



GEFÖRDERT DURCH



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA  
UND ENERGIEWIRTSCHAFT

# Klimaökologische Situation im Stadtgebiet von Kehl am Rhein: Modell-basierte Klimaanalyse



Erstellt von:

**GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover**



Im Auftrag der

**Stadt Kehl**

**Stadtplanung / Umwelt**

**Januar 2020**

**Auftrag:** Klimaökologische Situation im Stadtgebiet von Kehl am Rhein:  
Modell-basierte Klimaanalyse

**Gebiet / Standort:** Stadt Kehl

**Auftraggeber:** Stadt Kehl, Stadtplanung / Umwelt

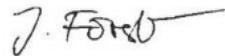
**Projektnummer:** 2\_18\_043

**Berichtsnummer:** 2\_18\_043\_Stadtklimaanalyse\_Kehl\_rev01

**Version:** 2

**Datum:** 24.02.2020

**Erstellt von:**



-----  
M.Sc. Geographie Josephine Förster

**Unter Mitarbeit von:**



-----  
Prof. Dr. Günter Groß

**Geprüft von:**



-----  
Dipl.-Geogr. Peter Trute



GEO-NET  
Umweltconsulting GmbH

Geschäftsführer:  
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey  
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a  
30161 Hannover  
Germany  
Tel. +49 (0) 511 388 72 00  
Fax +49 (0) 511 388 72 01

info@geo-net.de  
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover  
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG  
kto. 532 248 000  
blz 251 900 01

BIC VOHADE2H  
IBAN DE81 2519 0001  
0532 2480 00  
VAT DE 228892587



Die Erstellung der Stadtklimaanalyse erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach besten Wissen und Gewissen. Die Stadtklimaanalyse bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers.

# Inhaltsverzeichnis

<b>GLOSSAR .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. EINFÜHRUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FACHLICHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>3</b>
2.1 Der Wärmeinseleffekt .....	3
2.2 Beobachteter und zukünftiger Klimawandel in Kehl von 1881 bis 2100 .....	4
2.2.1 Temperaturentwicklung und Windverhältnisse in Kehl .....	4
2.2.2 Klimawandel in Kehl anhand meteorologischer Kennzahlen .....	6
<b>3. METHODIK DER MODELLGESTÜTZTEN STADTKLIMAANALYSE.....</b>	<b>12</b>
3.1 Untersuchungsgebiet.....	12
3.2 Betrachtete Wetterlage .....	13
3.3 Das mesoskalige Modell FITNAH 3D .....	14
3.4 Modelleingangsdaten .....	15
3.5 Voruntersuchung: Großräumige Modellrechnung .....	19
<b>4. MODELLERGEBNISSE.....</b>	<b>22</b>
4.1 Nächtliches Temperaturfeld .....	22
4.2 Kaltluftströmungsfeld.....	25
4.3 Thermische Belastung am Tage .....	29
<b>5. KLIMAANALYSEKARTE .....</b>	<b>33</b>
5.1 Nachtsituation .....	33
5.1.1 Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen.....	33
5.1.2 Kaltlufteinwirkungsbereich .....	33
5.1.3 Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen .....	34
5.1.4 Zukünftige Situation (2021-2050).....	36
5.2 Tagsituation.....	37

<b>6. PLANUNGSHINWEISKARTE HITZE.....</b>	<b>39</b>
6.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation) .....	39
6.2 Bewertung von Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (Wirkungsraum) .....	40
6.2.1 Bewertung der Nachtsituation .....	40
6.2.2 Bewertung der Tagsituation .....	40
6.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) .....	41
6.3.1 Bewertung der Grünflächen in der Nacht .....	41
6.3.2 Bewertung der Grünflächen am Tage.....	42
6.4 Verknüpfung der Planungshinweiskarten Tag und Nacht zu einer gesamten Karte.....	43
6.5 Ergebnisse .....	45
6.5.1 Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) .....	45
6.5.2 Siedlungs- und Verkehrsflächen (Wirkungsraum) .....	47
<b>7. MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA.....</b>	<b>50</b>
<b>8. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>56</b>
<b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>I</b>

Bildnachweis Titelblatt: Städtische Pressestelle Kehl

# Glossar

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

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

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

**Austauscharme Wetterlage:** → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

**Kaltluftfeinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden; Bezugswert: 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 zusammenhän-

gendes und großflächiges Gebiet wirksam mit Kaltluft versorgen) und „Einzugsgebiete“ der Kaltluftleitbahnen (Grünflächen hoher Kaltluftproduktivität, die die Kerngebiete speisen).

**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der  $\rightarrow$  *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an  $\rightarrow$  *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das  $\rightarrow$  *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

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

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

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

**Strahlungswetterlage**  $\rightarrow$  *Autochthone Wetterlage*

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

**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

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Angesichts des weiterhin anhaltenden Bevölkerungswachstums in Kehl einerseits als auch der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen andererseits besteht hier Handlungsbedarf. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

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

Der vorliegende Bericht erläutert zu Beginn einige fachliche Grundlagen (Kap. 2), anschließend 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 Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in entsprechenden „Klimaanalysekarten“ zusammengefasst werden (Kap. 5). Darüber hinaus werden Bewertungen der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarte; Kap. 6). Der Maßnahmenkatalog Stadtklima (Kap. 7) präzisiert die allgemeinen Planungshinweise. Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Stadtklimaanalyse zusammengefasst (Kap. 8).

## **EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN**

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 **Stadtsektornierung** sind auch **informelle Planungsinstrumente**, wie ein **städtebaulicher Rahmenplan**, denkbar (§ 140 BauGB), um städtebauliche Vorgaben und Ziele zum Klima zu definieren.

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

## 2. Fachliche Grundlagen

### 2.1 DER WÄRMEINSELEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als **Städtische Wärmeinsel** bezeichnet.

Für die Stadtbevölkerung entstehen hohe Belastungen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (autochthone Wetterlagen). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen auf, d.h. Luftmassen aus dem Umland können bis in das Stadtgebiet hinein strömen (**Flurwinde**; Abb. 1). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann (insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen)<sup>1</sup>.

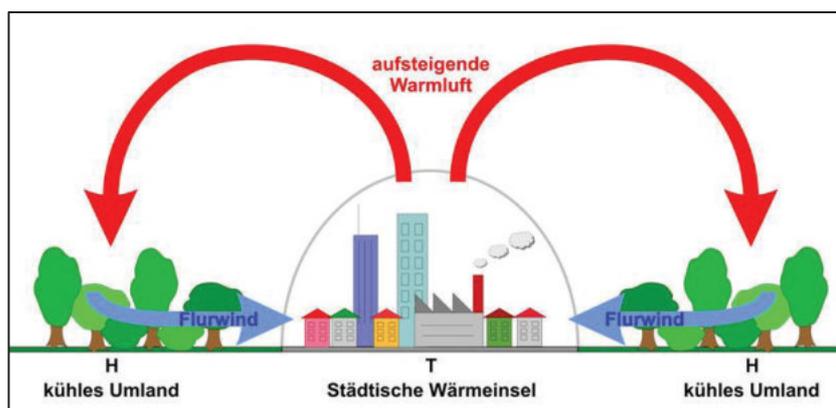


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

<sup>1</sup> 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<sup>2</sup>, 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<sup>3</sup> (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 BEOBACHTETER UND ZUKÜNFTIGER KLIMAWANDEL IN KEHL VON 1881 BIS 2100

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 im Kap. 2.2.2) die Periode 1971 - 2000 verwendet (DWD 2019).

### 2.2.1 TEMPERATURENTWICKLUNG UND WINDVERHÄLTNISSE IN KEHL

Seit dem Jahr 1881, welches dem Beginn der Aufzeichnung entspricht, stieg in Baden-Württemberg die Jahresmitteltemperatur um 1,4 °C an; seit 1989 sogar um 1° C in nur 30 Jahren. Mit dem Klimawandel ist auch ein weiterer Anstieg zu erwarten (LUBW 2020a).

Das in Baden-Württemberg beobachtete Phänomen spiegelt sich auch in der Stadt Kehl wider (Abb. 2). Die **Jahresmitteltemperatur** ist Schwankungen unterworfen, doch zeigt sich in Kehl ein klar zunehmender Trend über die letzten 140 Jahre – insb. seit den 1990er Jahren wurden vorwiegend überdurchschnittlich warme Jahre beobachtet. Die mittlere Lufttemperatur in Kehl im Zeitraum von 1971-2000 beträgt 10,7 °C. Die nachstehende Abbildung zeigt die Abweichung von diesem Bezugswert für jedes Kalenderjahr. Mit tendenziell steigenden Temperaturen geht zugleich eine Zunahme von bestimmten meteorologischen Kenntagen, wie etwa heiße Tage und Tropennächte, einher. Dies zeigt sich auch in der Betrachtung der zukünftigen Situation (vgl. Kap. 2.2.2).

---

<sup>2</sup> Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

<sup>3</sup> In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmetransport gegenüber.

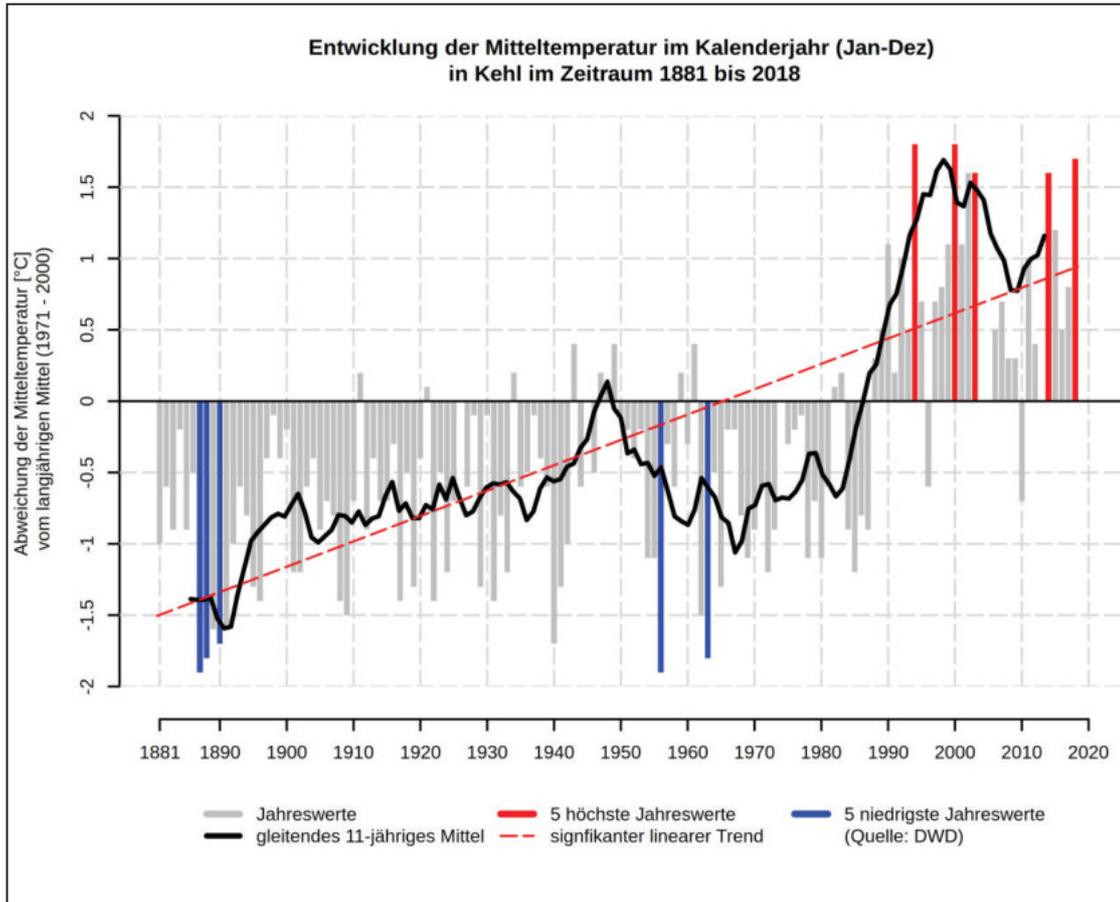


Abb. 2: Entwicklung der Mitteltemperatur in Kehl im Zeitraum von 1881 bis 2018 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2020)

Die langjährige **Windrichtungsverteilung** in der Stadt Kehl zeigt vornehmlich südliche und nördliche Anströmungen (LUBW-Stationen Kehl, Abb. 3). Für die Ausbildung des lokalen Klimas ist Kehls Lage im flachen Rheintal von Bedeutung, das eine Leitwirkung auf die großräumigen Windströmungen erwarten lässt. Hindernisarme Strukturen, wie etwa der Rhein mit seiner Uferzone, sorgen für eine gute Durchlüftung, was sich in hohen Windgeschwindigkeiten niederschlägt. So wurden an der LUBW-Station am Rhein im Zeitraum 1995-2018 beispielsweise Windgeschwindigkeiten von über 5 m/s gemessen. Dies entspricht gemäß der Beaufort-Skala ungefähr einer mäßigen Brise. Hohe Windgeschwindigkeiten treten am häufigsten aus dem Süden auf, ein zweites Maximum bilden Nord- bis Nordostwinde (bis 30 °). Auch Westwinde treten gelegentlich auf, sind aber nicht so häufig wie die Süd- und Nord(ost)winde. Im bebauten Bereich sind die Windgeschwindigkeiten gegenüber dem Gewässer und Freiland deutlich reduziert. So fallen die Windgeschwindigkeiten an der LUBW-Station Kehl-Südost tendenziell geringer aus als an der Station am Rhein, die Anströmungsrichtung verhält sich dagegen relativ ähnlich (Abb. 3).

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). Es ist davon auszugehen, dass diese „windschwachen Strahlungsnächte“<sup>4</sup> im Sommer durchschnittlich in etwa jedem vierten bis fünften Tag (bzw. Nacht) auftreten.

