

Klimaanalyse Ingolstadt



Zwischenbericht – Methodik und Ergebnisse

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Im Auftrag der
Stadt Ingolstadt
Referat für Gesundheit, Klimaschutz
und Umwelt

Juni 2020

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
GLOSSAR	II
1. EINFÜHRUNG	4
Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	4
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	6
2.1 Der Wärmeinseleffekt	6
2.2 Stadtklima in Ingolstadt	7
2.2.1 Großraumklima.....	7
2.2.2 Meteorologische Kennzahlen von Ingolstadt	7
3. METHODIK DER MODELLGESTÜTZTEN STADTKLIMAANALYSE	9
3.1 Untersuchungsgebiet	9
3.2 Betrachtete Wetterlage	9
3.3 Das mesoskalige Modell FITNAH 3D	10
3.4 Modelleingangsdaten	11
Aufbereitung der Eingangsdaten	13
4. MODELLERGEBNISSE	14
4.1 Nächtliches Temperaturfeld	14
Ergebnisse.....	14
4.2 Kaltluftströmungsfeld	16
Ergebnisse.....	17
4.3 Kaltluftproduktionsrate	19
4.4 Thermische Belastung am Tage	20
Ergebnisse.....	21
5. AUSBLICK	22
QUELLENVERZEICHNIS	23
ANHANG	I

Bildnachweis Titelfolie: Stadt Ingolstadt, Schalles

Glossar

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

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

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

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

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

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

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Unterscheidung in „Kerngebiet“ (in den Siedlungsraum reichende Grünstrukturen, die die bestehende Bebauung über ein zusammenhängendes und großflächiges Gebiet wirksam mit Kaltluft versorgen) und „Einzugsgebiete“ der Kaltluftleitbahnen (Grünflächen hoher Kaltluftproduktivität, die die Kerngebiete speisen).

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite;

Einheit $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das \rightarrow *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

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

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

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

Strahlungswetterlage \rightarrow *Autochthone Wetterlage*

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

Wirkungsraum: Bebaute oder zur Bebauung vorgesehene Räume (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

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

1. Einführung

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. Angesichts eines weiterhin zu erwartenden Bevölkerungswachstums in Ingolstadt einerseits als auch der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen andererseits besteht hier Handlungsbedarf. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

Als Grundlage für die Analyse und Bewertung der siedlungsklimatischen Zusammenhänge dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine Modellrechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Ingolstädter Stadtklimas.

Der vorliegende Bericht erläutert zu Beginn einige fachliche Grundlagen, anschließend die Methodik der Stadtklimaanalyse (Kap. 3) und geht auf die Ergebnisse der Modellrechnung ein (Kap. 4). Abschließend wird ein Ausblick hinsichtlich der nachfolgenden Analyse und planerischen Bewertung der Modellergebnisse gegeben (Kap. 5).

EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

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 bspw. die Möglichkeit der Sicherung von Freiflächen, die der Kaltluftproduktion dienen, sowie von Frischluft- und Ventilationsbahnen (Belüftungsachsen; vgl. Stadt Karlsruhe 2014). In FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten ca. 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 2014). 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, insb. 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 anstehenden 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. Fachliche Grundlagen

2.1 DER 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 bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als **Städtische Wärmeinsel** bezeichnet.

Für die Stadtbevölkerung entstehen hohe Belastungen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (autochthone Wetterlagen). 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 hinein strömen (**Flurwinde**; Abb. 1). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann (insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen)¹.

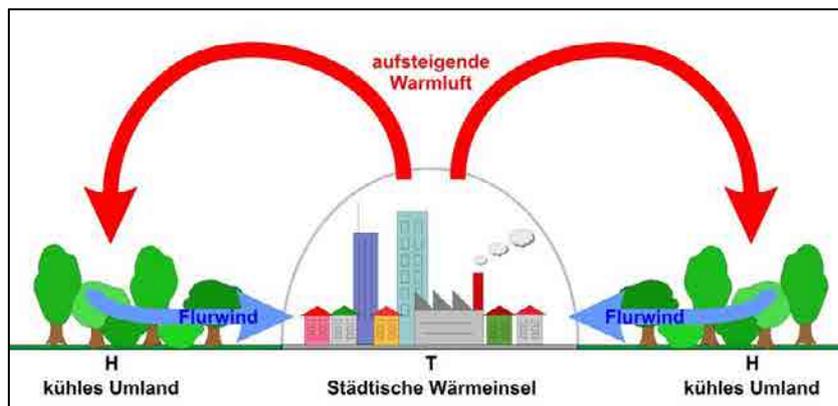


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

¹ In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil. Durch das Aufsteigen von Warmluftblasen aus der bodennah nachströmenden Luft (Böigkeit) ist eine vertikale Durchmischung der Luftschichten möglich, sodass Strömungshindernisse ggf. überwunden werden können.

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme (anthropogener Wärmefluss), kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo², 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 geringerer Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Stadt herabgesetzt³ (Schönwiese 2008).

Verkehr, Industrie und Hausbrand bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009).

Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insbesondere da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

2.2 STADTKLIMA IN INGOLSTADT

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren betrachtet. So ist die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961 - 1990 festgelegt, doch wird gegenwärtig häufig (wie auch in den folgenden Kennzahlen) die Periode 1971 - 2000 verwendet (DWD 2019a).

2.2.1 GROßRAUMKLIMA

Ingolstadt liegt wie ein Großteil der mittel- und süddeutschen Landesfläche innerhalb der kühlgemäßigten Klimazone, im Übergangsbereich zwischen maritimen und kontinentalen Klima. Das Großraumklima wird von wechselnden Wetterlagen bestimmt. West- bzw. Nordwest-Wetterlagen bringen einen maritimen Einfluss mit gemäßigten Temperaturen, starker Wolkenbildung und häufigeren Niederschlägen. Der kontinentale Einfluss bei Ost-Wetterlagen zeichnet sich durch Trockenheit, hohe Temperaturen im Sommer und niedrige Temperaturen im Winter aus.

2.2.2 METEOROLOGISCHE KENNZAHLEN VON INGOLSTADT

Die klimatischen Gegebenheiten von Ingolstadt können anhand der nahegelegenen DWD-Station Kösching (ca. 8 km nördlich des Stadtkerns) abgeleitet werden. Die DWD-Station Ingolstadt Flugplatz wurde aufgrund der geringen Datendichte innerhalb der Referenzperiode in diesem Zusammenhang nicht in die Betrachtung einbezogen.

² Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

³ In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmetransport gegenüber.

Tab. 1: Mittelwert bzw. Standardabweichung der Lufttemperatur (in 2 m über Grund), des Auftretens Heißer Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) sowie des Jahresniederschlags im Zeitraum 1971 -2000 an den DWD-Stationen Kösching, Nürnberg und weiteren Standorten in Deutschland (eigene Berechnung nach DWD 2019b).

DWD-Station (Höhe über NN)	Lufttemperatur [°C] Mittelwert (± Stabw.)	Heiße Tage [Anzahl pro Jahr] Mittelwert	Jahresniederschlag [mm] Mittelwert (± Stabw.)
Kösching. (417 m)	8,2 (± 0,8)	5,6	701 (± 97)
Nürnberg (314 m)	9,1 (± 0,8)	8,4	629 (± 98)
Schwerin (59 m)	8,7 (± 0,8)	3,8	614 (± 115)
Essen (150 m)	9,9 (± 0,7)	4,1	934 (± 149)
Hannover (55 m)	9,3 (± 0,8)	5,2	641 (± 96)
Dresden (227 m)	9,2 (± 0,8)	7,3	663 (± 139)
Karlsruhe (112 m)	10,7 (± 0,8)	16,3	771 (± 125)

Das langjährige Mittel der **Lufttemperatur** spiegelt den Einfluss des kontinentalen Klimas wider und wird überdies durch die Höhenlage der Station beeinflusst. Mit 8,2 °C erreicht es gegenüber den Vergleichsstädten ein vergleichsweise niedriges Niveau. Dresden und Hannover (ca. + 1 °C) sowie insbesondere Essen (+ 1,7 °C) und Karlsruhe (+ 2,5 °C) weisen deutlich höhere Jahresmittelwerte auf (Tab. 1).

Das Wohlbefinden bzw. die Belastung einer Stadtbevölkerung wird weniger durch die allgemeine Erwärmung als vielmehr durch Hitzeereignisse bestimmt. Als besonders belastend gelten „**Heiße Tage**“, an denen Temperaturen von 30 °C und mehr erreicht werden. Mit durchschnittlich 5,6 Heißen Tagen pro Jahr liegt der Raum Ingolstadt im Vergleich zu den Referenzstädten etwa im Mittelfeld, während Karlsruhe erneut den Ausreißer nach oben bildet (Tab. 1). Das Auftreten der Kenntage ist von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterworfen und lag im Beobachtungszeitraum zwischen 0 Heißen Tagen im Jahr 1978 sowie 1979 und 22 Heißen Tagen in 1994 – im Jahr 2018 wurden sogar 24 Ereignisse gezählt.

3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 UNTERSUCHUNGSGBIET

Das Stadtgebiet von Ingolstadt liegt größtenteils in der naturräumlichen Haupteinheit „Unterbayrisches Hügelland“ und untergeordnet im Bereich der Untereinheit „Donaumoos“. Von Norden reichen zudem Ausläufer der „Fränkischen Alb“ in das Stadtgebiet hinein (LfU, 2018). Die Ausdehnung des Stadtgebiets beträgt von Ost nach West ca. 18 km bzw. 15,5 km in Nord-Süd-Richtung, was eine Fläche von rund 133 km² ergibt (roter Kasten in Abb. 2). Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von 294 km² auf (18,8 km x 15,7 km), damit die im Umland gelegenen Höhenunterschiede mit Einfluss auf das Ingolstädter Stadtklima erfasst werden (Abb. 2).

