Stadt Erlangen

# Klimaanpassungskonzept der Stadt Erlangen



## Teil B: Stadtklimaanalyse Erlangen – Methodik und Ergebnisse


Erstellt von:

**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**, Hannover

**MUST Städtebau GmbH**, Köln

Im Auftrag der

**Stadt Erlangen**

**Amt für Umweltschutz und Energiefragen**


**Mai 2019**


GEFÖRDERT DURCH:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

NATIONALE KLIMASCHUTZ INITIATIVE

# Inhaltsverzeichnis


GLOSSAR ..... III

1. EINFÜHRUNG ..... 1

Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen ..... 1

2. FACHLICHE GRUNDLAGEN ..... 3

2.1 Der Wärmeinseleffekt ..... 3

2.2 Stadtklima in Erlangen ..... 4

2.2.1 Großraumklima ..... 4

2.2.1 Meteorologische Kennzahlen in Erlangen ..... 5

3. METHODIK DER MODELLGESTÜTZTEN STADTKLIMAANALYSE ..... 9

3.1 Untersuchungsgebiet ..... 9

3.2 Betrachtete Wetterlage ..... 10

3.3 Das mesoskalige Modell FITNAH 3D ..... 11

3.4 Modelleingangsdaten ..... 12

4. MODELLERGEBNISSE ..... 15

4.1 Nächtliches Temperaturfeld ..... 15

4.2 Kaltluftströmungsfeld ..... 18

4.3 Thermische Belastung am Tage ..... 22

4.4 Lufthygiene ..... 24

5. KLIMAANALYSEKARTE ..... 27

5.1 Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen ..... 27

5.2 Kaltlufteinwirkbereich ..... 28

5.3 Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen ..... 28

**6. PLANUNGSHINWEISKARTEN ..... 31**

**6.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation) ..... 31**

**6.2 Bewertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Strassenflächen (Wirkunsgraum) ..... 32**

6.2.1 Bewertung der Nachtsituation ..... 32

6.2.2 Bewertung der Tagsituation ..... 33

**6.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) ..... 34**

6.3.1 Bewertung der Grünflächen in der Nacht ..... 34

6.3.2 Bewertung der Grünflächen am Tage ..... 35

**6.4 Ergebnisse Planungshinweiskarten ..... 36**

6.4.1 PHK Nacht ..... 36

6.4.2 PHK Tag ..... 39

**6.5 Massnahmenkatalog Stadtklima ..... 42**

**7. ZUSAMMENFASSUNG ..... 48**

**QUELLENVERZEICHNIS ..... 51**

**ANHANG ..... I**

Bildnachweis Titelfolie: Stadt Erlangen, Hans-Heinrich Moritz

# 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:** Grüngeprägte, 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).

**Fläche hochempfindlicher thermischer Funktionalität:** Die Regnitz-Aue weist zwar keine klassische Leitbahnfunktion auf, als flächenhaft durchlüfteter Grünraum mit Siedlungsbezug und durch die Trennung der beiden Siedlungsbereiche Innenstadt und Büchenbach, verhindert sie jedoch die Ausbildung eines noch stärkeren Wärmeinseleffekts.

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

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

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

**Kaltlufteinwirkbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* > 24,9 m³/(s*m) durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

**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).

**Kaltluftleitbahnen, lokale:** „Lokale“ Kaltluftleitbahnen dienen den jeweiligen Stadtgebieten als Leitbahnen zur Kaltluftversorgung.

**Kaltluftleitbahnen, übergeordnete:** „Übergeordnete“ Kaltluftleitbahnen tragen Kaltluft bis weit in das thermisch belastete und dicht besiedelte Zentrum.

**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m³/(s*m)). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *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 (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

**RCP-Szenarien:** 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/m² 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** → *Autochthone Wetterlage*

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

**Wirkungsraum:** Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (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

Innerhalb des Klimaanpassungskonzepts der Stadt Erlangen nimmt das Handlungsfeld „Hitze in der Stadt“ eine besondere Stellung ein, da in einigen Stadtgebieten bereits heute hohe Wärmebelastungen auftreten und sich in Zukunft steigende Temperaturen sowie häufigere Hitzeereignisse abzeichnen. Um Strategien bzw. Maßnahmen zur Minderung der Belastung und Anpassung an die erwartenden Klimaveränderungen zu entwickeln, bedarf es räumlich genauer Informationen zur bioklimatischen Situation in Erlangen.

Bisherige Aussagen zum Erlanger Stadtklima stützen sich auf das Klimagutachten des Deutschen Wetterdiensts aus dem Jahr 1989 (DWD 1989) und dessen Fortschreibung im Jahr 2002 (Strobel 2002, Samimi und Strobel 2003/04). Angesichts der seitdem erfolgten Siedlungsentwicklung war im Hinblick auf das derzeitige Belastungsniveau und künftige städtebauliche Planungen eine Aktualisierung der Klimaanalyse notwendig. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mesoskalige Rechnung 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 Erlanger Stadtklimas.

Der vorliegende Bericht erläutert die Methodik der Stadtklimaanalyse (Kap. 3) und geht auf die Ergebnisse der Modellrechnung ein (Kap. 4). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „Klimaanalysekarte“ zusammengefasst werden (Kap. 5). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, Bewertungen der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarten; Kap. 6).

Die erarbeiteten Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an die „Hitze in der Stadt“ sowie weiteren durch den Klimawandel betroffenen Handlungsfeldern werden im separaten Bericht „Klimaanpassungskonzept der Stadt Erlangen. Teil A: Klimaanpassungsstrategie“ beschrieben (Stadt Erlangen 2019). Das Projekt wurde als „Klimaschutzteilkonzept zur Klimaanpassung“ im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gefördert (Förderkennzeichen 03K06266).

#### *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 der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen 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 es 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 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, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als **Städtische Wärmeinsel** bezeichnet.

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].

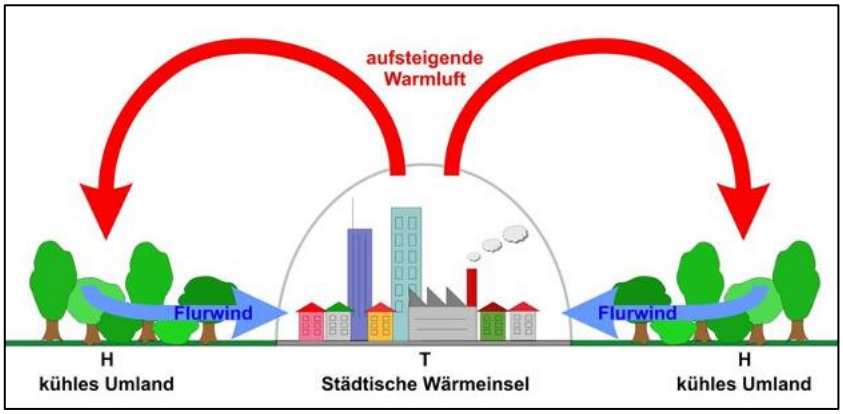



Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

[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 Albedo[2], 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 herabgesetzt[3] (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, insb. 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 ERLANGEN

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

Erlangen liegt in der kühlgemäßigten Klimazone, im Übergangsbereich zwischen maritimen und kontinentalen Klima (vgl. Strobel 2002). 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.

In der regionalen Einstufung zählt Erlangen zum Klimabezirk Mittelfranken, der zum größten Teil westlich der Regnitz liegt und, aufgrund seiner Lage im Mittelfränkischen Becken, relativ geringe Niederschläge verzeichnet. Östlich der Regnitz nehmen die Niederschläge zu, da die Fränkische Alb Stauwirkung besitzt und Steigungsregen verursacht. Mit ca. 630 - 690 mm Jahresniederschlag im langjährigen Mittel (1971 - 2000) zählt Erlangen zu den trockeneren Regionen in Bayern (Zeitraum 1971 - 2000; vgl. Tab. 1 und Strobel 2002).

[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 ($T_{max} \geq 30$ °C) sowie des Jahresniederschlags im Zeitraum 1971 -2000 an den DWD-Stationen Möhrendorf-Kleinseebach, Nürnberg und weiteren Standorten in Deutschland (eigene Berechnung nach DWD 2019b).

| **DWD-Station** (Höhe über Grund) | **Lufttemperatur [°C]** Mittelwert (± Stabw.) | **Heiße Tage [Anzahl pro Jahr]** Mittelwert | **Jahresniederschlag [mm]** Mittelwert (± Stabw.) |
|---|---|---|---|
| Möhrendorf-Kleinseeb. (270 m) | 9,0 (± 0,7) | 6,8 | 687 (± 102) |
| 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) |

### 2.2.1 METEOROLOGISCHE KENNZAHLEN IN ERLANGEN

Anhand der nahegelegenen DWD-Stationen Möhrendorf-Kleinseebach (ca. 2 km nördlich des Stadtkerns[4]) und Nürnberg-Flughafen (ca. 11 km südöstlich des Stadtkerns) können die klimatischen Gegebenheiten in Erlangen abgeleitet werden. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die folgenden Kennzahlen auf die DWD-Station Nürnberg, da nur für diese Station eine Windrose im betrachteten Zeitraum bestimmt werden kann.

Das langjährige Mittel der **Lufttemperatur** spiegelt den Einfluss des kontinentalen Klimas wider und wird überdies durch die Höhenlage der Station beeinflusst. Mit 9,1 °C erreicht es ein ähnliches Niveau wie in Dresden oder Hannover, während die Werte in Essen (maritimer geprägtes Klima) und insb. Karlsruhe höher liegen (der Oberrheingraben zählt zu den wärmsten Regionen Deutschlands; Tab. 1). Die Jahresmitteltemperatur ist Schwankungen unterworfen, doch zeigt sich ein klar zunehmender Trend über die letzten knapp 140 Jahre – insb. seit den 1990er Jahren wurden vorwiegend überdurchschnittlich warme Jahre beobachtet (Abb. 2). Diese Entwicklung setzt sich in Zukunft fort, sodass bis Ende des Jahrhunderts ein weiterer Temperaturanstieg um 1,0 - 1,6 °C („Klimaschutz"-Szenario RCP 2.6[5]) bzw. 3,1 - 4,6 °C („weiter wie bisher"-Szenario RCP 8.5) erwartet wird[6].

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 8 Heißen Tagen pro Jahr liegt der Raum Erlangen im Mittel über den Vergleichswerten nord- und westdeutscher Städte, 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 1 Heißen Tag im Jahr 1978 und 27 Heißen Tagen in 1994 – im vergangenen Jahr 2018 wurden sogar 31 Ereignisse gezählt.

[4] Seit 2006 liegt die Station an einem neuen Standort ca. 6 km nördlich des Erlanger Stadtkerns.

[5] *Representative Concentration Pathways* = Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre

[6] Änderungssignal verschiedener Modelläufe zwischen der fernen Zukunft (2071 – 2100) und der Referenzperiode 1971 - 2000

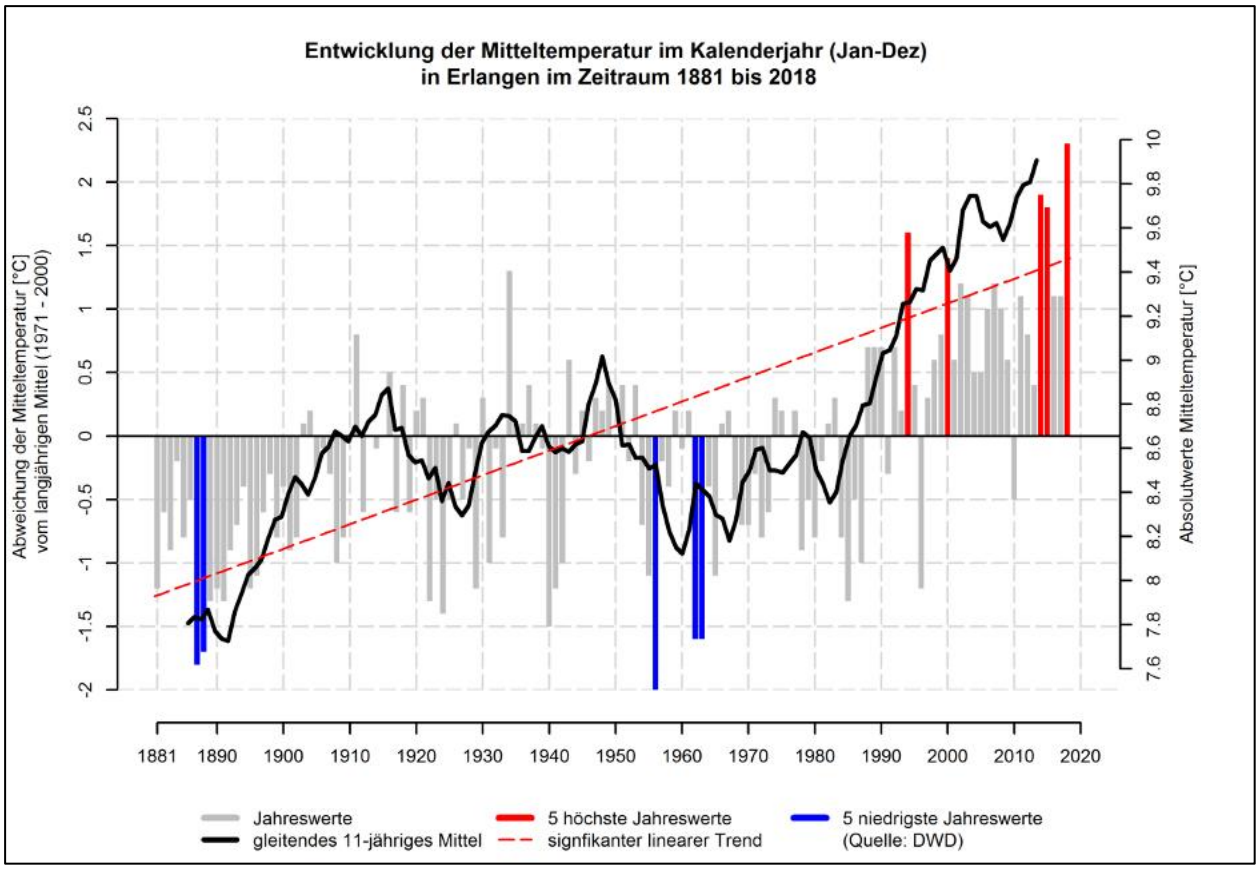



Abb. 2: Entwicklung der Mitteltemperatur in Erlangen im Zeitraum von 1881 bis 2018 (Quelle: eigene Berechnung nach DWDb)

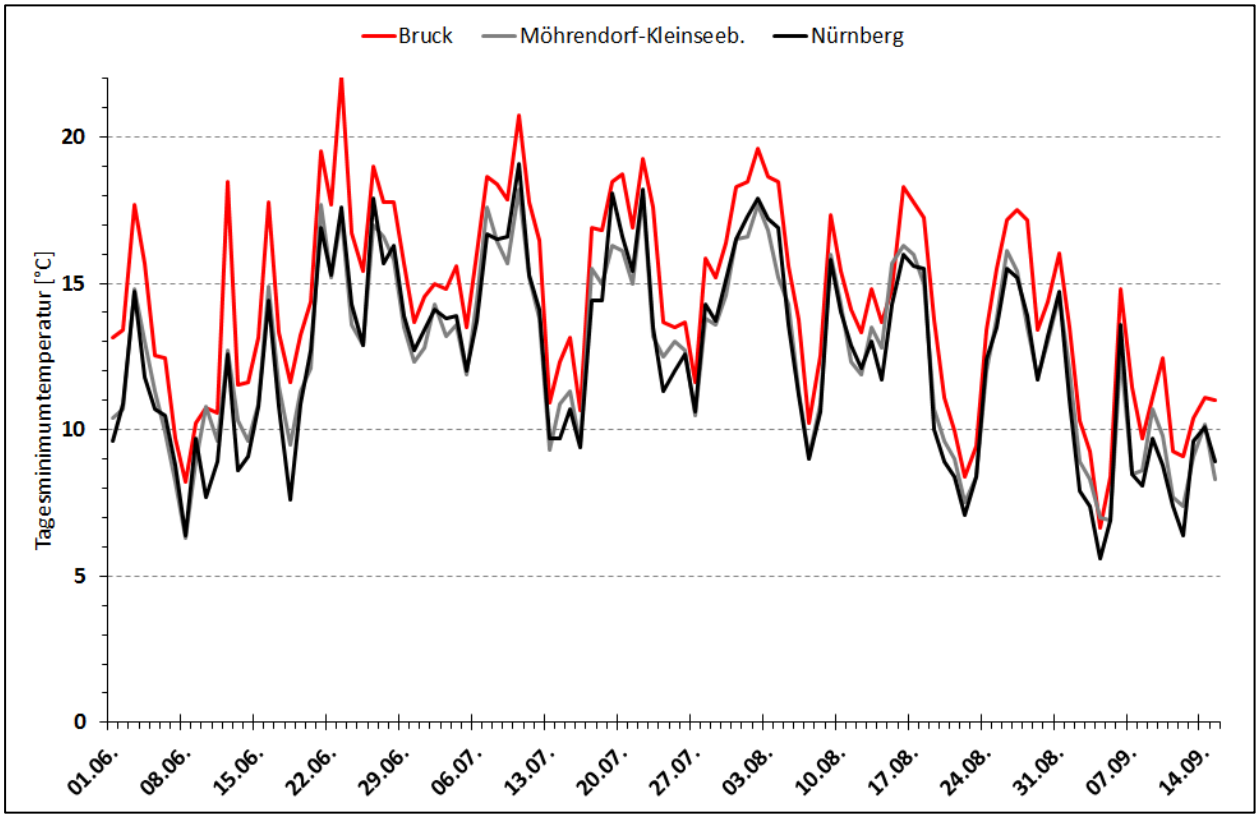



Abb. 3: Tagesminimumtemperaturen im Sommer 2017 an der ESTW-Station in ER-Bruck sowie den DWD-Stationen Möhrendorf-Kleinseebach und Nürnberg (Quellen: eigene Berechnung nach DWD 2019b, ESTW 2018)

Das Auftreten und die Intensität von Hitzeereignissen werden in Erlangen durch den Klimawandel weiter zunehmen. So ist für die mittlere Zukunft mit einer Verdopplung bis Verdreifachung der Anzahl Heißer Tage zu rechnen (Zunahme von derzeit 8 auf 19 - 26 Heiße Tage pro Jahr in 2041 - 2070 im „weiter wie bisher"-Szenario RCP 8.5; detaillierte Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Stadt Erlangen (2019)).

Bei den meteorologischen Kennzahlen ist zu beachten, dass Messstationen meist am Rand bzw. näheren Umland der Städte liegen, die Wärmebelastung im Stadtkern in der Regel aber noch höher ausfällt (insbesondere in den Nachtstunden). Abb. 3 verdeutlicht, dass der im Vorkapitel in der Theorie beschriebene Wärmeinseleffekt in Erlangen auch messtechnisch nachgewiesen werden kann. Dargestellt ist die Tagesminimumtemperatur im Sommer 2017, die an der urban geprägten ESTW-Messstation in Erlangen-Bruck[7] im Mittel knapp 2 °C höher ausfällt als an den DWD-Stationen im städtischen Umland. In einzelnen Nächten lag die Temperatur in ER-Bruck bis zu 6 °C über den Werten der DWD-Stationen. Entsprechend können im Stadtgebiet auch dann nächtliche Belastungssituationen wie bspw. **Tropennächte**[8] auftreten, wenn an den Umland-Stationen keine solcher Ereignisse gemessen werden (im Sommer 2017 bspw. an den DWD-Stationen keine, in ER-Bruck dagegen zwei Tropennächte).

**Starkregenereignisse** sind unabhängig von der Jahresniederschlagssumme zu sehen und können zu schweren Schäden im Stadtgebiet führen, darunter an Infrastrukturen (Verkehr, Gebäude), in der Landwirtschaft oder im Extremfall zu Gefahren für die menschliche Gesundheit. Der Grund dafür ist, dass Kanalsysteme nur für einen gewissen Bemessungsregen ausgelegt sind und darüber hinausgehende Mengen nicht aufnehmen können, sodass Überflutungen die Folge sein können. In Erlangen gab es in der Vergangenheit, wenn auch selten, einzelne Starkregenereignisse – zukünftig muss von einer Zunahme der Niederschlagsintensität sowie häufigeren Ereignissen ausgegangen werden (vgl. Stadt Erlangen 2019). Starkregen treten meist sehr kleinräumig mit einer hohen räumlichen Variabilität auf[9]. Bspw. wurde im Juni 2018 an der DWD-Station Nürnberg ein entsprechendes Ereignis beobachtet, während zeitgleich in Möhrendorf-Kleinseebach keinerlei Niederschläge zu verzeichnen waren – genau umgekehrt war es im September 2014 (Tab. 2).

Tab. 2: Niederschlagsmengen der DWD-Stationen Möhrendorf-Kleinseebach und Nürnberg an drei ausgewählten Starkregenereignissen (eigene Berechnung nach DWD 2019b).

| | **Möhrendorf-Kleinseeb.**<br>Niederschlag [mm] | **Nürnberg**<br>Niederschlag [mm] |
|---|---|---|
| 21.07.2007 (3 h-Ereignis) | 59,2 | 41,2 |
| 07.09.2014 (2 h-Ereignis) | 0,4 | 60,8 |
| 31.05.2018 (2 h-Ereignis) | 71,0 | 0,0 |

[7] Station der Erlanger Stadtwerke auf einem Parkplatz an der Henri-Dunant-Straße (1 h-Werte der Lufttemperatur in 2 m ü.Gr.)