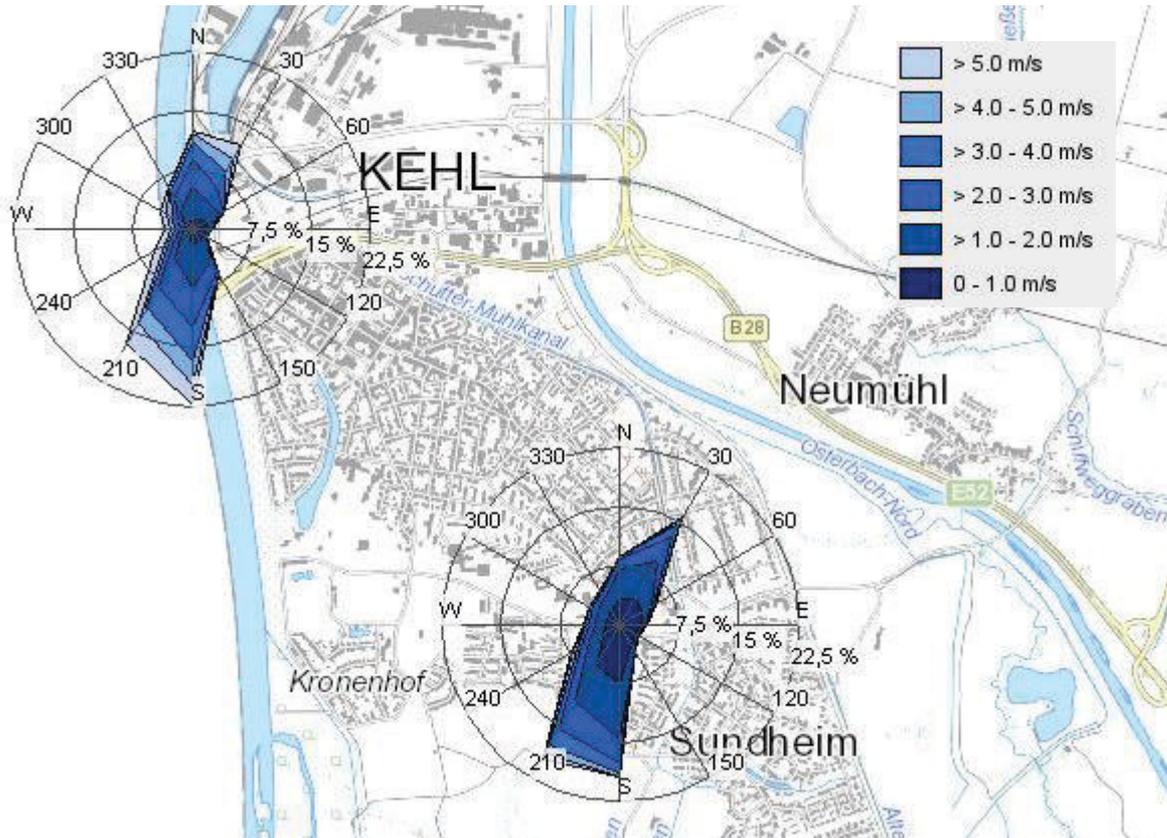


Abb. 3: Windrichtungsverteilung in 10 m über Grund für den Zeitraum 1995-2018 an den Kehler LUBW-Stationen (Quelle: LUBW 2020b)

### 2.2.2 KLIMAWANDEL IN KEHL ANHAND METEOROLOGISCHER KENNZAHLEN

Der Anstieg der globalen Mitteltemperaturen wird zum Großteil durch die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gesteuert. Insofern haben wir schon heute einen Einfluss auf die Lufttemperaturen, die sich in naher und ferner Zukunft ergeben werden. Da noch unklar ist, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Zukunft entwickeln, werden diese anhand verschiedener Szenarien untersucht, welche bis ins Jahr 2100 einen bestimmten Strahlungsantrieb erzeugen. Für Europa sind derzeit drei verschiedene Klimaszenarien verfügbar, nämlich RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5<sup>5</sup>. Die Zahlen in dem Namen der Szenarien stehen für den mittleren Strahlungsantrieb in W/m<sup>2</sup>, der bis ins Jahr 2100 erreicht wird (Abb. 4).

Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Ermittlung des dem Stadtzentrum von Kehl am nächsten gelegenen Gitterpunktes sowie den 8 umliegenden Gitterpunkten. Die an den Gitterpunkten vorliegenden Zeitrei-

<sup>4</sup> Monatliches Mittel der Anzahl windschwacher Strahlungsnächte im langjährigen Zeitraum anhand folgender Kriterien nach Augter/DWD (1997):

- Windgeschwindigkeit  $\leq 2.7$  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)

<sup>5</sup> Representative Concentration Pathways (RCP) = Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre

den der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (täglich) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2016). Alle Auswertungen basieren auf diesen Zeitreihen.

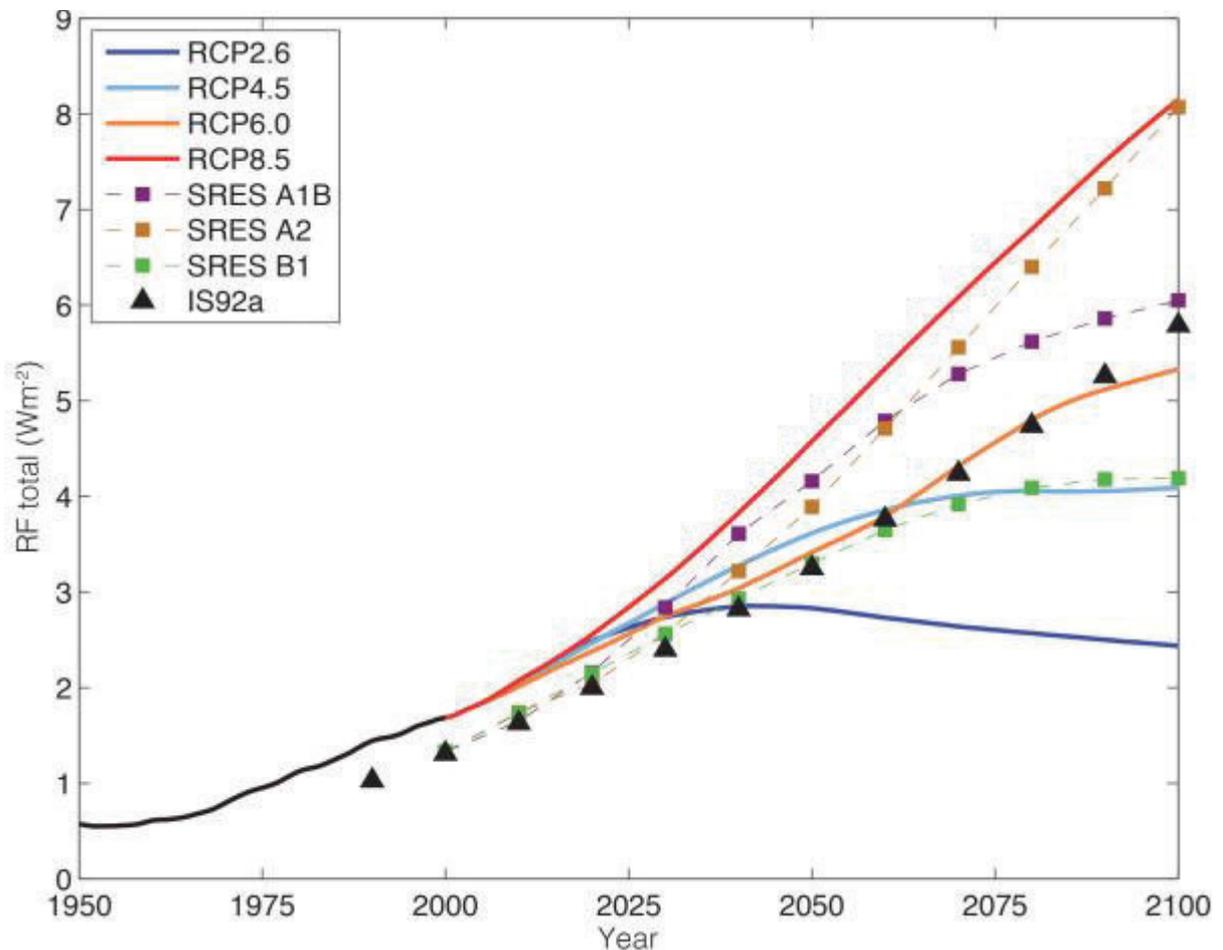


Abb. 4: Anthropogener globaler Strahlungsantrieb (RF) der aktuellen RCP-Szenarien (zum Vergleich die ehemals verwendeten SRES-Szenarien) (Quelle: Cubasch et al. 2013)

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode (vgl. Einleitung in Kap. 2.2) benötigt. Da bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde im Rahmen dieses Projektes der Zeitraum von 1971 bis 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt. Für jede Variable wurden entsprechende Werte über folgende 30-jährige Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 - 2000
- Zukunftsperiode 1 (nahe Zukunft): 2021 - 2050
- Zukunftsperiode 2 (mittelfristige Zukunft): 2041 - 2070
- Zukunftsperiode 3 (ferne Zukunft): 2071 - 2100

In diesem Kapitel werden die Änderungen der Jahresmitteltemperatur, der Monatsmitteltemperatur, der Anzahl von Heißen Tagen sowie Tropennächten und der Länge von Hitzeperioden in den verschiedenen Zukunftsperioden untersucht.

Die nachstehenden Abbildungen bilden die zukünftig zu erwartenden Veränderungen gegenüber der Referenzperiode in Form sogenannter Box-Whisker Plots ab. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind. Die Ergebnisse des RCP2.6-Szenarios basieren auf 9 verschiedenen regionalen Klimamodellen. Für die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 bilden die Ergebnisse aus 15 verschiedenen Modellen die Datengrundlage. Da die Ergebnisse jedes einzelnen Modells variieren, ergibt sich eine Spannbreite aus möglichen Werten. Will man sich jedoch auf nur einen Wert festlegen, bietet sich der Median (horizontaler, durchgehender schwarzer Strich in der Box) an. Der Median teilt das Box-Whisker-Diagramm in zwei Bereiche, in denen jeweils 50 % der Daten liegen.

Die bisherig beobachtete Temperaturentwicklung (vgl. Kap. 2.2.1) setzt sich in Zukunft fort, sodass bis Ende des Jahrhunderts ein weiterer Temperaturanstieg um etwa 1,15 °C („Klimaschutz“-Szenario RCP 2.6) bzw. etwa 4 °C („weiter wie bisher“-Szenario RCP 8.5) erwartet wird<sup>6</sup> (Abb. 5). Das mittlere Szenario RCP 4.5 liegt mit einem Temperaturanstieg von ca. 2,1 °C bis 2100 entsprechend zwischen diesen beiden Extremwerten.

Über das gesamte Jahr betrachtet, nehmen in Kehl die durchschnittlichen Temperaturen nicht gleichermaßen zu, sondern verteilen sich ungleichmäßig über das Kalenderjahr. Vor diesem Hintergrund wurden die Monatsmitteltemperaturen für das mittlere Szenario RCP 4.5 genauer betrachtet (Abb. 6). Die stärksten Temperaturerhöhungen treten in den Monaten September, Oktober, Dezember und Januar auf. Im Frühjahr sind dagegen die geringsten Temperaturzunahmen zu erwarten. Die Stärke des Temperaturänderungssignals hängt stark von der betrachteten Zukunftsperiode ab (je ferner die Zukunft, desto wärmer).

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. In der Referenzperiode 1971-2000 traten im Raum Kehl durchschnittlich 11 Heiße Tage pro Jahr auf. Die zukünftige Entwicklung von Heißen Tagen für das mittlere Szenario RCP 4.5 zeigt die Abb. 7. In der nahen Zukunft (2021-2050) werden jährlich etwa 7 zusätzliche Heiße Tage erwartet, in der mittelfristigen Zukunft (2041-2070) sind es bereits 12 und in der fernen Zukunft (2071-2100) 13 weitere Heiße Tage pro Jahr.

Ein weiterer wichtiger meteorologischer Kenntag sind **Tropennächte**, bei denen die Lufttemperatur in der Nacht nicht unter 20 °C sinkt. Bei einem Auftreten sogenannter Tropennächte kann ein erholsamer Schlaf nicht mehr gewährleistet werden (optimale Schlaftemperaturen liegen bei 16 bis 18 °C, UBA 2016). Während in der Referenzperiode durchschnittlich nur eine Tropennacht pro Jahr auftrat, kommen in der nahen Zukunft jährlich bereits 4 weitere Tropennächte hinzu. In der mittelfristigen Zukunft sind jährlich insgesamt 7, also 6 zusätzliche Tropennächte, zu erwarten. In der fernen Zukunft treten im Jahresdurchschnitt insgesamt 10 (eine bisherige + 9 weitere) Tropennächte auf. Wie auch schon bei den Heißen Tagen beziehen sich diese Angaben auf das mittlere Szenario RCP 4.5 (Abb. 8).

---

<sup>6</sup> Änderungssignal verschiedener Modellläufe zwischen der fernen Zukunft (2071 – 2100) und der Referenzperiode 1971 - 2000

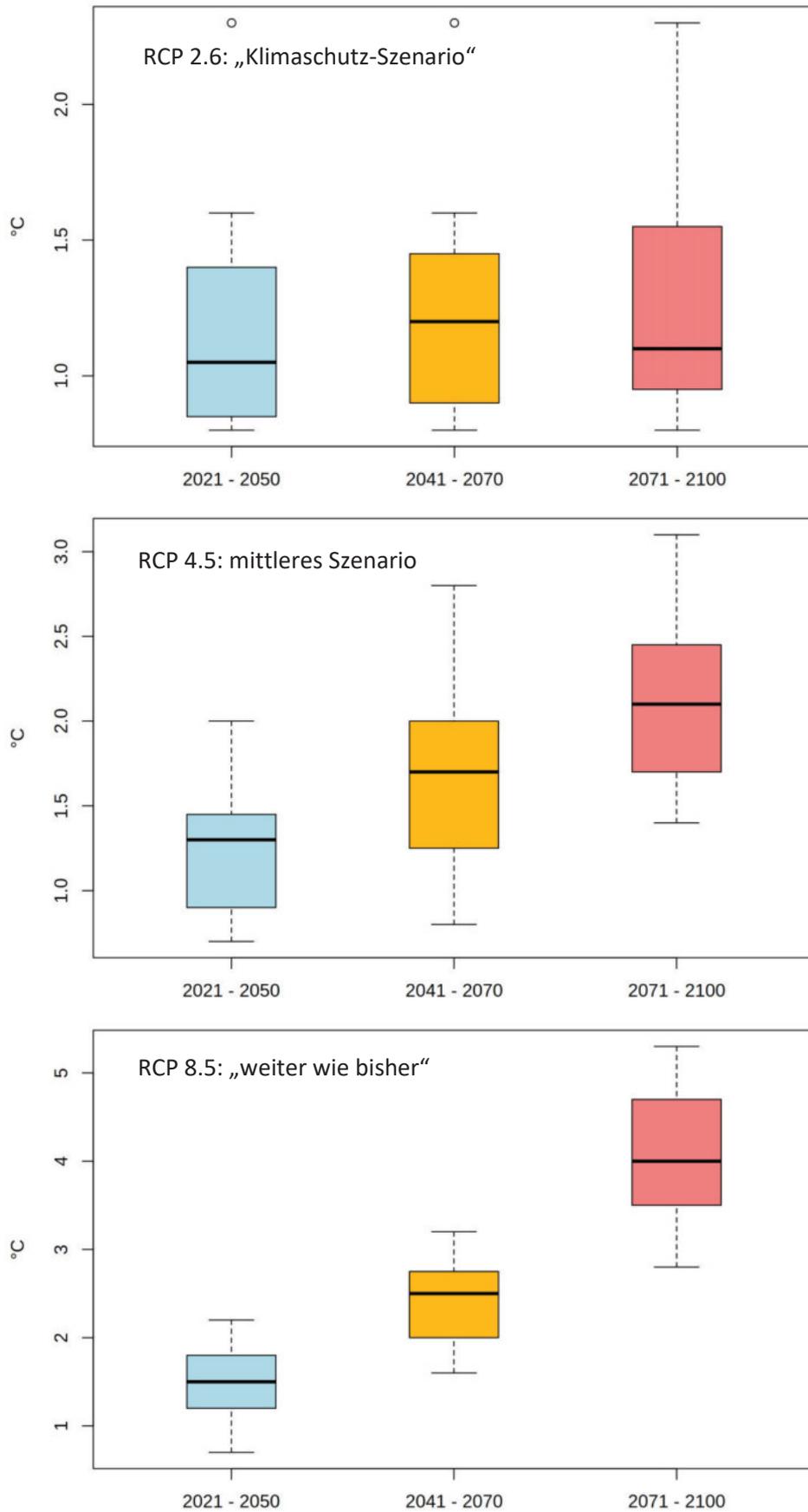


Abb. 5: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für die Stadt Kehl gegenüber der Referenzperiode 1971-2000: Ergebnisse aus den Klimaszenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5