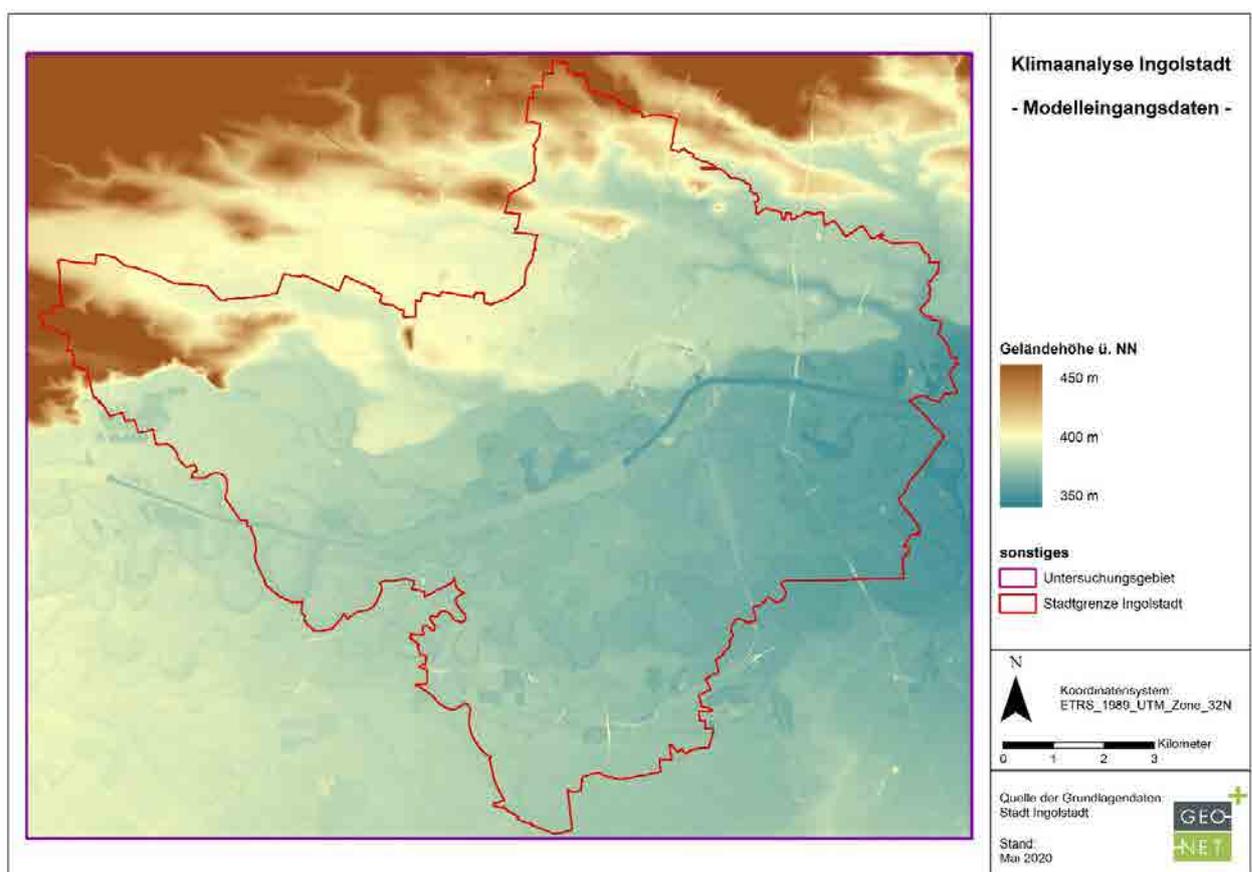


Abb. 2: Für die Modellrechnung bestimmtes Untersuchungsgebiet um die Stadt Ingolstadt (violetter Kasten) und Darstellung der Geländehöhe

3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die Klimaanalyse legt einen autochthonen Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Dieser 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. 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. 3 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 bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen Luftaustauschs zu den höchsten thermischen Belastungen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere Situation handelt, tritt solch eine Wetterlage regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf.

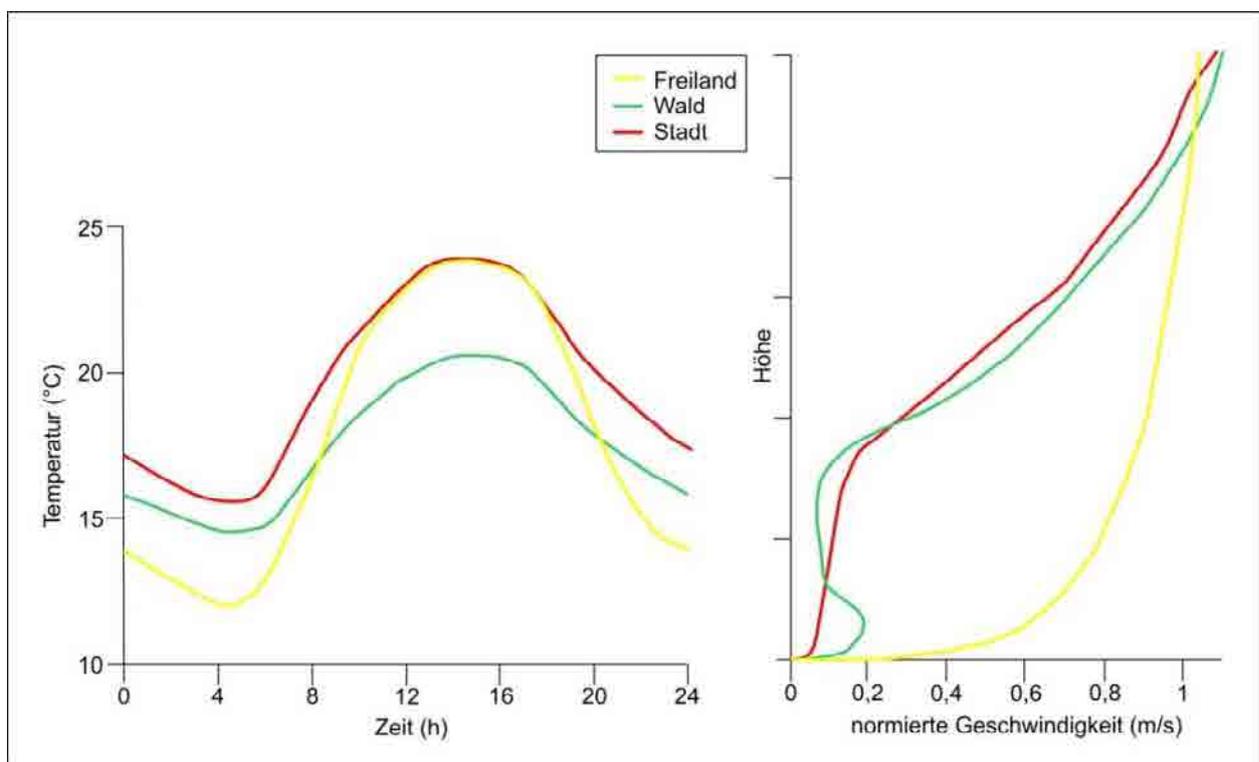


Abb. 3: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

3.3 DAS MESOSKALIGE MODELL FITNAH 3D

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 bspw. 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 (insb. 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.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe meso- und mikroskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988) und der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch. Zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht somit, neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien, ein weiteres leistungsfähiges Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in der Stadt- und Landschaftsplanung zur Verfügung. Die Modelle basieren, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*). Für tieferegehende Informationen zu FITNAH 3D wird u.a. auf Groß (1992) verwiesen.

Mesoskalige Modelle wie FITNAH 3D können demnach deutlich besser zur Beantwortung stadtklimatologischer Fragestellungen herangezogen werden, als rein auf 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 25 m (mesoskalige Modellrechnung). 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 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 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 Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

3.4 MODELLEINGANGSDATEN

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 jeweils von der Stadt Ingolstadt zur Verfügung gestellt wurden:

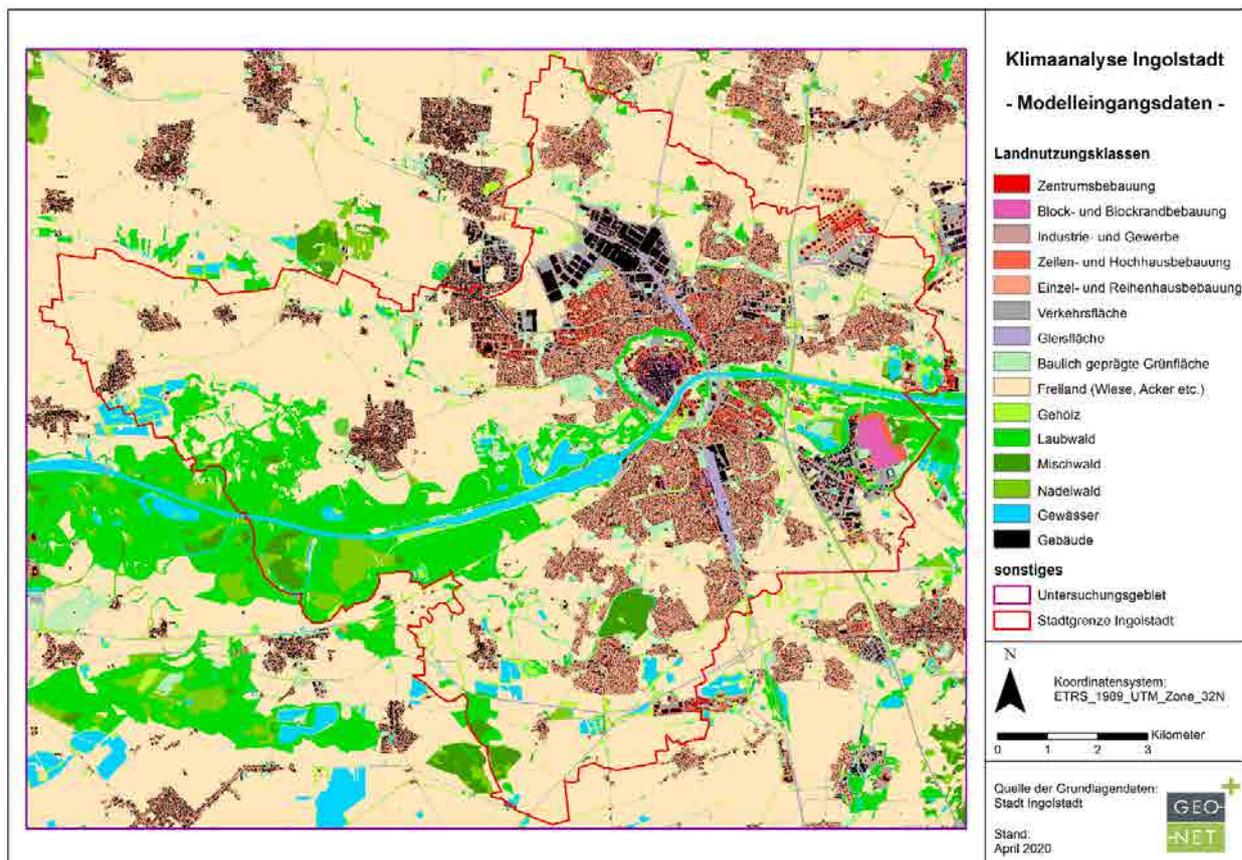
- Geländehöhe
 - ↳ Abgeleitet aus einem DGM 1 m (Digitales Geländemodell, Stand 2013)