[8] Die nächtliche Lufttemperatur sinkt nicht unter 20 °C.

[9] Aus diesem Grund sind Aussagen zu den erwarteten Folgen des Klimawandels noch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, zumal Starkregenereignisse zu den seltenen Ereignissen zählen und somit statistisch nur unzureichend beschreibbar sind.

Die langjährige **Windrichtungsverteilung** im Raum Erlangen zeigt vornehmlich westliche und östliche Anströmungen (DWD-Station Nürnberg; Abb. 4). Am Tage überwiegen (bei erwartet höheren Windgeschwindigkeiten) Strömungen aus West bzw. Westsüdwest, nachts herrschen meist östliche Windrichtungen vor.

Für die Ausbildung des lokalen Klimas ist Erlangens Lage im flachen Regnitztal von Bedeutung, das mit seinen Randhöhen eine Leitwirkung auf die großräumigen Windströmungen erwarten lässt. Die geringer besiedelten Osthänge der westlichen Randhöhen sowie die Freiflächen des Burgberges können der Entstehung schwacher lokaler Hangwindzirkulationen dienlich sein. Im Bereich des dichter besiedelten östlichen Stadtgebietes an den Füßen der bewaldeten Hügelkämme sind die Bedingungen für die Ausprägung von bodennahen Hangwinden weniger günstig (jeweils DWD 1989). Folglich können nur Teile des Erlanger Stadtgebiets wirksam über Hangabwinde durchlüftet werden.

Fällt während autochthoner Sommernächte die übergeordnete Strömung weg, reduziert sich die Durchlüftung des Stadtgebiets (umgangssprachlich heißt es dann meist „die Luft steht“), was zu einer höheren thermischen Belastung führt. Entsprechend simuliert die vorliegende Stadtklimaanalyse eine solche Wetterlage, bei der neben Hangabwinden auch Flurwinde als Ausgleichsströmungen in den Vordergrund rücken (vgl. Kap. 3.2). In der Vergangenheit traten diese „windschwachen Strahlungsnächte“ im Sommer an etwa 7 - 10 Nächten pro Monat auf[10] (ca. 25 % der Sommernächte; vgl. Abb. A 1 im Anhang).

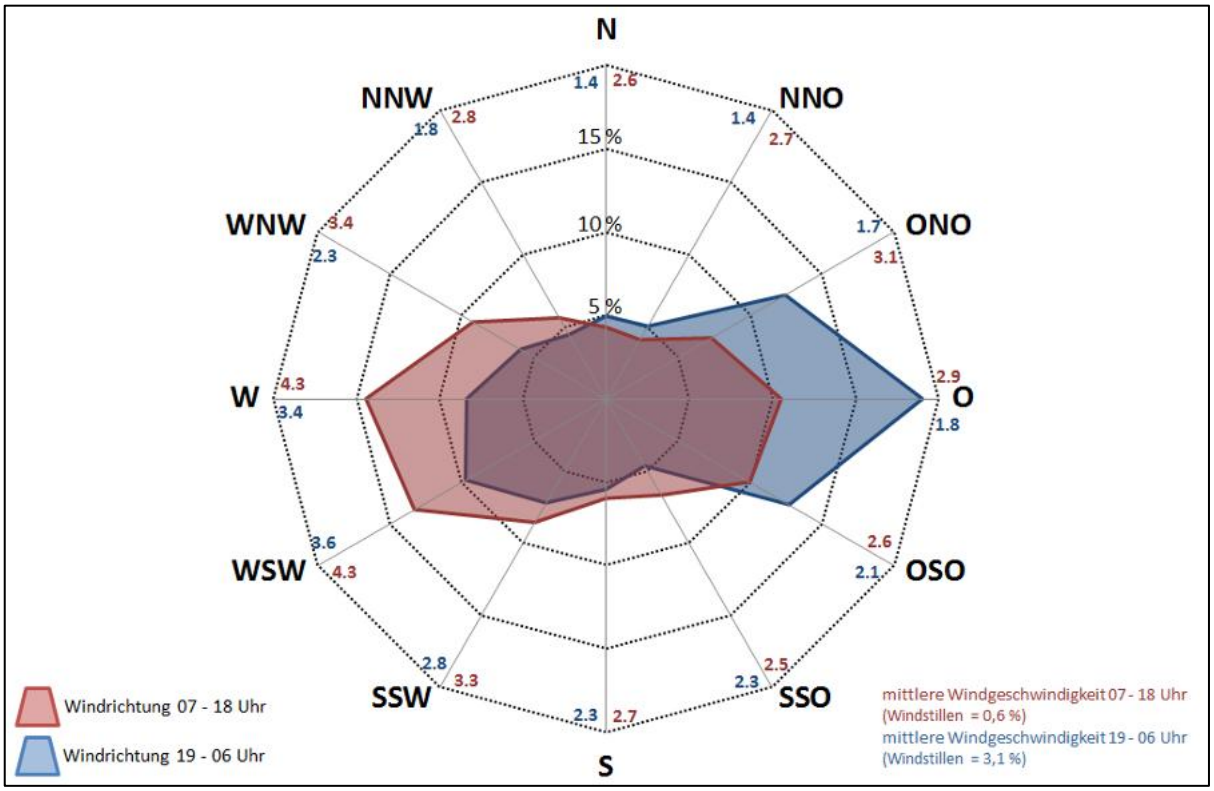


Abb. 4: Windrichtungsverteilung in 10 m über Grund für den Zeitraum 1971-2010 (Windrichtung erst ab 1975) an der DWD-Station Nürnberg (bezogen auf stündliche Werte; eigene Berechnung nach DWD 2019b)

[10] Monatliches Mittel der Anzahl windschwacher Strahlungsnächte an der DWD-Station Nürnberg im Zeitraum 1971-2018 anhand folgender Kriterien nach Augter/DWD (1997):

- Windgeschwindigkeit ≤ 2.7 m/s in 10 m ü.Gr. und Bedeckungsgrad höchstens vier Achtel in der Nacht
- Kriterien müssen für zehn Stunden innerhalb des Zeitraums 17:00 - 05:00 MEZ (Lücken erlaubt) oder an sieben aufeinanderfolgenden Stunden innerhalb desselben Zeitraums erfüllt sein (ohne Lücke)

# 3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse

## 3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Erlangen liegt im Bereich der naturräumlichen Haupteinheiten „Mittelfränkisches Becken“ (größter Teil des Stadtgebiets) und „Vorland der nördlichen Frankenalb“ (nordöstlicher Teil des Stadtgebiets mit Rathsberg und Burgberg; Strobel 2002).

Das Stadtgebiet Erlangens erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 10 km in Ost-West- bzw. 12 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von 77 km² (Stadt Erlangen 2019b[11]). Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von 254 km² auf (14,5 km x 17,5 km), damit die im Umland gelegenen Höhenunterschiede mit Einfluss auf das Erlanger Stadtklima erfasst werden (Abb. 5).

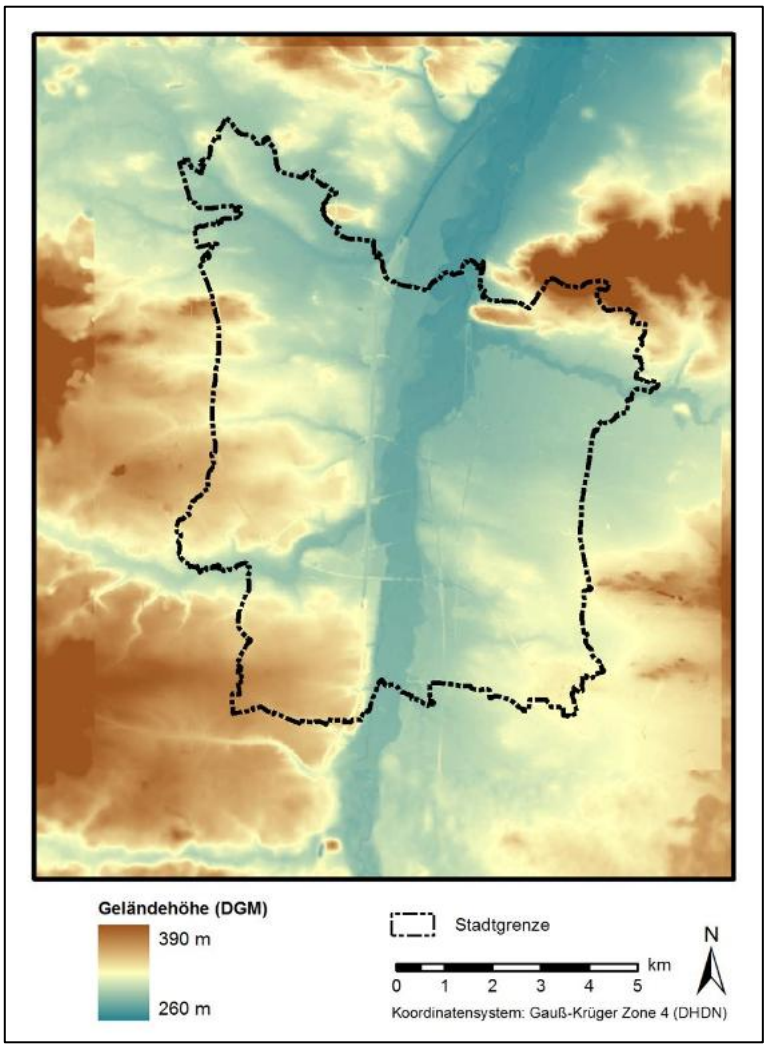



Abb. 5: Für die Modellrechnung bestimmtes Untersuchungsgebiet um die Stadt Erlangen (schwarzer Kasten) und Darstellung der Geländehöhe

[11] www.erlangen.de/desktopdefault.aspx/tabid-1587/2174_read-10609, Abruf 21.05.2019.

## 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. 6 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 (in Erlangen in etwa 25 % der Sommernächte; vgl. Kap. 2.2.1).

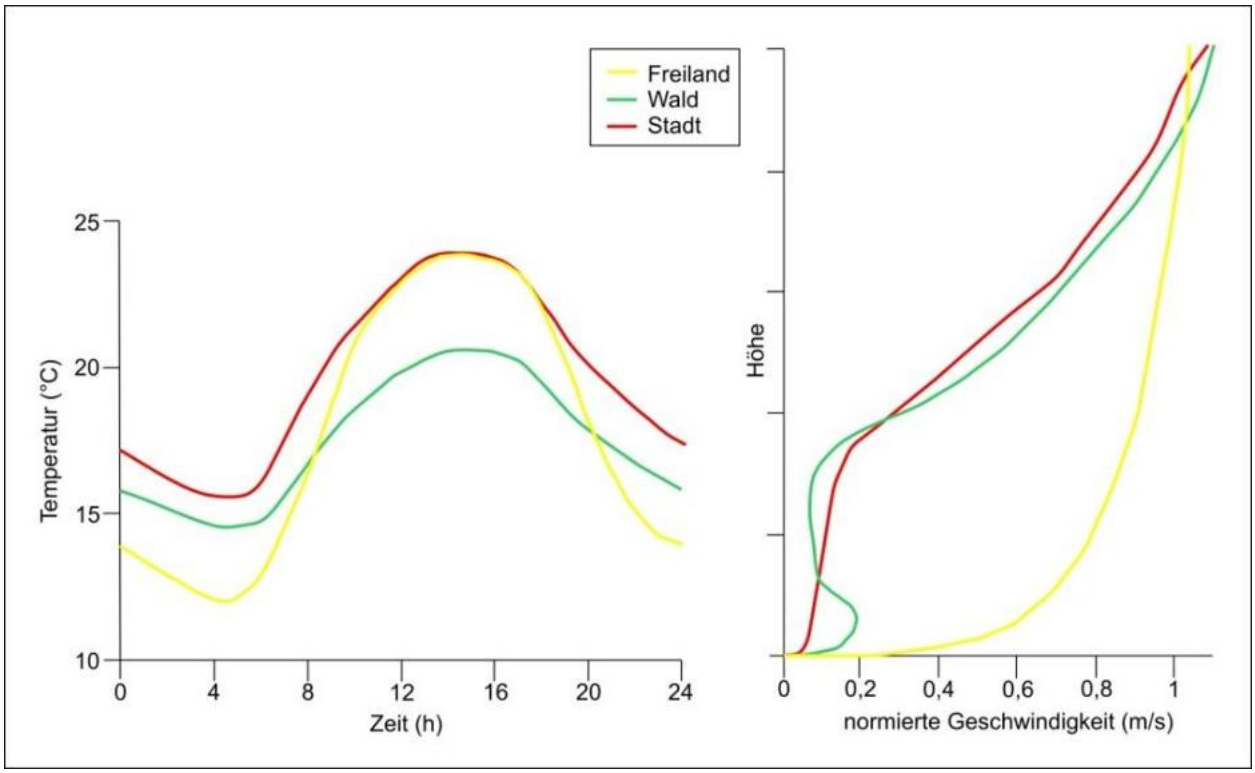



Abb. 6: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

## 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 mirkoskaliger 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 tiefergehende 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 Erlangen zur Verfügung gestellt wurden:

- Geländehöhe
  - Abgeleitet aus einem DGM 5 m (Digitales Geländemodell, Stand 2013)
- Landnutzung
  - ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem, 05/2018), ergänzt um
  - Baum- und Grünkataster (2018) sowie
  - Geodaten der Hauptverkehrsstraßen inkl. Angaben zum Verkehrsaufkommen (DTVw, 2017)
  - Gebäudegrundrisse (2019, nachrichtlich)
- Strukturhöhe
  - Laserscanbefliegung (DOM, 2013)
  - Gebäudehöhe (LOD1, 2017)
  - Lärmschutzwände
- Versiegelungsgrad

Bei der vorliegenden mesoskaligen Modellrechnung im 25 m-Raster konnten keine einzelnen Gebäude oder Bäume aufgelöst werden, sodass die Landnutzung, genau wie Angaben zum Versiegelungsgrad, über verschiedene Nutzungsklassen parametrisiert wurde (z.B. weist die Blockrandbebauung eine dichtere und höhere Bebauung auf als Einfamilienhausgebiete, die dagegen einen höheren Anteil an Grünflächen enthalten; vgl. Abb. 7). Dennoch konnten das Baumkataster sowie Gebäudedaten verwendet werden, um die Einteilung der Nutzungsklassen zu verbessern. Ähnlich verhält es sich bei Lärmschutzwänden, die im 25 m-Raster nicht erfasst, jedoch als wichtige Strömungshindernisse bei der Parametrisierung der Strukturhöhe verwendet wurden.

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. Damit die Ergebnisse bestmöglich das Stadtbild der nächsten Jahre widerspiegeln, wurden bereits feststehende Bauvorhaben wie der Siemens-Campus in die Modellrechnung integriert (B-Pläne 345, 347, 411, 412, 435 und 436 sowie das Bürgerbegegnungszentrum an der Hartmannstr.).

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Außerhalb des Erlanger Stadtgebiets wurde dabei auf frei verfügbare Daten in geringerer räumlicher Auflösung wie Urban Atlas-Daten[12] für die Landnutzung (Stand 2012) sowie SRTM-Daten für die Geländehöhe (Stand 2000) zurückgegriffen.

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

[12] Aus dem “Copernicus Land Monitoring Service” der European Environment Agency (EEA).

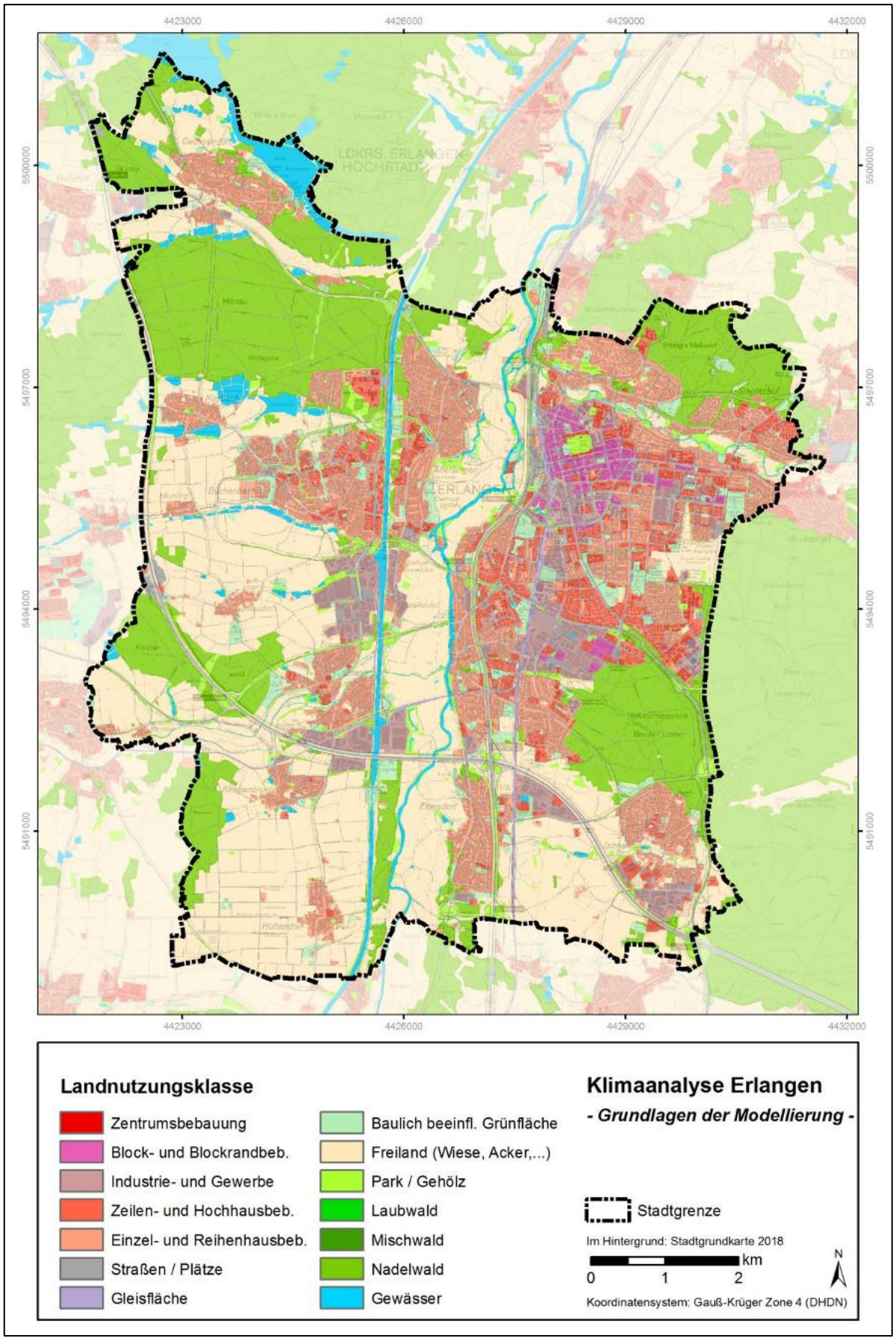



Abb. 7: Landnutzungsklassen auf Blockflächenebene im Erlanger Stadtgebiet

### *AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN*

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 25 m zu erzeugen (Schritt 1 und 2 in Abb. 8). 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 ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein (vgl. Abb. 7). Die rasterbasierten Modellergebnisse werden nun auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4 in Abb. 8).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 4), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Klimaanalysekarte in Kap. 5).

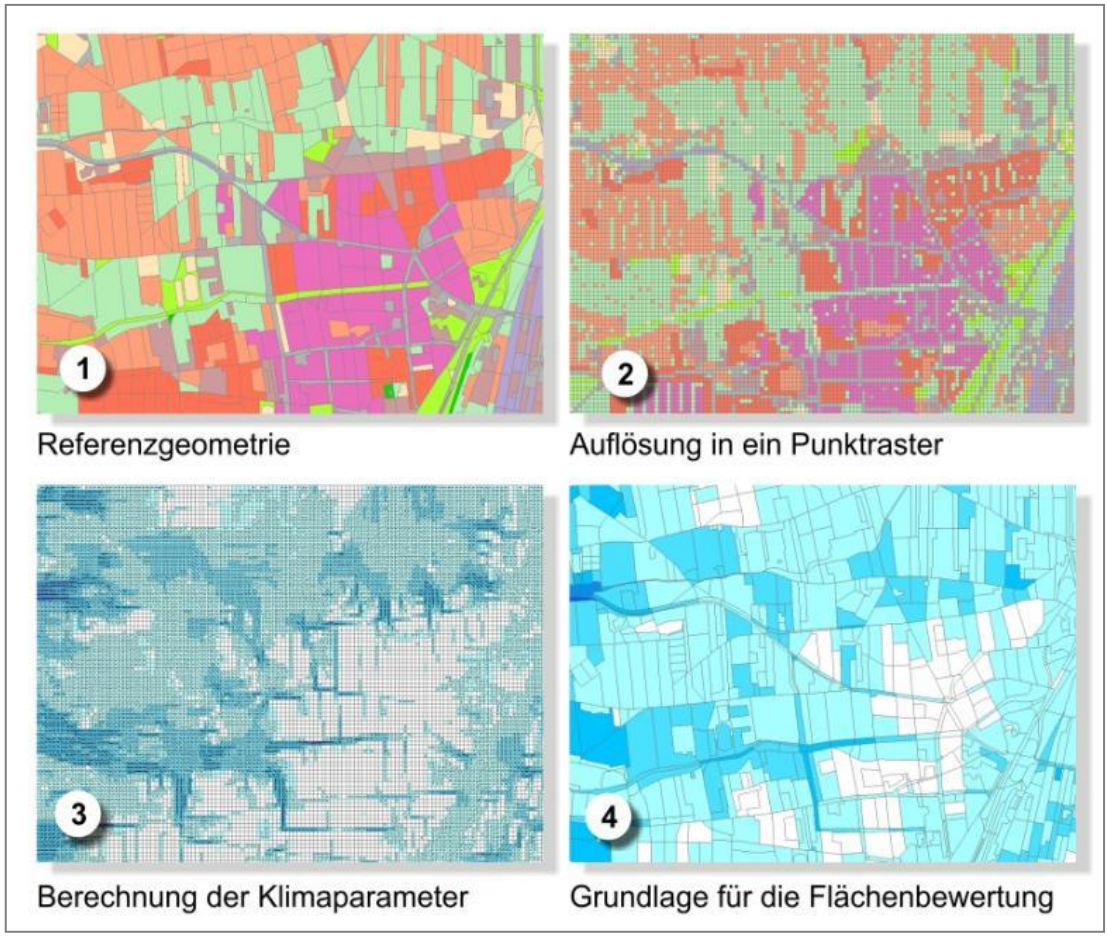



Abb. 8: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

# 4. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Außerdem wird die Schadstoffbelastung der Luft anhand der Ausbreitung von Stickstoffoxid (NOx)-Emissionen betrachtet. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 25 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.