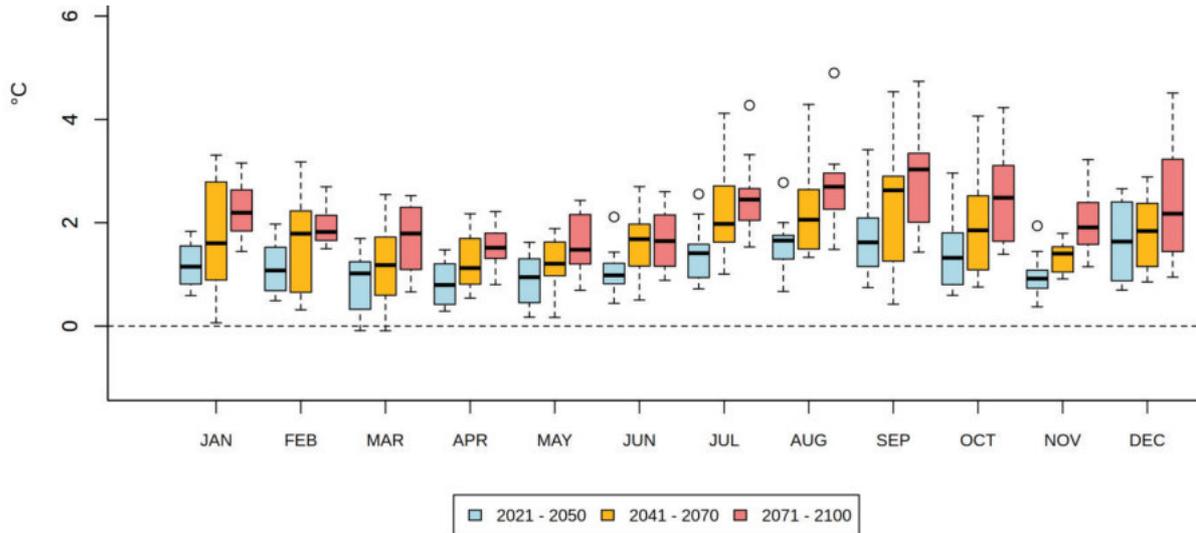


Abb. 6: Langjährige Änderung der Monatsmitteltemperatur für Kehl; Grundlage: RCP4.5

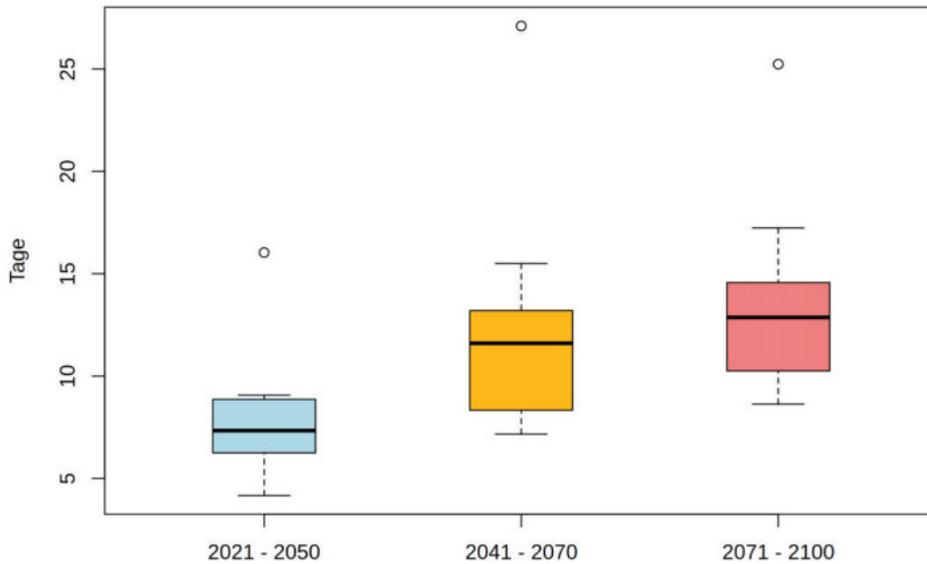


Abb. 7: Langjährige Änderung, Anzahl Heiße Tage ( $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ), RCP 4.5

Neben der Zunahme von Heißen Tagen und Tropennächten wird außerdem die Dauer von Hitzeperioden länger (Abb. 9). Um die Länge einer Hitzeperiode zu bestimmen, werden die aufeinanderfolgenden Heißen Tage ( $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) aufsummiert. Eine durchschnittliche Hitzeperiode in Kehl dauert in der Referenzperiode 1971-2000 ca. 3,6 Tage an. In der nahen Zukunft ist davon auszugehen, dass sich die durchschnittliche Hitzeperiode um etwa 2 Tage verlängert. In der mittelfristigen bzw. fernen Zukunft sind es bereits 3 bzw. 4 Tage mehr als in der Referenzperiode.

Bei den meteorologischen Kennzahlen und –tagen 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). Entsprechend können im Stadtgebiet auch dann nächtliche Belastungssituationen wie beispielsweise Tropennächte auftreten, wenn an den Umland-Stationen keine solcher Ereignisse gemessen werden.

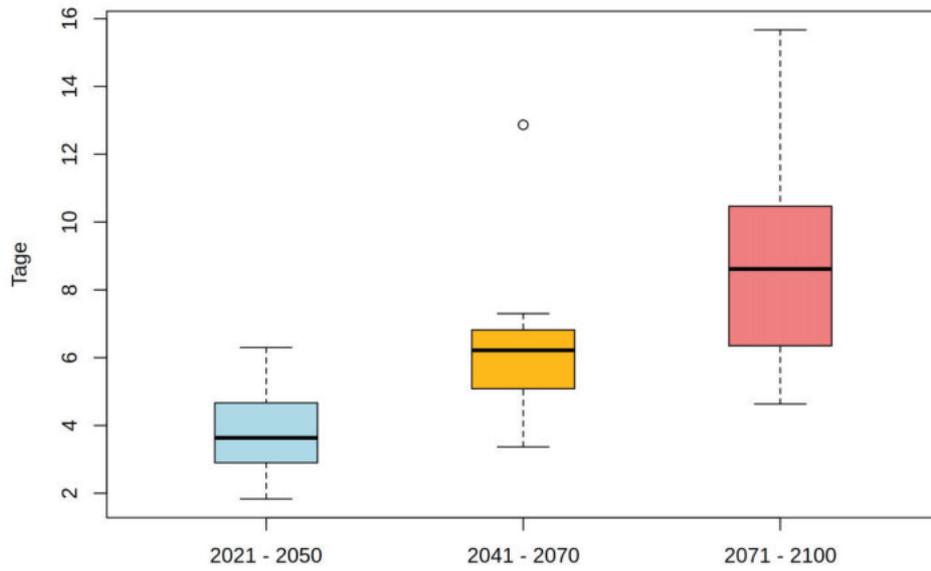


Abb. 8: Anzahl an Tropennächten ( $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ ), langjährige Änderung, RCP 4.5

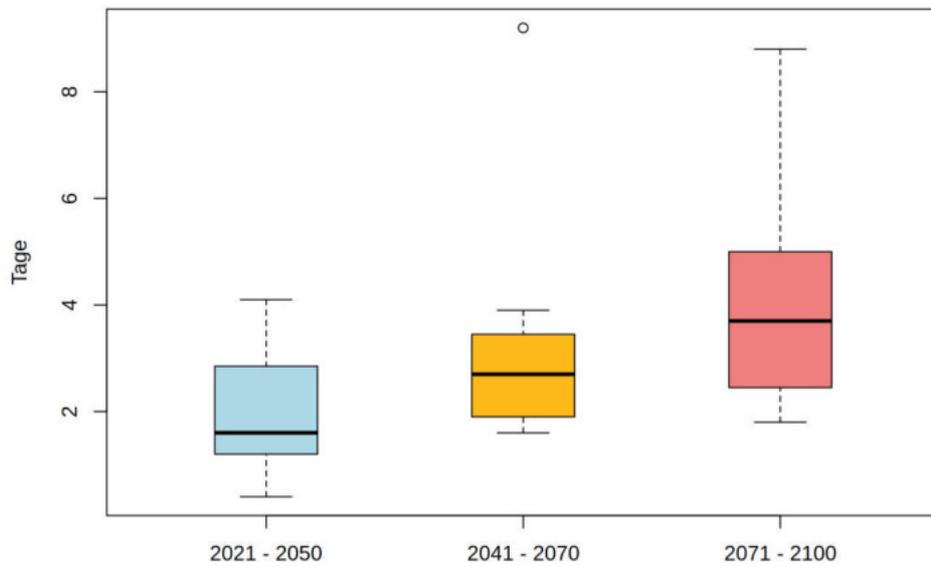


Abb. 9: Länge von Hitzeperioden (Aufeinanderfolgende Tage mit  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ); langjährige Änderung, RCP 4.5

# 3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse

## 3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Kehl befindet sich in der Oberrheinischen Tiefebene in einer Höhenlage zwischen 128,2 m und 163,6 m ü. NHN unmittelbar angrenzend an die Stadt Straßburg. Das Kehler Stadtgebiet weist demnach mit nur 35,4 m geringe Höhenunterschiede auf und befindet sich im Mittel auf einer Höhe von 137 m ü. NHN (Abb. 10). Im näheren Umfeld der Stadt befinden die Höhenzüge des Schwarzwaldes (im Osten) und der Vogesen (im Westen).

Das Stadtgebiet erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 17 km in Nord-Süd- bzw. ca. bis zu 11 km in Ost-West-Richtung über eine Fläche von etwa 75 km<sup>2</sup>. Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ungefähr 233 km<sup>2</sup> auf (12,8 km x 18,2 km) und schließt Teile des Schwarzwaldes mit ein.

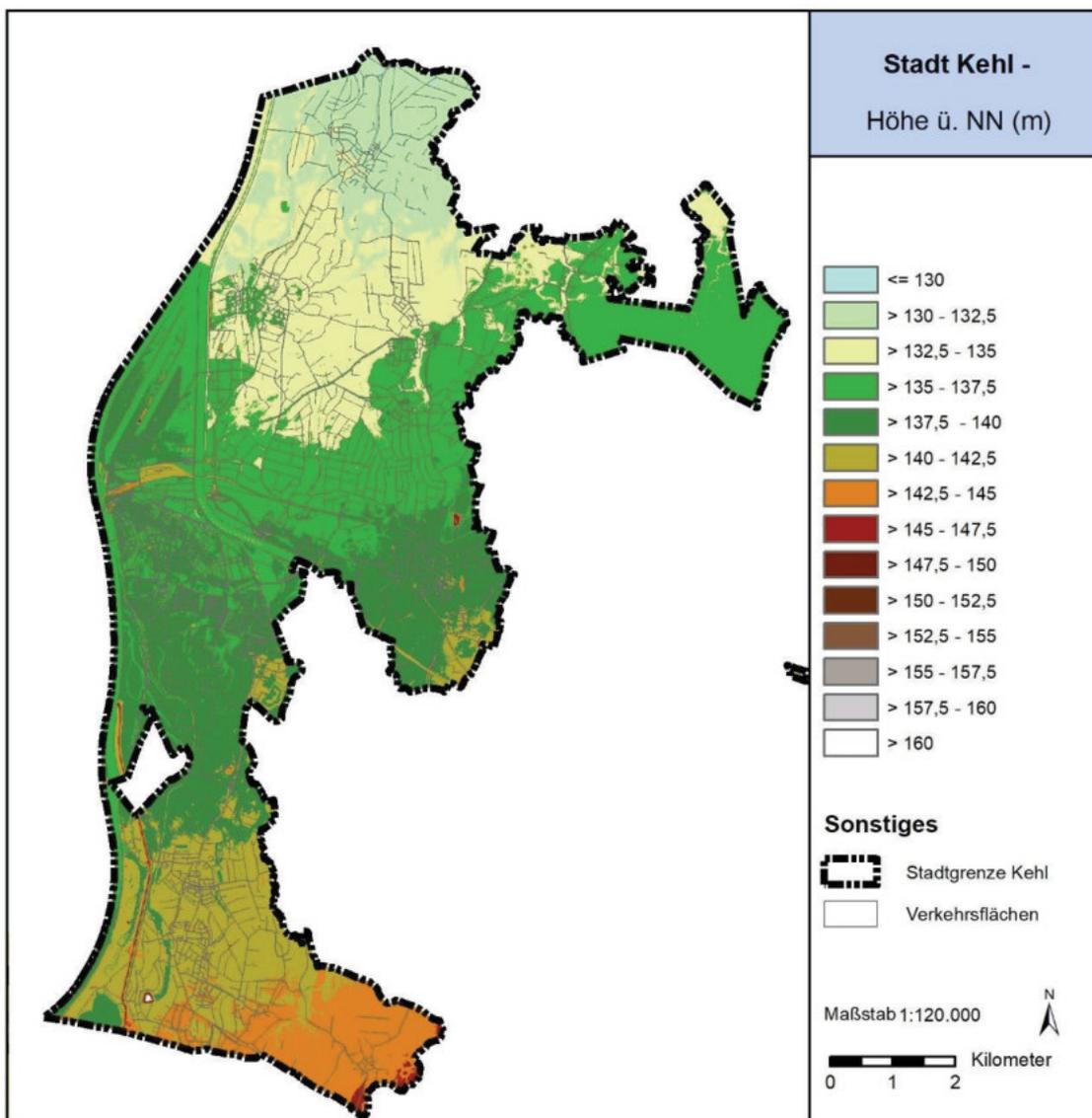


Abb. 10: Geländehöhe der Stadt Kehl basierend auf dem Digitalen Geländemodell in 1 m Auflösung

