutzbedarf	24,9	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bauliche Entwicklungen sollten klimafachlich begleitet werden (städtische Fachstelle, bei Bedarf externe Expertise).
Erhöhter Schutzbedarf	25,4	Bei Eingriffen in die Flächen sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen zu beachten (bspw. Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei großflächigen baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
Kein besonderer Schutzbedarf	24,7	

Tab. 16: Stadtklimatischer Schutzbedarf im Ausgleichsraum (Grünflächen, Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen, Wälder) und abgeleitete Planungshinweise gemeinsame Planungshinweiskarte.

¹⁰ Mit einer klimafachlichen Stellungnahme werden die Auswirkungen einer Planung auf das Stadtklima auf Basis bestehender Karten verbal-argumentativ beurteilt und aus fachlicher Sicht Hinweise zur Optimierung der Planung gegeben. Die Stellungnahme kann durch ein städtisches Fachamt oder externes Gutachterbüro erfolgen.

Zusätzlich dargestellter Parameter „Kaltlufteinwirkungsbereich“

Das Wohlbefinden und die Schlafqualität im Siedlungsraum hängen, wie zuvor erläutert, wesentlich von der Außentemperatur im Wohnumfeld ab. Zusätzlich spielt die Durchlüftung des Siedlungsraums eine Rolle. Im besten Falle kann herantransportierte Kaltluft die Überwärmung senken und zu günstigeren Bedingungen beitragen. Doch handelt es sich beim Begriff „Kaltluft“ um eine relative Angabe: Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens gibt es bisher nicht (VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5¹¹). Kaltluft im Zentrum ist also in der Regel wärmer als Kaltluft in aufgelockerten Siedlungsrandbereichen. Allerdings trägt der rein dynamische Aspekt der Luftbewegung – unabhängig davon, ob die Außentemperatur dadurch weiter gesenkt wird – über die Fensterlüftung zum Luftaustausch der tagsüber aufgeheizten Innenräume bei. Daher ist eine nächtliche Strömung im Wohnumfeld bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen auch ohne eine zusätzliche Kühlleistung im Außenbereich als erhaltenswert zu betrachten.

Aus diesem Grund werden Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen mit einer hohen Durchlüftung als Kaltlufteinwirkungsbereich gekennzeichnet (überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom oder Windgeschwindigkeit). Der Kaltlufteinwirkungsbereich wird in der gemeinsamen Planungshinweiskarte über eine Signatur hervorgehoben, fließt jedoch nicht in die bioklimatische Bewertung der Siedlungsflächen ein. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche oder Straße als Kaltlufteinwirkungsbereich ausgewiesen. Entsprechende Bereiche kommen im gesamten Stadtgebiet vor und stehen meist in Zusammenhang zu Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüssen oder treten in den hügeligen Bereichen des Stadtgebiets auf.

¹¹ Die Aktualisierung der VDI-Richtlinien insbes. Zur physikalischen Einordnung des Begriffs Kaltluft wird für Mitte 2023 erwartet.

Zusätzlich dargestellter Parameter „Entlastungsraum“

Als Entlastungsraum sind in der gemeinsamen Planungshinweiskarte Grünflächen und Wälder dargestellt, denen durch ihre Nähe innerhalb von 300 m zu stark belasteten Siedlungsräumen eine besondere Bedeutung zur Erholung der Bevölkerung einerseits und für das Kaltluftprozessgeschehen andererseits zukommt.

Für den Kaltlufthaushalt wichtige Flächen (wie beispielsweise in Landshut-West, Häscherkeller oder Auloh) können an Sommertagen in ihrer Funktion als Ausgleichsräume von geringerer Bedeutung sein, da die fehlende Verschattung zu einer starken Wärmebelastung führt. Umgekehrt weisen Wälder am Tag eine höhere Bewertung auf als in der Nacht (Hofgarten, Isaraue, Stadtpark). Die höchsten klimaökologischen Funktionen erfüllen Grünflächen, denen sowohl tagsüber als auch nachts eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird und die somit aus stadtklimatischer Sicht besonders erhaltens- und schützenswert sind (vgl. Abb. 41). Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Nähe der Freiflächen zu belasteten Siedlungsräumen.