## 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 Erlangen mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird (vgl. Abb. A 2 im Anhang). So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von weniger als 13 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp über 21 °C im Stadtkern eine Spannweite von mehr als 8 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,8 °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. Dabei hat die Regnitz mit ihrer Trennung der beiden Siedlungsräume „Zentrum – ER-Süd – Bruck“ und „Büchenbach – Alterlangen“ nicht nur entscheidenden Einfluss auf das Erlanger Stadtbild, sondern auch auf das Stadtklima. Im Zentrum sowie Teilen von ER-Süd und Bruck 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 über 20 °C erreicht (Abb. 9). Mit steigender Entfernung zum Zentrum nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Randbereichen liegt die Temperatur im Bereich 16 - 17 °C (z.B. Äußere Tennenloher Str.).

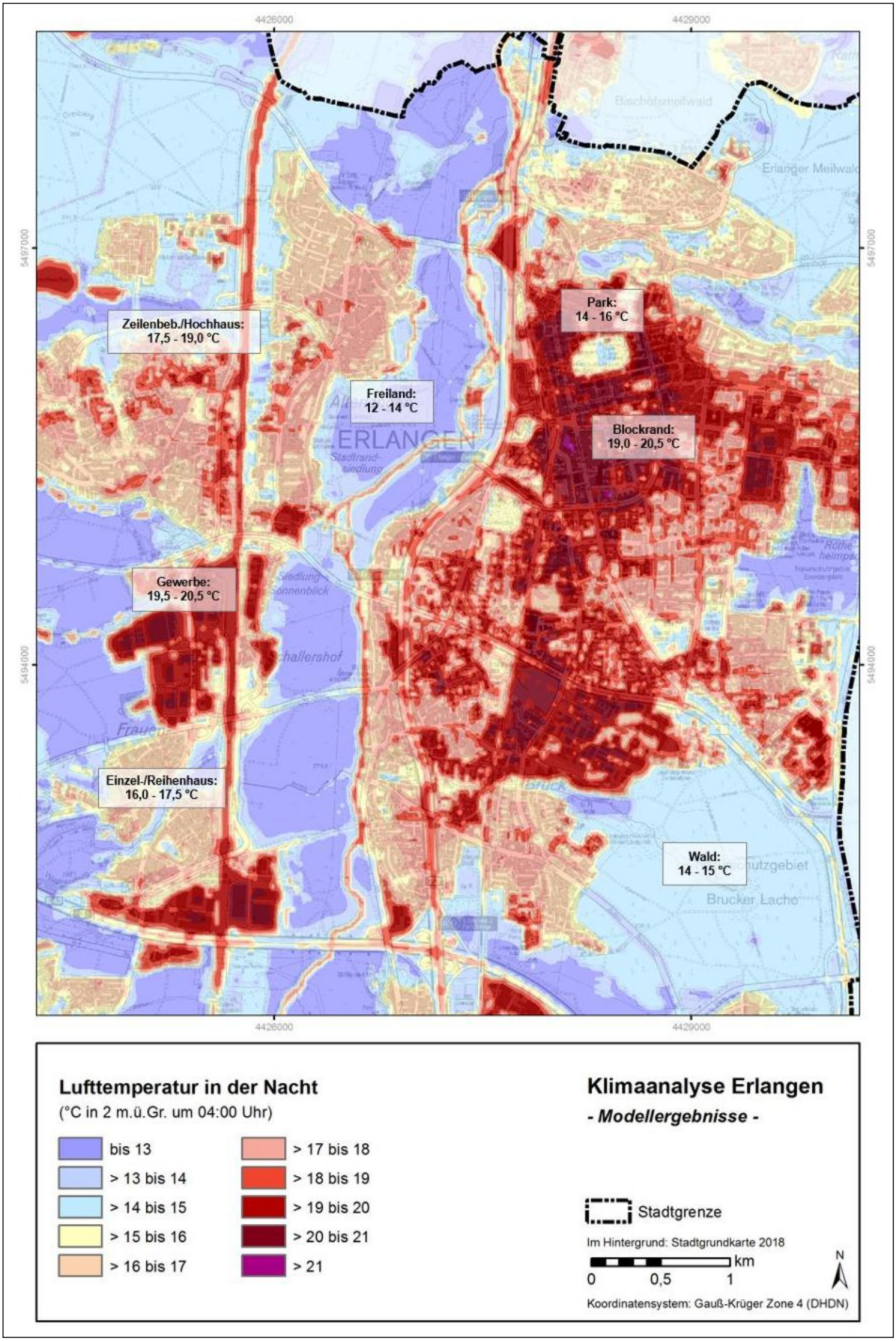



Abb. 9: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen

Büchenbach und Alterlangen bilden einen zweiten zusammenhängenden Siedlungsraum, wobei auch hier durch den Main-Donau-Kanal eine gewisse Unterbrechung besteht. Gleichzeitig fällt die Bebauungsdichte geringer aus, sodass mit ca. 17 - 18 °C spürbar niedrigere Temperaturen als im Zentrum auftreten. Höhere Werte bis ca. 19 °C werden in den Zeilen- und Hochhausstrukturen in Büchenbach, geringere Werte unter 17 °C in den aufgelockerten Bereichen am Siedlungsrand Alterlangens sowie Büchenbachs erreicht.

Die geringsten Temperaturen sind in den Wohngebieten am Burgberg sowie den kleineren Gemarkungen im Umland wie bspw. Dechsendorf oder Kriegenbrunn zu finden, wo kaum noch Temperaturen über 18 °C auftreten (siehe auch Abb. A 2 im Anhang).

Eine Ausnahme stellen Industrie- und Gewerbegebiete dar, deren nächtliche Abkühlung durch die Versiegelung reduziert ist, sodass sie auch außerhalb der großen Siedlungsräume eine hohe Überwärmung aufweisen (z.B. Gewerbegebiete entlang der A3 in Frauenaurach oder Tennenlohe).

Dank ihrer weitläufigen Freiflächen und aufgrund der Lage in einer leichten Senke[13], weist die Regnitz-Aue ein deutliches Temperaturgefälle zum Siedlungsraum auf (großflächig Werte unter 13 °C). Genau wie der Exerzierplatz stellt sie damit eine wichtige siedlungsnahe Ausgleichsfläche dar. Von hoher Bedeutung sind zudem in das Stadtgebiet hineinreichende Grünzüge wie bspw. der Rötelheimpark ausgehend vom Exerzierplatz oder die Auen der Schwabach und des Bachgrabens, deren Kühlwirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlen kann.

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 sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 17 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Ohmplatz), auch ist die Kühlleistung anthropogen geprägter Brachflächen eingeschränkt (z.B. Freifläche an den Bahngleisen südlich des Gewerbegebiets Rathenaustraße). Größere vegetationsgeprägte Grünareale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar – zu nennen sind hier zuvorderst der Schlossgarten oder Zentralfriedhof.

In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü.Gr. Werte um 14 - 15 °C erreicht werden (z.B. Brucker Lache, Meilwald, Mönau-Wald*)*. 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.

U.a. die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser[14] sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über größeren Gewässern, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sein und deren Abkühlung verringern können. Dies ist bei Stillgewässern stärker ausgeprägt (z.B. Dechsendorfer Weiher, Großauweiher), in geringerem Maße aber auch beim Main-Donau-Kanal oder der Regnitz zu erkennen.

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

[14] Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

## 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 $m^3$, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 10).

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.

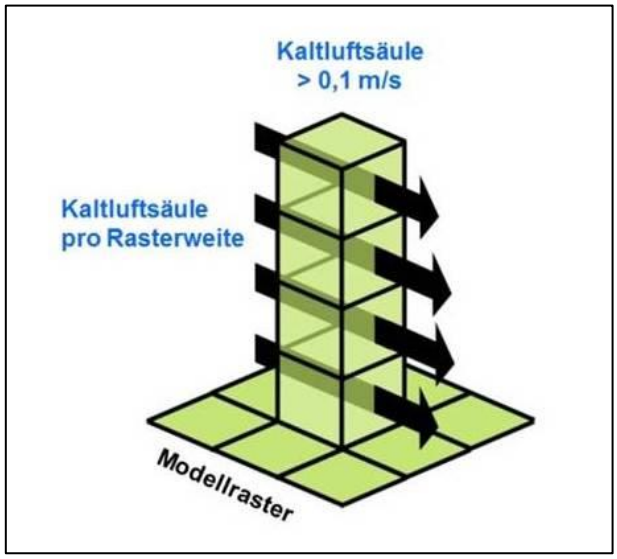



Abb. 10: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

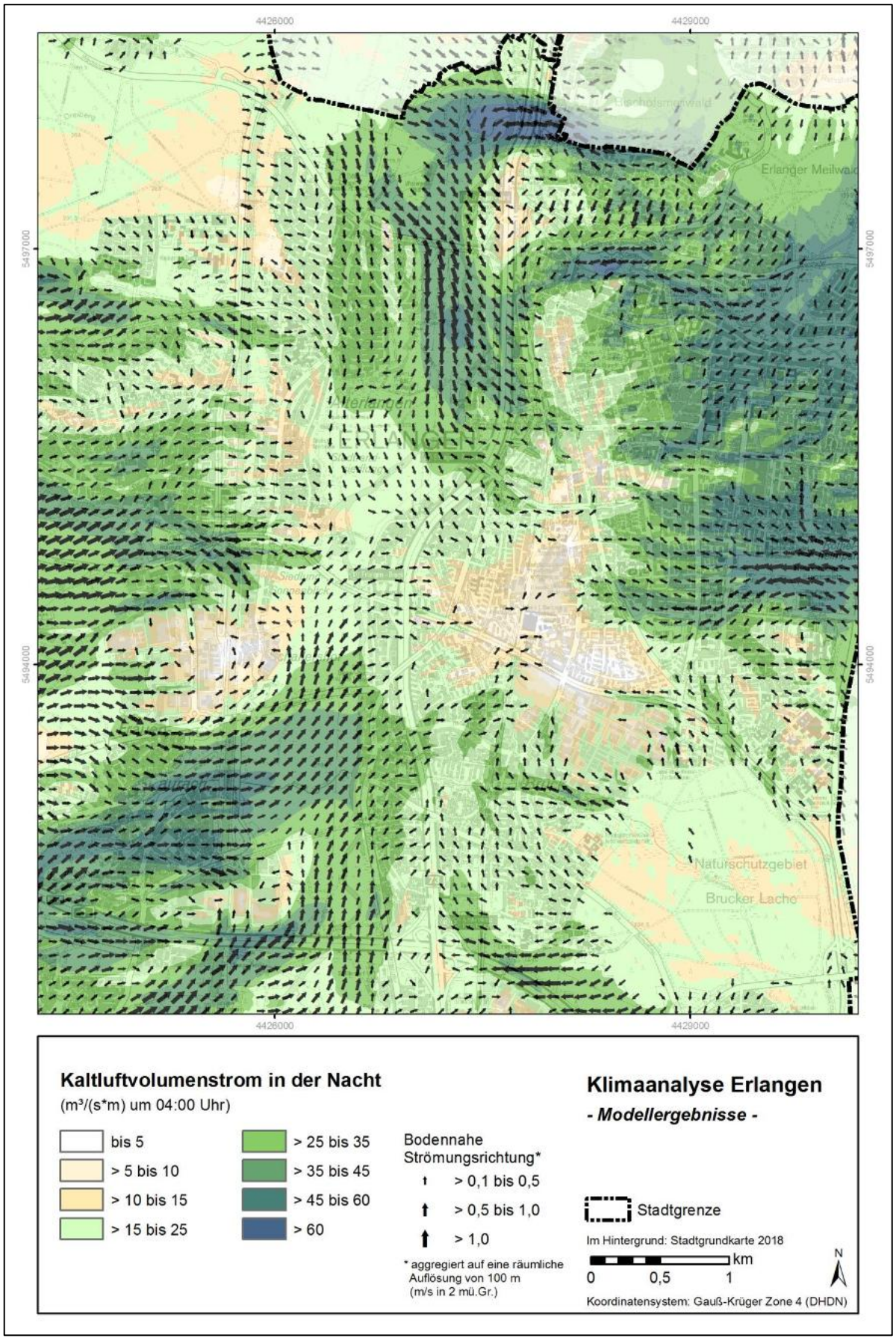



Abb. 11: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets

***ERGEBNISSE***

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten über 80 m³/(s*m). Der Mittelwert im Erlanger Stadtgebiet liegt bei 24,9 m³/(s*m).

Im Fokus der Untersuchung steht die Funktion des Kaltlufthaushalts für das Erlanger Stadtgebiet. Hervorzuheben ist die Schwabach-Aue, die, gespeist von Katltuftabflüssen aus dem Höhenzug Rathsberg sowie dem Burgberg, Kaltluft bis weit in die bestehende Bebauung transportiert (Abb. 11). Zusammen mit den Ausgleichsströmungen des Exerzierplatzes wird damit der (nord-)östliche Teil des Zentrums wirksam mit Kaltluft versorgt. Zudem bilden sich im nördlichen Bereich der Regnitz-Aue Kaltluftströmungen aus, von denen Alterlangen profitiert und die, gleichwohl räumlich begrenzt, über die Autobahn den westlichen Rand des Zentrums erreichen. In Richtung Stadtkern nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung ab, noch geringere Werte sind im Erlanger Süden um die Paul-Gossen-Straße zu verzeichnen.

Auch der südliche Teil der Regnitz-Aue weist eine wichtige Funktion für den Kaltlufthaushalt in Erlangen auf. Gespeist von den Kaltluftabflüssen über die Aue der Altaurach in Frauenaurach und in Verbindung mit Flurwinden aus den Freiflächen zwischen Tennenlohe und Bruck, bewirkt die Regnitz-Aue eine Durchlüftung bis weit nach Bruck hinein. Weitere für das Kaltluftprozessgeschehen wichtige Flächen sind die westlich von Büchenbach gelegenen Freiflächen, die sich als Grünzüge nördlich und südlich von Büchenbach bis zum Main-Donau-Kanal fortsetzen und für eine wirksame Durchlüftung großer Bereiche von Büchenbach sorgen (Abb. A 3). Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen (z.B. Brucker Lache).

Abb. 12 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur[15]) 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. Im Erlanger Stadtgebiet sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 1,5 m/s im Bereich der genannten Ausgleichsräume vorzufinden (u.a. Auen der Schwabach, Regnitz und Altaurach, Exerzierplatz, Freiflächen um Büchenbach; siehe auch Abb. A 4 im Anhang). 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 der Straßenraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich). Weiterhin können größere Grünflächen zumindest lokal für Entlastung sorgen, etwa im Nahbereich des Schlossgartens, dessen angrenzende Bebauung von seiner Kaltluftproduktion profitiert.

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.

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

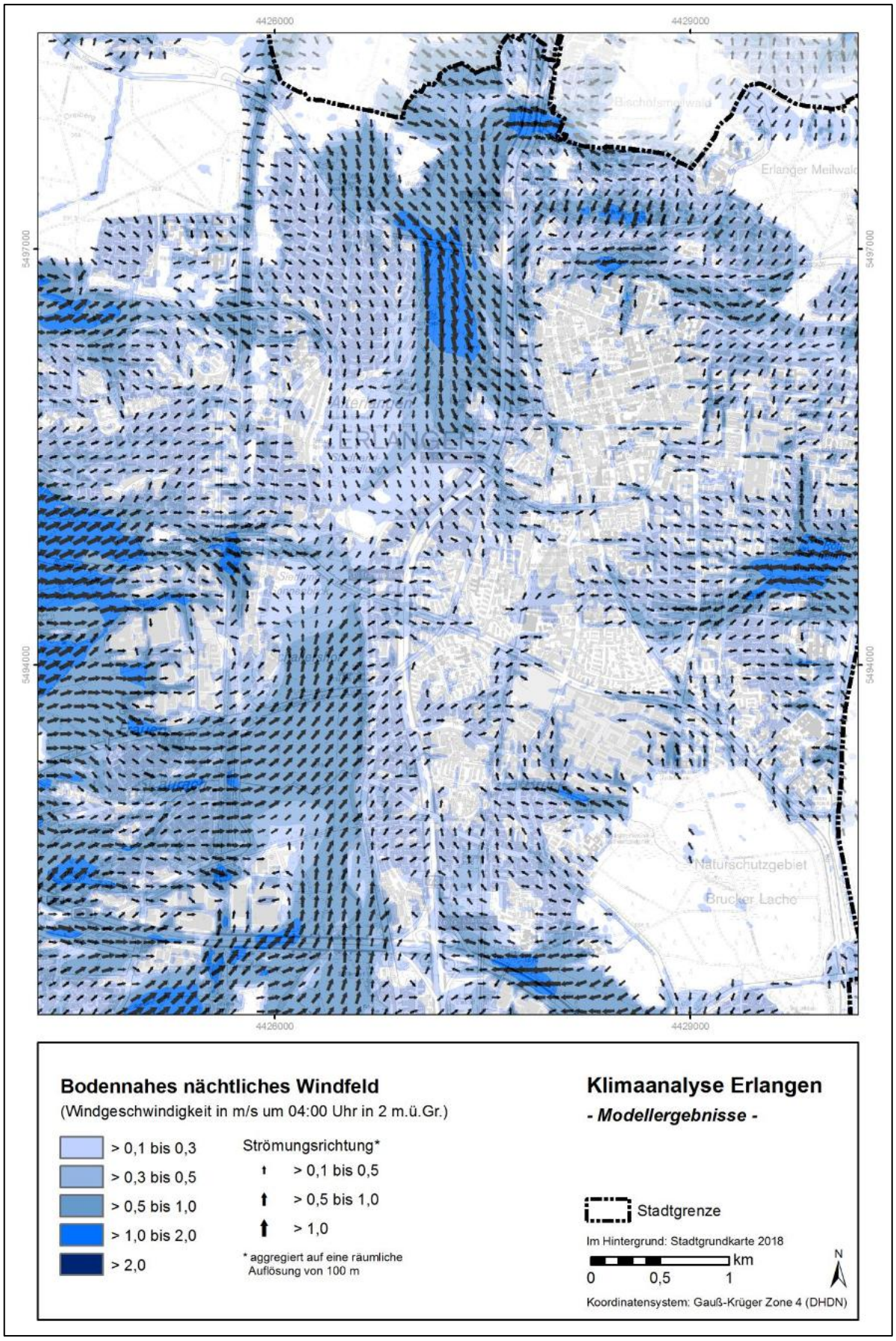



Abb. 12: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets

## 4.3 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 abschätzen[16].

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 können[17]. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. A 1 im Anhang).

### *ERGEBNISSE*

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Die geringsten Werte sind über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. z.B. Dechsendorfer Weiher; Abb. A 5 im Anhang). Flächenhaft heben sich zudem Waldgebiete mit PET-Werten von meist unter 26 °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 (z.B. Brucker Lache; Abb. 13). 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 wie der Schlossgarten, Friedhöfe (z.B. Büchenbacher Friedhof) sowie begrünte Auen-Bereiche (z.B. Schwabach-Aue) mit ihrer vglsw. geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

Die Ergebnisse sind mit gewissen Einschränkungen behaftet, da Gebäude und Bäume in der Modellierung nicht einzeln aufgelöst werden konnten. Diese Strukturen beeinflussen mit ihrer Ver-schattung wesentlich die PET, werden bei einer Auflösung von 25 m jedoch nur parametrisiert erfasst, sodass kleinräumige Analysen kaum möglich sind (bspw. die thermische Situation im Straßenraum).

[16] 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).