- Landnutzung
 - ↳ ALKIS-Daten (Stand 2019),
 - ↳ ATKIS-Daten (Stand 2019)
- Strukturhöhe
 - ↳ Laserscanbefliegung (DOM, 2013),
 - ↳ Gebäudehöhe (LOD1, 2018)

Die Ingolstädter Landnutzung wird über 15 verschiedene Strukturtypen (vgl. Landnutzungsklassen in Abb. 7) definiert. Die Zuweisung der Strukturtypen erfolgte rein auf der Basis der physikalischen Eigenschaften, unabhängig von der tatsächlichen Nutzung. So kann es u.a. vorkommen, dass gewerblich genutzte Flächen als Zeilen- und Hochhausbebauung definiert wurden, wenn diese z.B. einen sehr geringen Versiegelungsgrad aufwiesen. Hinzu kommt, dass die Bebauungsklassen (Stadtkern, Blockrandbebauung, Industrie/ Gewerbe, Zeile / Hochhaus sowie Einzel- und Reihenhausbebauung) lediglich das Umfeld der Gebäude beschreiben. Der reine Baukörper als solcher wird im Raster als Gebäude klassifiziert. Die Klimaanalyse bildet den Zustand des Stadtgebiets zu einem bestimmten Zeitpunkt ab und ist dabei statisch, d.h. die Auswirkungen zukünftiger Landnutzungsänderungen müssen separat untersucht werden.

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Außerhalb des Ingolstädter Stadtgebiets wurde dabei teilweise auf frei verfügbare Daten in geringerer räumlicher Auflösung wie Urban Atlas-Daten⁴ für die Landnutzung (Stand 2012) zurückgegriffen.

Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels eines aktuellen Luftbildes abgeglichen (Stand 2018).



⁴ Aus dem "Copernicus Land Monitoring Service" der European Environment Agency (EEA).

Abb. 4: Landnutzungsclassen auf Blockflächenebene im Ingolstädter Stadtgebiet

AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritt 1 und 2 in Abb. 5). Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter (Schritt 3).

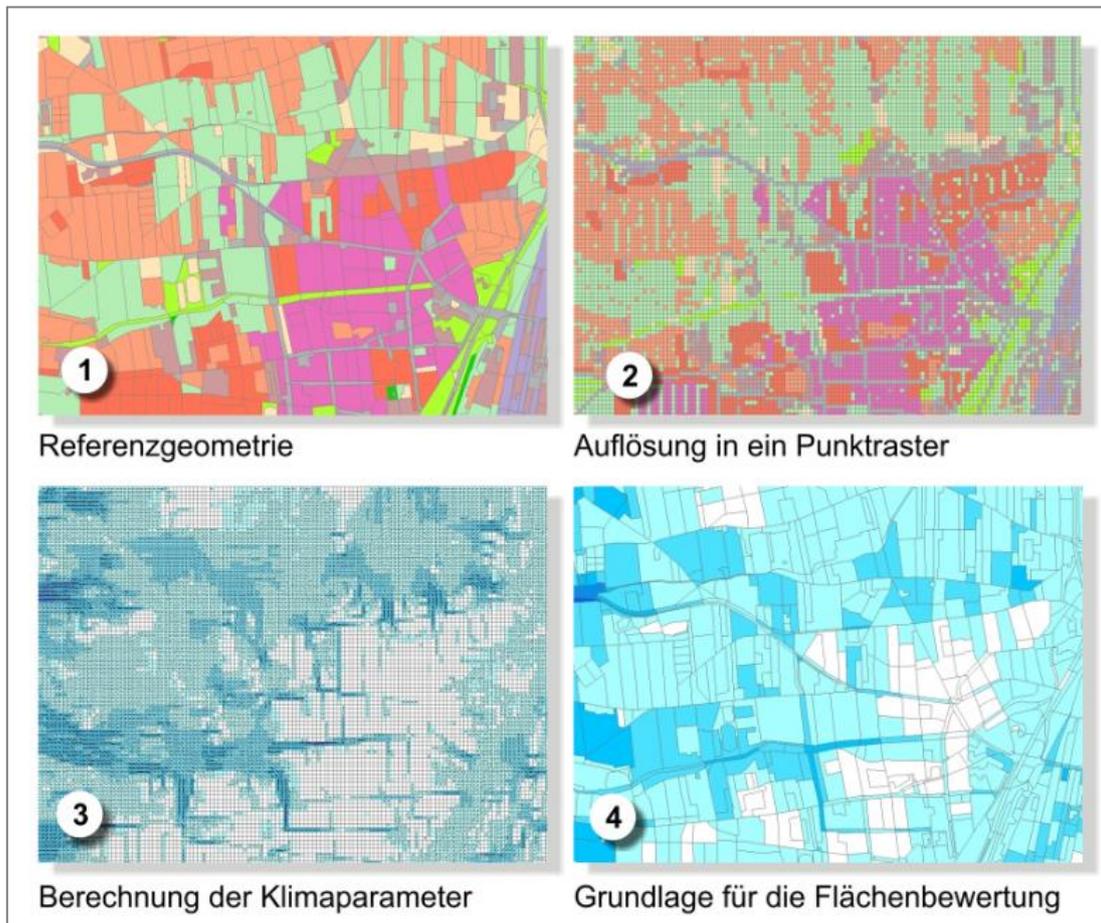


Abb. 5: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

4. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld, Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftproduktionsrate (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Zudem wurde im nachfolgenden ein auf das zentrumsnahe Stadtgebiet vergrößerter Ausschnitt gewählt. Eine zusätzliche Darstellung des gesamten Untersuchungsgebietes befindet sich jeweils im Anhang.

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.

ERGEBNISSE

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Raum Ingolstadt mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird (Abb. 6 bzw. Abb. A1 im Anhang). So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von unter 14 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp über 20 °C im Bereich von Gewässern sowie des Audi-Werksgeländes eine Spannweite von mehr als 7 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,5 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den messtechnisch bereits nachgewiesenen Wärmeinseleffekt, erlaubt darüber hinaus jedoch eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. Im Stadtkern sowie insbesondere in den Industrie- bzw. Gewerbegebieten Ingolstadts sind die höchsten Bebauungsdichten und, gerade in den gewerblich geprägten Bereichen, hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der stärksten nächtlichen Überwärmung widerspiegelt – selbst nachts werden unter den angenommenen Bedingungen noch Temperaturen rund 19 °C (Stadtkern) bzw. über 20 °C (Audi-Werksgelände) erreicht (Abb. 6). Mit abnehmender Bebauungsdichte sowie Bodenversiegelung nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Siedlungsgebieten außerhalb des Stadtkerns liegt die Temperatur meist im Bereich von 16 (grüngeprägte Innenhöfe und Abstandsflächen) bis maximal 18 °C (im Nahbereich von Hauptverkehrsstraßen, z.B. Goethestraße).

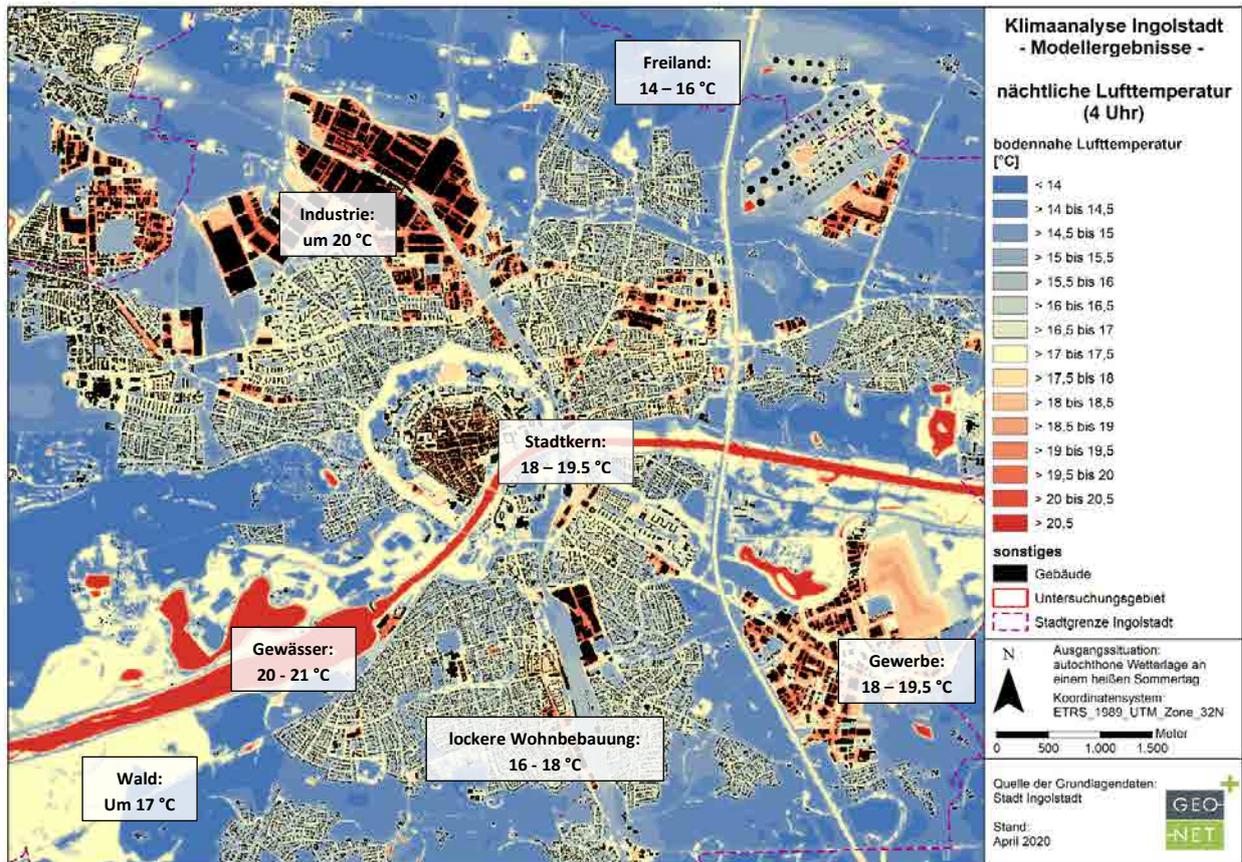


Abb. 6: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld für das zentrumsnahe Ingolstädter Stadtgebiet mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen.