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

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

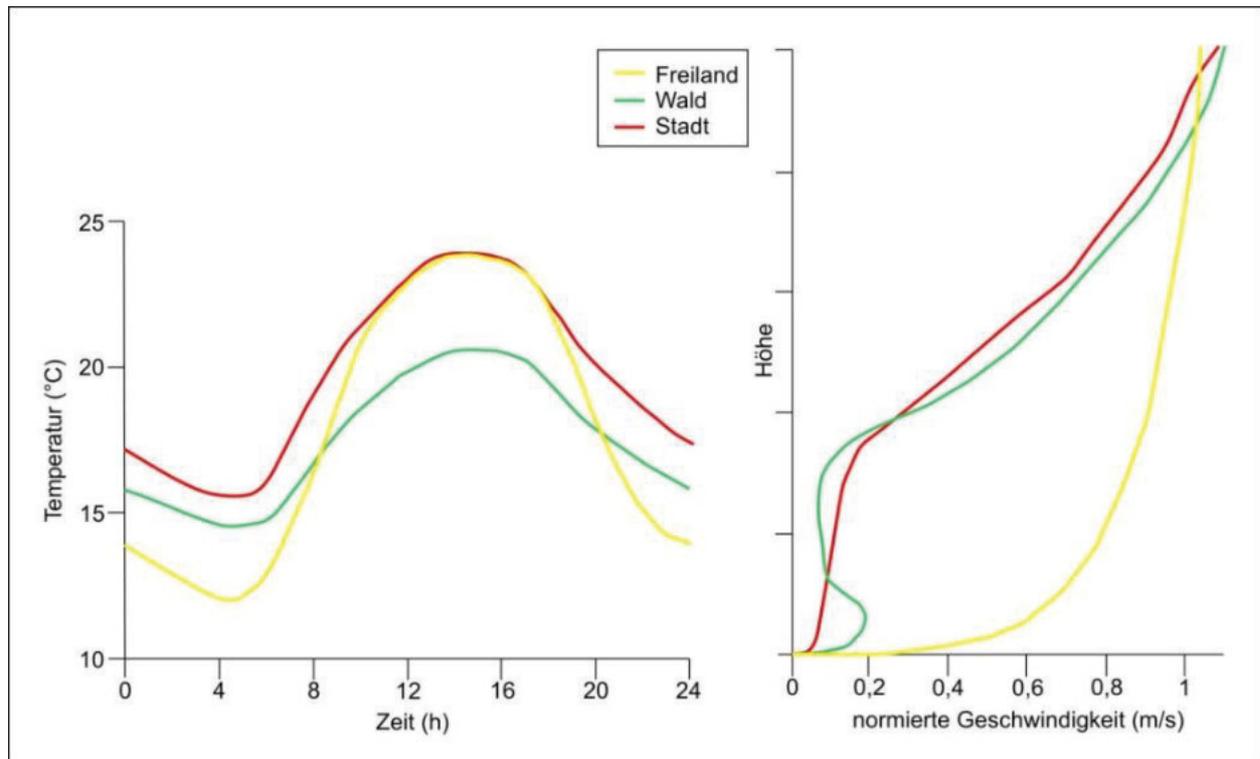


Abb. 11: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

### 3.3 DAS MESOSKALIGE MODELL FITNAH 3D

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

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

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe meso- und mikroskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988) und der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch. Zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht somit, neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien, ein weiteres leistungsfähiges Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in der Stadt- und Landschaftsplanung zur Verfügung. Die Modelle basieren, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*). Für 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 10 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 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 angenom-

men, 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 Kehl zur Verfügung gestellt wurden:

- Geländehöhe
  - ↳ abgeleitet aus einem DGM (Digitales Geländemodell) in 1 m Auflösung für die Stadt Kehl
  - ↳ im Umland von Kehl ergänzt durch ein DGM5 von Straßburg
- Landnutzung
  - ↳ ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem, 2018), ergänzt um
  - ↳ BASIS-DLM (Digitales Landschaftsmodell, 2018)
  - ↳ Urban Atlas (2012) für den Bereich in Straßburg
  - ↳ CLC (Corine Land Cover, 2018) für die Gebiete außerhalb von Straßburg-Kehl
  - ↳ Straßenkataster (2017)
  - ↳ Straßenbaumkataster (2018)
  - ↳ Sentinel-2 (05/2018)
  - ↳ Gebäudegrundrisse (LoD2-Daten (2018) für Kehl, Raster Hauteur Toits für Straßburg, OSM buildings für restliches Umland)
  - ↳ DOP (Digitale Orthophotos 2017 und 2018)
- Strukturhöhe
  - ↳ DOM (Digitales Oberflächenmodell) in 5 m Auflösung (2018)
  - ↳ Gebäudehöhe (LoD2, 2018)
  - ↳ Raster Hauteur Toits & Raster Hauteur Vegetation für den Bereich in Straßburg
- Versiegelungsgrad
  - ↳ Versiegelungskartierung Kehl (2018)

Die Kehler Landnutzung wird über 14 verschiedene Strukturtypen (vgl. Landnutzungenklassen in den Abb. 12 und Abb. 13) definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Die Zuweisung der Strukturtypen erfolgte rein auf der Basis der physikalischen Eigenschaften, unabhängig von der tatsächlichen Nutzung. So kann es u.a. vorkommen, dass gewerblich genutzte Flächen als Zeilen- und Hochhausbebauung definiert wurden, wenn diese z.B. einen sehr geringen Versiegelungsgrad aufwiesen. Hinzu kommt, dass die Bauungsklassen (Zentrumsbebauung, Blockrandbebauung, Industrie/ Gewerbe, Zeile / Hochhaus sowie Einzel- und Reihenhausbebauung) lediglich das Umfeld der Gebäude beschreiben. Der reine Baukörper als solcher wird im Raster als Gebäude klassifiziert. Jede Klimamodellierung kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur zu einem bestimmten Zeitpunkt abbilden. Insgesamt wurden zwei separate Klimamodellierungen durchgeführt und damit zwei Zustände betrachtet; die „heutige“ Ist-Situation (Abb. 12) und die angenommene Situation der nahen Zukunft (Abb. 13), welche die Klimaperiode 2021-2050 repräsentieren soll. Die aktuelle Kehler Landnutzung, welche zum Großteil aus den ALKIS-Daten abgeleitet ist, wurde auf der Basis aktueller Luftbilder (DOP 2017<sup>7</sup>) abgeglichen, sodass die „heutige“ Flächenkulisse den Stand von 2017 darstellt.

Die für die nahe Zukunft angenommene Flächenkulisse basiert auf den Entwicklungsgebieten, die zum Zeitpunkt der Bearbeitung (Sommer 2019) als plausible Flächen von der Stadt Kehl definiert wurden. Es

---

<sup>7</sup> Das DOP 2018 lag zum Zeitpunkt dieses Arbeitsschrittes noch nicht vor und konnte demnach für den Abgleich der Nutzung nicht berücksichtigt werden.

handelt sich um insgesamt 54 Entwicklungsflächen, von denen 14 zum Zeitpunkt der Bearbeitung bereits über einen mindestens in Aufstellung befindlichen Bebauungsplan verfügten. Zu diesen 14 Flächen zählen:

- ↳ Am Dreschkopf
- ↳ Gärtnerstraße
- ↳ Hanfrötze II
- ↳ Hohrott IV
- ↳ Hühnerbünd II
- ↳ Iringheimer Straße
- ↳ Lummertskeller IV
- ↳ Mosrin
- ↳ Oase
- ↳ Pfaffeneger West
- ↳ Rott III
- ↳ Sandacker Nord
- ↳ Schlossergasse
- ↳ Schneeflären

Die Namen der 40 verbleibenden möglichen, zum Teil nicht durch Darstellung im FNP abgebildeten Entwicklungsflächen, die in der Flächenkulisse der zukünftigen Situation berücksichtigt wurden, sind in der Tab. 1 dargestellt. Bei diesen 40 Flächen konnten im Gegensatz zu den Flächen mit B-Plan mangels Informationen keine einzelnen Gebäude aufgelöst werden, jedoch wurden sie anhand ihres Stadtstrukturtyps (z.B. Gewerbefläche, Zeilen- und Hochhausbebauung, Einzel- und Reihenhausbebauung) hinreichend beschrieben.

Tab. 1: Berücksichtigte Kehler Entwicklungsflächen (ohne Bebauungsplan) für die zukünftige Situation (2021-2050)

Anbindung KV Sundheim *	Hummelsmatt, Wittengut, Teufelsort *	Martin-Luther-Areal	Sölling
Anselm-Pflüger-Str.	Im breiten Stück - Erweiterungsf. Nußbaum *	Neu Fehl Ost	Söllingeck
Bündt	Im Wäldle - Morgenäcker IV	Neu Fehl West	Schorenfeld
Beckäcker II	Im Wäldle - Morgenäcker zur Eschauer Allee	Pfaffeneger-Süd	Stöckmatt *
Dorfsmatt	Kaserne	Pfingstmatt	Stockfeld III
Höfel II	Kindergarten	Querbach - West	Yachthafen
Hanfplatz	Kohlersmatt	Rehmatt, Kuglersgut, Kleiner Riedweg	Zollhof
Hinterhof II *	Lange Sand	REWE;städt. Wohnungsbau	zw. Kieswerk und Basic
Hohfeld III	Lummertskeller IV	Rustfeld	

\* in 2 (Teil-)Flächen untergliedert

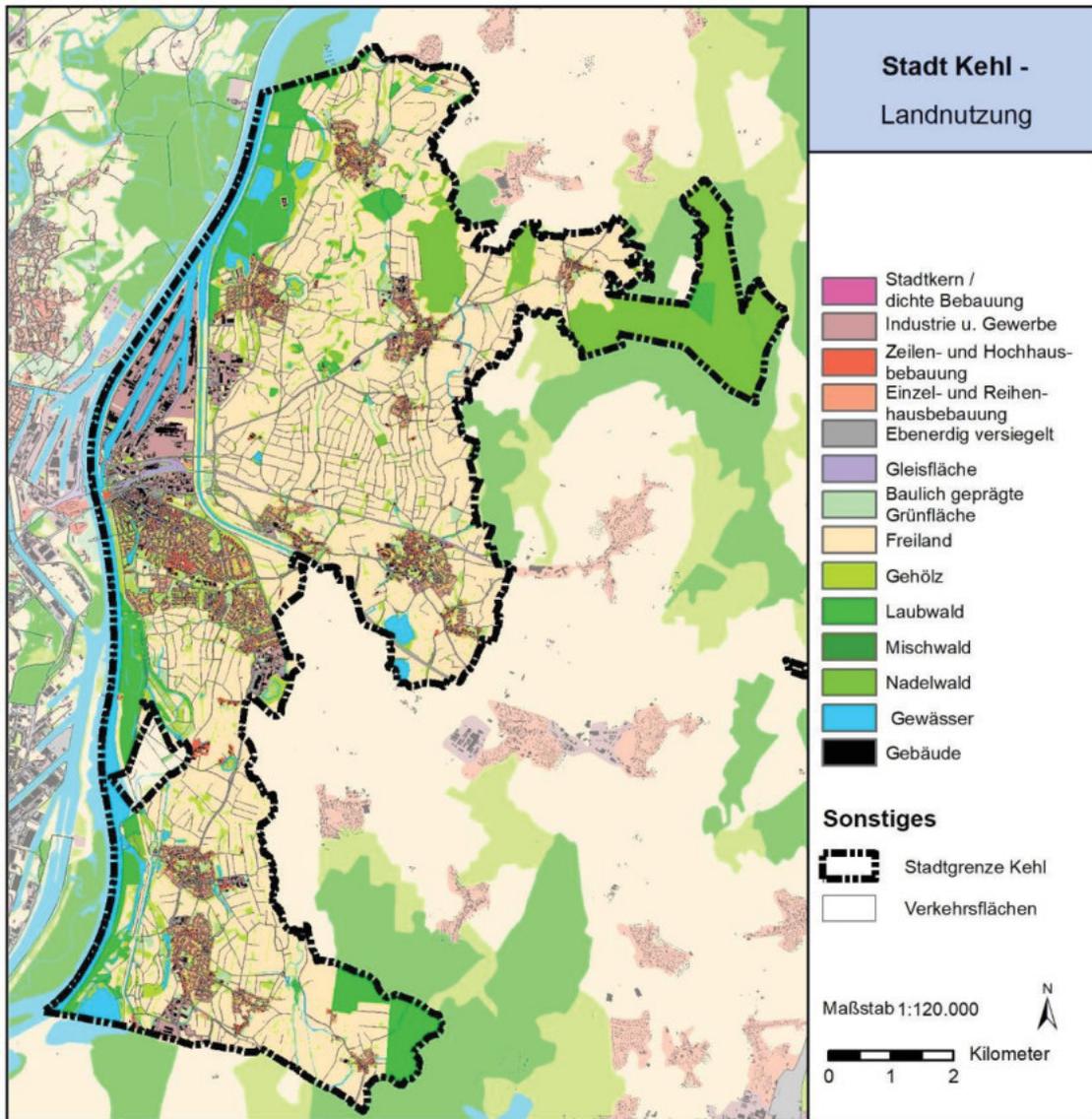


Abb. 12: Landnutzung im Kehler Stadtgebiet, Ist-Situation

Die in der Landnutzung klassifizierten Gebäude wurden nicht nur in Bezug auf ihren Grundriss, sondern auch ihrer Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Dies erfolgte auf der Basis des 3D-Stadtmodells LoD2. Weiterhin wurde ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit einer Gitterauflösung von 5 m verwendet. Aus der Differenz von DOM und DGM ergibt sich die Strukturhöhe, die damit flächendeckend für die Stadt Kehl vorlag. Die finale, rasterbasierte Strukturhöhe ergab sich aus der Verknüpfung der berechneten Strukturhöhe (DOM minus DGM) mit dem LoD2-Modell (für Gebäude) und den landnutzungsabhängigen Korrekturwerten<sup>8</sup>.

Die Rasterauflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne kleinkronige Bäume<sup>9</sup> auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden. Die Bäume im Kehler Stadtgebiet wurden in der Landnutzung als „Gehölz“ klassifiziert, sofern sie

<sup>8</sup> Die Strukturhöhe einiger Rasterzellen wurde teilweise in Abhängigkeit der Landnutzung korrigiert; z.B. alle Rasterzellen, die als Gewässer klassifiziert wurden, bekamen als Strukturhöhe 0 m zugewiesen.

<sup>9</sup> Als kleinkronige Bäume sind in diesem Fall Bäume mit einem Kronendurchmesser von weniger als 6 m gemeint. Solche Bäume sind als einzeln stehende Bäume meist zu klein, um sie in einer 10 m x 10 m großen Rasterzelle abbilden zu können, da eine andere Nutzungsart einen größeren Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt.

nicht Bestandteil eines Waldes sind (sonst: Klassen „Laub-, Misch- oder Nadelwald“). Die Individualität der unterschiedlichen Baumstandorte, z.B. Bäume über Asphalt (z.B. Straßenbäume) oder Bäume über Rasen (z.B. Gartenbäume), wurde über den Versiegelungsgrad, der für jede Rasterzelle vorlag, gesteuert. Zur flächendeckenden Kartierung der Baumstandorte wurden die frei verfügbaren Sentinel-2-Daten in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt. Ein NDVI-Schwellwert von 0,5 war geeignet, um die Vegetation von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe ( $\geq 3$  m) konnten so flächendeckend für die gesamte Stadt Baumstandorte identifiziert werden. Die auf diese Weise automatisiert erfassten Baumstandorte wurden mit dem Digitalen Orthophoto (2017) und dem Straßenbaumkataster (2018) überprüft und teilweise korrigiert.