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

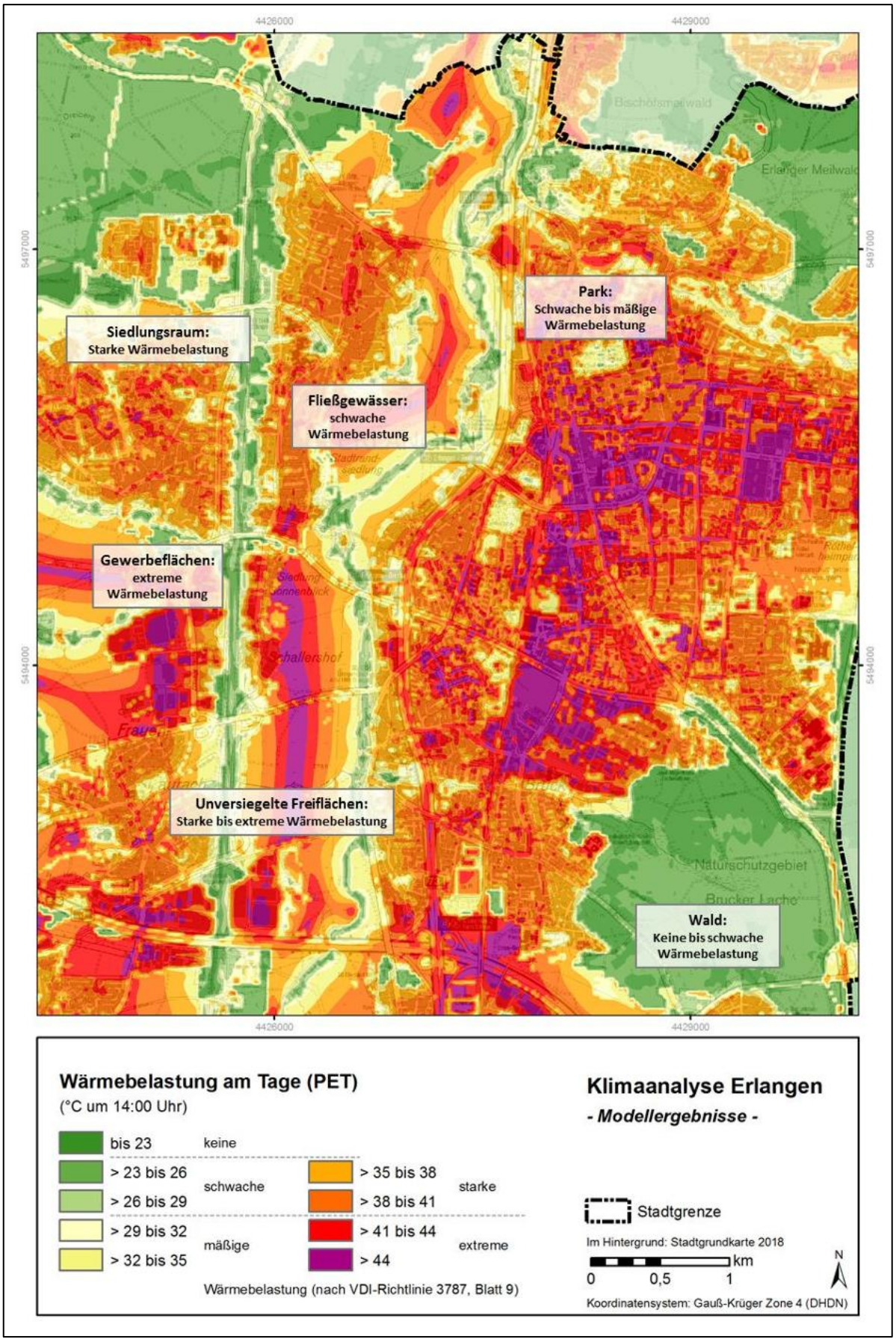



Abb. 13: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets (PET)

## 4.4 LUFTHYGIENE

### *METHODIK*

Ziel der Modellierung ist eine qualitative Aussage über die Schadstoffverteilung zu einer temporären Verkehrsbelastungsspitze. Diese Belastungsspitze wurde zum morgendlichen Berufsverkehr um 8:00 Uhr gewählt, da die Wetterlage zu diesem Zeitpunkt noch von der autochthonen nächtlichen Wetterlage beeinflusst wird und keinen allzu großen Turbulenzen unterliegt.

Als Indikator für die Schadstoffbelastung der Luft wurde in der vorliegenden Untersuchung die Ausbreitung von Stickstoffoxid ($NO_x$)-Emissionen im Strömungsfeld bzw. die daraus resultierende theoretische Immissionskonzentration von Stickstoffdioxid ($NO_2$) verwendet. $NO_2$ ist neben Feinstaub ($PM_{10}$) die wichtigste, maßgeblich durch den Straßenverkehr induzierte Luftschadstoffkomponente. Zwar konnten die komplexen Reaktionen der $NO_2$-Ozonchemie in der Modellierung keine detaillierte Berücksichtigung finden, doch ist die $NO_2$-Konzentration weniger abhängig von weiteren, nicht straßenverkehrsbedingten Gegebenheiten als die $PM_{10}$-Konzentration. Hierzu gehören u.a. der kleinräumig wechselnde Anteil an Feststoffheizungen, die Verteilung industrieller und landwirtschaftlicher Produktionsanlagen, die großräumigen Witterungsverhältnisse sowie die veränderlichen Ferntransporte aus Quellen außerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die hier beschriebenen Immissionsfelder beziehen sich, anders als die modellierten meteorologischen Parameter, auf eine spezifische Ausbreitungssituation, wie sie unter Annahme eines Strömungsfeldes an einem autochthonen Sommertag um 8:00 Uhr typischerweise auftritt. Dies bedeutet, dass die Strömung zwar noch durch die nächtliche Wetterlage geprägt ist, jedoch bereits durch die aufgehende Sonne und dadurch erwärmte Oberflächen beeinflusst wird. Dadurch, dass eine spezifische Situation betrachtet wird, ist diese Analyse nicht geeignet, grenzwertrelevante Aussagen zu treffen, sondern dient lediglich dazu, Siedlungsbereiche zu identifizieren, in denen während der Belastungsspitze mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist (Indikatorfunktion).

Zur Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung ist vor allem das Straßennetz Erlangens relevant. Erlangen und das 20 km nahe Nürnberg bilden einen Verkehrsknotenpunkt in der Region. Die Autobahnen A3 bzw. A73 führen in Nordwest-Südost- bzw. Nord-Süd-Richtung in das überregionale Umland Erlangens. Eine weitere Hauptverkehrsader in Richtung Süden ist die B4. Die durch die Regnitz-Aue getrennten Stadtteile werden durch die A3, den Herzogenauracher Damm, den Büchenbacher Damm, den Dechsendorfer Damm sowie die Hauptstraße miteinander verbunden.

Anhand der von der Auftraggeberin bereitgestellten Verkehrsdaten wurden mit Hilfe des Handbuches Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (HBEFA 3.3) die $NO_x$-Emissionsfaktoren für das Jahr 2015 ermittelt (die Verkehrsdaten stammen überwiegend von 2012 bis 2017). Dabei wurden die Fahrzeugkategorien PKW und SNF (Schwere Nutzfahrzeuge) unterschieden. Für die Autobahnen A3 und A73 konnten keine Daten zur Verfügung gestellt werden, daher wurden für diese Straßenabschnitte die DTVw-Werte der Automatischen Straßenverkehrszählung in Bayern aus 2016 herangezogen (ZIS Bayern 2016). Da zur Beschaffenheit der Fahrzeugflotten keine detaillierten Angaben vorlagen, wurde ein Flottenmix (hinsichtlich Fahrzeuggröße und -antriebsart) angenommen, der im HBEFA als „Business-As-Usual"-Szenario der Verkehrsentwicklung bezeichnet wird. Des Weiteren wurde das Straßennetz in die Obergruppen Erschließungs-, Sammel-, Hauptverkehrs- und Bundesstraße sowie Autobahnen unterteilt. Da in der Modellierung der Verkehr während einer temporären Belastungsspitze betrachtet werden soll, wurden „Stop and Go"-Situationen berücksichtigt, die zu Spitzenzeiten auf bestimmten Straßenabschnitten auftreten. Die Informationen wurden von der Stadt Erlangen zur Verfügung gestellt.

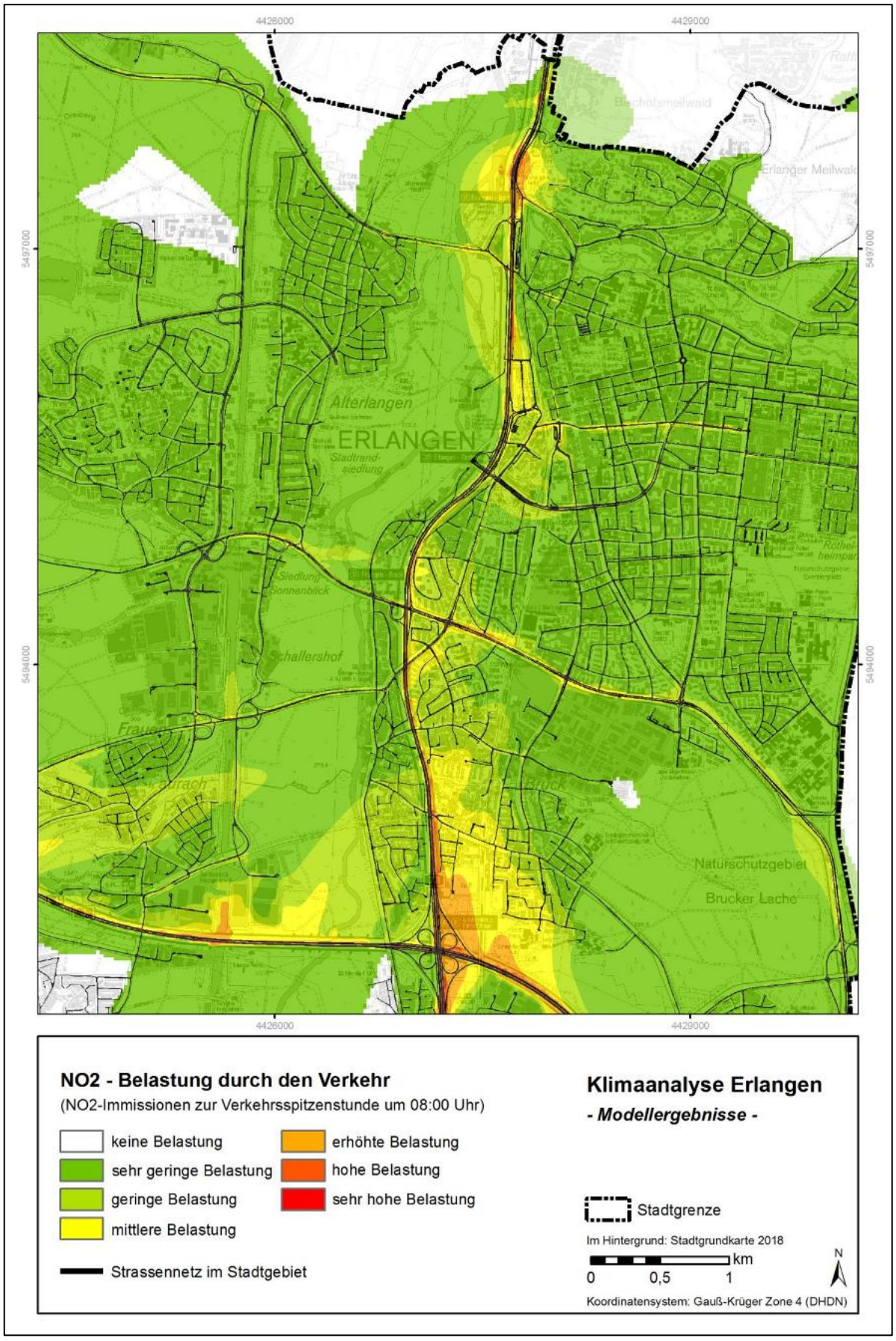



Abb. 14: Stickstoffdioxid-Immissionen zur morgendlichen Verkehrsspitzenstunde in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets

Aus diesen Daten leitet das HBEFA unterschiedliche Verkehrsmuster ab, die in die Berechnung der Emissionsfaktoren einfließen. Auf Grundlage der Verkehrsmengen wurden daraus tatsächliche werktagesdurchschnittliche Emissionen errechnet, die anschließend mit dem Strömungsfeld im Klimamodell FITNAH 3D verdriftet und modellintern so verrechnet wurden, dass sie die $NO_2$-Immission zur morgendlichen Belastungsspitze repräsentieren.

Bei der Interpretation der Modellergebnisse muss berücksichtigt werden, dass größere Strömungshindernisse wie Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst werden konnten, jedoch parametrisiert in die Modellierung eingegangen sind. Sie wurden daher je Rasterzelle lediglich über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert.

#### *ERGEBNISSE*

Abb. 14 zeigt feldhaft für einen Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets die $NO_2$-Luftschadstoffkonzentration, die sich bei gegebener Verkehrsstärke um 8:00 Uhr einstellt. Die Verteilung wird dabei durch den Herantransport aus der Umgebung, der vertikalen Verteilung und der lokalen Diffusion bestimmt. Da hier keine grenzwertrelevanten Angaben gemacht werden können, wurde eine qualitative Einteilung der Belastungsstufen von *„sehr gering“* bis *„sehr hoch“* gewählt, die die relativen Unterschiede im Untersuchungsgebiet widerspiegelt.

Der Großteil des Erlangener Stadtgebietes unterliegt *keiner* oder nur einer *sehr geringen $NO_2$-Belastung* durch den Verkehr. Jedoch ergeben sich ausgehend von der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen verschiedene Belastungsschwerpunkte. Diese befinden sich insbesondere entlang der Autobahnen A3 und A73. Durch quer zur Straße fließende Strömungen werden die Luftschadstoffe in das Umland verdriftet und dadurch verdünnt, so dass autobahnnah lediglich eine geringe bis mittlere Belastung auftritt, die allerdings flächiger ausgeprägt ist. In Abhängigkeit der Windrichtung bilden sich diese Verdriftungsfahnen primär in östlicher, jedoch örtlich auch in westlicher Richtung aus (siehe auch Abb. A 6 im Anhang).

Des Weiteren zeigt sich entlang der A3 bei der Überquerung des Main-Donau-Kanals und der Regnitz-Aue ein Schadstofftransport in Richtung Norden. Die Windströmung wird hier kanalisiert und nach Norden abgelenkt. Großflächige *mittlere* bis *erhöhte Belastungen* werden am Autobahnkreuz Fürth/Erlangen erreicht, da sich hier die beiden vielbefahrenen Autobahnen kreuzen. In der Verkehrsspitzenstunde kann dies dazu führen, dass in der angrenzenden Bebauung von Bruck temporär eine *mittlere* $NO_2$-Belastung erreicht wird.“

Aufgrund der bebauungsbedingt verminderten Durchmischung der Luftmassen treten in den Siedlungsgebieten vor allem kleinräumige Bereiche mit einer *mittleren* bis *erhöhten* $NO_2$-Konzentration auf. Dies gilt bspw. entlang der B4 östlich der Regnitz-Aue (Büchenbacher Damm) sowie die Henkestraße im Zentrum.

# 5. Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar (Wärmeinseleffekt), basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefergehende Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insb. zum Rand des Untersuchungsgebiets hin).

## 5.1 BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu unversiegelten Grünflächen im gesamten Stadtgebiet, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 13,3 °C aufweisen. Der ***Wärmeinseleffekt*** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert. Im Vergleich zu absoluten Temperaturwerten bietet diese Darstellung den Vorteil, dass die Überwärmung des Siedlungsgebiets weitestgehend auch während anderer Wetterlagen gilt – wenngleich der Wärmeinseleffekt in der Regel während autochthoner Bedingungen am stärksten ausgeprägt ist.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen liegt im Erlanger Stadtgebiet bei 17,3 °C. Etwas mehr als ein Viertel der bebauten Flächen zeigt eine, im Untersuchungsgebiet als vergleichsweise gering einzuschätzende, Überwärmung bis 3 °C[18] (Tab. 3). Mit 47 % weist fast die Hälfte des Siedlungsraum eine Überwärmung > 3 bis 5 °C auf, in ca. 26 % der Flächen liegt ein ausgeprägter Wärmeinseleffekt über 5 °C vor. Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbebauung sowie die Stadtrandbereiche bzw. Ortslagen tendenziell durch eine geringere Überwärmung geprägt sind (Abb. 15). Der stärkste Wärmeinseleffekt mit ca. 7 °C tritt im Stadtkern und der dort meist dichten Blockbebauung auf. Ähnlich hohe Werte finden sich in den großflächigen Gewerbegebieten, aufgrund der starken Versiegelung selbst dann, wenn sie außerhalb des Stadtkerns liegen.

Tab. 3: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerberaum.

| Nächtlicher Wärmeinseleffekt [°C] | Flächenanteil im Stadtgebiet [%] |
|---|---|
| bis 3 | 27,2 |
| > 3 bis 4 | 30,9 |
| > 4 bis 5 | 15,7 |
| > 5 bis 6 | 14,4 |
| > 6 bis 7 | 11,0 |
| > 7 | 0,9 |

[18] Es gibt keinen offiziellen Grenzwert, bis wann eine Überwärmung als „gering“ einzustufen ist, sodass die Festlegung des hier verwendeten Schwellenwerts auf gutachterlicher Erfahrung unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten beruht (z.B. das Relief im Stadt- bzw. Untersuchungsgebiet).

## 5.2 KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der ***Kaltlufteinwirkbereich*** kennzeichnet die bodennahe Strömung der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkbereich sind Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 24,9 $m^3/(s*m)$ durchflossen werden. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche oder Straße als Kaltlufteinwirkbereich ausgewiesen.

Innerhalb des Erlanger Stadtgebiets stellt mit 45 % nicht ganz die Hälfte der Siedlungs- und Gewerbeflächen einen Kaltlufteinwirkbereich dar. Dabei fällt auf, dass neben kleineren Siedlungsgebieten in den Randbereichen (z.B. Frauenaurach oder Tennenlohe), auch Büchenbach und große Teile des Zentrums als Kaltlufteinwirkbereich gelten. Dass im Zentrum gleichzeitig die höchste Überwärmung auftritt, ist kein Widerspruch, sondern verdeutlicht vielmehr die wichtige Ausgleichsfunktion der Schwabach-Aue und des Exerzierplatzes – ohne deren Funktion als Kaltluftlieferant würde ein noch stärkerer Wärmeinseleffekt auftreten. In Eltersdorf oder Hüttendorf liegt dagegen kein Kaltlufteinwirkbereich vor, obwohl die Siedlungen bodennah wirksam mit Kaltluft durchlüftet werden. Aufgrund der ohnehin geringen Überwärmung (und den räumlichen Gegebenheiten wie bspw. dem Relief) bilden sich dort vglsw. weniger mächtige Kaltluftvolumenströme aus[19], die unter dem stadtweiten Mittelwert von 24,9 $m^3/(s*m)$ liegen.

## 5.3 KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN ÜBER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insb. unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), zudem können Wälder als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Dabei wird der Kaltluftvolumenstrom in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet. Zusätzlich werden ***Flurwinde*** ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung dargestellt.

***Kaltluftleitbahnen*** verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind elementarer Bestandteil des Luftaustausches. 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 zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen – so z.B. die vom Exerzierplatz ausgehende Kaltluftleitbahn über die südwestlich gelegenen Sportplätze.

[19] Der Kaltluftvolumenstrom betrachtet nicht nur die bodennahe Strömung, sondern auch die Höhe der Kaltluftschicht.