Wie bei der Handlungspriorität ist das Ziel der Klassifizierung des Schutzbedarfs der Frei- und Grünflächen die Herausstellung der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung der Flächen und die Unterstützung der Planung durch entsprechende Planungshinweise. Zielvorgabe ist hier der bestmögliche Erhalt der stadtklimatischen Funktion der unbebauten Flächen.

Auf Grundlage des Zukunftsszenarios erfolgte ebenfalls eine stadtklimatische Einschätzung der möglichen Entwicklungsflächen. Entscheidend ist hierbei die stadtklimatische Bedeutung der Freiflächen des Ausgleichsraums im Status Quo. Liegt in der Gegenwart eine hohe stadtklimatische Bedeutung vor, sollten Bauvorhaben unter Berücksichtigung klimaökologischer Standards optimierende Maßnahmen in die Planung mit einbringen. Bei Freiflächen mit geringer stadtklimatischer Bedeutung im Status Quo sind weniger restriktive Planungen möglich, wobei die Einhaltung klimaökologischer Standards zu jedem Zeitpunkt empfohlen wird. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass die stadtklimatischen Bedingungen bestmöglich erhalten werden.

Die aus den Bewertungskarten und der daraus resultierenden gemeinsamen Planungshinweiskarte abgeleiteten Handlungsprioritäten in Landshut bieten eine wichtige Grundlage zur Ausweisung und Verortung von möglichen Maßnahmen. In dem