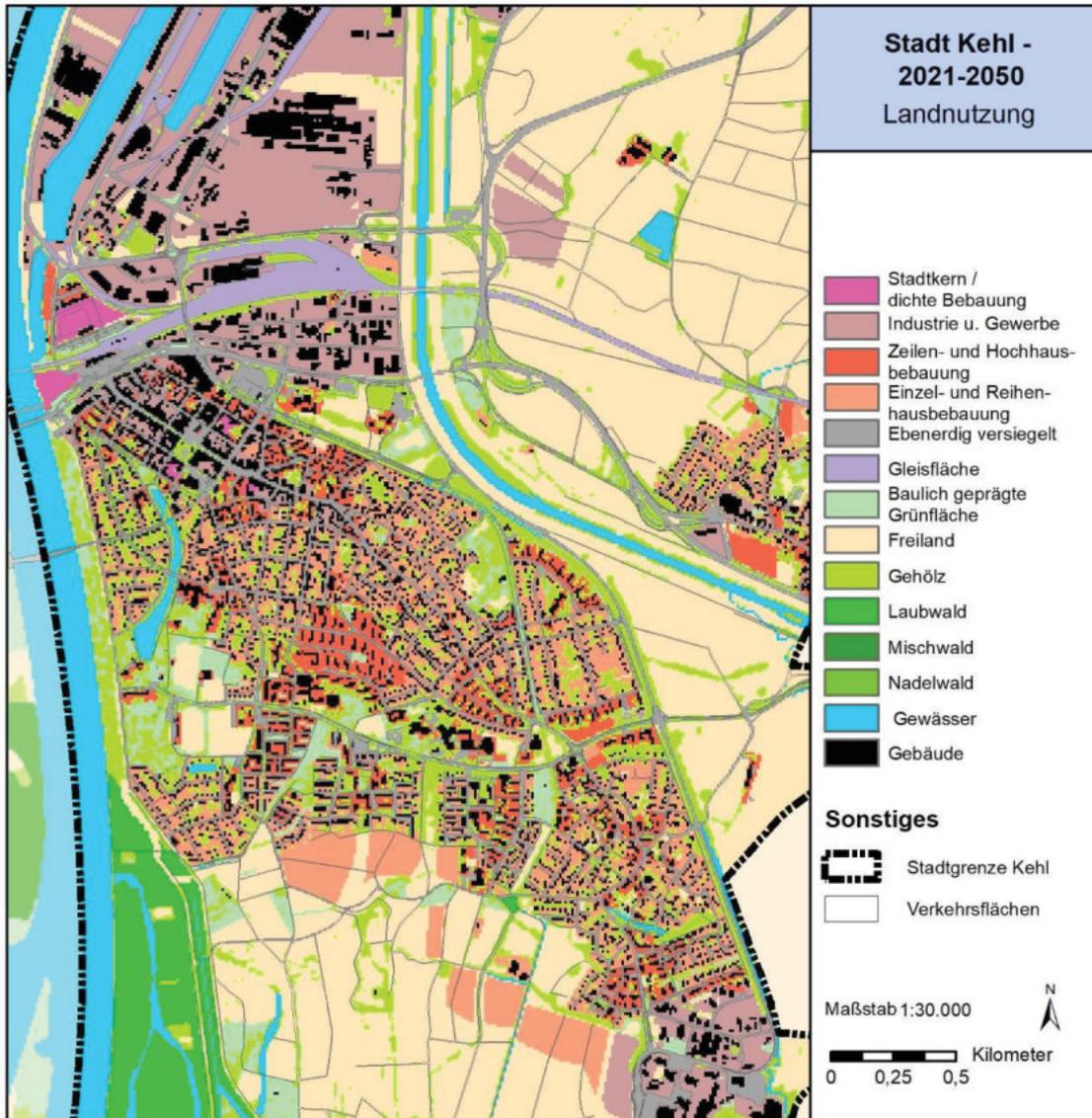


Abb. 13: Angenommene, zukünftige Landnutzung in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets für die Periode 2021-2050

#### **AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN**

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritt 1 und 2 in Abb. 14). 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. Die rasterbasierten Modellergebnisse werden nun auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4 in Abb. 14).

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).

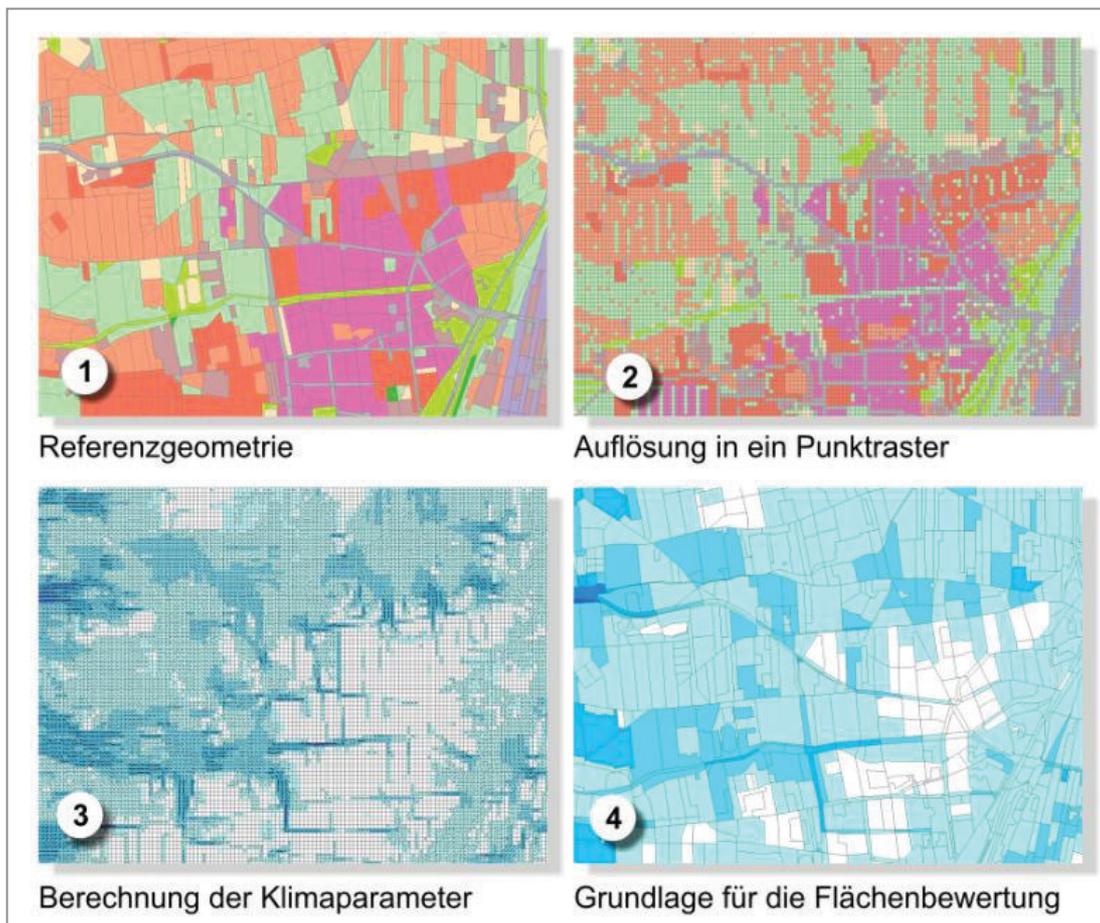


Abb. 14: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

### 3.5 VORUNTERSUCHUNG: GROßRÄUMIGE MODELLRECHNUNG

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet der Klimamodellierung über die Stadtgrenze hinaus. Neben der Landnutzung beeinflusst das Relief maßgeblich die nächtlichen Kaltluftströmungen. Das festgelegte Untersuchungsgebiet der Klimaanalyse mit seiner Ausdehnung von 12,8 km x 18,2 km ist nur begrenzt in der Lage, regionale Windsysteme wie beispielsweise nächtliche Bergwinde (z.B. Kinzigtäler) zu erfassen. Um zu prüfen, ob derartige Winde bei den meteorologischen Rahmenbedingungen der Modellrechnung berücksichtigt werden müssen, wurde im Vorfeld eine großräumige Rechnung in einem 48,6 km x 33,5 km großen erweiterten Untersuchungsgebiet durchgeführt (Abb. 15). In dieser Großraumrechnung konnten die für den nächtlichen Kaltluftabfluss prägenden Gebirgszüge, der Schwarzwald und die Vogesen, im Modell

abgebildet werden. Die Rechnung erfolgte ebenfalls mit dem Modell FITNAH 3D in einer horizontalen Auflösung von 50 m und fußt auf Corine Land Cover- sowie SRTM-Daten.

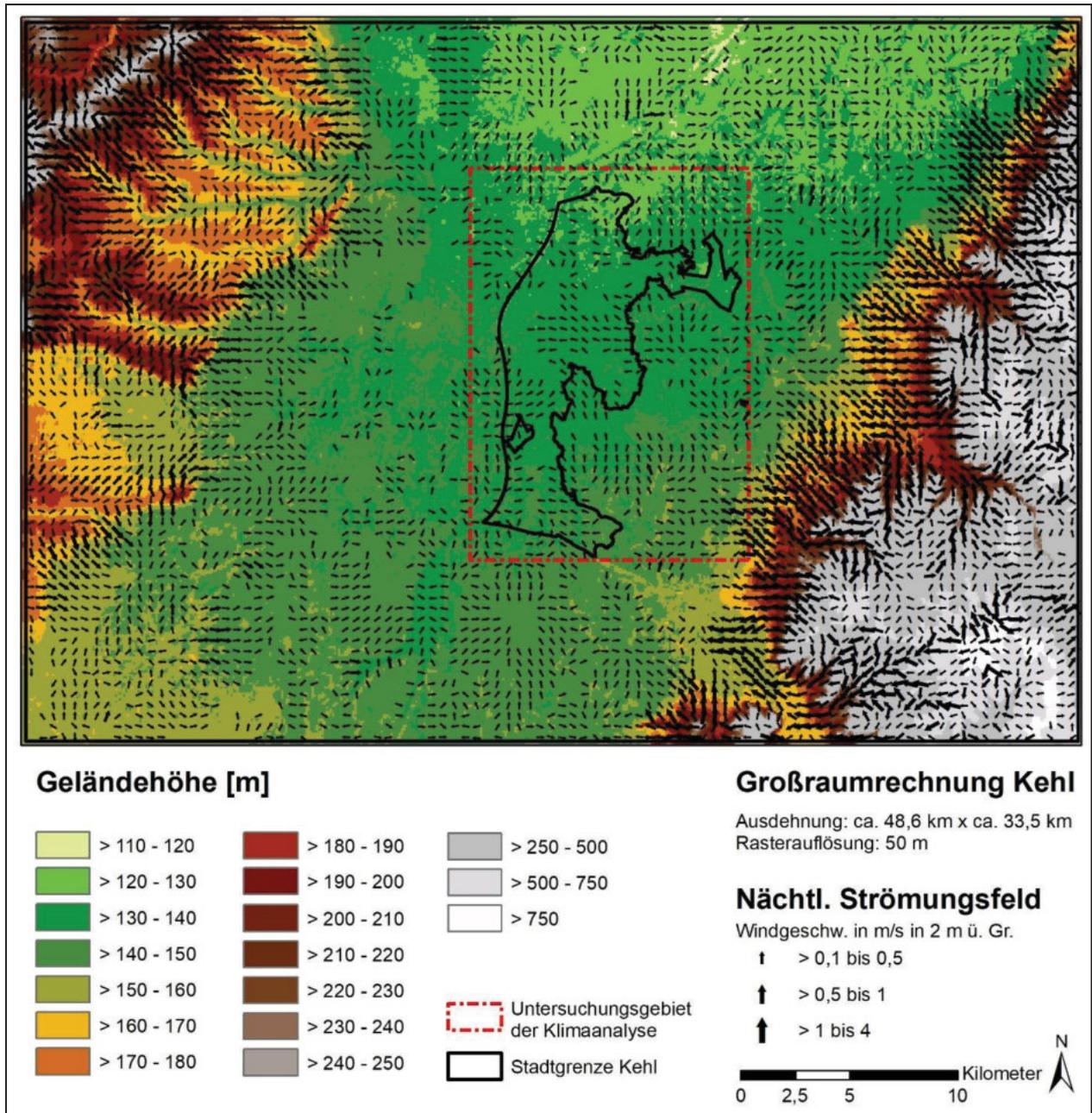


Abb. 15: Geländehöhe und nächtliches Strömungsfeld der großräumigen Modellrechnung

Ausgewertet wurde das nächtliche Strömungsfeld zum Zeitpunkt 04:00 Uhr in einer Höhe von 2 m. Das Ergebnis zeigt, dass die während austauscharmer Bedingungen (vgl. Kap. 3.2) auftretenden Bergwinde vom Schwarzwald sowie den Vogesen nicht bis zum Kehler Stadtgebiet vordringen. Lediglich an der südöstlichen Ecke des kleinen Untersuchungsgebiets (rote Linie in Abb. 15) sind Hangabwinde vom Schwarzwald zu erkennen. Diese kommen aber innerhalb des kleinen Untersuchungsgebiets frühzeitig und noch deutlich vor der Kehler Stadtgrenze zum Erliegen. Demnach musste für die Kehler Klimaanaly-

serechnung in 10 m Auflösung kein übergeordneter Strömungsantrieb in das Modell aufgenommen werden<sup>10</sup>.