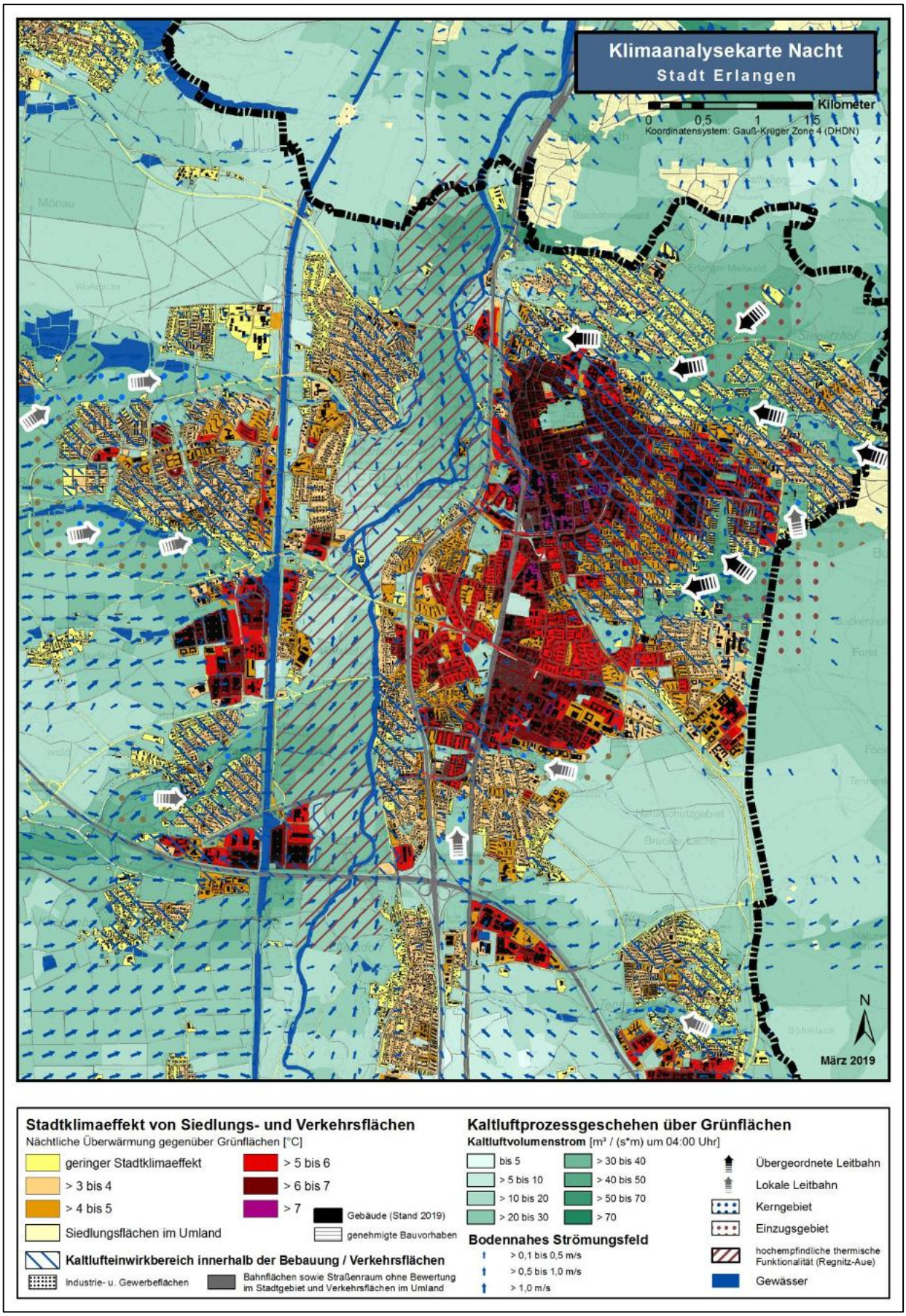



Abb. 15: Klimaanalysekarte in einem Ausschnitt des Erlanger Stadtgebiets (verkürzte Legende)

Besonders wichtige Funktionen als „übergeordnete“ Kaltluftleitbahnen übernehmen in Erlangen die Schwabach-Aue und der Exerzierplatz, die Kaltluft bis weit in das thermisch belastete und dicht besiedelte Zentrum tragen. Auch die Weiherketten samt umliegenden Grünflächen nördlich bzw. südlich von Büchenbach, die Auen der Altaurach in Frauenaurach, des Hutgrabens in Tennenlohe sowie des Bachgrabens in Bruck und die von Süden nach Bruck hineinreichenden Grün- bzw. Sportflächen dienen den jeweiligen Stadtgebieten als Leitbahnen zur Kaltluftversorgung (lokale Leitbahn).

Dabei wurden in den Siedlungsraum reichende Grünstrukturen als sogenannte „Kerngebiete“ der Kaltluftleitbahnen ausgewiesen, wenn sie die bestehende Bebauung über ein zusammenhängendes und großflächiges Gebiet wirksam mit Kaltluft versorgen. Diese Kerngebiete besitzen klimaökologisch eine herausragende Bedeutung, da sie in unmittelbarem Bezug zum Siedlungsraum stehen, auf den Flächen selbst sowie von außen produzierte Kaltluft in den Siedlungsraum hineintragen und damit wesentlich zur Entlastung überwärmter Bereich beitragen. Geht die Kaltluftleitbahn-Funktion dieser Fläche verloren, würde eine stärkere thermische Belastung der umliegenden Siedlungsräume erfolgen. Außerdem wurden Grünflächen hoher Kaltluftproduktivität identifiziert und als „Einzugsgebiete“ der Kaltluftleitbahnen klassifiziert, wenn die dort gebildete Kaltluft die Kaltluftleitbahn-Kerngebiete versorgt. Ohne diese Einzugsgebiete wird die Funktion der Kaltluftleitbahn beeinträchtigt, kann jedoch durch die Kerngebiete in abgeschwächter Form aufrechterhalten werden.

Von hoher Bedeutung für das Erlanger Stadtklima ist die Regnitz-Aue als flächenhaft durchlüfteter Grünraum mit Siedlungsbezug. Sie weist zwar keine klassische Leitbahnfunktion auf, durch die Trennung der beiden Siedlungsbereiche Innenstadt und Büchenbach, verhindert die Regnitz-Aue jedoch die Ausbildung eines noch stärkeren Wärmeinseleffekts und wird als ***Fläche hochempfindlicher thermischer Funktionalität*** bewertet.

Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf Ihr näheres Umfeld haben. In Erlangen ist diesbezüglich der Schlossgarten hervorzuheben, dessen kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Parks wirken oftmals Friedhöfe (z.B. Zentralfriedhof, Friedhof Büchenbach), Sportflächen (z.B. des ATSV Erlangen in Bruck) oder Kleingärten aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

# 6. Planungshinweiskarten

Im Unterschied zur Klimaanalysekarte wurden jeweils separate Planungshinweiskarten (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils nur auf das Stadtgebiet Erlangens beziehen. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Siedlungsraum (Wirkungsraum) sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

## 6.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

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 den Planungshinweiskarten fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage die Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

Für die Bewertung meteorologischer Größen bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie bspw. *Hoch* und *Niedrig* oder *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale bzw. regionale Werteniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a).

Erstrebenswert wäre es zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine ***z-Transformation*** standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen ($S_i$) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere $S_1$-Schranke; Abb. 16).

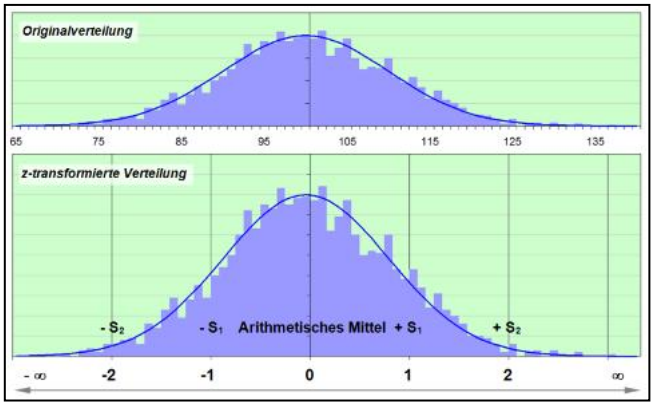



Abb. 16: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

Tab. 4: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung im Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation (Mittelwert und Standardabweichung basieren auf der nächtlichen Lufttemperatur in Wohnsiedlungsflächen in Erlangen).

| Mittlerer z-Wert | Lufttemperatur in der Nacht [°C] | Qualitative Einordnung |
|---|---|---|
| bis -1 | bis 15,7 | 1 = Sehr günstig |
| > -1 bis 0 | > 15,7 bis 17,0 | 2 = Günstig |
| > 0 bis | > 17,0 bis 18,3 | 3 = Mittel |
| > 1 bis 2 | > 18,3 bis 19,6 | 4 = Ungünstig |
| > 2 | > 19,6 | 5 = Sehr ungünstig |

## 6.2 BEWERTUNG VON SIEDLUNGS-, GEWERBE- UND STRASSENFLÄCHEN (WIRKUNSGRAUM)

Der Siedlungsraum stellt den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation 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 und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), entsprechend definiert das Climate Service Center Germany seinen „Schlecht-Schlaf-Index“ als Nächte, in denen die Temperatur 18 °C nicht unterschreitet (GERICS 2019). Als besonders belastend gelten Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C - eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum jedoch (noch) nicht.

Für die PHK Nacht erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Überwärmung (Wärmeinseleffekt). Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, 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. 4). Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund[20], doch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Sensible Bevölkerungsgruppen wie Senior*innen oder Kleinkinder gelten als besonders empfindlich gegenüber der Hitzebelastung. Um mögliche Maßnahmen zur Anpassung verorten zu können, sind in der PHK Nacht *Gebiete demographischer Betroffenheit* hervorgehoben, in denen sich *ungünstige* oder *sehr ungünstige* bioklimatische Bedingungen mit einer hohen Bevölkerungsdichte überlagern. Eine *hohe demographische Betroffenheit* besteht, wenn zusätzlich ein hoher Anteil sensibler Bevölkerungsgruppen vorhanden ist.

[20] Dabei konnten nur diejenigen Straßenzüge bewertet werden, für die eine geeignete Geometrie vorlag (abgeleitet aus der Luftreinhalteplanung). Zusätzlich wurden wichtige städtische Plätze bewertet. Der übrige Straßenraum in der Stadt sowie die Autobahnen und Bahnflächen sind ohne Bewertung in dunkelgrau dargestellt.

### 6.2.2 BEWERTUNG DER TAGSITUATION

Zur Bewertung der Tagsituation 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 Erlangens wurde in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 5). Die Klassengrenzen orientieren sich an den physiologischen Belastungsstufen der VDI-Richtlinie (z.B. Klasse *Ungünstig* ab einer „extremen Wärmebelastung“; vgl. Tab. A 1 im Anhang), wobei die Bewertungen *Günstig* bzw. *Mittel* mehrere Belastungsstufen umfassen, um die große Spannbreite der PET-Werte im Stadtgebiet abzubilden.

Tab. 5: Einordnung der Wärmbelastung am Tage im Siedlungs- und Gewerberaum.

| Wärmbelastung am Tage (PET) [°C] | Qualitative Einordnung |
|---|---|
| bis 32,0 | 1 = Sehr günstig |
| > 32,0 bis 36,5 | 2 = Günstig |
| > 36,5 bis 41,0 | 3 = Mittel |
| > 41,0 bis 44,0 | 4 = Ungünstig |
| > 44,0 | 5 = Sehr ungünstig |

Am Tage ist die bioklimatische Situation im Straßenraum und auf Plätzen ebenfalls von Bedeutung, da sie die Aufenthaltsqualität von Fahrradfahrer*innen, Fußgängern*innen und Pendler*innen steuert. Da in der mesoskaligen Modellrechnung Gebäude nicht einzeln aufgelöst werden konnten, diese jedoch durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität im Straßenraum genauso wie Bäume maßgeblich beeinflussen, beruht die Darstellung der Belastungsklassen in der Planungshinweiskarte auf einer Verknüpfung der modellierten Wärmebelastung (PET; Klassengrenzen nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9) mit höher aufgelösten Informationen zur Verschattung durch Bäume und Gebäude[21] (Abb. 17).

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.

| Verschattung | PET um 14 Uhr [°C] ≤ 38 | ≤ 41 | ≤ 44 | > 44 |
|---|---|---|---|---|
| Hoch | Sehr günstig | Sehr günstig | Günstig | Mittel |
| Mittel | Sehr günstig | Günstig | Mittel | Ungünstig |
| Gering | Günstig | Mittel | Ungünstig | Sehr ungünstig |
| Freifläche | Mittel | Ungünstig | Sehr ungünstig | Sehr ungünstig |

Abb. 17: Verknüpfungsmatrix zur Darstellung der thermischen Belastung am Tag im Straßenraum anhand der PET sowie Verschattung

[21] Die Verschattung beruht auf von der Stadt Erlangen zur Verfügung gestellten Daten zu Grundrisse und Höhe von Gebäuden (LOD1-Modell) sowie zu Bäumen im öffentlichen Raum (Baumkataster ohne privates Grün). Anhand dieser Daten wurde die Verschattung im Straßenraum in ESRI ArcGIS über das Hillshade-Werkzeug berechnet ("Schummerung"). Dabei wurde die mittlere Verschattung von drei Zeitpunkten eines exemplarischen Sommertages ausgegeben und in die Klassen *Hohe*, *Mittlere* bzw. *Geringe Verschattung* und *Freifläche* eingeteilt (12:00, 14:00 und 16:00 Uhr; vgl. Tab. A 2 im Anhang).

## 6.3 BEWERTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)

In den Planungshinweiskarten 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-Ausgleichraum-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[22].

### 6.3.1 BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten übergeordnete Kaltluftleitbahnen eine *sehr hohe* und lokale Leitbahnen eine mindestens *hohe Bedeutung*. Zudem spielen die Kaltluftproduktivität und der Siedlungsbezug von Grünflächen eine Rolle. Im Einzelnen wurde folgender hierarchischer Bewertungsschlüssel verwendet:

***Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)***

a) Grünflächen, die Teil einer *übergeordneten Kaltluftleitbahn* sind (Kern- und Einzugsgebiet)

b) Mindestens 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen (*sehr) ungünstiger bioklimatischen Situation* (bis 250 m Entfernung)

   Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima im meist dicht bebauten Umfeld. Je stärker der Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind Grünflächen als Ausgleichsräume, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Umso größer eine Grünfläche ist, desto weiter reichen ihre ausgleichenden Effekte in das angrenzende Siedlungsgebiet (vgl. Kuttler 2011).

***Hohe bioklimatische Bedeutung (3)***

c) Grünflächen, die Teil einer *lokalen Kaltluftleitbahn* sind (Kern- und Einzugsgebiet) sowie Grünflächen hochempfindlicher thermischer Funktionalität (Regnitz-Aue)

d) Grünflächen < 1 ha im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen (*sehr) ungünstiger bioklimatischen Situation* (bis 250 m Entfernung)

e) Mindestens 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen *mittlerer bioklimatischen Situation* (bis 250 m Entfernung)

[22] Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *sehr geringe Bedeutung* nicht vergeben wurde.

***Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)***

f) Grünflächen < 1 ha im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen *mittlerer bioklimatischen Situation* (bis 250 m Entfernung)

g) Waldflächen (sofern nicht bereits höher bewertet)

In Wäldern fällt die Kaltluftproduktion geringer aus als über Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

h) Straßenbegleitgrün[23] im Nahbereich belasteter Siedlungsflächen (vgl. b))

Straßenbegleitgrün ist i.d.R. eine kleine Grünfläche, die bei sehr dichtem Bestand sogar ein Hindernis in Bezug auf die Durchströmbarkeit darstellen kann. Tagsüber sorgt es für Verschattung, sodass sich Straßen, Plätze und Parkplätze weniger stark aufheizen und auch in der Nacht weniger Wärme abgeben.

i) Mindestens 1 ha große Grünflächen mit Wohnsiedlungsbezug (bis 500 m Entfernung), die überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumenströme oder Kaltluftproduktionsraten aufweisen

***Geringe bioklimatische Bedeutung (1)***

j) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen

### 6.3.2 BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN AM TAGE

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen hauptsächlich auf der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerberäumen sowie der modellierten Wärmebelastung (PET). Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten. Der Einstufung liegt folgender hierarchischer Bewertungsschlüssel zugrunde:

***Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)***

a) Aus Siedlungsräumen *(sehr) ungünstiger bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare[24] Grünflächen mit einer mittlere PET ≤ 32 °C

Je stärker die bioklimatische Belastung im Siedlungsgebiet, desto wichtiger ist eine für alle Bevölkerungsgruppen fußläufige Erreichbarkeit schattenspendender Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist die Existenz ausreichend beschatteter Flächen, d.h. ein gewisser Verschattungsanteil sollte vorhanden sein.

b) Aus Siedlungsräumen *mittlerer bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittlere PET ≤ 26 °C

***Hohe bioklimatische Bedeutung (3)***

c) Aus Siedlungsräumen *(sehr) ungünstiger bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittlere PET ≤ 38 °C

[23] Straßenbegleitgrün wurde teilautomatisiert anhand folgender Kriterien bestimmt: Verhältnis „Umfang : Fläche“ ≥ 0,15 (1/m) und Entfernung zu Straßen bzw. Bahnflächen ≤ 5 m (zusätzlich Validierung anhand des Luftbildes).

[24] Eine *sehr gute* fußläufige Erreichbarkeit wird bis zu einer Entfernung von 300 m Luftlinie definiert – diese entspricht einem Fußweg bis ca. 500 m (BBSR 2017). Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m/s (3,6 km/h) würde dies eine Wegstrecke bis zu 5 min bedeuten.

d) Aus Siedlungsräumen *mittlerer bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittlere PET ≤ 32 °C

e) Übrige Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 26 °C

Dabei handelt es sich vielfach um Waldgebiet, die, selbst wenn sie nicht fußläufig erreichbar sind, wichtige Rückzugsorte für die Naherholung darstellen können

f) Straßenbegleitgrün im Umfeld belasteter Siedlungsflächen (vgl. b))

Straßenbegleitgrün verhindert das Aufheizen von Straßen, Plätzen und Parkplätzen und sorgt entlang von Rad- und Gehwegen für ein angenehmeres Aufenthaltsklima.

***Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)***

g) Übrige aus Siedlungsräumen *(sehr) ungünstiger bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen

h) Aus Siedlungsräumen *mittlerer bioklimatischen Situation* fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittlere PET ≤ 38 °C

i) Aus Siedlungsräumen ab einer *mittlerer bioklimatischen Situation* fußläufig erreichbare[25] Grünfläche mit einer mittlere PET ≤ 35 °C

j) Übrige Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 32 °C

k) Übriges Straßenbegleitgrün

***Geringe bioklimatische Bedeutung (1)***

l) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen

Selbst im Nahbereich belasteter Siedlungsräume stellen unversiegelte Freiflächen an autochthonen Sommertagen aufgrund der hohen Einstrahlung keine Rückzugsorte dar.

## 6.4 ERGEBNISSE PLANUNGSHINWEISKARTEN

### 6.4.1 PHK NACHT

Die besondere Stadtstruktur Erlangens mit der Trennung durch die Regnitz-Aue führt zu einem relativ geringen Anteil an Siedlungsflächen *mittlerer bioklimatischen Situation*. Unter reinen Wohngebieten fällt z.B. nur ein Viertel der Flächen in diese mittlere Kategorie (Tab. 6). Dem stehen ca. 15 % *(sehr) ungünstig* bewerteter Wohnflächen gegenüber, die überwiegend im Zentrum und ER-Süd vorzufinden sind (Abb. 18). In den diesen Flächen sollte nicht nur keine weitere Verdichtung erfolgen (insb. zu Lasten von Grünflächen), sondern vielmehr Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation angestrebt werden (Durchlüftung fördern, Vegetationsanteil erhöhen, etc.).

In den Kerngebieten größerer Gemarkungen wie Büchenbach herrschen vorwiegend *mittlere* Belastungen vor, während die Belastung zum Siedlungsrand hin sowie in den kleineren Ortschaften abnimmt. In Summe weisen mit 60 % vglsw. viele Wohngebiete Erlangens mindestens *günstige bioklimatische Bedingungen* auf. Diese sind weniger empfindlich gegenüber Nutzungsintensivierungen, jedoch sollten klimaökologische Aspekte beachtet werden, um das günstige Bioklima nicht zu gefährden.

[25] Bis zu einer Entfernung von 700 m Luftlinie (ca. 1000 m Fußweg) wird eine Grünfläche als erreichbar angesehen und kann als Ausgleichsraum dienen, insb. wenn es sich um größere Grünflächen handelt (vgl. BBSR 2017).