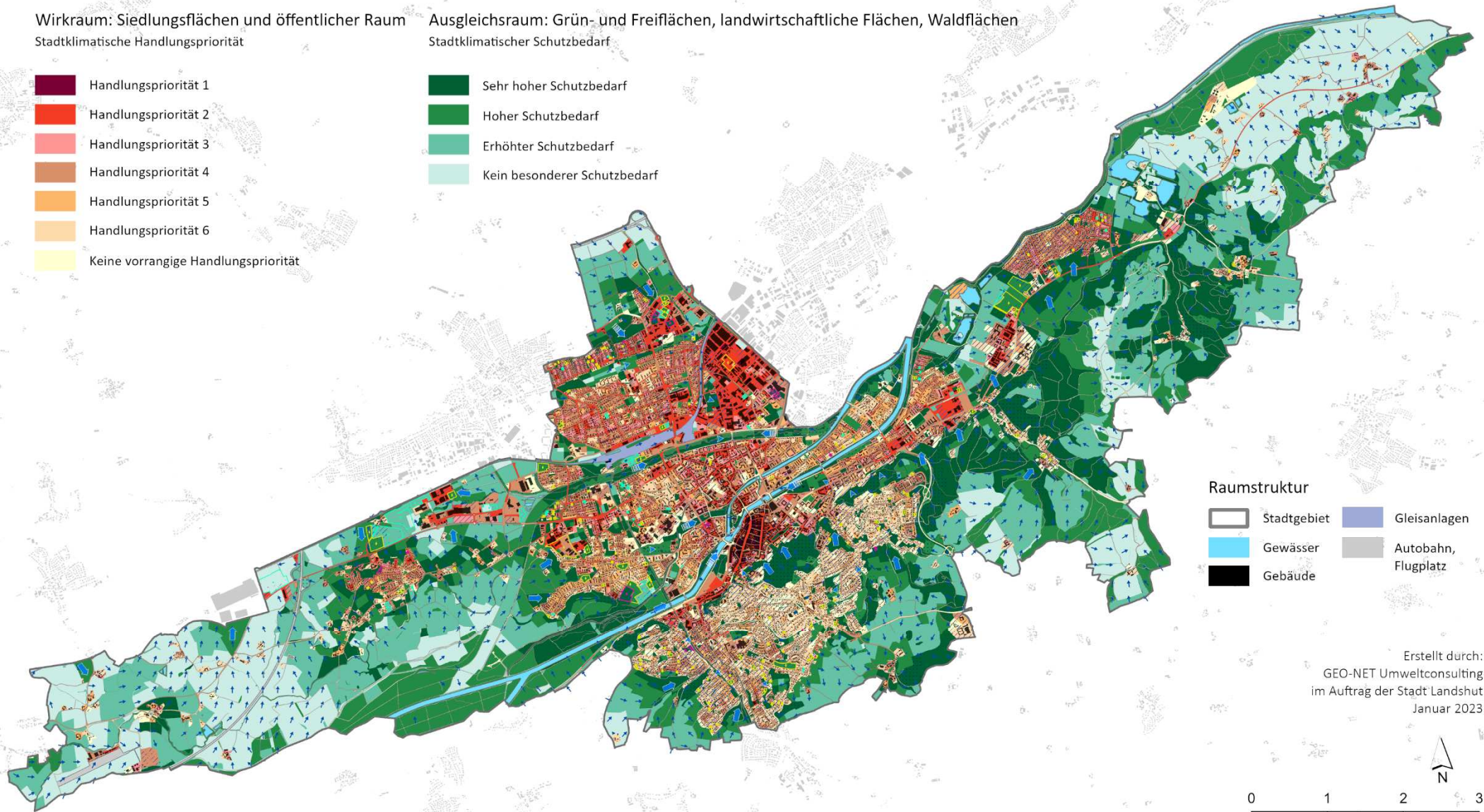
Bericht „Klimaanpassungskonzept Stadt Landshut“ werden entsprechende, auf die verschiedenen Stadtstrukturtypen Landshuts zugeschnittene Maßnahmen entwickelt und detailliert dargelegt. Weiterhin ist auf Basis der Ergebnisse eine Fokusraumkarte entstanden, welche die Hotspots aus der Klimaanalyse und den Starkregengefahren zusammengeführt darstellt und Anpassungspotenziale aufzeigt.

Wirkraum: Siedlungsflächen und öffentlicher Raum
Stadtklimatische Handlungspriorität

- Handlungspriorität 1
- Handlungspriorität 2
- Handlungspriorität 3
- Handlungspriorität 4
- Handlungspriorität 5
- Handlungspriorität 6
- Keine vorrangige Handlungspriorität

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen, Waldflächen
Stadtklimatischer Schutzbedarf

- Sehr hoher Schutzbedarf
- Hoher Schutzbedarf
- Erhöhter Schutzbedarf
- Kein besonderer Schutzbedarf



Raumstruktur

- Stadtgebiet
- Gleisanlagen
- Gewässer
- Autobahn, Flugplatz
- Gebäude

Erstellt durch:
GEO-NET Umweltconsulting
im Auftrag der Stadt Landshut
Januar 2023

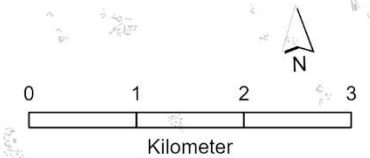









Abb. 41: Gemeinsame Planungshinweiskarte Stadt Landshut - Tag und Nacht, Status Quo und Zukunftsszenario

Wirkraum: Siedlungsflächen und öffentlicher Raum

Stadtklimatische Handlungspriorität

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (Ausmaß nächtlicher Überwärmung), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Grundsätzlich wird die Einhaltung klimaökologischer Standards in alle Flächen empfohlen. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Daraus ergibt sich keine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen.