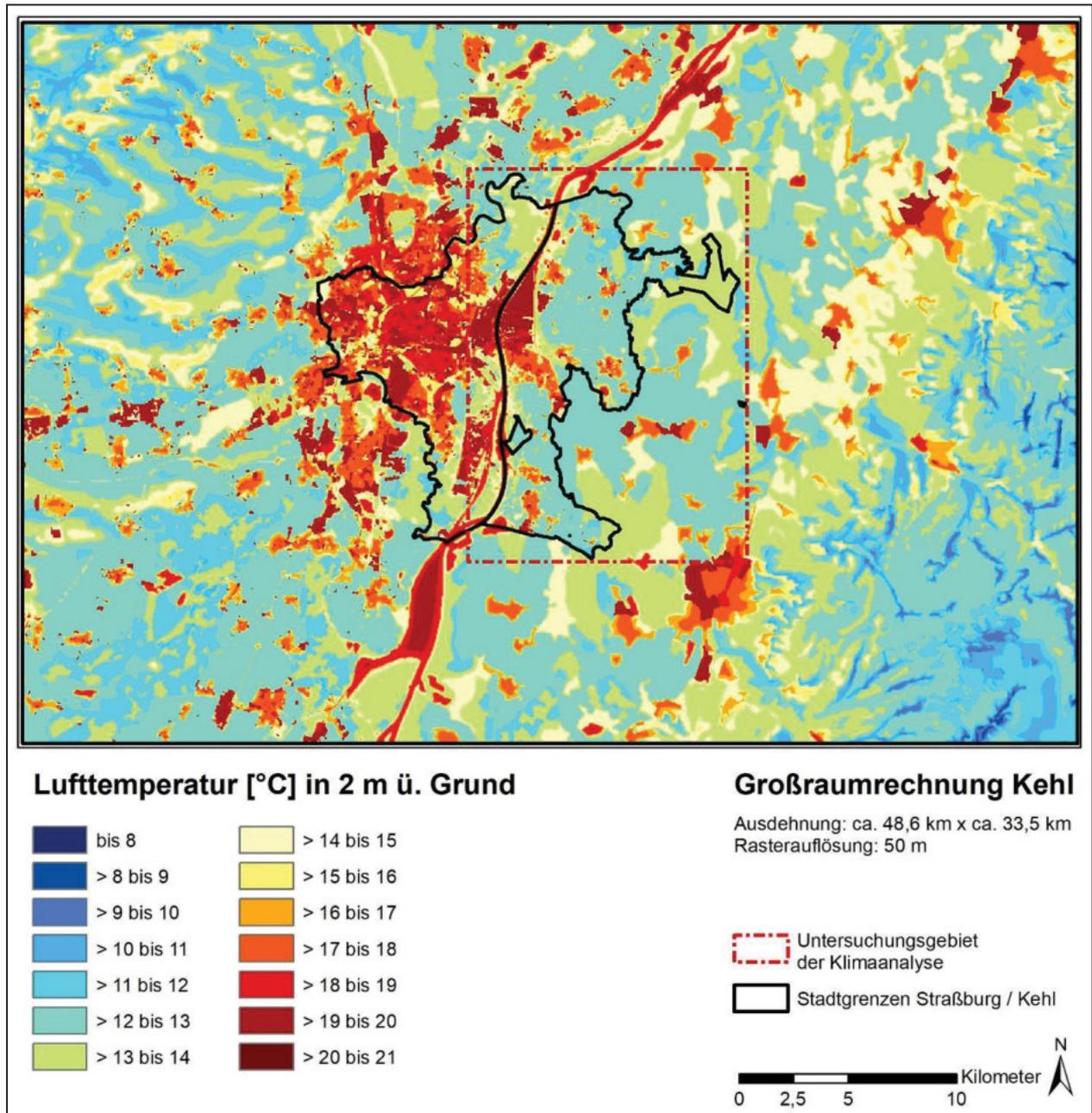


Abb. 16: Großräumige Modellrechnung: Lufttemperatur um 4 Uhr nachts – ein Vergleich zwischen Straßburg und Kehl

Die Kehler Großraumrechnung ermöglichte zudem einen ersten Temperaturvergleich<sup>11</sup> zwischen der Stadt Kehl und der angrenzenden Stadt Straßburg (Abb. 16). Es ist zu erkennen, dass die Maximaltemperaturen in Kehl ähnlich hoch ausfallen wie in Straßburg. Da in Kehl jedoch Grünstrukturen dominieren, dehnt sich die nächtliche Wärmeinsel (in rot – braun dargestellt) nicht so stark aus wie in Straßburg.

<sup>10</sup> zumal die Hangabwinde am Südostrand des kleinen Untersuchungsgebiets aufgrund des Reliefs auch ohne Strömungsantrieb hervorgerufen werden

<sup>11</sup> Aufgrund der groben Rasterauflösung von 50 m kann die Temperaturverteilung innerhalb der Städte jedoch nicht so präzise erfasst werden.

## 4. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü.Gr. und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Wärmebelastung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. In diesem Kapitel werden sowohl die heutige Situation als auch die nahe Zukunft (Periode 2021-2050) betrachtet. Im Zukunftsszenario werden sowohl eine geänderte Landnutzung (vgl. Kap. 3.4) als auch eine höhere Ausgangstemperatur infolge des Klimawandels (vgl. Kap. 2.2) angenommen. Der zusätzliche Temperaturanstieg in der Simulation der nahen Zukunft beträgt 1,35 K. Dies entspricht der mittleren Temperaturdifferenz in den Sommermonaten Juni, Juli und August zwischen der nahen Zukunft und der Referenzperiode im RCP-Szenario 4.5.

### 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 Kehl mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von etwa 11,8 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp 21 °C im Stadtkern eine Spannweite von 9,2 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,5 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den in der Theorie angenommenen Wärmeinseleffekt (Kap. 2.1), erlaubt darüber hinaus jedoch eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. Im Zentrum von Kehl 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. 17). Mit steigender Entfernung zum Zentrum und den größeren Gewerbeflächen nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Randbereichen liegt die Temperatur je nach Bebauungstyp bei durchschnittlich 18 °C (Zeilenbebauung, z.B. in der Niederreichstraße) bzw. 17,2 °C (Einzel- und Reihenhausbebauung, z.B. Kronenhof).

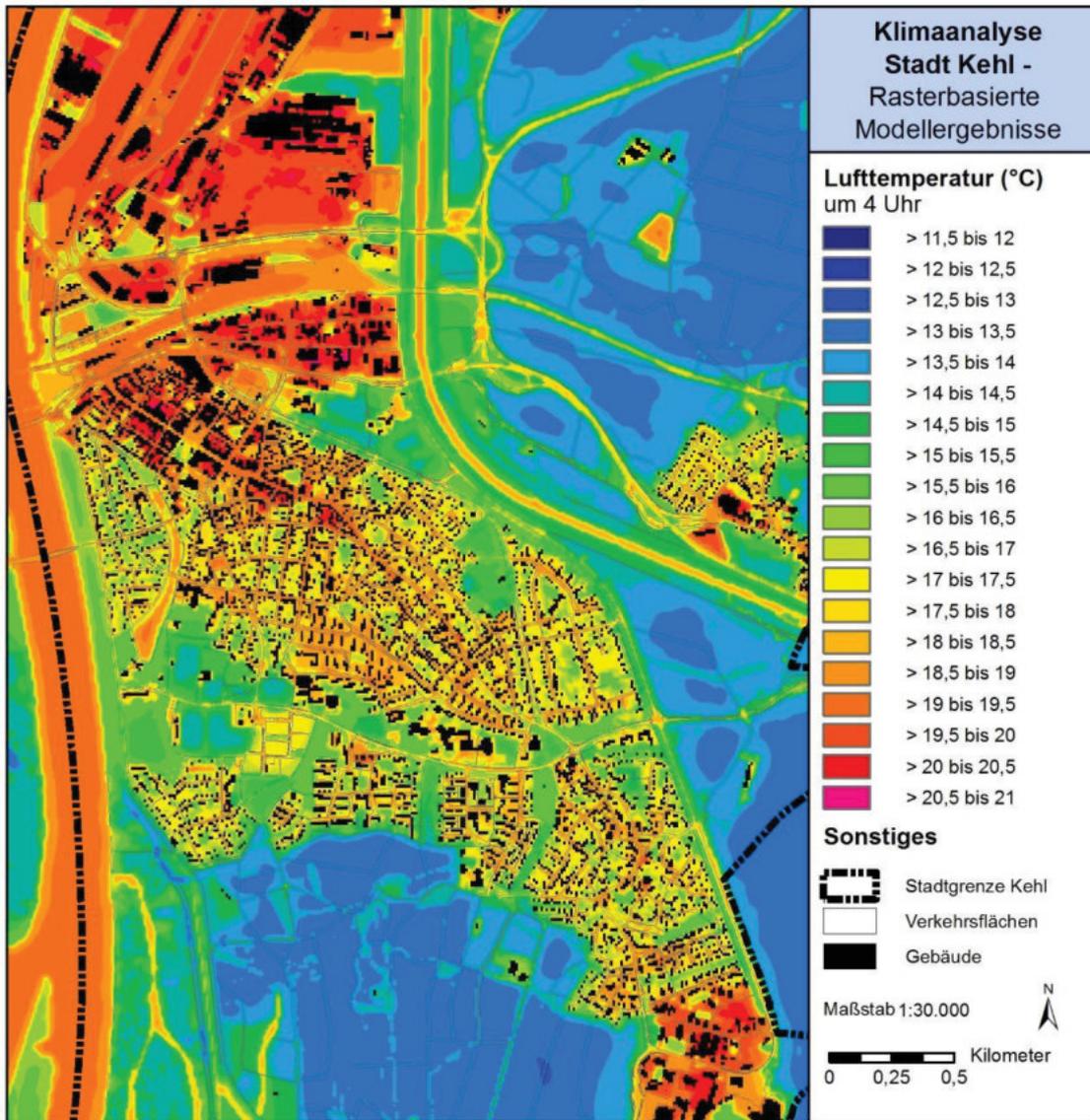


Abb. 17: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets

Die Ortslagen wie bspw. Kork, Auenheim, Goldscheuer und Marlen weisen mit ihrer Zeilen- und Einzelhausbebauung ebenfalls eine geringe Bebauungsdichte auf, sodass auch dort mit ca. 17 - 18 °C spürbar niedrigere Temperaturen als im Zentrum auftreten. Höhere Werte von über 19 °C werden im Bereich von peripheren Gewerbeflächen, z.B. in Marlen (Eckartsweierer Straße) und Goldscheuer-Süd erreicht. In den Wohngebieten sind die geringsten Temperaturen u.a. in Kronenhof, westlich des Rhein-Altarms, in Kittersburg und in Auenheim-West zu finden, wo kaum noch Temperaturen über 18 °C auftreten.

Die weitläufigen Freiflächen von Kehl mit durchschnittlich unter 13,2 °C weisen ein deutliches Temperaturgefälle zum Siedlungsraum auf und stellen damit wichtige siedlungsnahe Ausgleichsflächen dar. Von hoher Bedeutung sind zudem in das Stadtgebiet hineinreichende Grünzüge wie zum Beispiel der Friedhof Kehl, der Ehrenfriedhof Kehl mit seinen umliegenden Grün- und Freiflächen, die Sportplätze nördlich von Kronenhof, der Grünstreifen zwischen dem Dr.-Rosenthal-Weg und der René-Schickele-Straße sowie der Riedgraben. Die Kühlwirkung dieser Grünzüge kann auf die umliegende Bebauung ausstrahlen, sodass diese von der klimatischen Wirksamkeit profitieren.

Verglichen mit den umliegenden Freiräumen weisen innerstädtische Grünflächen jedoch mit ca. 14 - 16 °C ein höheres Wertespektrum als die entlegenen Ackerflächen auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 15 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Riedgraben), auch ist die Kühlleistung anthropogen geprägter Brachflächen eingeschränkt (z.B. Freifläche in der Vogesenallee zwischen den beiden Kreisverkehren). 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 die Sportplätze in der Schwimmbadstraße (z.B. Rheinstadion, KT-Platz).

In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü.Gr. meist Werte um 14 - 15 °C erreicht werden (z.B. Korker 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<sup>12</sup> 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 auf den Kehler Gewässern, u.a. dem Rhein, der Kinzig und dem Baggersee Kork zu erkennen.

Aufgrund des Klimawandels ist in naher Zukunft (2021-2050) mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von durchschnittlich 1,35 K gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) zu rechnen (RCP-Szenario 4.5, Abb. 18). Die nachstehende Abbildung zeigt, dass sich diese Temperaturerhöhung nicht gleichmäßig über das Kehler Stadtgebiet verteilt. Mit dem Klimawandel erwärmen sich tendenziell die Kehler Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen stärker als die Grün- und Freiflächen, d.h. die Wärmebelastung im bebauten Gebiet nimmt überproportional zu. Gleichzeitig haben die neu erschlossenen Wohn- und Gewerbeflächen einen Einfluss auf das Kehler Stadtklima. Im Bereich der Entwicklungsflächen, wo Freiflächen in bebaute Flächen umgewandelt werden, nimmt die Temperatur am stärksten – und zwar bis zu 8,1 °C auf der Gewerbefläche Hummelsmatt / Wittengut / Teufelsort – gegenüber der heutigen Ist-Situation zu. Bei den zukünftig neu zu erschließenden Gewerbestandorten ist von einer Temperaturzunahme von mindestens 5 °C auszugehen. Bei den in Zukunft erschlossenen Wohngebieten beträgt die Änderung in etwa 2 bis 5 °C. Diese starke Änderung erklärt sich zum einen damit, dass die (noch) un bebauten Freiflächen derzeit bereits relativ kühl sind und durch eine Versiegelung deutlich wärmer werden. Zum anderen kommt die Wirkung des Klimawandels noch hinzu, sodass sich insbesondere auf den Entwicklungsflächen deutlich spürbare Änderungen ergeben. Auch das nähere Umfeld der Entwicklungsflächen sowie die Innenstadt sind von einer stärkeren Temperaturzunahme von bis zu 2 °C betroffen. Andere Gebiete zeigen hingegen auch mit dem Klimawandel keine spürbare Änderung auf (z.B. Kronenhof-Süd und -West).

---

<sup>12</sup> Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

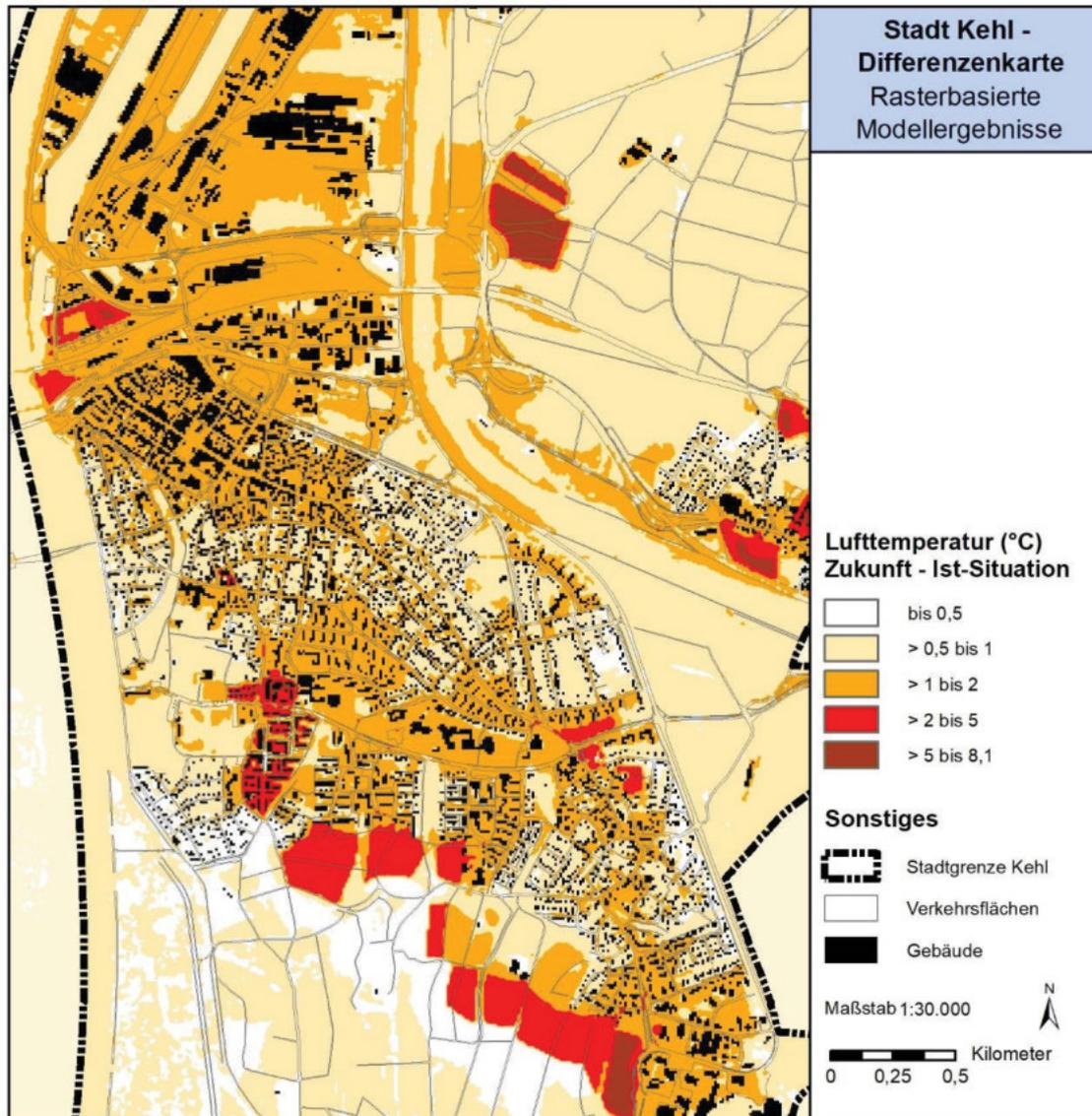


Abb. 18: Nächtliche Temperaturänderung in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050 minus heutige Situation)

#### 4.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aero-dynamischen 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 (Schichthö-

he) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 19).