Die geringste Überwärmung von Siedlungsflächen ist in der Regel am Stadtrand festzustellen. Dies kann zum einen mit der häufig einhergehenden geringeren Bebauungsdichte und Bodenversiegelung begründet werden und darüber hinaus an der räumlichen Nähe zu den deutlich kühleren Freiflächen im Umland von Ingolstadt festgemacht werden. Insbesondere die Senken⁵ entlang der Donau weisen dabei mit flächendeckend unter 14 °C die geringsten Lufttemperaturen auf.

Neben den an die Stadt angrenzenden Freiflächen stellen die innerstädtischen Grünzüge wie der innere (z.B. Hindenburgpark) und äußere Grüngürtel (z.B. Am Augraben) sowie kleinräumigere Parkanlagen (z.B. Nordpark) wichtige Ausgleichsräume dar.

Verglichen mit den umliegenden Freiräumen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 15 - 17 °C ein höheres Wertespektrum auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So weisen kleinere Grünflächen im Nahbereich stärkerer Überwärmung tendenziell höhere Temperaturen auf als Grünflächen mit vergleichsweise geringer Überwärmung (z.B. Fort Haslang Park). Zudem führt ein ausgeprägter Baumbestand auf Grünflächen ebenfalls zu einer geringeren Abkühlung in der Nacht (z.B. Baumbestand entlang des Stadtrings). Dies liegt wie auch im Fall von Wäldern an der dämpfenden Wirkung des Kronendachs gegenüber der nächtlichen Ausstrahlung. So zeigt sich auch für die Waldflächen fernab der Siedlungsflächen lediglich eine Abkühlung auf rund 17 °C. Nachts fällt daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

⁵ Aufgrund ihrer – im Vergleich zu wärmeren Luftmassen – höheren Dichte, kann sich Kaltluft in Senken sammeln.

U.a. die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser⁶ sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern. Dies führt auch im Fall von Ingolstadt dazu, dass die oberflächennahe Luftschicht über Gewässern nachts mit durchschnittlich über 20 °C die höchsten Werte aufweist.

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 den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte 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 m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 7).

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

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, 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 zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

⁶ Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

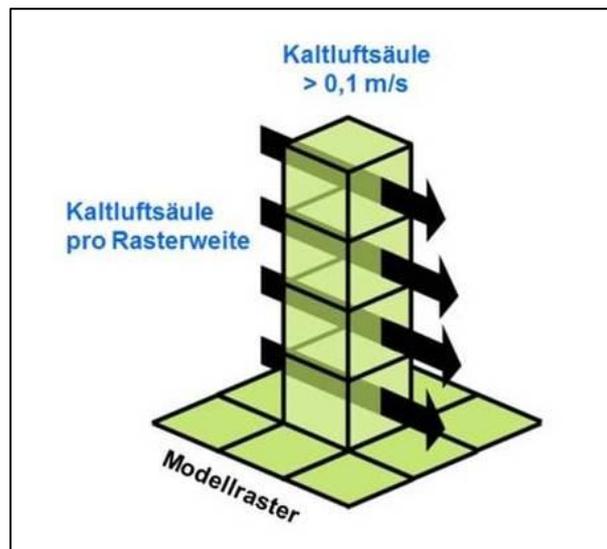


Abb. 7: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

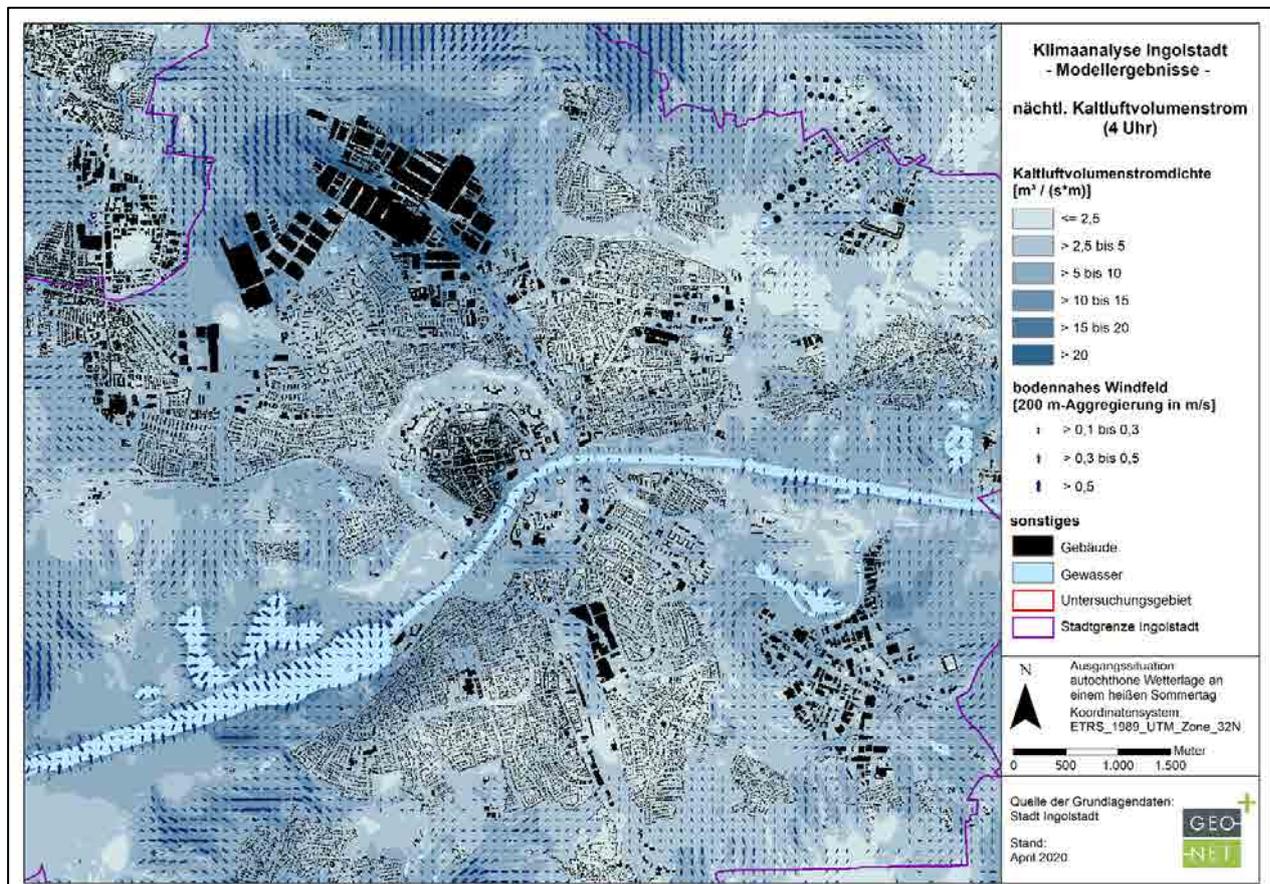


Abb. 8: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Ingolstädter Stadtgebietes

ERGEBNISSE

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten über $43 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Ingolstädter Stadtgebiet liegt bei $5,9 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Besonders hohe Kaltluftbewegungen zeigen sich dabei ausgehend von den Höhenzügen im Norden des Untersuchungsgebietes (Hangabflüsse) sowie im Nahbereich der stark überwärmten Bebauungsstrukturen des Audi-Werksgeländes aufgrund des hohen Temperaturgradienten (Abb. 8).

Im Fokus der Untersuchung steht die Funktion des Kaltfluthaushalts für das zentrumsnahe Ingolstädter Stadtgebiet. Die verschiedenen Stadtbezirke werden dabei teils sehr unterschiedlich mit Kaltluft versorgt. So erhalten die nördlichen Stadtbezirke Oberhaunstadt, Nordwest sowie der nördliche Teil des Stadtbezirks Nordost ihre Kaltzufuhr aus nördliche Richtung von den dort befindlichen Freiflächen, wohingegen der südliche Teil des Stadtbezirks Nordost sowie Mailing überwiegend ausgehend von der Donauaue mit Kaltluft versorgt werden. Auffällig ist, dass die zentral gelegenen Siedlungsflächen des Stadtbezirks Nordost deutlich schlechter mit Kaltluft versorgt werden als die Randgebiete (Kaltluftvolumenstrom $\leq 2,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Dies betrifft insbesondere das Josephsviertel.

Der Stadtbezirk Friedrichshofen-Hollerstauden sowie der westliche Teil der Stadtmitte (Gerolfinger Straße, Im Freihöfl und Probielweg) werden zu großen Teilen aus Richtung der westlichen landwirtschaftlichen Freiflächen sowie der südwestlich gelegenen Donauaue wirksam mit Kaltluft versorgt.