	Handlungspriorität 1 Flächenanteil: 0,6 %	Zusätzlich zu den unten genannten Empfehlungen sind Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation im Bestand anzustreben. Bei Neubauten ist die Möglichkeit einer klimagerechten Gebäudekühlung zu prüfen.
	Handlungspriorität 2 Flächenanteil: 16,3 %	
	Handlungspriorität 3 Flächenanteil: 6,7 %	Bei Nachverdichtungen, Umbauten und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende, optimierende Maßnahmen umzusetzen (beispielsweise Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen).
	Handlungspriorität 4 Flächenanteil: 26,8 %	
	Handlungspriorität 5 Flächenanteil: 14,0 %	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.).
	Handlungspriorität 6 Flächenanteil: 23,9 %	
	Keine vorrangige Handlungspriorität Flächenanteil: 11,9 %	

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen, Waldflächen

Stadtklimatischer Schutzbedarf

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






	Sehr hoher Schutzbedarf Flächenanteil: 25,0 %	Bei Eingriffen in die Flächen ist die jeweilige stadtklimatische Funktion zu erhalten (beispielsweise Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten (städtische Fachstelle, bei Bedarf externe Expertise).
	Hoher Schutzbedarf Flächenanteil: 24,9 %	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion anzustreben (beispielsweise Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bauliche Entwicklungen sollten klimafachlich begleitet werden (städtische Fachstelle, bei Bedarf externe Expertise).
	Erhöhter Schutzbedarf Flächenanteil: 25,4 %	Bei Eingriffen in die Flächen sind die jeweiligen stadtklimatischen Funktionen zu beachten (beispielsweise Kaltlufttransport, Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei großflächigen baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
	Kein besonderer Schutzbedarf Flächenanteil: 24,7 %	



Abb. 42: Gemeinsame Planungshinweiskarte Stadt Landshut - Tag und Nacht, Status Quo und Zukunftsszenario - Kartenlegende

Stadtklimatische Bewertung der städtebaulichen Entwicklungsflächen

Entwicklung unter Beachtung klimaökologischer Standards möglich

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

Entwicklung mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich

-  Entwicklung großflächiger Vorhaben auf Freiflächen (Potenzialflächen) mit optimierenden Maßnahmen für das Stadtklima möglich (Planungsprozess stadtklimatisch begleiten, Berücksichtigung klimaökologischer Standards). Entwicklung der Leerbauflächen unter Berücksichtigung klimaökologischer Standards möglich (optimierende Maßnahmen empfohlen).
-  Entwicklung nur mit optimierenden Maßnahmen zum Erhalt der Kaltluftfunktion in der Nacht und der Ausgleichsfunktion am Tag empfehlenswert (Berücksichtigung klimaökologischer Standards, Planung zur stadtklimatischen Optimierung begleiten).

Klimaökologische Standards:

Beispielsweise geringe Versiegelung, ausreichender Wurzelraum für Bäume, Dachbegrünung auf niedrigen Gebäuden mit Flachdach.

Stadtklimatisch optimierende Maßnahmen:





Beispielsweise Versiegelung minimieren, Freihaltung von Durchlüftungssachsen, Schaffung öffentlicher kühler Orte, Fassadenbegrünung, Sonnensegel, Fontänen/Brunnen, Gebäudeverschattung, Gebäudekühlung.

Stadtklimatische Begleitung Planungsprozess:

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

Grundlage Entwicklungsflächen: Wohnbauliche und gewerbliche Potenzialflächen (z. B. aus dem FNP) und Leerbauflächen in Landshut (Stand: August 2022).