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.

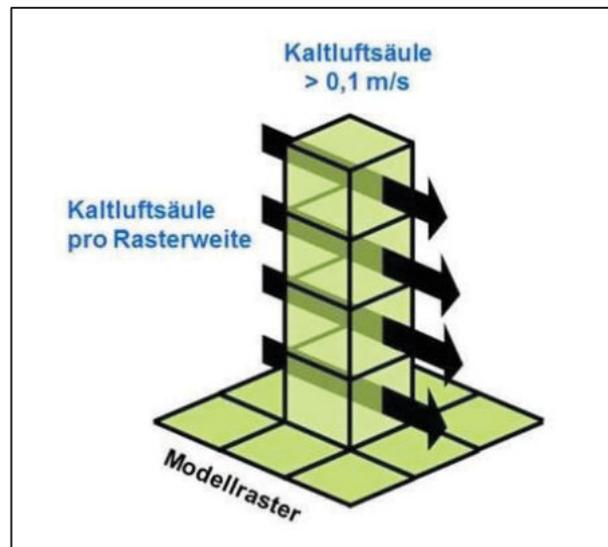


Abb. 19: Prinzipische Skizze Kaltluftvolumenstrom

### ERGEBNISSE

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt innerhalb von Kehl eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten über  $30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ . Der Mittelwert im Kehler Stadtgebiet liegt bei  $5,2 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ . Im Fokus der Untersuchung steht die Funktion des Kaltlufthaushalts für das Kehler Stadtgebiet. Hervorzuheben ist das Kinzigtal, entlang dessen flächenhaft Kaltluft in Richtung der nördlichen Kernstadt abfließt (Abb. 20). Die Grünflächen entlang der Kinzigallee (z.B. Ehrenfriedhof) unterstützen den Transport von Kaltluft in die innerstädtischen Bereiche. Die Belüftung der südlichen Kernstadt erfolgt vorrangig über die Sportplätze der Schwimmbadstraße, der Ackerfläche an der Bärmattstraße/Iringheimer Straße sowie dem Grünstreifen zwischen dem Dr.-Rosenthal-Weg und der René-Schickele-Straße. Außerdem kann über den Altarm des Rheins verhältnismäßig viel Umgebungsluft<sup>13</sup> in innenstadtnahe Bereiche transportiert werden, sodass selbst auf dem Marktplatz noch hohe bis sehr hohe Volumenströme auftreten. Ansonsten nimmt tendenziell in Richtung Stadtkern der Kaltluftvolu-

<sup>13</sup> Die Luft über Gewässern ist jedoch wärmer als über Grün- und Freiflächen, sodass letztere potenziell kühlere Luft in die Stadt hineinbringen können als der Altarm des Rheins.

menstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung ab, noch geringere Werte sind im Südosten der Kernstadt um die Sternenstraße und auf einigen Gewerbeflächen nördlich der Innenstadt zu verzeichnen.

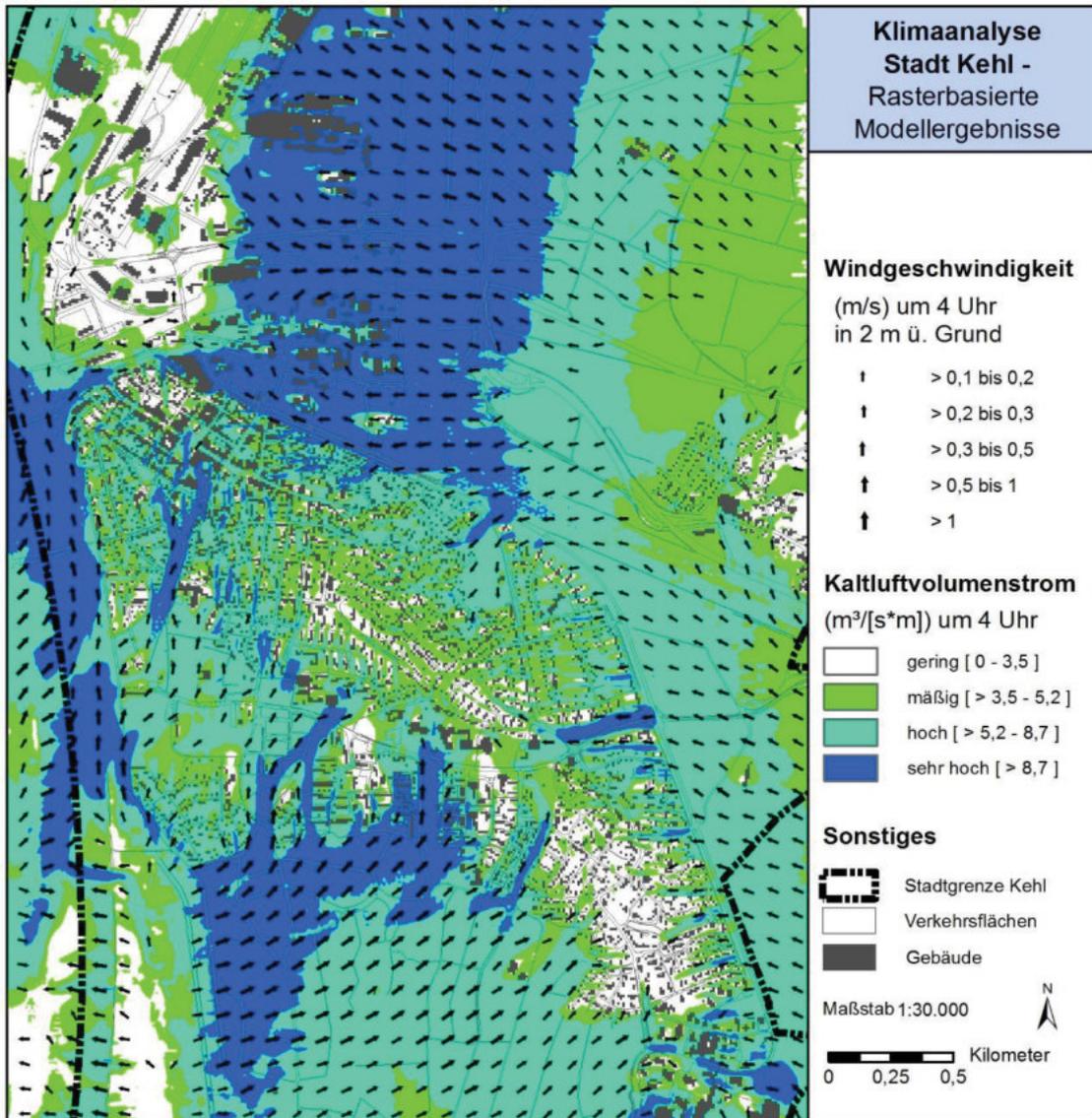


Abb. 20: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (heutige Situation)

Weitere für das Kaltluftprozessgeschehen wichtige Flächen sind die von Ortslagen umgebenden Acker- und Freiflächen, über die überdurchschnittlich viel Kaltluft abfließt (z.B. nördlich und östlich von Bodersweier und Auenheim, südöstlich von Leutesheim, Zierolshofen und Hohnhurst). Diese sorgen für eine wirksame Durchlüftung großer Bereiche der jeweiligen Ortslagen.

Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen. So werden über dem Kronendach vom Grünen Wald von Bodersweier große Mengen an Kaltluft produziert, die über die umliegenden Freiflächen in Richtung der Ortsteile Bodersweier und Leutesheim abfließen.

Neben dem Kaltluftvolumenstrom zeigt die Abb. 20 flächenhaft die Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung (Pfeilsignatur<sup>14</sup>) 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 Kehler Stadtgebiet sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 1,14 m/s im Bereich der genannten Ausgleichsräume vorzufinden (u.a. Grünstreifen Dr.-Rosenthal-Weg/René-Schickele-Straße, Ackerfläche Bärmattestraße / Iringheimer Straße, Ackerflächen um den Grünen Wald Bodersweier). In 2 m ü.Gr. tritt allerdings die Hinderniswirkung von Gebäuden stärker hervor, so dass einige Bereiche des Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren.

Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch Gewässerflächen und der Verkehrsraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei jedoch lediglich um schadstoffunbelastete Frischluft, und nicht um Kaltluft. Weiterhin können größere Grünflächen zumindest lokal für Entlastung sorgen, etwa im Nahbereich des Friedhofs Kehl, dessen angrenzende Bebauung von seiner Kaltluftproduktion und -strömung 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. Ebenso treten auf manchen Ackerflächen, wie z.B. nordwestlich von Neumühl, nur geringe bis gar keine Strömungen auf; dies liegt u.a. an den geringen Temperatur- und Höhenunterschieden in den entsprechenden Bereichen. Derartige Flächen werden bei austauscharmen Wetterlagen trotz ihrer hindernisarmen Strukturen nicht spürbar, d.h. mit Windgeschwindigkeiten unter 0,1 m / s, durchströmt.

Die Kaltluftdynamik in der nahen Zukunft verändert sich im Zuge des Klimawandels nur geringfügig gegenüber der heutigen Situation (Abb. 21). Lokale Änderungen im Kaltluftströmungsfeld ergeben sich vorrangig im Umfeld der Entwicklungsflächen, da neu errichtete Gebäude als Strömungshindernisse fungieren und damit die Winde abbremsen bzw. umlenken. So nehmen Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit mit der Realisierung der Entwicklungsfläche Schneeflären im B-Plan-Gebiet deutlich ab, wogegen die Kaltluftströmung am westlichen und östlichen Rand des Gebietes infolge der Strömungsumlenkung verstärkt wird. Einem ähnlichen Beispiel folgen die Entwicklungsflächen im Bereich der Vogesenallee (REWE – Städt. Wohnungsbau, Kindergarten und Martin-Luther-Areal).

Im Zuge der Landnutzungsänderung (also der Umwandlung einer Freifläche in eine bebaute, versiegelte Fläche) nimmt außerdem die Temperatur auf den Entwicklungsflächen zu (vgl. Ende von Kap 4.1), was zu veränderten, thermisch-induzierten Flurwinden führt. So nehmen beispielsweise Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit rund um die Entwicklungsflächen Hummelmatt / Wittengut / Teufelsort in Kork signifikant zu, da diese aufgrund ihres zunehmenden Versiegelungsgrades deutlich wärmer sind als die umliegenden Frei- und Ackerflächen und sich damit stärkere thermische Flurwinde ausprägen. Ein ähnlicher Effekt tritt u.a. auf den geplanten Gewerbeflächen Stockfeld III und zw. Kieswerk und Basic in Goldscheuer auf.

---

<sup>14</sup> Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung (100 m) abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

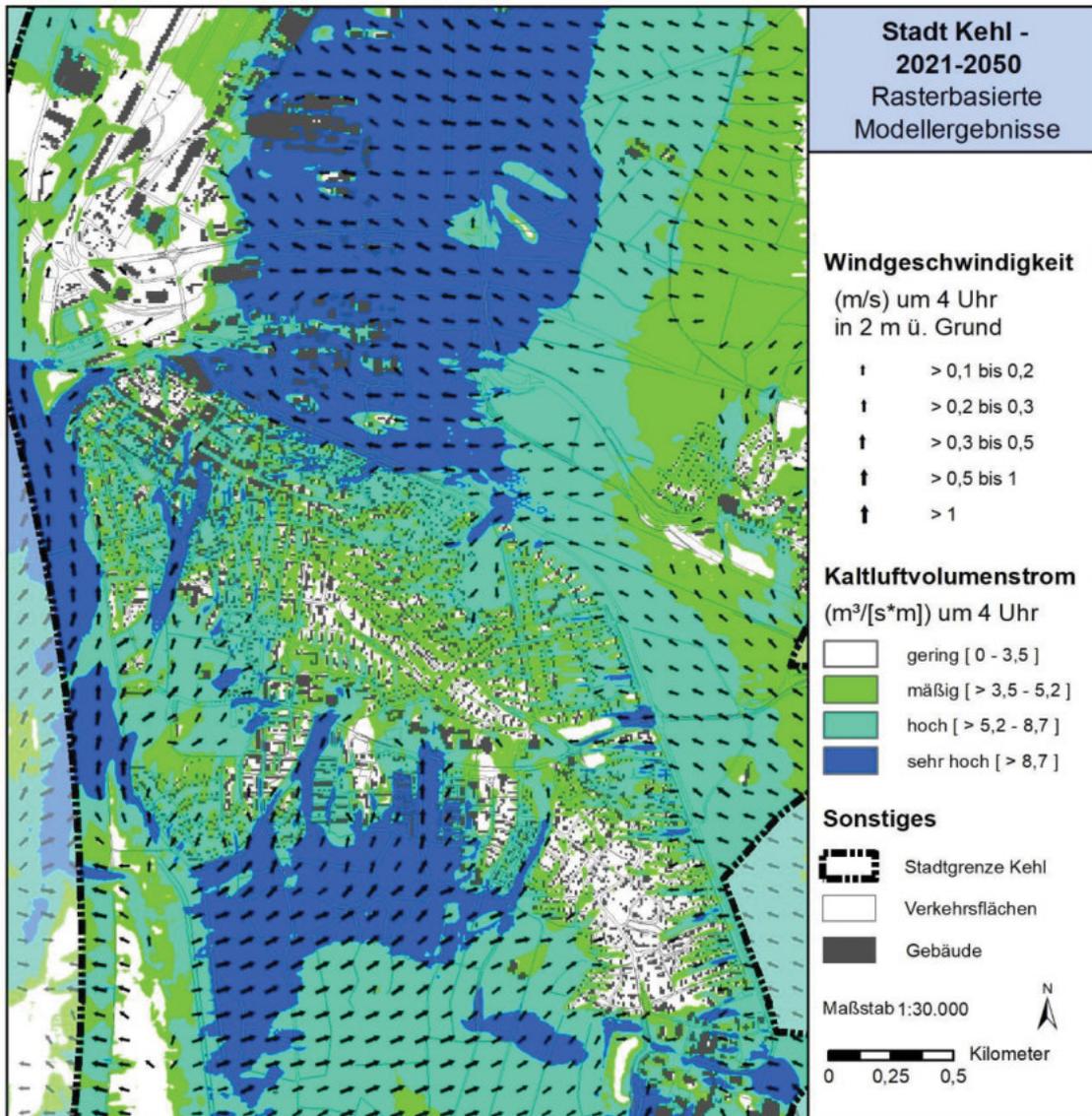


Abb. 21: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom sowie Windgeschwindigkeit in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050)

### 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 seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen<sup>15</sup>.