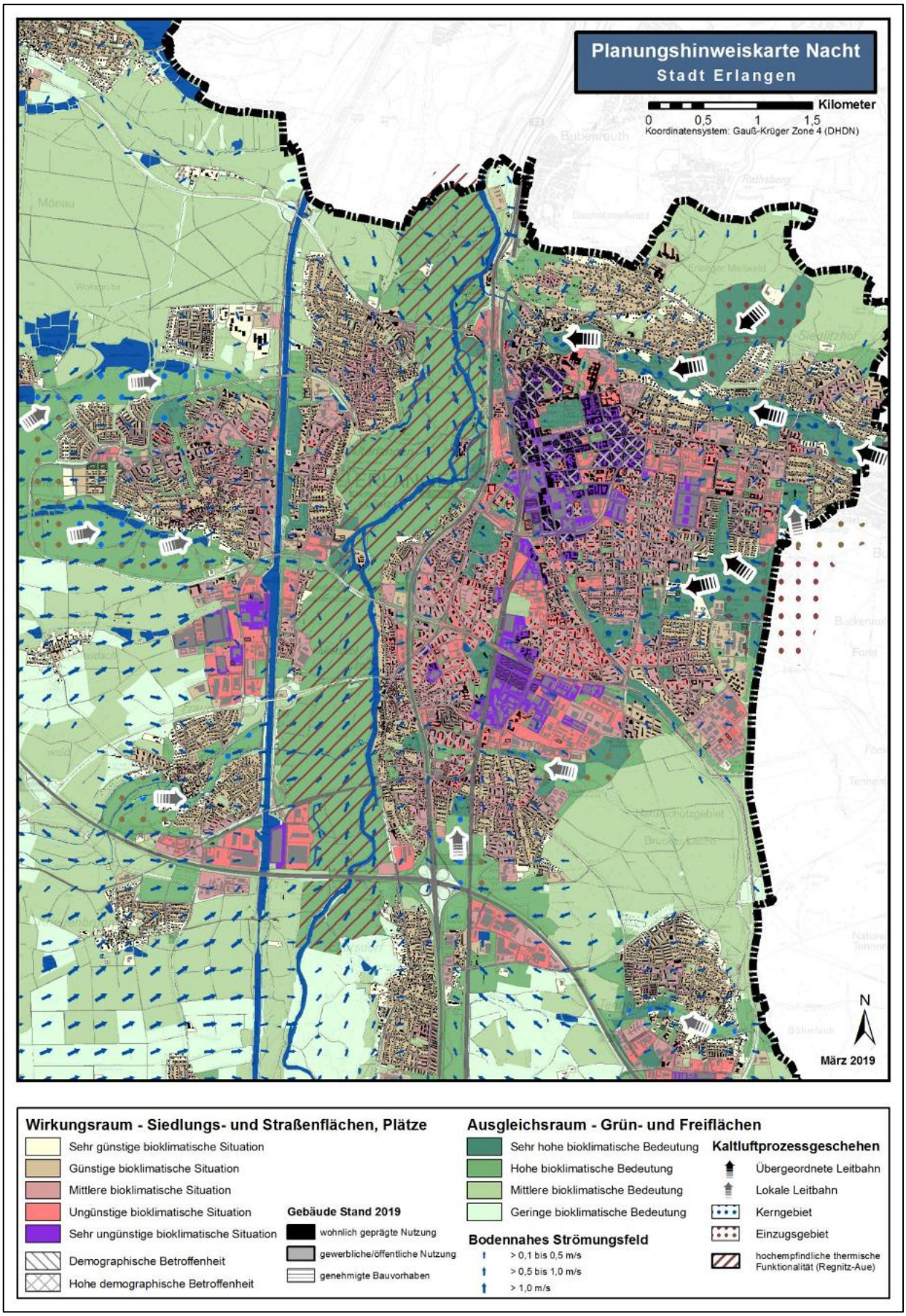



Abb. 18: Planungshinweiskarte Nacht in einem Ausschnitt der Stadt Erlangen (verkürzte Legende)

Tab. 6: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

| Bewertung der Siedlungsflächen | Flächenanteil [%] Wohn | Gewerbe | Allgemeine Planungshinweise |
|---|---|---|---|
| 1 = Sehr günstig | 16,3 | 0,1 | Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und geringer Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, der Vegetationsanteil sollte jedoch möglichst erhalten bleiben, um das sehr günstige Bioklima zu sichern. |
| 2 = Günstig | 43,3 | 3,1 | Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben, um das günstige Bioklima zu sichern. |
| 3 = Mittel | 25,3 | 13,9 | Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden. |
| 4 = Ungünstig | 12,1 | 47,5 | Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (z.B. Begrünung von Blockinnenhöfen). |
| 5 = Sehr ungünstig | 3,0 | 35,5 | Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetations-anteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen). |

Bei den Gewerbeflächen verschieben sich die Flächenanteile deutlich. Der typischerweise hohe Versiegelungsgrad und geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, sodass über 80 % der Gewerbeflächen eine *(sehr) ungünstige* und nur ca. 3 % eine mindestens *günstige bioklimatische Situation* aufweisen (Tab. 6). Wie bereits erwähnt, steht nachts die Belastung in Wohnsiedlungsflächen im Vordergrund und Maßnahmen sind vor allem für den Erhalt bzw. möglichst die Verbesserung der Situation in belasteten Flächen nötig. Doch sollten aufgrund der hohen Belastungen Gewerbeflächen und auch der Straßenraum nicht außer Acht gelassen werden, insb. wenn sie einen räumlichen Bezug zu Wohnbebauungen aufweisen.

Den Grünflächen im Erlanger Stadtgebiet kommt zu mehr als einem Viertel eine *hohe* bzw. *sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (knapp 22 % bzw. 7 %; Tab. 7). Neben den Kaltluftleitbahnen und der Regnitz-Aue handelt es sich um größere städtische Grünflächen wie bspw. den Schlossgarten oder Zentralfriedhof. Auf diesen Flächen sollten bauliche Eingriffe möglichst vermieden werden bzw. unter Berücksichtigung stadtklimatischer Belange erfolgen (Gebäudekörperstellung, Begrünung, etc.), um deren Funktion und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung zu erhalten.

Etwas mehr als ein Fünftel der Grünflächen weist eine *geringe Bedeutung* auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Ackerflächen bzw. Straßenbegleitgrün. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

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 (Abb. A 8 im Anhang).

Tab. 7: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

| Bedeutung der Grünflächen | Flächen-anteil [%] | Allgemeine Planungshinweise |
|---|---|---|
| 1 = Geringe | 22,2 | Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit. Dennoch sollten bauliche Eingriffe unter Beachtung klimaökologischer Belange erfolgen (insb. Begrünung), um auf der Fläche selbst keine Belastungsräume zu schaffen. |
| 2 = Mittlere | 49,7 | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen - entsprechend sollten bauliche Eingriffe nur unter Beachtung klimaökologischer Belange erfolgen (Begrünung, Gebäudekörperstellung, etc.), um diese Funktionen nicht zu gefährden. |
| 3 = Hohe | 21,6 | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume. Zur Erhaltung ihrer Funktion sollten bauliche Eingriffe möglichst vermieden bzw. unter Berücksichtigung stadtklimatischer Belange erfolgen (Begrünung, Gebäudekörperstellung, etc.) und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung gewährleistet werden. |
| 4 = Sehr hohe | 6,5 | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume. Zur Erhaltung ihrer Funktion sollten bauliche Eingriffe gänzlich vermieden und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung gewährleistet werden. Eine Vernetzung mit benachbarten Grünflächen soll zudem die Ökosystemleistung verbessern. |

### 6.4.2 PHK TAG

Auch am Tage sind deutliche Unterschiede bezüglich der Aufenthaltsqualität im Freien zwischen Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine *mittlere bioklimatische Belastung* (66 %) und der Anteil *(sehr) günstiger* Flächen überwiegt gegenüber *ungünstigen* (24 % gegenüber 10 %), während s*ehr ungünstig* bewertete Flächen zu vernachlässigen sind (Tab. 8). Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen. Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und thermische Belastung am Tage höher ausfällt (über 80 % *ungünstige* oder s*ehr ungünstige Flächen*; Abb. 19).

Die bioklimatische Belastung am Tage variierte innerhalb des Straßenraums stärker als im Siedlungs- und Gewerberaum. Der Anteil *(sehr) ungünstiger* Bereiche ist mit über 45 % relativ hoch, doch sind mit 8 % auch nennenswerte Anteile *sehr günstiger* Flächen vorhanden. Die Bandbreite ist auf die unterschiedlichen Flächentypen zurückzuführen – von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschattete Straßenabschnitte.

Über 40 % der Grünflächen wird eine mindestens *hohe Bedeutung* zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung (Tab. 9). Die Freiflächen der Regnitz-Aue sowie weitläufigen landwirtschaftlichen Flächen im südlichen und westlichen Stadtgebiet Erlangens erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der meist ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzug und sorgen für einen hohen Anteil an Grünflächen *geringer Bedeutung* (45 %; Abb. A 9 im Anhang).

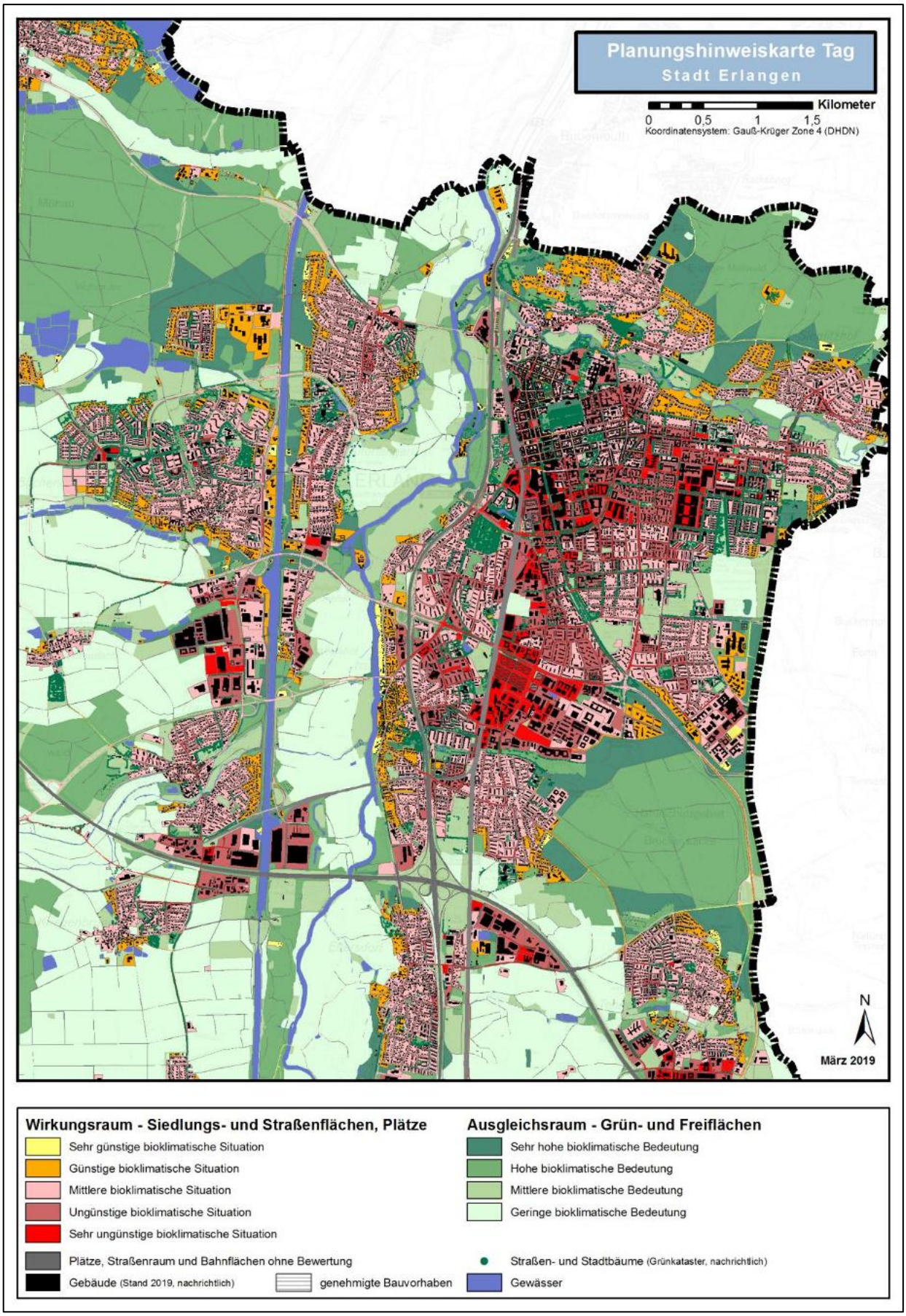



Abb. 19: Planungshinweiskarte Tag in einem Ausschnitt der Stadt Erlangen (verkürzte Legende)

Tab. 8: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

| Bewertung der Siedlungsflächen | Flächenanteil [%] | | | Allgemeine Planungshinweise |
|---|---|---|---|---|
| | Wohn | Gewerbe | Straße | |
| 1 = Sehr günstig | 1,9 | - | 8,4 | Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. |
| 2 = Günstig | 21,7 | 0,8 | 10,9 | Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. |
| 3 = Mittel | 65,9 | 15,4 | 34,3 | Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein. |
| 4 = Ungünstig | 10,4 | 56,0 | 24,5 | Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein. |
| 5 = Sehr ungünstig | < 0,1 | 27,9 | 21,9 | Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein. |

Tab. 9: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

| Bedeutung der Grünflächen | Flächen-anteil [%] | Allgemeine Planungshinweise |
|---|---|---|
| 1 = Geringe | 44,8 | Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtsch. Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt). |
| 2 = Mittlere | 12,7 | Frei- und Grünflächen mit einem geringen Anteil an verschattenden Vegetationselementen (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Grünstrukturen zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt). |
| 3 = Hohe | 35,2 | Siedlungsnahe Grünflächen, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch die Grünstrukturen überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. zu bewässern) bzw. ggf. auszubauen.<br>Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung außerhalb einer fußläufigen Erreichbarkeit, die an heißen Tagen aber als Rückzugsorte dienen können (z.B. Wälder). |
| 4 = Sehr hohe | 7,3 | Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität (Verschattung), die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten als Rückzugsorte an heißen Tagen erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. zu bewässern), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten. |

## 6.5 MASSNAHMENKATALOG STADTKLIMA

Für Erlangen wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert, die einzelnen Blockflächen räumlich zugeordnet werden können. Dieser Katalog ergänzt die Planungshinweiskarten als GIS-gestützter „Aktionsplan Anpassung“ um eine weitere Informationsebene. Die Auswahl der Maßnahmen sowie deren Übertragung auf konkrete Flächen erfolgten durch fachgutachterliche Einschätzung und basierend auf einer Literaturauswertung sowie den Erkenntnissen anderer Klimaanalysen (vgl. Berlin 2015, MUNLV 2010, MVI 2012).

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 19 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt). Zusätzlich fließen die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse sowie weitere Sach- und Geoinformationen ein (z.B. Demographische Betroffenheit, Siedlungsbezug; vgl. Abb. 20). Die Ergebnisse sind jeweils als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Maßnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung *Dachbegrünung* auf der stadtklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre, da keine Informationen über den Dachtyp der Gebäude auf der Blockfläche vorlagen). Die Maßnahmen sind stickpunktartig in Tab. 10 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

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

Die Wirkung der Maßnahmen wird qualitativ beschrieben, da verifizierte Daten nur sehr vereinzelt für ganz spezielle Fallstudien zur Verfügung stehen. Zum anderen hängt die Wirkung stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Erlanger Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Stadtgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

Neben ihres Potentials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu

gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Großkronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. „Projekt Stadtgrün 2021“ der LWG Bayern[26] oder GALK-Straßenbaumliste[27]).

**Maßnahmen zur Verschattung** verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M05: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen).

**Klimaangepasstes Bauen** enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente[28] oder energetische Sanierung[29] sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

[26] www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/085113/index.php (Abruf 12.08.2019)

[27] www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste (Abruf 12.08.2019)

[28] Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

[29] Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.

Bei **Nachverdichtung** im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

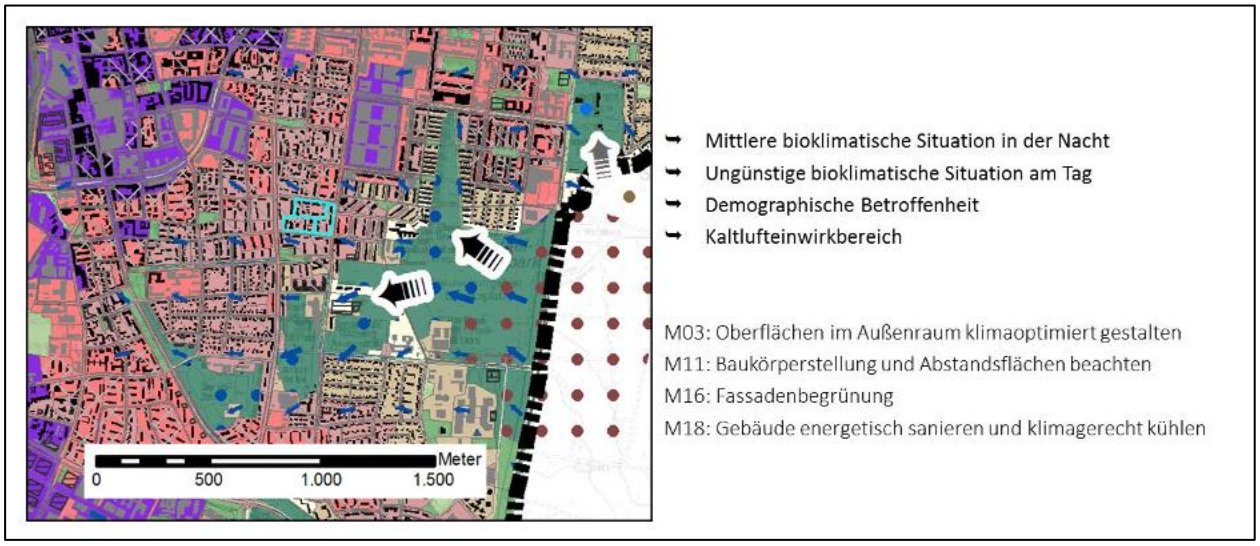


Abb. 20: Beispielhafte Ableitung von Maßnahmen für Siedlungsflächen in einem Ausschnitt der PHK Nacht (türkiser Rahmen zeigen betrachtete Blockflächen)

Tab. 10: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Erlangen (Maßnahmenkatalog Aktionsplan Anpassung).

| Nr. | Maßnahme | Erläuterung | Wirkung | Räumliche Umsetzung |
|---|---|---|---|---|
| **THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM** | | | | |
| **01** | **Innen-/Hinterhofbegrünung** | Vegetation und Entsiegelung | ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität | Hinterhöfe |
| **02** | **Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen** | Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten | ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts<br>▪ Vernetzung von Grünflächen<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität | Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) |
| **03** | **Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten** | Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern | ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts | Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze |
| **04** | **Entsiegelung** | Rasenflächen oder Teilversiegelung (Schotter, Rasengittersteine, etc.) | ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement | Straßen, Wege, Plätze, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe |
| **05** | **Bäume im Straßenraum erhalten und neu pflanzen** | Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung der Haltestellen, Sonnensegel, etc.) | ▪ Reduktion der Wärmebelastung nachts und insb. tagsüber | Straßen, Wege, Plätze |
| **06** | **Begrünung und Verschattung von Parkplätzen** | Bäume, Sträucher oder Überdachung | ▪ Reduktion der Wärmebelastung nachts und insb. tagsüber<br>▪ Deposition und Filterung von Luftschadstoffen<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität | Parkplätze |
| **07** | **Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren** | Vielfältigkeit der Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) | ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts<br>▪ Synergien zur Biodiversität | Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **08** | **Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen** | ▪ Bedeutung für den Kaltlufthaushalt<br>▪ Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagsmanagement | | Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) |
| **09** | **Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen** | ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Standgewässer<br>▪ Rauhigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die auch bei anderen als autochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird (allochthone Wetterlagen)<br>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks)<br>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken | | Gewässer,<br>Grün- und Freiflächen |
| **10** | **Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke** | Partizipative Projekte (z.B. Quartiersmanagement) oder aus Bevölkerung heraus (z.B. Trinkpatenschaften, Urban Gardening) | ▪ Minderungen der Vulnerabilität der Quartiersbevölkerung gegenüber thermischem Stress | (thermisch belastete) Quartiere hoher Einwohnerdichte |
| **VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG** | | | | |
| **11** | **Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten** | Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) | ▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung<br>▪ Reduktion des Wärmestaus | Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen achten) |
| **12** | **Entdichtung (Rückbau)** | Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen | ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts<br>▪ Verbesserung der Durchlüftung<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement | Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen) |
| **13** | **Vermeidung von Austauschbarrieren** | ▪ Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen<br>▪ Schutz des Luftaustauschsystems | | Grün- und Freiflächen,<br>gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen,<br>Straßen, Wege, Plätze |
| **14** | **Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen** | ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung<br>▪ Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, Felder, Kleingärten und Parklandschaften (im Außen- und Innenbereich), die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben<br>▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft<br>▪ Synergien zur Biodiversität | | Grün- und Freiflächen |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM** | | | | |
| **15** | **Dachbegrünung** | Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen) | ▪ Verbesserung des Innenraumklimas<br>▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich<br>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement, Biodiversität und Klimaschutz | Flachdächer,<br>ggf. flach geneigte Dächer |
| **16** | **Fassadenbegrünung** | Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen) | ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas<br>▪ Synergien zur Luftreinhaltung, Biodiversität, Lärm- und Gebäudeschutz | Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen) |
| **17** | **Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen** | Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie, geeignete Raumlüftung (Verhalten der Bewohner) | ▪ Wirkung tagsüber und nachts<br>▪ Verbesserung des Innenraumklimas<br>▪ Synergien zum Klimaschutz | Gebäude, v.a. Südfassaden und in Bezug auf Fenster- und sonstige Glasflächen (Neubau und Bestand) |
| **18** | **Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen** | Dämmung von Gebäuden, Erhöhung der Albedo | ▪ In erster Linie Klimaschutzmaßnahme<br>▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber | Gebäude (Bestand) |
| **19** | **Anpassung des Raumnutzungskonzeptes** | Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risiko-gruppen genutzte Zimmer (etwa im Krankenhaus)) | ▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) | Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau) |

# 7. Zusammenfassung

Bisherige Aussagen zum Erlanger Stadtklima stützen sich auf das Klimagutachten des Deutschen Wetterdiensts aus dem Jahr 1989 und dessen Fortschreibung im Jahr 2002. Angesichts der seitdem erfolgten Siedlungsentwicklung war im Hinblick auf das derzeitige Belastungsniveau und künftige städtebauliche Planungen eine Aktualisierung der Klimaanalyse notwendig. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mesoskalige Rechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten.

Die Stadtklimaanalyse stellt eine wichtige Basis der Betroffenheitsanalyse für das Klimaanpassungskonzept der Stadt Erlangen und die darin erarbeiteten Strategien und Maßnahmen dar, die im separaten Bericht „Klimaanpassungskonzept der Stadt Erlangen. Teil A: Klimaanpassungsstrategie“ beschrieben werden. Das Projekt wurde als „Klimaschutzteilkonzept zur Klimaanpassung“ im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative durch das Bundesumweltministerium gefördert (Förderkennzeichen 03K06266).

#### *ZENTRALE ERGEBNISSE*

Bei Betrachtung der bodennahen Lufttemperatur zeigt sich eine deutliche nächtliche Überwärmung der städtischen Bereiche – so weisen die Erlanger Kernstadt oder hochversiegelte Gewerbeflächen bspw. in Bruck um bis zu 7 °C höhere Temperaturen als das natürliche, weitgehend unbebaute Umland etwa in der Regnitz-Aue auf. Dieser für Großstädte typische „Wärmeinseleffekt“ kommt vor allem nachts zum Tragen und geht u.a. auf den höheren Versiegelungsgrad bzw. geringeren Grünanteil in der Stadt, die Beeinträchtigung der Strömung durch Hindernisse sowie Emissionen aus Verkehr, Industrie und Haushalten zurück.