Die Altstadt erfährt nur geringfügigen Kaltluftzufluss aus dem Umland, allerdings dient in diesem Fall der innere Grüngürtel als wirksame Kaltluftaustauschfläche. Südlich der Donau erhalten die Stadtbezirke Südwest und Süd ihre Kaltluftzufuhr aus westlicher bis südwestlicher Richtung, wobei die an die Donauaue angrenzenden Siedlungsflächen im Umfeld der Haunwöhrer Straße bzw. Hagauer Straße besonders wirksam mit Kaltluft versorgt werden. Dagegen erfährt das innere Stadtgebiet nördlich des Südfriedhofs aufgrund der Hinderniswirkung der Gebäudekörper nur noch eine unterdurchschnittliche Zufuhr von Kaltluft.

Der Stadtbezirk Münchner Straße erhält im Norden (Antonviertel sowie nördliches Bahnhofsviertel) einen Kaltluftzufluss ausgehend von der Donauaue, wogegen der Stadtteil Unsernherrn und das südliche Bahnhofsviertel ihre Kaltluft primär aus südlicher bis südwestlicher Richtung erhalten. Auch in diesem Fall werden die zentral gelegenen Siedlungsflächen wie beispielsweise die Gebiete östlich sowie südöstlich des Schulzentrums Südwest nur unterdurchschnittlich mit Kaltluft versorgt.

Im Südosten Ingolstadts erhalten die zentrumsnahen Stadtteile Augustin- und Monikaviertel sowie Kothau weitestgehend aus Richtung der östlichen Donauaue ihre Kaltluftzufuhr, wohingegen die Stadtteile Ringsee und Rothenturm vornehmlich aus dem südlichen Umland versorgt werden. Das von Grünflächen umgebene Gewerbegebiet Südost sowie der angrenzende Stadtteil Niederfeld erhalten ihre Kaltluftzufuhr aus verschiedenen Richtungen.

Abb. 9 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur⁷) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potentielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeld folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. In 2 m ü.Gr. tritt allerdings die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass einige Bereiche des Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren.

Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch Verkehrsflächen wie Straßen und Gleisanlagen (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen können – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich). Weiterhin können größere Grünflächen zumindest lokal für Entlastung sorgen, etwa im Nahbereich der innerstädtischen Grüngürtel, dessen angrenzende Bebauung von seiner Kaltluftproduktion profitiert.

⁷ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

Für die Strömung in 2 m ü.Gr. stellen Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den Waldrändern her auch bodennahe Ausgleichsströmungen Richtung Stadtgebiet einsetzen.

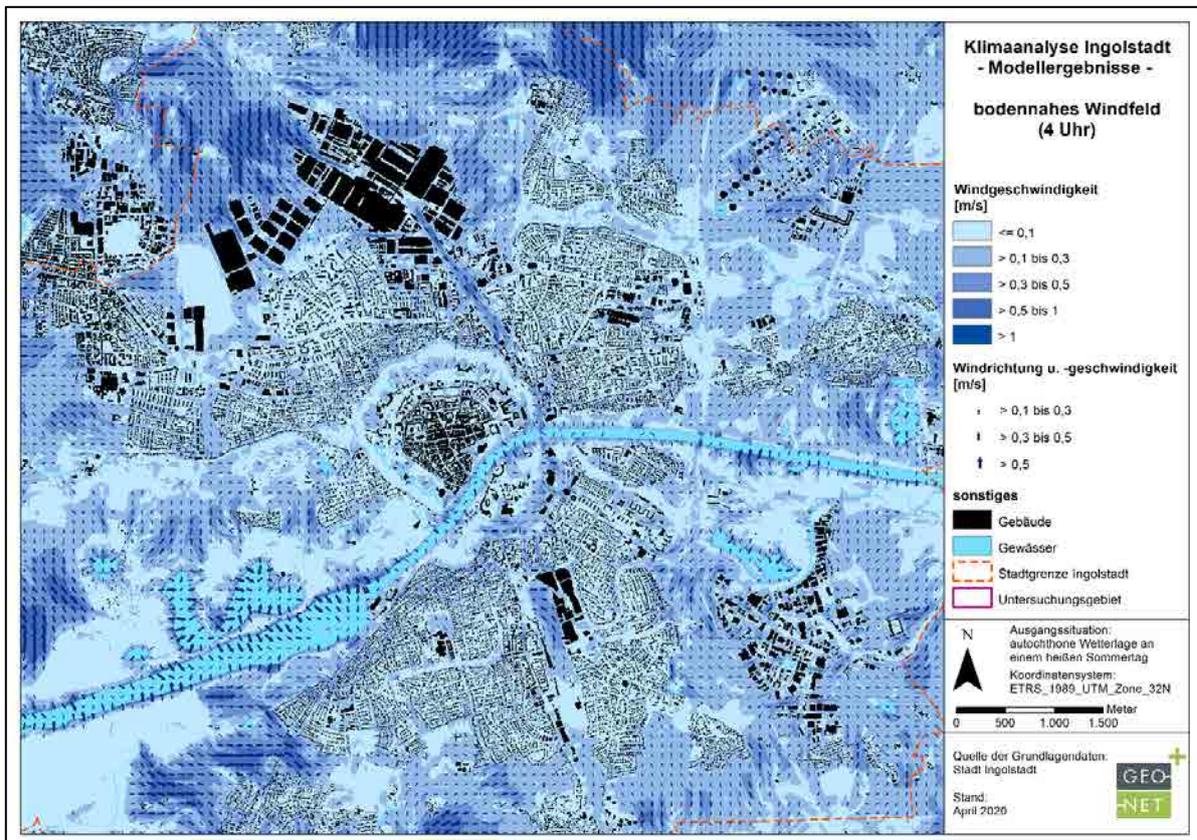


Abb. 9: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld des zentrumsnahen Ingolstädter Stadtgebiets

4.3 KALTLUFTPRODUKTIONSRATE

Die Kaltluftproduktionsrate gibt an wie viel Kaltluft über einer Fläche pro Stunde produziert wird und wird in der Einheit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ angegeben. Abb. 10 zeigt, dass die höchsten Produktionsraten ausschließlich über unversiegelten Freiflächen zu finden sind. Somit stellen die das Stadtgebiet von Ingolstadt umgebenden meist landwirtschaftlichen Freiflächen hinsichtlich Kaltluftproduktionsrate die wertvollsten Gebiete dar. Die höchsten Werte werden in diesem Zusammenhang dort erreicht, wo eine erhöhte bodennahe Strömung stattfindet, da an dieser Stelle ein Abtransport der produzierten Kaltluft gegeben ist und somit die Neubildung gefördert wird. Innerstädtische Grünflächen können trotz ihrer vergleichsweise kleinen Fläche ebenfalls wirksame Kaltluftproduktionsgebiete darstellen (z.B. Hindenburgpark und Klenzepark). Wälder weisen deutlich geringere Kaltluftproduktionsraten auf, da der Baumbestand zum einen als Strömungshindernis wirkt und zudem durch das Kronendach der Bäume die Ausstrahlung reduziert ist. Insgesamt stellen aber auch Wälder wichtige Kaltluftproduktionsflächen dar. Im Siedlungsraum hemmen insbesondere die wärmespeichernde Bodenversiegelung sowie der Gebäudebestand die Kaltluftproduktion, so dass in diesen Bereichen neben Gewässern die geringste Kaltluftproduktion zu beobachten ist.

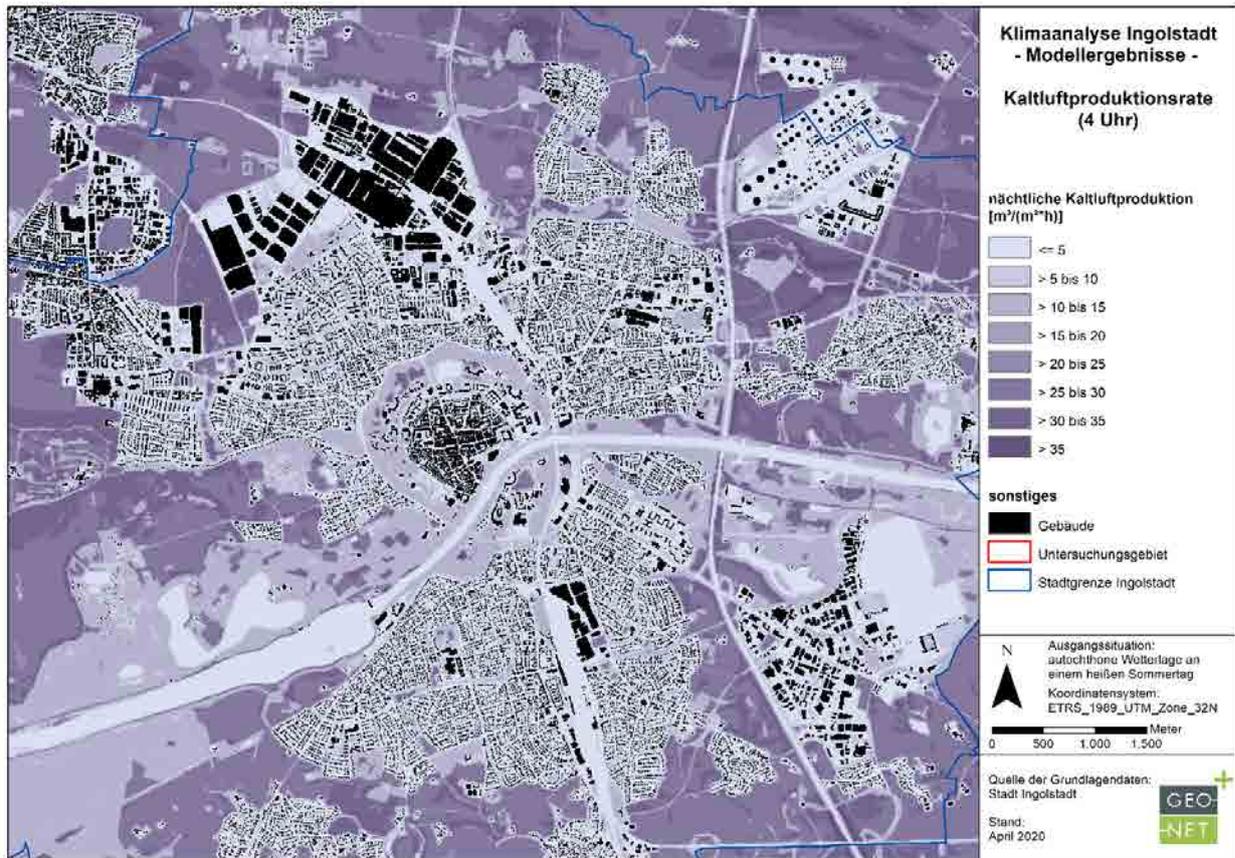


Abb. 10: Nächtliche Kaltluftproduktion im zentrumsnahen Ingolstädter Stadtgebiet

4.4 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit der Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen⁸.