Kaltluftprozesse im Ausgleichsraum


-  Entlastungsraum (Grünflächen und Wälder mit hoher Bedeutung am Tag innerhalb 300m Entfernung zu belasteten Siedlungsflächen)
-  Kaltluftleitbahnen (linienhafte Strukturen über die kältere Luftmassen aus Grün- und Freiflächen in den Siedlungsraum transportiert werden)
-  Kaltluftabfluss (Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme, insbesondere in Hangbereichen)
-  Kaltluftabfluss innerorts (innerhalb des geschlossenen Siedlungsraumes auftretende Kaltluftströme)

Kaltluftprozesse im Wirkraum

 Kaltlufteinwirkungsbereich im Siedlungsraum

Bodennahes Strömungsfeld

Windgeschwindigkeit um 04:00 Uhr

 > 0,1 - 0,5 m/s

Raumstruktur

-  Stadtgebiet
-  Straßenraum
-  Gleisanlagen
-  Gewässer
-  Gebäude

7. Zusammenfassung

Für städtebauliche Planungsprozesse oder die gezielte Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist eine genaue Kenntnis von überwärmten Siedlungsbereichen und klimatisch bedeutsamen Grünflächen nötig. Dafür wurde eine hochaufgelöste Rechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, die flächendeckende Aussagen zum klimatischen Geschehen ermöglichen. Die Ergebnisse repräsentieren neben der Nachtsituation und der bioklimatischen Belastung am Tage auch die möglichen Klimaveränderungen und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des aktuellen und zukünftigen Landshuter Stadtklimas, unter Berücksichtigung eines starken Klimawandels mit dem Bezugsjahr 2050.

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse stellen eine zentrale Grundlage für die Maßnahmen zur Hitzevorsorge in den Bereichen Siedlungsplanung und Städtebau, Straßen- und Freiraumplanung und Gebäudeplanung dar. Diese werden im Hauptbericht „Klimaanpassungskonzept Stadt Landshut“ beschrieben. Das Projekt wurde im Rahmen des Modellvorhabens „Klimagerechter Städtebau“ des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr gefördert.

Ergebnisse der Modellierung

Als Maß für die Wärmebelastung am Tag wird die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) um 14:00 Uhr betrachtet. Neben der Temperatur berücksichtigt die PET u.a. die Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung und kann, vereinfacht ausgedrückt, als gefühlte Temperatur verstanden werden. Die Modellrechnung beruht auf der Annahme einer sommerlichen Strahlungswetterlage ohne Bewölkung, sodass die Wärmebelastung stark von der Verschattung gesteuert wird. Die geringsten Werte finden sich entsprechend in Wäldern oder mit Bäumen bestandenen Grünzügen wie beispielsweise in den Isarauen oder den bewaldeten Bereichen des Isarhügellandes im südlichen Stadtgebiet von Landshut. Auch begrünte Innenhöfe oder Parks (beispielsweise der Stadtpark oder der Hofgarten) treten als Bereiche mit geringer Wärmebelastung hervor und eignen sich an heißen Sommertagen als Rückzugsorte für die Landshuter Bevölkerung. Je nach Bebauungsdichte, Grünanteil und Gewässernähe weisen die Landshuter Siedlungsräume mäßige bis starke Wärmebelastungen auf (gelb bis orange) im Status Quo auf, welche sich mit Blick auf das

Zukunftsszenario auf teilweise extreme Wärmebelastungen verschlechtern. Die höchsten Werte sind dabei in beiden Szenarien (Status Quo und Zukunftsszenario) im Straßenraum und auf versiegelten Plätzen und Gewerbeflächen zu finden (extreme Wärmebelastung). Unter der Annahme eines Sommertags ohne Bewölkung zeigen auch unversiegelte Freiflächen relativ hohe Wärmebelastungen (beispielsweise Ackerland), wobei diese Flächen ohnehin nicht für den Aufenthalt der Bevölkerung gedacht sind.