Aktuelle Messergebnisse bestätigen den modellierten Wärmeinseleffekt. So traten an der ESTW-Messstation in Erlangen-Bruck im Sommer 2017 zwei Tropennächte auf, während die DWD-Stationen Möhrendorf-Kleinseebach bzw. Nürnberg-Flughafen keine Tropennächte verzeichneten. Noch deutlicher wird der Unterschied bei Betrachtung des sogenannten „Schlecht-Schlaf-Index“, d.h. Nächte, in denen die Temperatur 18 °C nicht unterschreitet. Dieser Fall wurde im Sommer 2017 in Bruck in 16 Nächten beobachtet, an den beiden DWD-Stationen dagegen nur in zwei bzw. drei Nächten.

Infolge des Klimawandels ist im Raum Erlangen zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrten Hitzeperioden auszugehen (siehe Teil A „Klimaanpassungsstrategie“). Diese Zunahmen sind in den (kern)städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorliegt.

Die Modellrechnung beruht auf der Annahme einer sommerlichen Strahlungswetterlage (d.h. ohne Bewölkung), die typischerweise zu den höchsten Belastungen führt und in Erlangen an etwa 25 % der Sommertage auftritt. In solch einer „autochthonen Sommernacht“ ist der Wärmeinseleffekt besonders stark ausgeprägt und kein übergeordneter Luftaustausch vorhanden („die Luft steht“). Lokal können sich jedoch Ausgleichsströmungen bilden und für Entlastung im Stadtgebiet sorgen. Neben reliefbedingten Hangabwinden sind Flurwinde die wichtigsten dieser Windsysteme. Flurwinde werden durch Temperaturunterschiede angetrieben und sind vom kühleren Umland auf die überwärmten Stadtgebiete ausgerichtet. Im besten Fall kann damit Kaltluft (und ggf. Frischluft) über zusammenhängende Grünzüge bzw. Freiflächen bis weit in den Stadtkörper fließen.

Besonders wichtige Funktionen als „Kaltluftleitbahnen“ übernehmen in Erlangen die Schwabach-Aue und der Exerzierplatz. Auch die Weiherketten samt umliegenden Grünflächen nördlich bzw. südlich von Büchenbach, die Auen der Altaurach in Frauenaurach, des Hutgrabens in Tennenlohe sowie des Bachgrabens in Bruck und die von Süden nach Bruck hineinreichenden Grün- bzw. Sportflächen dienen den jeweiligen Stadtgebieten als Leitbahnen zur Kaltluftversorgung. Von hoher Bedeutung für das Erlanger Stadtklima ist die Regnitz-Aue als flächenhaft durchlüfteter Grünraum mit Siedlungsbezug. Sie weist zwar keine klassische Leitbahnfunktion auf, durch die Trennung der beiden Siedlungsbereiche Innenstadt und Büchenbach, verhindert die Regnitz-Aue jedoch die Ausbildung eines noch stärkeren Stadtklimaeffekts. Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf Ihr näheres Umfeld haben. In Erlangen ist diesbezüglich der Schlossgarten hervorzuheben, dessen kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Parks wirken oftmals Friedhöfe (z.B. Zentralfriedhof, Friedhof Büchenbach), Sportflächen (z.B. des ATSV Erlangen in Bruck) oder Kleingärten aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

#### *PLANUNGSHINWEISKARTEN*

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Erlanger Stadtklimaanalyse und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist das Inwertsetzen der Ergebnisse, z.B. in Form der beiden nach Nacht und Tag unterschiedenen Planungshinweiskarten (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 Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der PHK 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. Auf diesen Flächen sollten bauliche Eingriffe möglichst vermieden werden bzw. unter Berücksichtigung stadtklimatischer Belange erfolgen (Gebäudekörperstellung, Begrünung, etc.), um deren Funktion und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung zu erhalten. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur ausgerichtet, d.h. (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 spiegelt die nächtliche Überwärmung wider. Entsprechend weist die Erlangen Innenstadt die ungünstigsten Bedingungen auf. Auch in den hochversiegelten Gewerbegebieten fällt die Belastung hoch aus, doch liegt der Fokus in der PHK Nacht auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit auf der Wohnbebauung. In den ungünstig bewerteten Flächen sollte nicht nur keine weitere Verdichtung erfolgen (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen), sondern vielmehr Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation angestrebt werden (Durchlüftung fördern, Vegetationsanteil erhöhen, etc.). Günstige bioklimatische Bedingungen sind vornehmlich am Stadtrand und den umliegenden Gemarkungen zu finden. Diese sind weniger empfindlich gegenüber Nutzungsintensivierungen, jedoch sollten klimaökologische Aspekte beachtet werden, um das günstige Bioklima nicht zu gefährden. 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.

Um mögliche Anpassungsmaßnahmen für gegenüber der Hitzebelastung sensible Bevölkerungsgruppen (bspw. Senior*innen oder Kleinkinder) verorten zu können, sind in der PHK Nacht Gebiete (hoher) demographischer Betroffenheit hervorgehoben, in denen sich ungünstige bioklimatische Bedingungen mit einer hohen Bevölkerungsdichte (sowie hohem Anteil sensibler Bevölkerungsgruppen) überlagern.

Die PHK Tag betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung, um die Auswirkungen auf die Wohn- sowie arbeitende Bevölkerung abzubilden. 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. Für den Kaltlufthaushalt wichtige Freiflächen wie bspw. die Regnitz-Aue sind an Sommertagen dagegen von geringerer Bedeutung, da die fehlende Verschattung zu einer starken Wärmebelastung führt. Umgekehrt weisen (stadtnahe) Wälder am Tage eine höhere Bewertung als in der Nacht auf (z.B. Mönau-Wald nördlich Büchenbach). Die höchsten klimaökologischen Funktionen erfüllen Grünflächen, denen sowohl tagsüber als auch nachts eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird. Grünflächen wie bspw. der Schlossgarten, Zentralfriedhof oder Teile der Schwabach-Aue sind somit aus stadtklimatischer Sicht besonders erhaltens- und schützenswert.

Die höchsten Belastungen im Siedlungsraum treten in hochversiegelten Räumen mit eher geringer Gebäudehöhe und Grünausstattung auf, wie sie typischerweise in Gewerbegebieten zu finden sind. Der Schattenwurf hoher Gebäude sorgt für Bereiche geringerer Wärmebelastung, je nach Sonnenstand und Lage können Gebäude jedoch auch Strahlung reflektieren. Mit den Ergebnissen der PHK Tag können Bereiche hoher Wärmebelastung identifiziert werden, in der die Umsetzung bestimmter Maßnahmen zur Anpassung prioritär erfolgen sollte.

#### *STADTKLIMATISCHE MASSNAHMEN*

Für Erlangen wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Maßnahmen identifiziert, die einzelnen Blockflächen räumlich zugeordnet werden können und als Planungsempfehlungen zu verstehen sind, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche einer genaueren Überprüfung bedürfen.

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

Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten. Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss.

# Quellenverzeichnis


Augter, G. / DWD (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. DWD - Interne Ausarbeitung (unveröffentlicht)

BBSR (2017) - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.

Berlin (2015) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Planungshinweiskarte Stadtklima 2015. Begleitdokument zur Online-Version. Online: *www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db411_01.htm* (Abruf 27.07.2018)

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/*

DWD – Deutscher Wetterdienst (1989): Klimagutachten zur Entwicklungs- und Flächennutzungsplanung der Stadt Erlangen. Wetteramt Nürnberg.

ESTW (2018) – Erlanger Stadtwerke: Daten der Messstation auf einem Parkplatz an der Henri-Dunant-Straße in ER-Bruck.

GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht-Schlaf-Index (Homepage). Online: *https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php.de* (Abruf 21.06.2019).

Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynmics 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.

Samimi, C. und Strobel, B. E. (2003/04): Das Stadtklima von Erlangen unter Berücksichtigung kleinräumiger stadtklimatischer Strukturen. In: Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft. Bd. 50/51: S. 147-178.

Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.

Sonnenverlauf (2019): Online-Dienst zu Solardaten verschiedener Standorte. Online: *www.sonnenverlauf.de*

Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.

Stadt Erlangen (Hrsg., 2019): Klimaanpassungskonzept der Stadt Erlangen. Teil A: Klimaanpassungsstrategie. Redaktion: GEO-NET Umweltconsulting (Hannover) und MUST Städtebau (Köln).

Strobel, B. E. (2002): Klima-Mosaik der Stadt Erlangen. Diplomarbeit. Institut für Geographie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur.
Online: *www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur*

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.

ZIS Bayern - Bayerische Staatsbauverwaltung, Zentralstelle für Informationssysteme (2016): Automatische Straßenverkehrszählung in Bayern, Jahresauswertung: 2016. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, München. Online: *https://www.baysis.bayern.de/web/content/verkehrsdaten/dauerzaehlstellen.aspx* (Abruf 29.07.2019)

# Anhang

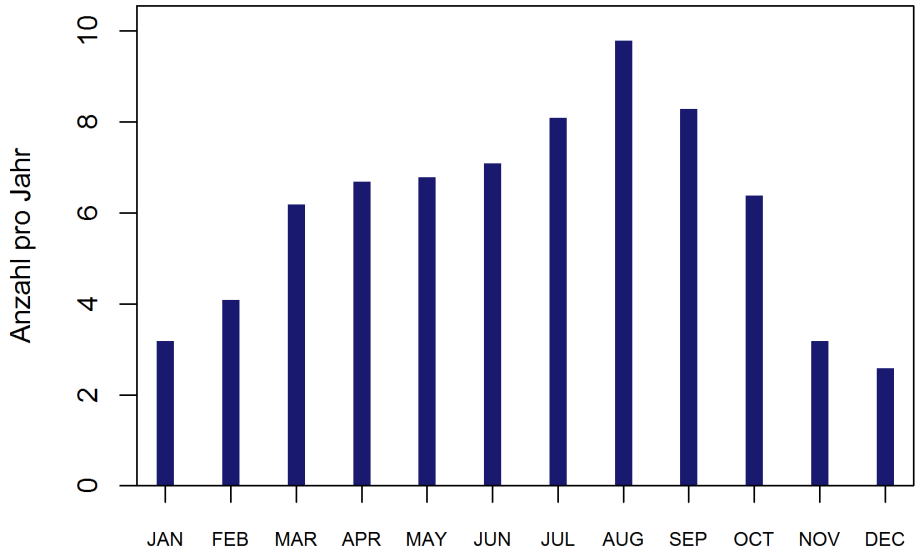



Abb. A 1: Langjähriges Monatsmittel der Anzahl autochthoner Nächte an der DWD-Station Nürnberg (1971 – 2018, Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2019b)

Tab. A 1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindexes 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 |

Tab. A 2: Sonnenstand in Erlangen an einem exemplarischen Sommertag (15.07.2018) zu verschiedenen Zeiten als Grundlage für die Berechnung der Verschattung (nach Sonnenverlauf 2019) sowie Einteilung in Verschattungsklassen.

| Uhrzeit | Azimut [°] | Sonnenhöhe [°] | Verschattungsklasse | Verschattungsanteil |
|---|---|---|---|---|
| 12:00 | 142,6 | 57,6 | Hoch | ab 60 % |
| 14:00 | 198,4 | 60,9 | Mittel | 42,5 % bis < 60 % |
| 16:00 | 242,4 | 48,1 | Gering | 25 % bis < 42,5 % |
| | | | Freifläche | < 25 % |

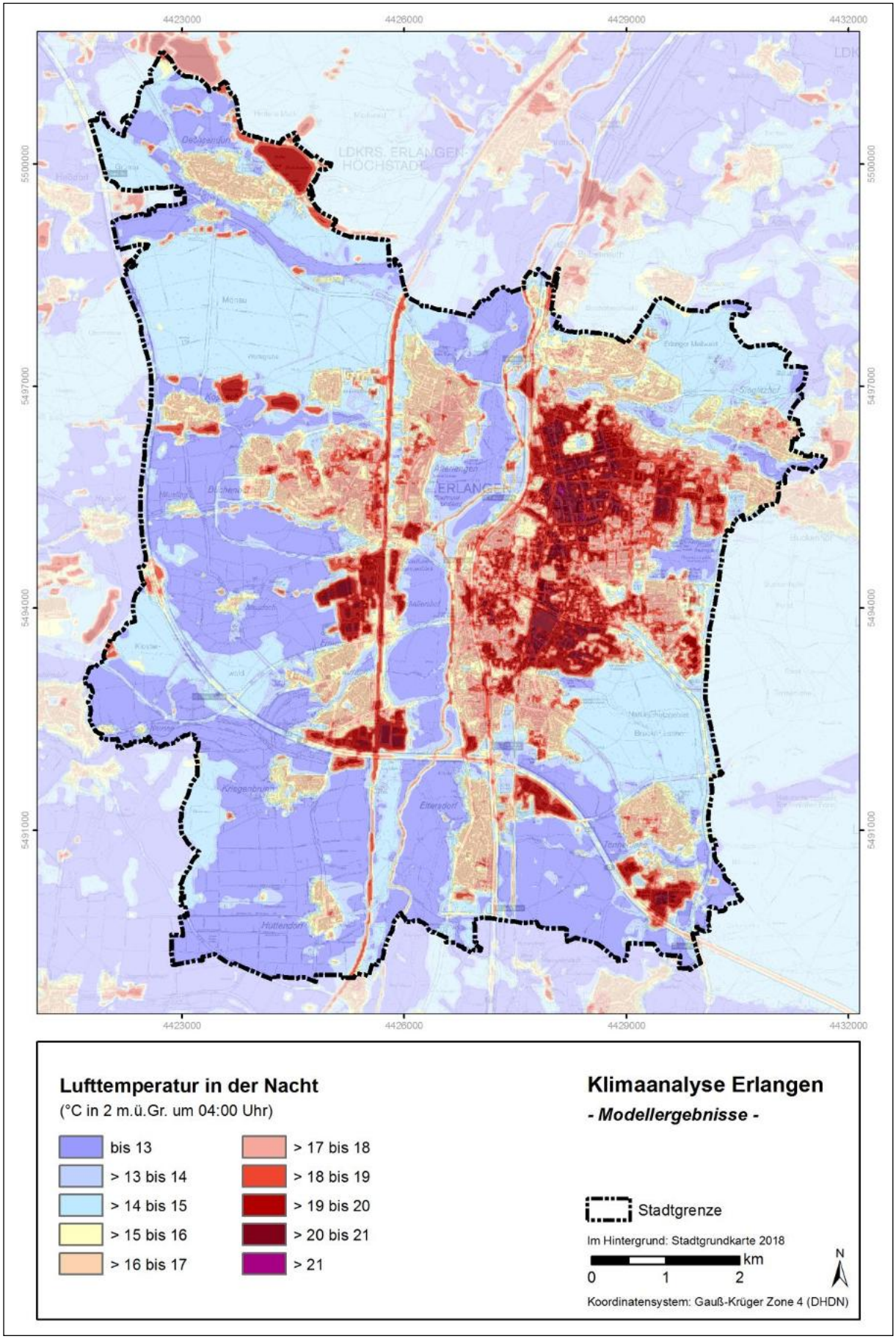



Abb. A 2: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Erlanger Stadtgebiet

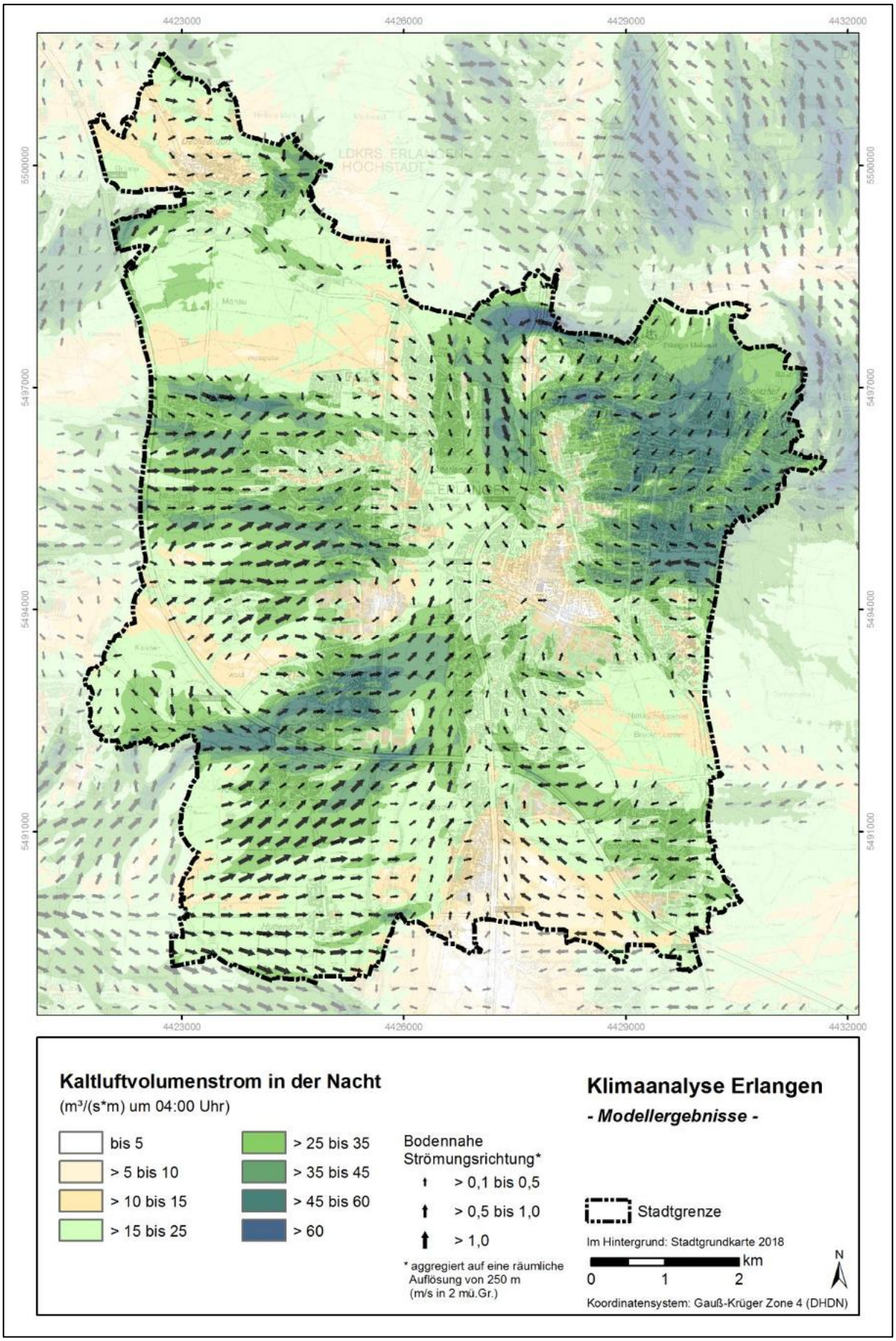



Abb. A 3: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Erlanger Stadtgebiet