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis & Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können⁹. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen 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

⁸ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

⁹ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. A 1 im Anhang).

ERGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Die geringsten Werte sind über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. Donau, Auwaldsee und Mailingner See; Abb. 11 bzw. Abb. A im Anhang). Flächenhaft heben sich zudem Waldgebiete mit PET-Werten von meist unter 25 °C ab (*keine bis schwache Wärmebelastung*). Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt).

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum zu finden (mehr als 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte. Innerhalb des Stadtgebiets stellen Parkareale innerhalb der städtischen Grüngürtel (z.B. Klenzepark) sowie begrünte Auen-Bereiche (z.B. rund um den Baggersee) mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

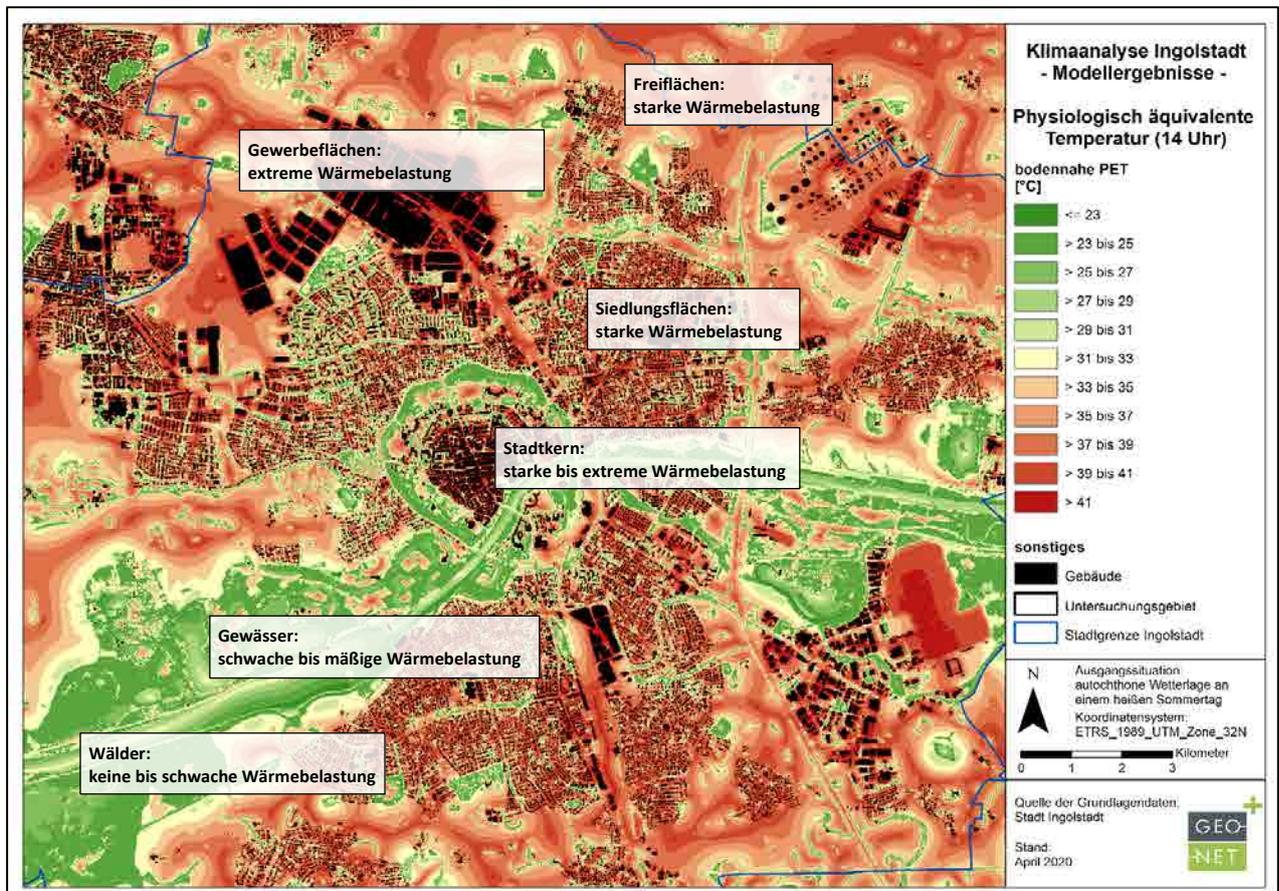


Abb. 11: Wärmebelastung am Tage (PET) des zentrumsnahen Ingolstädter Stadtgebiets.

5. Ausblick

Die in Kapitel 4 beschriebenen Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter stellen die Grundlage für eine weiterführende qualitative Bewertung des Ingolstädter Stadtklimas dar.

Um das Zusammenspiel der untersuchten Klimaparameter übersichtlich darzustellen, erfolgt zunächst die Erstellung einer Klimaanalysekarte für die Nachtsituation. Bei dieser Karte kommt es zu einer räumlichen Unterscheidung zwischen Wirk- und Ausgleichsraum, wobei der Ausgleichsraum aus den Grünflächen und der Wirkraum aus den Siedlungs- und Verkehrsflächen gebildet wird. Die Abb. 12 zeigt für einen Ausschnitt Ingolstadts wie die Klimaanalysekarte in ihren Grundzügen aufgebaut ist. So wird für den Wirkraum die nächtliche Überwärmung gegenüber dem umliegenden Grünflächen dargestellt (Wärmeinseleffekt), wohingegen für den Ausgleichsraum das Kaltluftprozessgeschehen dargestellt wird. In Form von beispielsweise Kaltluftleitbahnen und Einwirkungsbereichen werden die beiden Räume in einem nachfolgenden Schritt miteinander in Beziehung gesetzt, wodurch letztendlich anhand einer einzelnen Karte die klimatische Ist-Situation während einer sommerlichen autochthonen Wetterlage dargestellt werden kann.

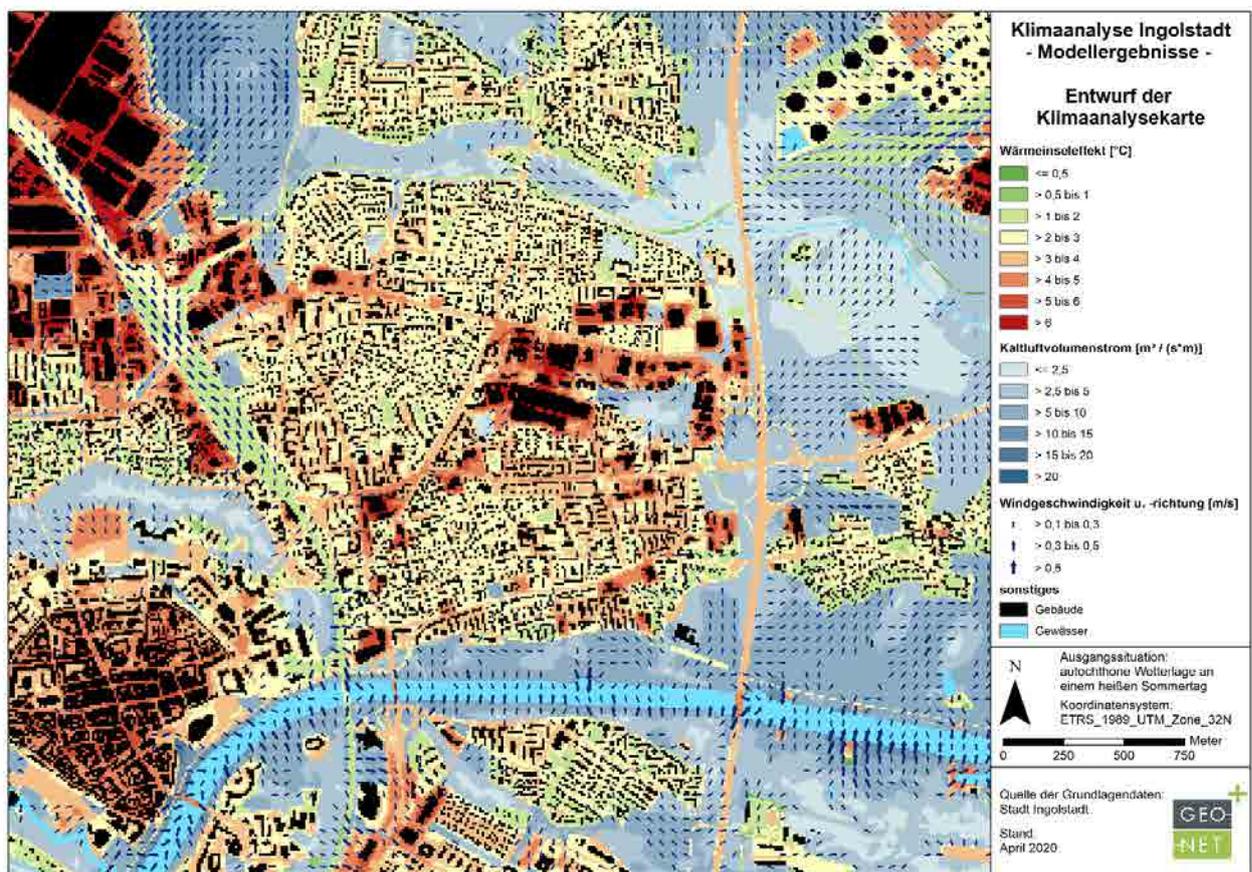


Abb. 12: Entwurf einer Klimaanalysekarte für einen Ausschnitt des Ingolstädter Stadtgebiets.