In der Nacht kühlen sich unbebaute Freiflächen dagegen stark ab und können mit ihrer Kühlwirkung und als Kaltluftentstehungsgebiete wichtige stadtklimatische Funktionen bereitstellen. Im Vergleich zu den Grün- und Freiflächen weist der Landshuter Siedlungsraum eine deutliche nächtliche Überwärmung auf, die in der Spitze bis zu über 6 °C höheren Temperaturen als im Umland führen kann. Dieser in der Stadt typische „Wärmeineleffekt“ kommt vor allem nachts zum Tragen und geht unter anderem auf den höheren Versiegelungsgrad bzw. geringeren Grünanteil, die Beeinträchtigung der Strömung durch Hindernisse sowie Emissionen aus Verkehr, Industrie und Haushalten zurück. In Landshut treten insbesondere die Altstadt, das Industriegebiet im Norden und weitere kleinere Gewerbegebiete, sowie einzelne Bereiche des Stadtteils Nikola auf Grund ihres hohen Versiegelungs- und Bebauungsgrades als stark überwärmte Bereiche hervor. Wohngebiete weisen hingegen ein überwiegend mittleres, am Siedlungsrand und in aufgelockerter Bauweise, insbesondere in den höher gelegenen Stadtteilen Berg und Moniberg, sogar geringes Belastungsniveau auf. Bei Betrachtung des Zukunftsszenarios verschlechtert sich allerdings auch in den weniger dicht bebauten Wohngebieten die Wärmebelastung deutlich.

Zwischen dem kühleren Umland und dem Siedlungsraum können sich lokale Ausgleichsströmungen bilden und für Entlastung im Stadtgebiet sorgen. Neben reliefbedingten Hangabwinden sind durch den Temperaturunterschied hervorgerufene Flurwinde die wichtigsten dieser Windsysteme, die im günstigsten Fall über zusammenhängende Grünzüge Kalt- und Frischluftzufuhr bis weit in die Siedlungsräume erlauben. Besonders wichtige Funktionen wie „Kaltluftleitbahnen“ finden sich im Bereich der Isar (hier wird Frischluft aus Westen und Osten in Richtung Innenstadt transportiert) der Flutmulde (hier strömt ebenfalls Frischluft aus Osten und Westen in dichter bebaute Stadtgebiete), sowie im Norden des Ortsteils Hascherkeller, wo Kaltluft mit

überdurchschnittlicher Geschwindigkeit auf die Siedlungsgebiete zuströmt. Von besonderer Ausprägung sind in Landshut flächenhafte Kaltluftströmungen an den Hangbereichen im südlichen Hügelland, die in Richtung Isartal abfließen und dabei Teile des Stadtgebietes begünstigen.

Planungshinweiskarte

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Landshuter Stadtklimaanalyse und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist die Inwertsetzung der Ergebnisse, z.B. in Form der gemeinsamen Planungshinweiskarte (PHK). In dieser wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als „Wirkraum“ sowie der Grünflächen als „Ausgleichsraum“ hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation für den Status Quo und das Zukunftsszenario vorgenommen und mit allgemeinen Planungshinweisen verbunden. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die gemeinsame Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der **Bewertungskarte Nacht** orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt des Stadtgebiets, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen bzw. für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur (Status Quo) ausgerichtet, (siedlungsferne) Grünflächen ohne relevante Klimafunktion sind von geringerer Bedeutung. Neben Kaltluftleitbahnen ist in der Karte das Strömungsfeld in Pfeilsignatur dargestellt, um das Strömungssystem außerhalb der Siedlungsräume abzubilden und damit mögliche klimaökologische Konflikte bei etwaigen größeren Vorhaben erkennen zu können. Zusätzlich wurde eine Bewertung der Nachtsituation unter Berücksichtigung des Klimawandels bis 2050 und einer möglichen Entwicklung der Siedlungsstrukturen auf bisherigen Freiflächen durchgeführt (Zukunftsszenario).