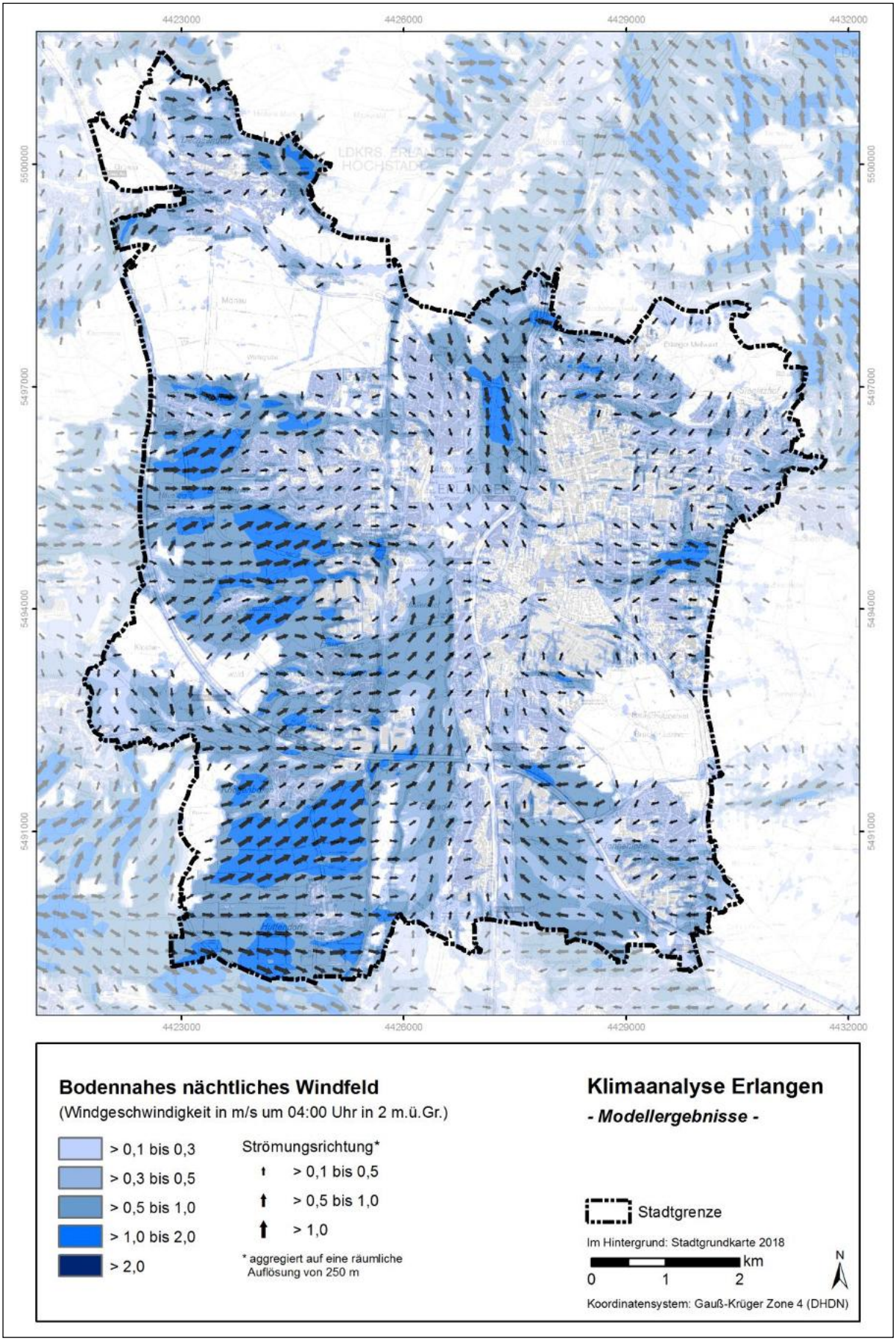



Abb. A 4: Nächtliches bodennahes Kaltluftströmungsfeld im Erlanger Stadtgebiet

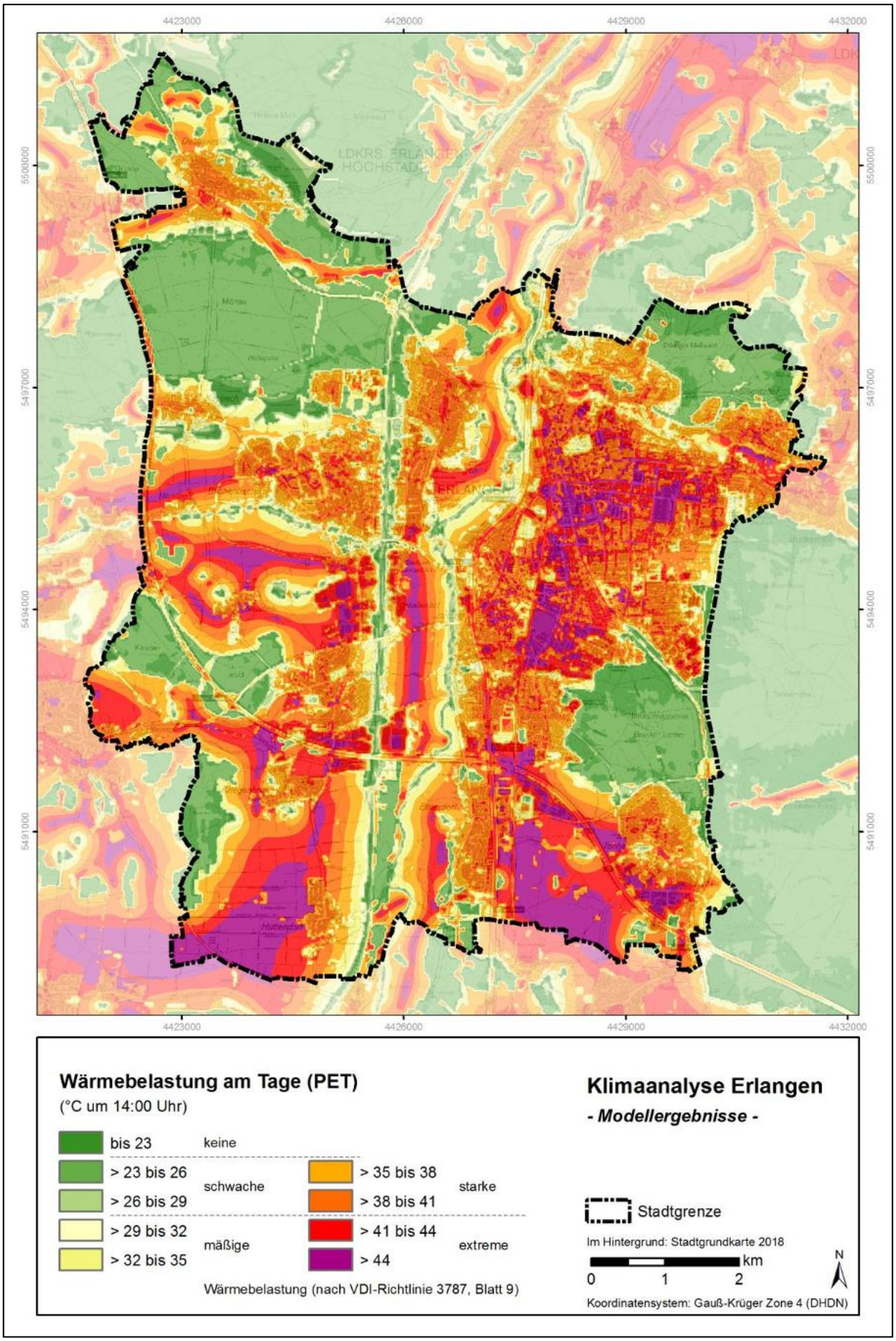



Abb. A 5: Wärmebelastung am Tage im Erlanger Stadtgebiet (PET)

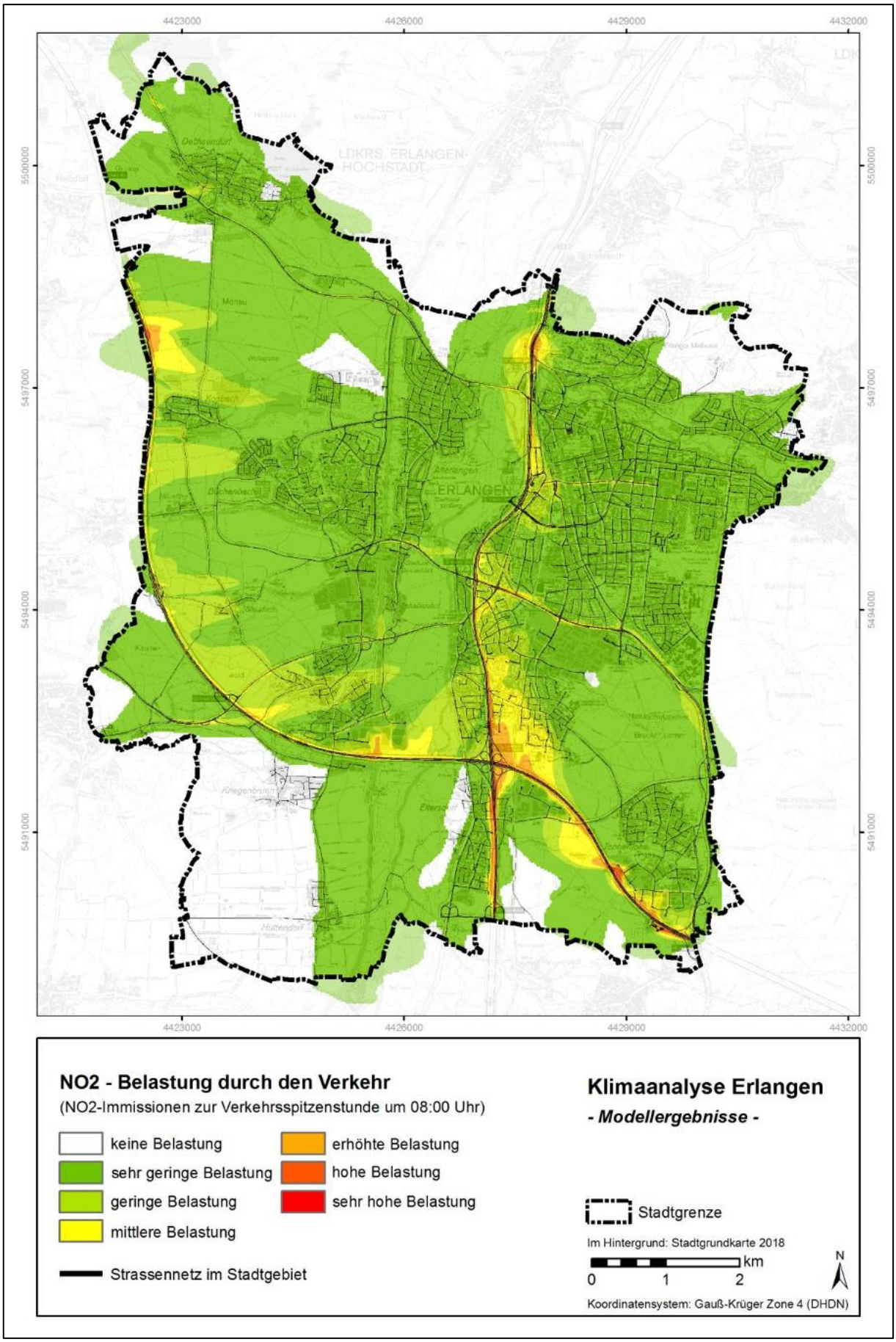



Abb. A 6: Stickstoffdioxid-Immissionen zur morgendlichen Verkehrsspitzenstunde im Stadtgebiet Erlangens

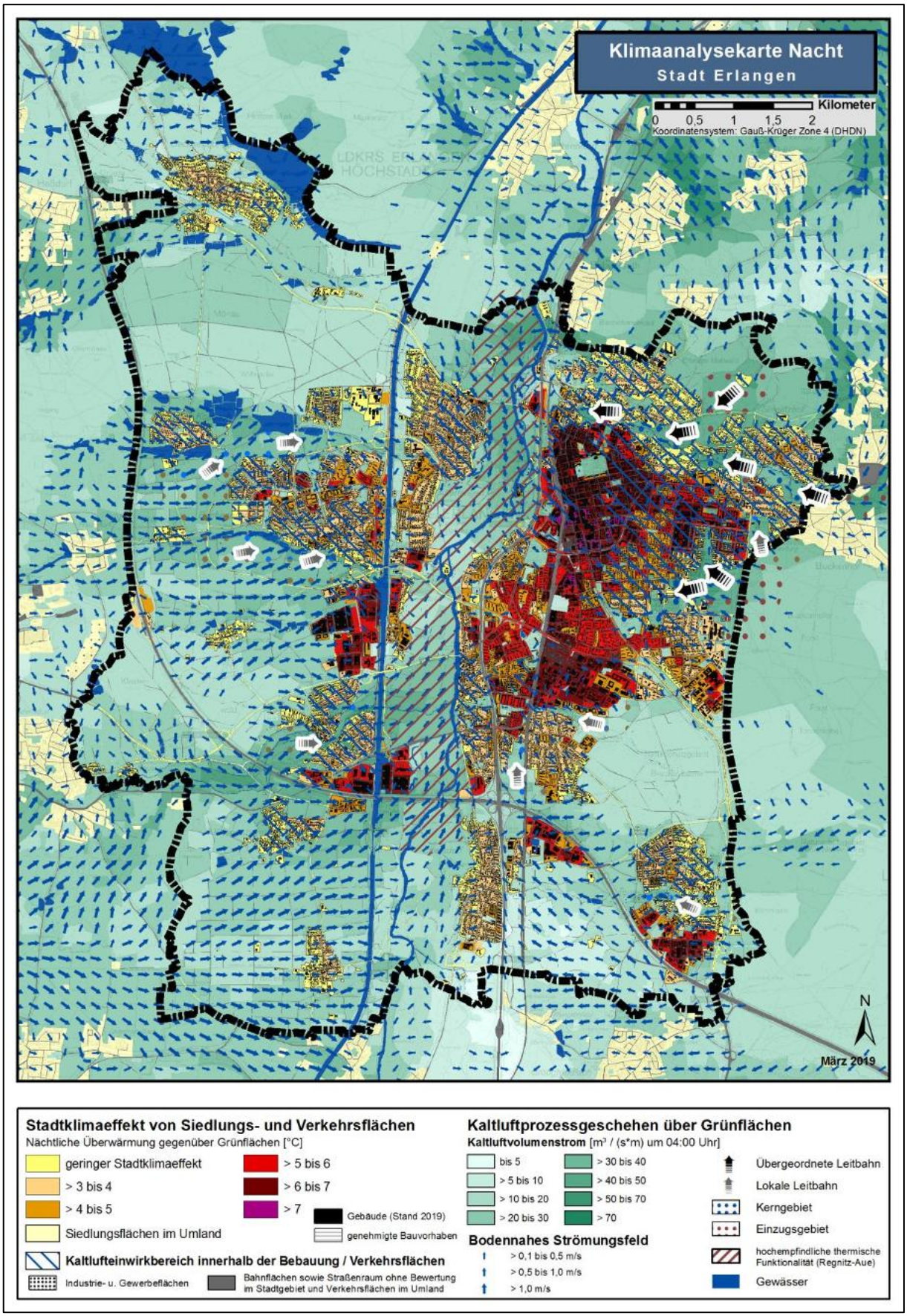



Abb. A 7: Klimaanalysekarte im Stadtgebiet Erlangens (verkürzte Legende) – im Originalformat DIN A0 ist die Karte als separater Anhang auf der städtischen Homepage frei verfügbar (www.erlangen.de)

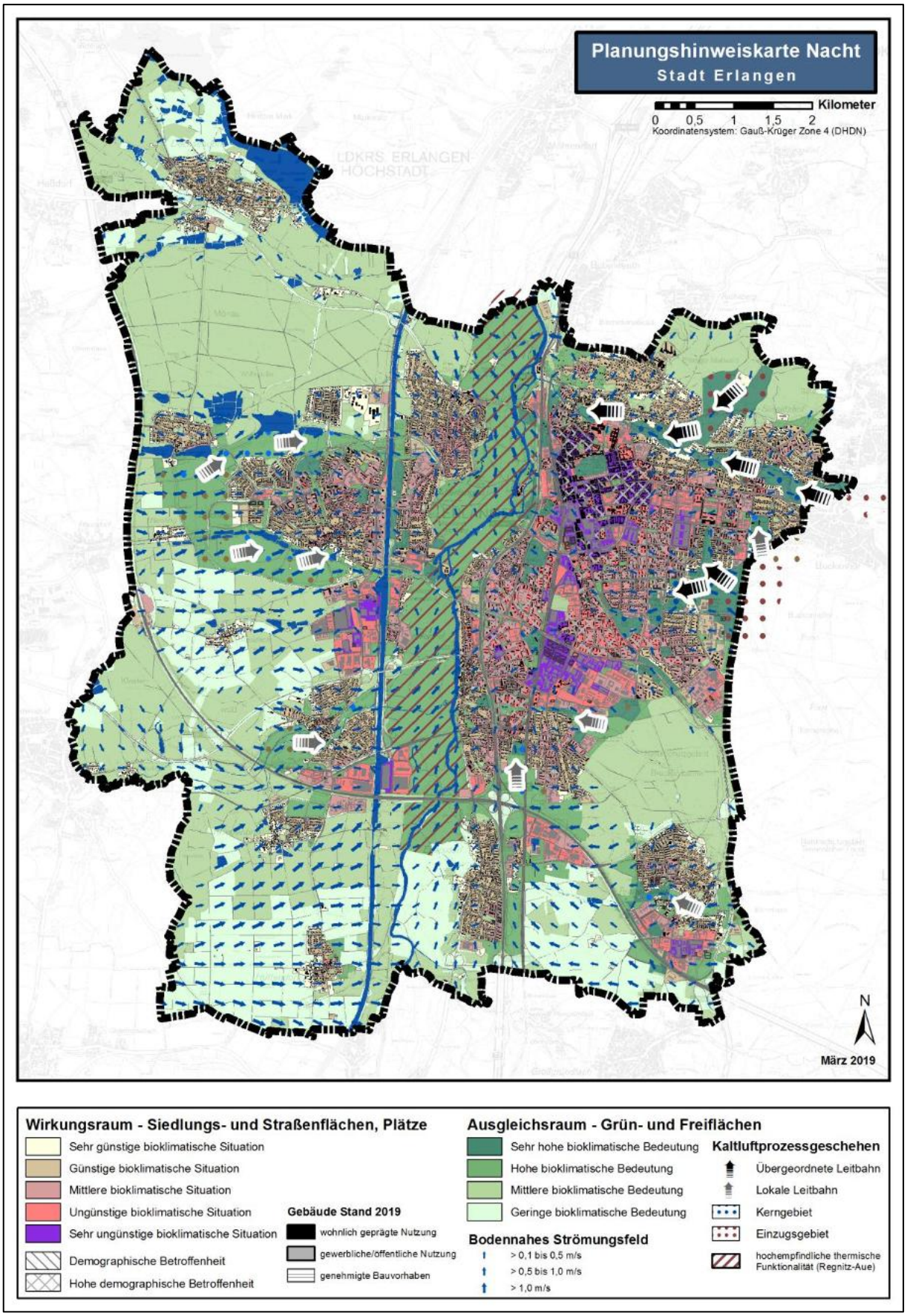



Abb. A 8: Planungshinweiskarte Nacht im Stadtgebiet Erlangens (verkürzte Legende) – im Originalformat DIN A0 ist die Karte als separater Anhang auf der städtischen Homepage frei verfügbar (www.erlangen.de)

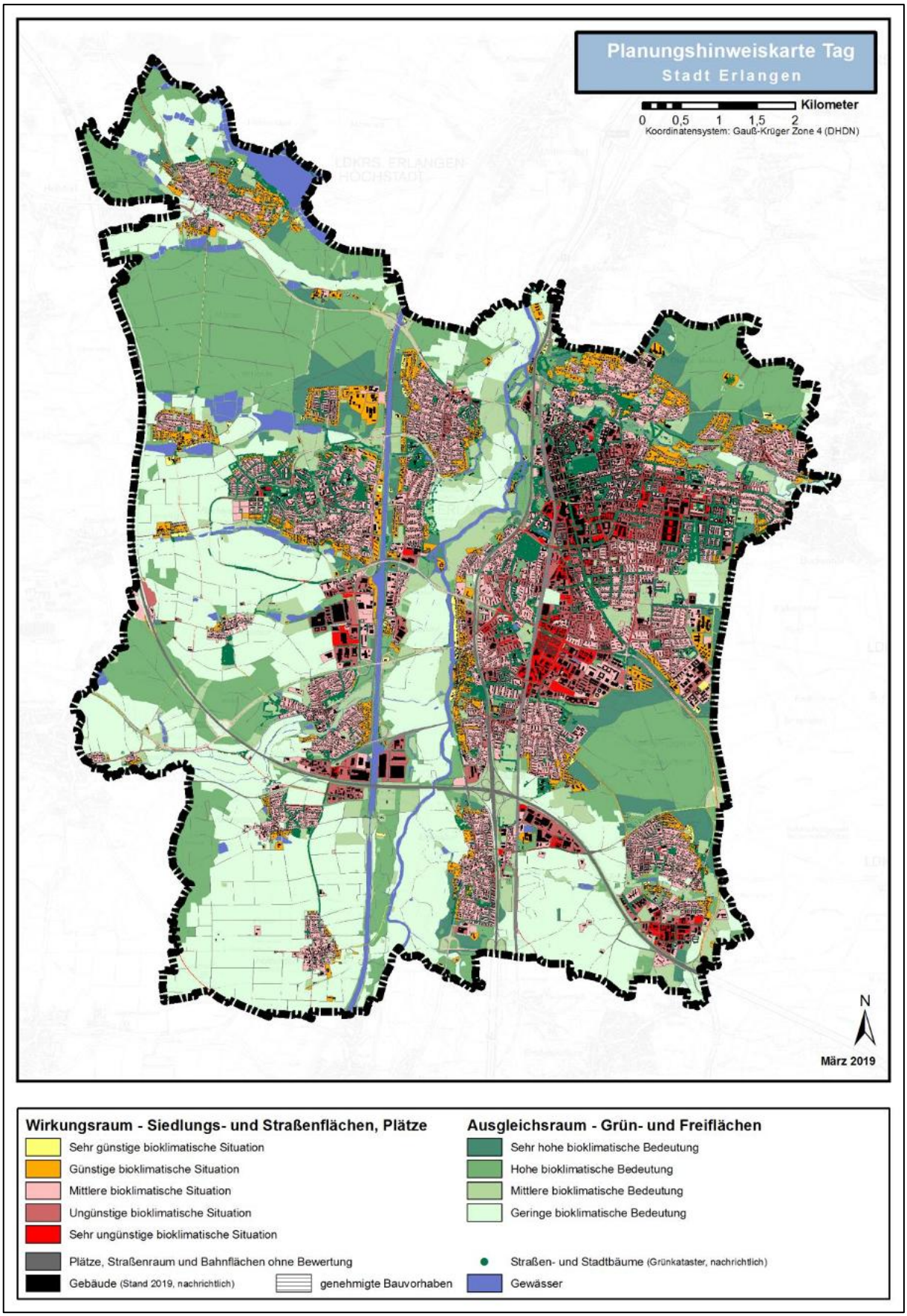



Abb. A 9: Planungshinweiskarte Tag im Stadtgebiet Erlangens (verkürzte Legende) – im Originalformat DIN A0 ist die Karte als separater Anhang auf der städtischen Homepage frei verfügbar (www.erlangen.de)