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Um eine allgemeingültige und flächenbezogene Bewertung vornehmen zu können, erfolgt im nachfolgenden Analyseschritt die Erstellung der Planungshinweiskarte. Die Bewertungen einer solchen Planungshinweiskarte fußen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage die Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

Quellenverzeichnis

- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2019a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon
- DWD (2019b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <https://cdc.dwd.de/portal/>
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Häckel, 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.
- 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.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie*. Paderborn.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. *Environmental Sciences Europe* 2011: 23:21.
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie-Eine Einführung*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A. und H. Mayer (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter No. 18*: 7-10.
- MUNLV (2010) – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: *Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel*.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: *Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung*.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- Stadt Karlsruhe (2014): *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II)*. Forschungsbericht KLIMOPASS.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. *Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft*
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. *Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima*.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. *Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf*.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. *Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima*.

Anhang

Tab. A 1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

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

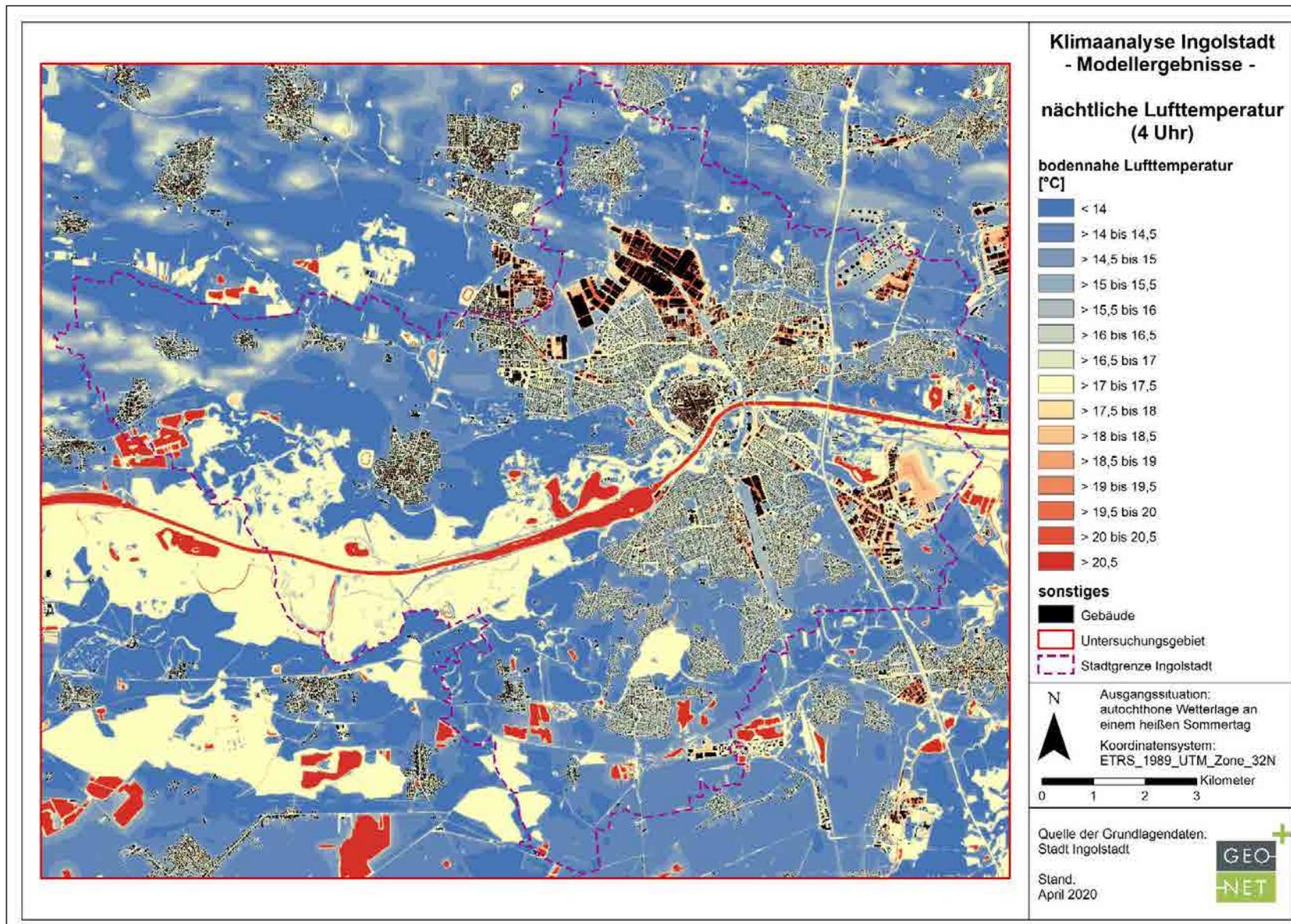


Abb. A 1: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Ingolstädter Stadtgebiet.

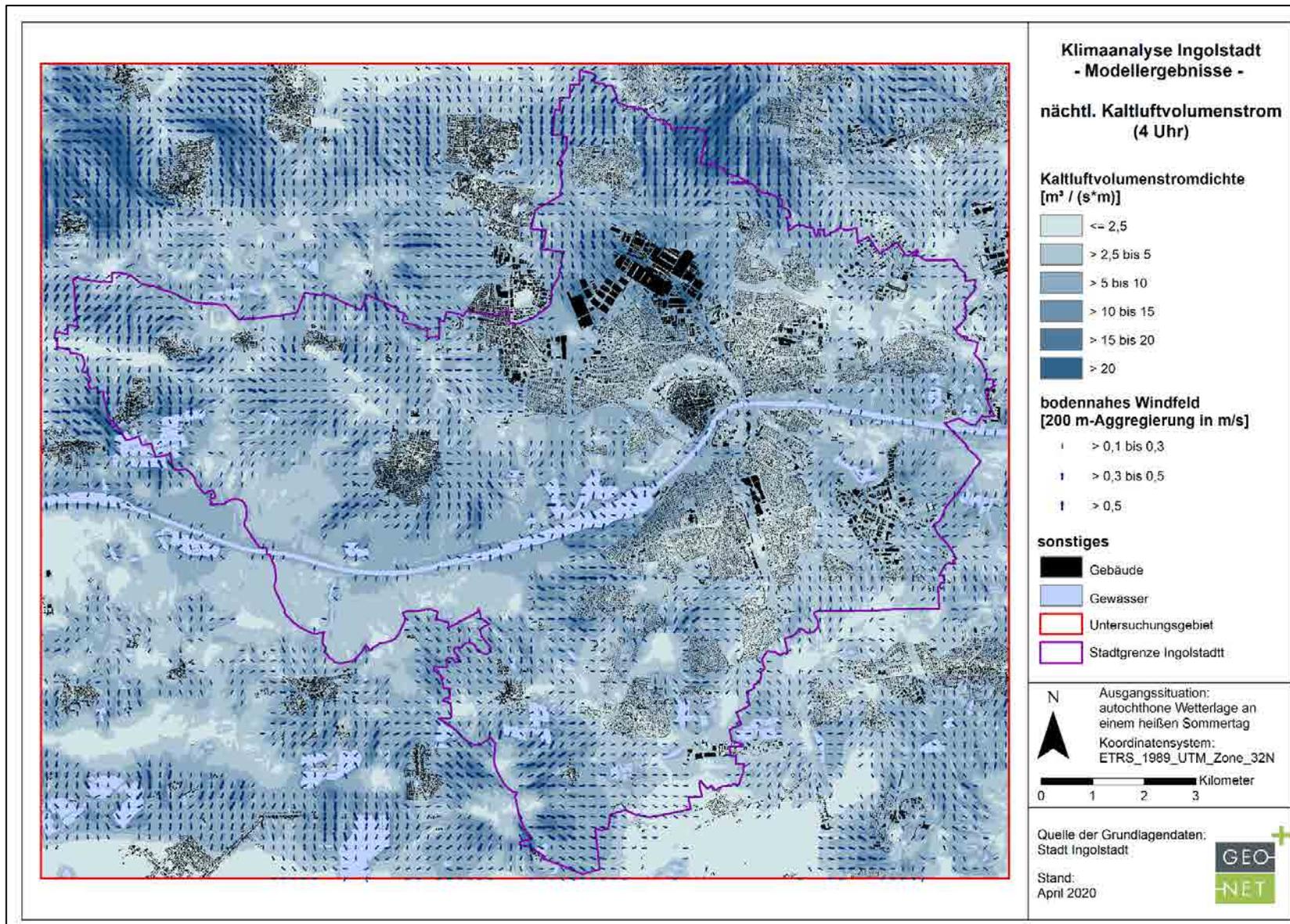


Abb. A 2: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Ingolstädter Stadtgebiet