Die Bewertung des Siedlungsraums spiegelt die nächtliche Überwärmung wider, sodass hochversiegelte Gewerbegebiete die ungünstigsten Bedingungen aufweisen. Der Fokus in der Bewertungskarte Nacht liegt jedoch auf der Möglichkeit eines

erholsamen Schlafs und damit der Wohnbebauung. In den dichter bebauten Bereichen des Landshuter Stadtgebiets treten im Status Quo teilweise ungünstige bioklimatische Bedingungen auf. Im überwiegenden Teil der Landshuter Wohngebiete ist ein mittleres oder günstiges Belastungsniveau vorzufinden. Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, doch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Infolge des (im Zukunftsszenario dargestellten) Klimawandels ist in Landshut zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrten Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in den städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorliegt.

Die **Bewertungskarte Tag** betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung, um die Auswirkungen auf die wohnende und arbeitende Bevölkerung abzubilden. In den Vordergrund rücken zudem der Straßenraum für Wegbeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen. Für den Kaltlufthaushalt wichtige Freiflächen (beispielsweise westlich von Landshut-West und in den südlichen Hügellagen) sind an Sommertagen dagegen von geringerer Bedeutung, da die fehlende Verschattung zu einer starken Wärmebelastung führt. Umgekehrt weisen Wälder am Tag eine höhere Bewertung auf als in der Nacht (z.B. Isaraue, Hofgarten, Wälder auf den südlichen Hügeln). Die höchsten Belastungen im Siedlungsraum treten in hochversiegelten Räumen mit geringer Grünausstattung und dichter Bebauung auf, insbesondere in Gewerbegebieten und auf Plätzen (z.B. Altstadt, Industriegebiet).

In der **gemeinsamen Planungshinweiskarte** werden die Ergebnisse aus der Bewertungskarte Tag und der Bewertungskarte Nacht, sowie dem Status Quo und dem Zukunftsszenario zusammengeführt. Aus der gemeinsamen Betrachtung werden allgemeine Planungshinweise abgeleitet und in der Karte aufgeführt.

Die Freiflächen werden anhand ihrer Bedeutung für den nächtlichen Kaltlufthaushalt der Stadt sowie ihre Funktion als Ausgleichsraum am Tag auf Basis einer kombinierten Bewertung des Status Quo und des Zukunftsszenarios bewertet. Die höchsten klimaökologischen Funktionen erfüllen dabei Grünflächen, denen tagsüber und nachts,

sowohl im Status Quo als auch im Zukunftsszenario eine hohe stadtklimatische Bedeutung zugeschrieben wird und die somit aus stadtklimatischer Sicht besonders erhaltens- und schützenswert sind (z. B. Stadtpark, Flutmulde, Hofgarten, Freiflächen angrenzend an stark belastete Siedlungsräume).

Die Bewertungen einzelner Flächen weichen teilweise von der Nachtsituation ab. Dies wird gerade bei den Grünflächen deutlich, deren Bedeutung dann am höchsten ist, wenn sie eine hohe Aufenthaltsqualität durch verschattete Bereiche bieten, fußläufig erreichbar und zudem öffentlich zugänglich sind (Entlastungsraum).

Planungshinweise, welche aus der Einordnung der Fläche nach Schutzbedarf abgeleitet werden können, sind beispielsweise Empfehlungen, dass auf Flächen mit hohem bis sehr hohem Schutzbedarf möglichst keine Strömungshindernisse geschaffen bzw. bei geplanten baulichen Entwicklungen unbedingt auf den Erhalt der Leitbahnfunktion hingewirkt werden sollte. Im Falle einer Bebauung auf Flächen bzw. in ihrer Umgebung sollte die Bewertung jedoch ggf. neu vorgenommen werden.

Zur Bewertung des Siedlungsraumes werden die in den Bewertungskarten zuvor bereits ermittelten Belastungsklassen zusammengeführt. Entscheidend sind hierfür die nächtliche Überwärmung und die thermische Belastung am Tag anhand der PET, kombiniert für den Status Quo und das Zukunftsszenario. Siedlungsräume, die sich über den Tag aufgrund mangelnder Verschattung stark aufheizen und auch über Nacht nicht ausreichend abkühlen und somit die Schlafqualität negativ beeinflussen erhalten die Handlungsprioritäten 1 und 2 (beispielsweise im Altstadtgebiet von Landshut). Dies bedeutet, dass zur Verbesserung der bioklimatischen Situation im betreffenden Raum proaktiv Maßnahmen umgesetzt werden sollten.

In der in Landshut weit verbreiteten aufgelockerten und gut durchgrüntem Siedlungsstruktur tauchen vornehmlich die Handlungsprioritäten 3 und 4 auf. Hier sind proaktive Maßnahmen zur Verbesserung der Situation nicht zwingend notwendig, sollten aber bei sich bietenden Gelegenheiten geprüft werden (beispielsweise Straßensanierungen). Zudem sollte bei Nachverdichtungen auf die begleitende Umsetzung optimierender Maßnahmen hingewirkt werden (z.B. Gebäudebegrünung). Bei der Planung von Bauvorhaben auf Freiflächen ist es auf Basis des Schutzbedarfs empfehlenswert die stadtklimatische Funktion so weit, wie möglich zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2021): Abschlussbericht. Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsrahmenplanung. Online: https://www.lfu.bayern.de/natur/schutzgutkarten/klima_luft/klimaanalysekarten/index.htm. Abruf 17.08.2022.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Klima-Faktenblätter Bayern und Donauregion. Klima der Vergangenheit und Zukunft. Online: <https://www.lfu.bayern.de/klima/klimawandel/klimafaktenblaetter/index.htm>
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Cubasch U., Wuebbles D., Chen D., Facchini M.C., Frame D., Mahowald N., Winther J.-G. (2013): Introduction. In: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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 – Deutscher Wetterdienst (1996): Gutachten zu Meteorologischen Messungen im Stadtgebiet Landshut. Regionalbüro, München.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020): Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <https://cdc.dwd.de/portal/>
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020a): Nationaler Klimareport. 4. Korrigierte Auflage. Stand Errata 8. Juni 2020.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020b): Datenbasis: Beobachtungsdaten des DWD. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020c): Datenbasis: Rasterdaten des DWD. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020d): Wetterlexikon (Homepage). Online: www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. Abruf 23.12.2021.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2021): Tropennächte https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/. Abruf 23.12.21.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2021): Analysen radarbasierter stündlicher (RW) und täglicher (SF) Niederschlagshöhen (Homepage). Online: www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html. Abruf 23.12.2021.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2021a): Tropennächte. Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/. Abruf 23.12.21.
- Fink A. H., Pohle S., Pinto J. G., Knippertz P. (2012): Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters* 39:L07803.
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht – Schlaf – Index. Online: https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php.de.
- 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. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G. (2014): On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. *Boundary – Layer Meteorology* Vol 150 No. 2, 319 – 326.
- Häkel, H. (2012): *Meteorologie*. 7. Auflage. Stuttgart.
- Jendritzky, G. et al. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr.114.
- Kaspar F., Müller-Westermeier G. Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T.: Monitoring of climatechange in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *Adv. Sci. Res.*, 10, 99–106, 2013.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig*. Band 13.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie – Eine Einführung*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A. und Mayer, H. (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter* No. 18: 7 – 10.

- Mayer, H. Beckröge, W. und 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.
- 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.
- Nagl, A. (1997): Stadtklimatische Untersuchungen in Landshut. Geländemessungen und Computermodellierung hinsichtlich klimaökologischer Ausgleichsflächen. Nürnberg.
- Oke, T.R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769 – 779.
- 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., Ulbrich U. (2009): Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics* 32:711–737.
- 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*.
- Themeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31(10):1530–1544.
- Schönwiese, C.-D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stadt Jena (2016): *Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel*. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. *Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen*.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. *Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima*.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. *Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima*.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2015): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. *Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*.
- ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2020): Starkniederschlag. Online: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/ne-oklima/starkniederschlag>. Abruf 23.12.2021.