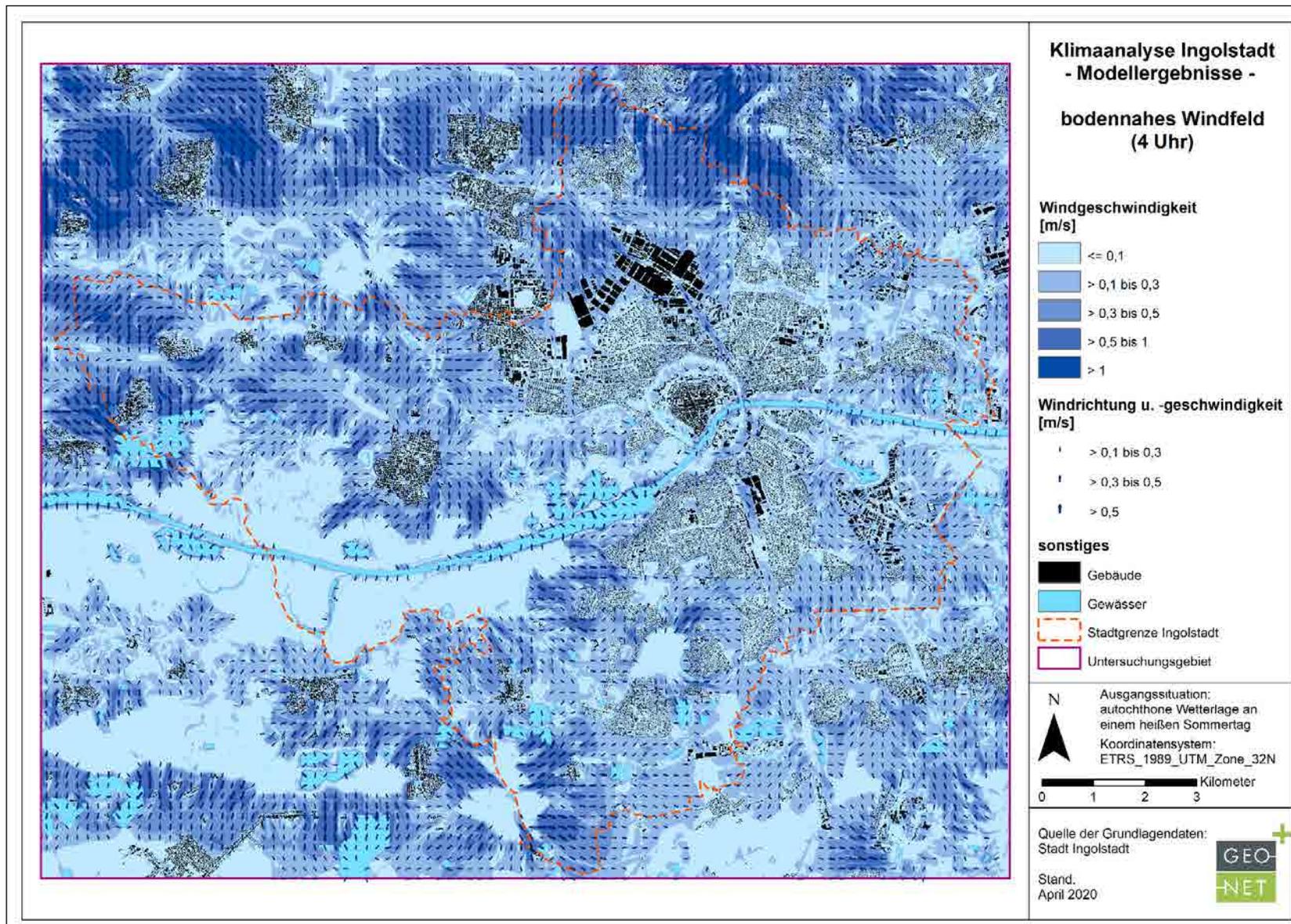


Abb. A 3: Nächtliches bodennahes Kaltluftströmungsfeld im Ingolstädter Stadtgebiet

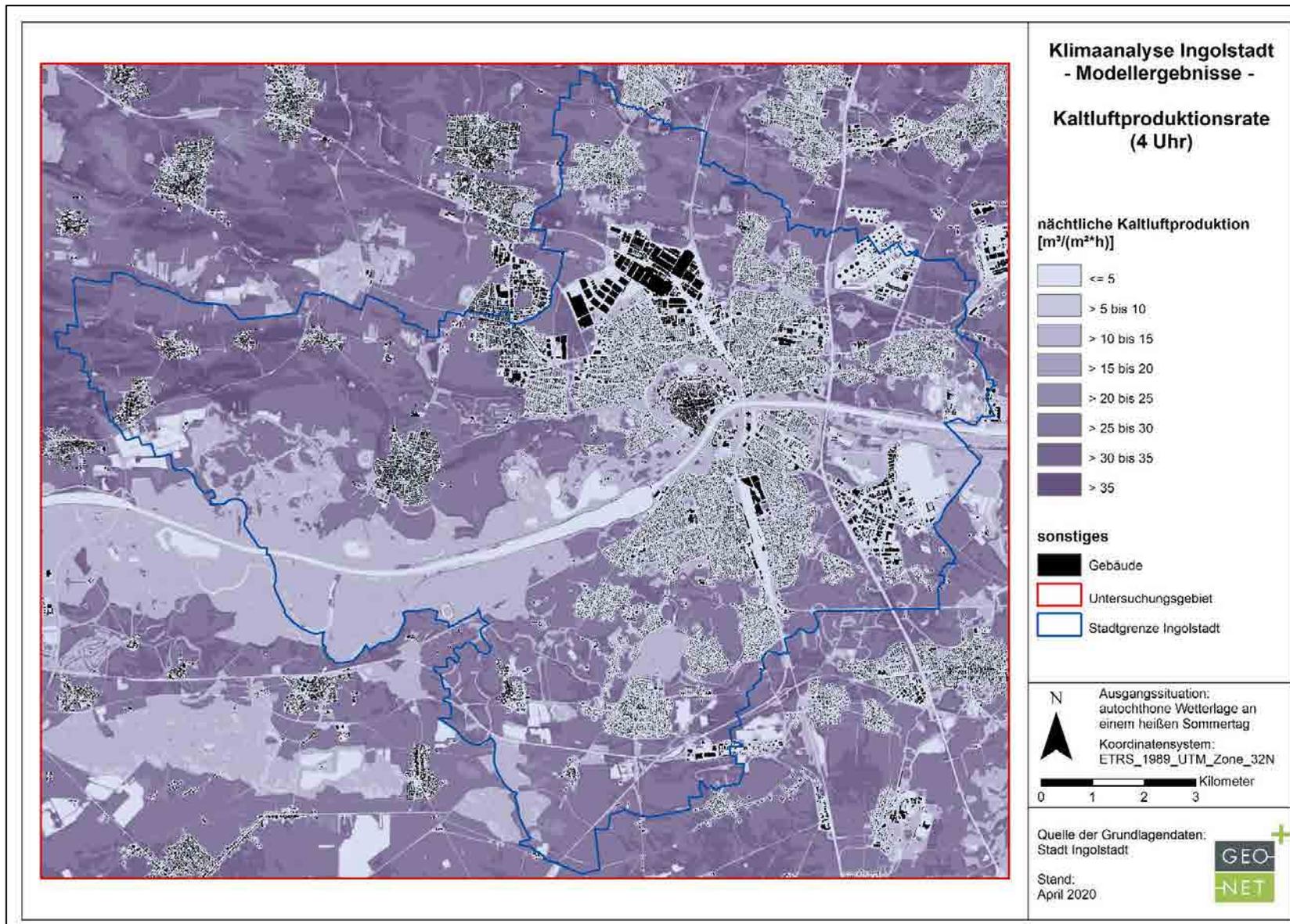


Abb. A 4: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Ingolstädter Stadtgebiet

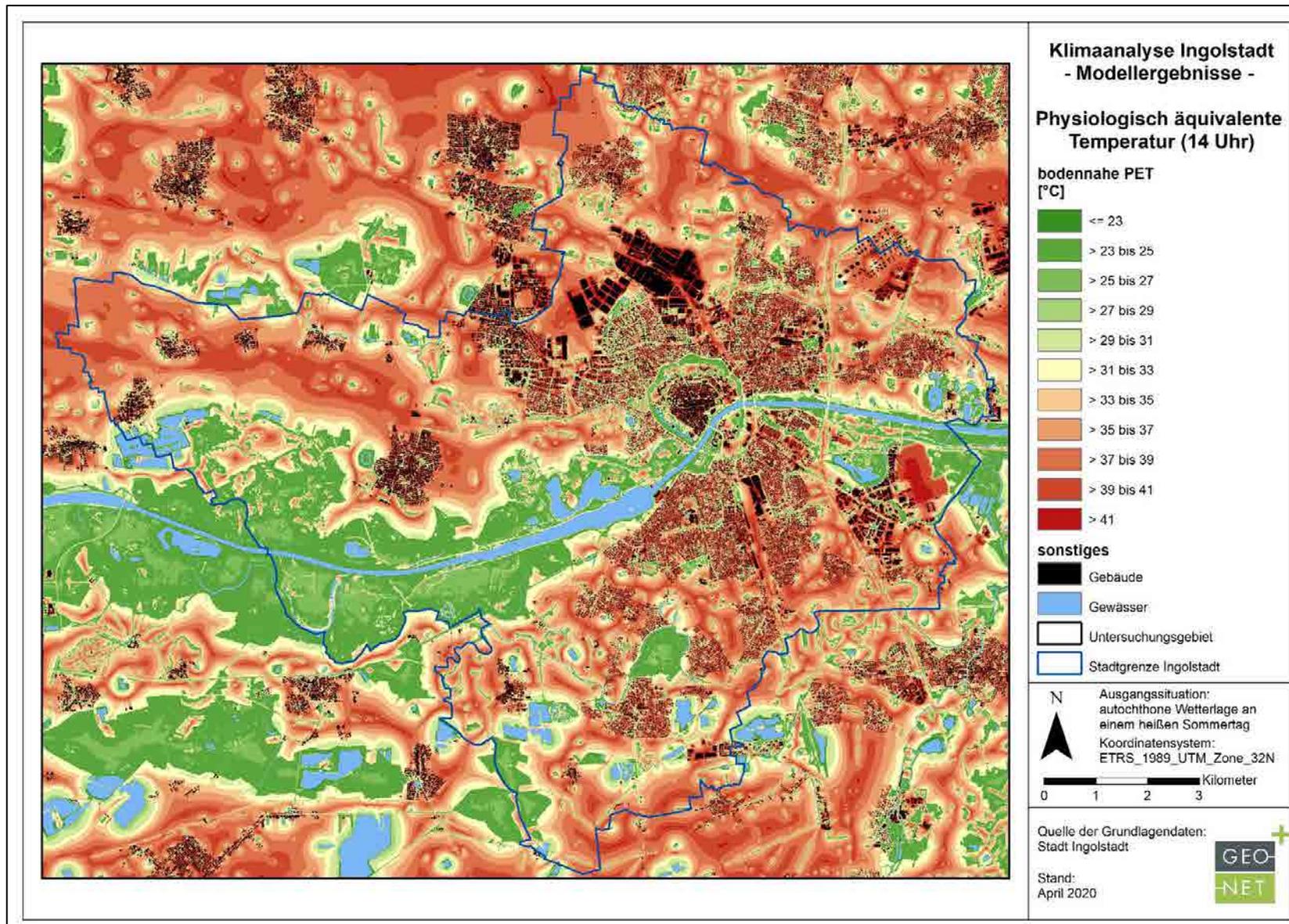


Abb. A 5: Wärmebelastung am Tage (PET) im Ingolstädter Stadtgebiet