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<sup>16</sup>. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt,

<sup>15</sup> Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m<sup>2</sup> Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

<sup>16</sup> Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. 2).

Tab. 2: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004)

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

**ERGEBNISSE**

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf (Abb. 22). Die geringsten Werte mit einer PET von 18,5 °C sind in Wäldern (z.B. Korker Wald) zu finden. Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü.Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt). Flächenhaft heben sich zudem Gewässerflächen mit PET-Werten von meist unter 29 °C ab (*keine bis schwache Wärmebelastung*). Gewässer wie z.B. der Rhein, die Kinzig und der Baggersee Kork entfalten tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung.

Alle weiteren Flächen weisen meist 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 Grünareale wie Auen-Bereiche (Uferzone des Rheins und der Kinzig), Friedhöfe (der Friedhof und Ehrenfriedhof Kehl) oder das Freibad Kehl mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar. Ebenso ist der Marktplatz (südliche Hälfte) mit seinem großen Baumbestand ein wichtiger, Schatten spendender Ausgleichsraum. Trotz zentraler Lage und hohem Versiegelungsgrad erreicht der Marktplatz mit PET-Werten von 27 bis 32 °C im Bereich der Baumstandorte ausgesprochen niedrige Werte. Hervorzuheben sind außerdem Alleen und Straßenräume mit großkronigen Bäumen, wie etwa

die Kinzigallee, die Schutterstraße sowie die Daimlerstraße. Derartige Straßenräume zeigen im Vergleich zu weniger begrünten Straßenabschnitten tagsüber eine deutlich geringere Wärmebelastung auf.

Die Ergebnisse sind mit gewissen Einschränkungen behaftet, da Gebäude und Bäume in der Modellierung lediglich in einer Auflösung von 10 m repräsentiert sind. Doch auch kleine Strukturen beeinflussen mit ihrer Verschattung wesentlich die PET, können jedoch nicht vollständig im Modell erfasst werden. So wird die PET beispielsweise in der Ehrmannstraße tendenziell überschätzt, da die dort befindlichen Bäume mit eher geringem Kronendurchmesser (in der Regel 4-5 m) nicht im Eingangsdatensatz der Landnutzung berücksichtigt wurden.

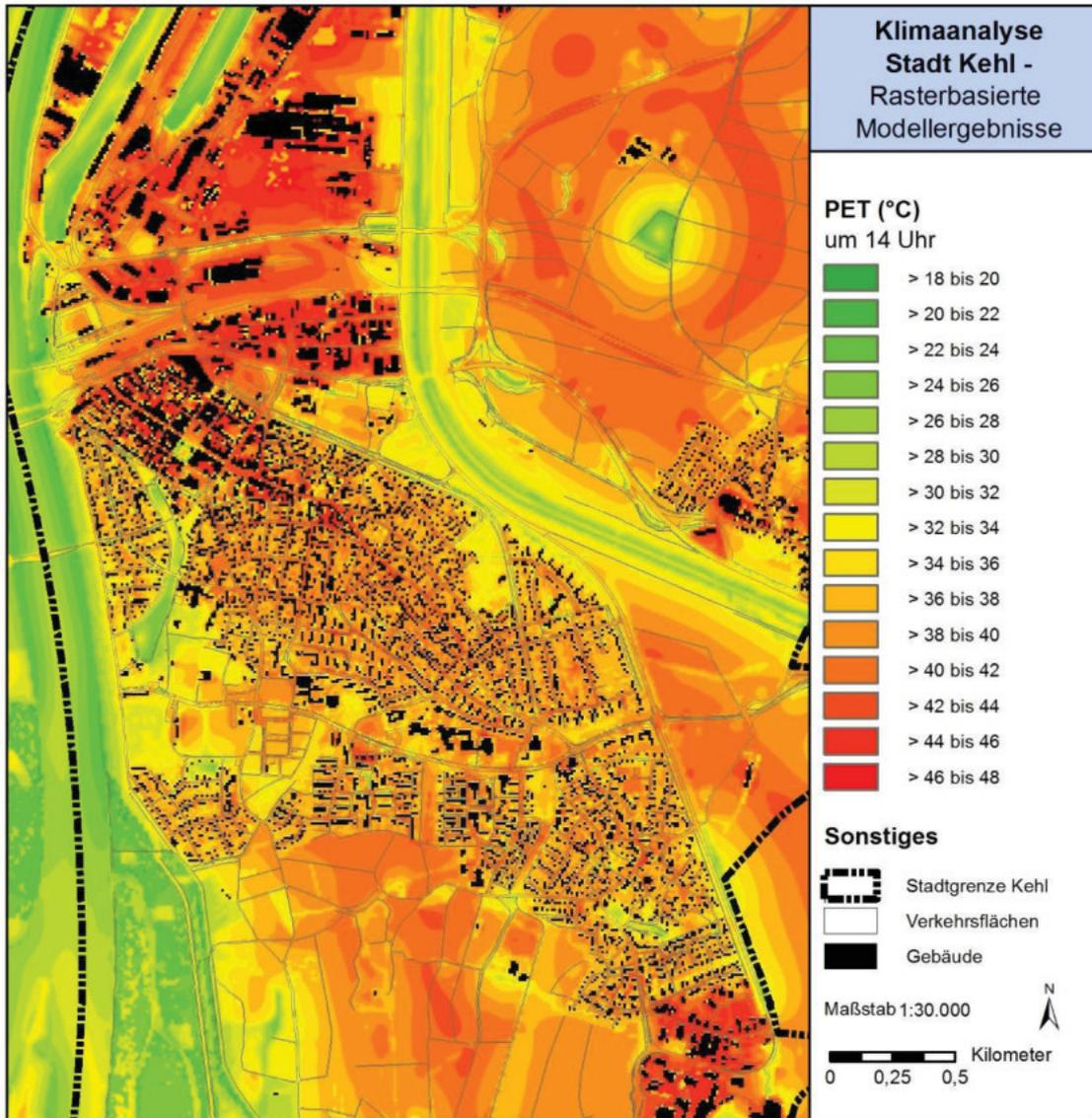


Abb. 22: PET am Tag in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets

Analog zur Lufttemperatur (vgl. Ende von Kap 4.1) nimmt die PET am Tag in der nahen Zukunft nicht gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt zu (Abb. 23). Die Veränderung der PET gegenüber der heutigen Situation reicht von -10,6 °C bis 12,2 °C und hat damit eine Spannweite von 22,8 °C.

Wie zu erwarten, hat auch bei der PET die Landnutzungsänderung einen größeren Einfluss als der Klimawandel. Die Änderungsraten sind sowohl negativ (blau; PET-Abnahme gegenüber der heutigen Situation) als auch positiv (orange – braun; PET-Zunahme gegenüber der heutigen Situation). Aufgrund der steigenden Lufttemperaturen und der Zunahme des Versiegelungsgrades auf den Entwicklungsflächen

erhöht sich die PET in den meisten Gebieten gegenüber der heutigen Situation. Jedoch bewirken zusätzliche Verschattungen durch Bäume (z.B. Straßenbäume in Schneeflären) oder durch Gebäude (z.B. Kaserne in der Hafensstraße) auch eine Reduktion der PET und damit eine verbesserte bioklimatische Situation am Tag.

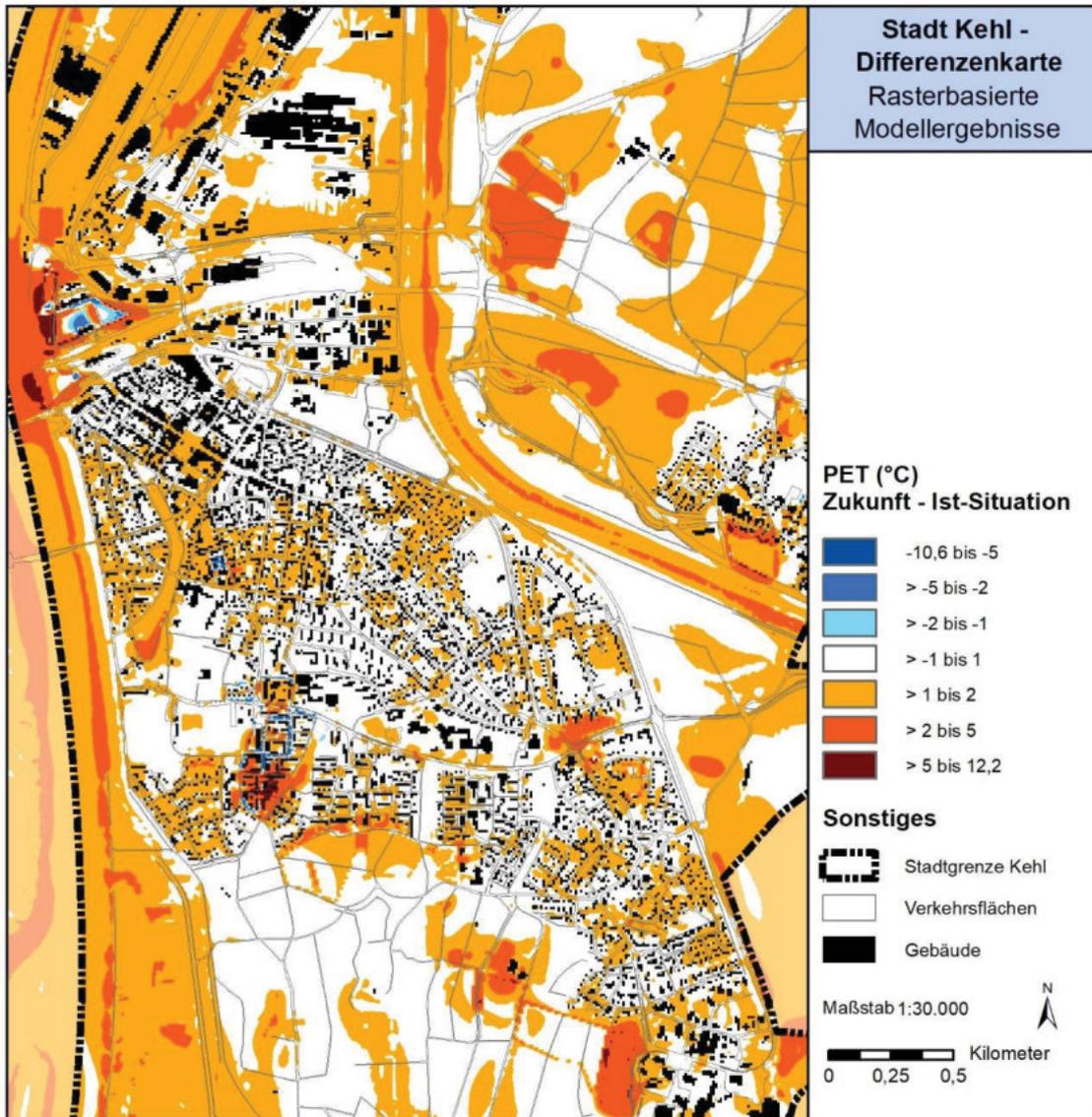


Abb. 23: Änderung der PET am Tag in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050 minus heutige Situation)

## 5. Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte der Nachtsituation 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. Die Klimaanalysekarte der Tagsituation bildet die Wärmebelastung am Tag um 14:00 Uhr ab. Insgesamt ergeben sich für die Stadt Kehl vier Klimaanalysekarten (Ist-Situation und nahe Zukunft getrennt nach Tag / Nacht), in welchen das Prozessgeschehen zusammengefasst wird. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefere Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu.

### 5.1 NACHTSITUATION

#### 5.1.1 BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu den Grünflächen im gesamten Stadtgebiet, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 13,9 °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 Kehler Stadtgebiet bei rund 18 °C. Knapp ein Fünftel der bebauten Flächen zeigt eine, im Untersuchungsgebiet als vergleichsweise gering einzuschätzende, Überwärmung bis 3 °C<sup>17</sup>. Mit 52,5 % weist mehr als die Hälfte des Siedlungsraums eine Überwärmung > 3 bis 5 °C auf, in ca. 27,8 % 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 Reihenhausbauung sowie die Stadtrandbereiche bzw. Ortslagen tendenziell durch eine geringere Überwärmung geprägt sind (Abb. 24 bzw. im Anhang). Der stärkste Wärmeinseleffekt mit über 6 °C tritt vorrangig im Stadtkern und der dort meist dichten Bebauung auf. Ähnlich hohe Werte finden sich in den großflächigen Gewerbegebieten (insbesondere nördlich der Innenstadt), aufgrund der starken Versiegelung selbst dann, wenn sie außerhalb des Stadtkerns liegen.

#### 5.1.2 KALTUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet die bodennahe Strömung der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Be-

---

<sup>17</sup> 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).

bauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom  $> 5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens  $0,2 \text{ m/s}$  erreichen. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche oder Straße als Kaltlufteinwirkungsbereich ausgewiesen.

Innerhalb des Kehler Stadtgebiets stellt mit  $48,7 \%$  knapp die Hälfte der Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen einen Kaltlufteinwirkungsbereich dar. Dabei fällt auf, dass neben kleineren Siedlungsgebieten in den Randbereichen (z.B. Sölling-Viertel, Kronenhof), auch große Teile des Zentrums und die nördlich davon gelegenen Gewerbeflächen als Kaltlufteinwirkungsbereich gelten. Dass dort gleichzeitig die höchste Überwärmung auftritt, ist kein Widerspruch, sondern verdeutlicht vielmehr die wichtige Ausgleichsfunktion des Kinzig- und Rhein-Tales inkl. Altarm – ohne deren Belüftungsfunktion würde ein noch stärkerer Wärmeinseleffekt auftreten. In Marlen, Goldscheuer und Kittersburg liegt mit Ausnahme der Randbereiche dagegen fast kein Kaltlufteinwirkungsbereich vor, obwohl die dort vorherrschende Einzel- und Reihenhausbauung nur eine geringe Hinderniswirkung für die Strömung darstellt. Aufgrund der geringen Überwärmung (und den räumlichen Gegebenheiten wie bspw. dem Relief) bilden sich dort vergleichsweise weniger mächtige Kaltluftvolumenströme aus<sup>18</sup>, die unter dem stadtweiten Mittelwert von etwa  $5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  liegen.

### 5.1.3 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 klimatologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von  $0,1 \text{ m/s}$  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.

Besonders wichtige Funktionen als Kaltluftleitbahnen übernehmen in Kehl der Grünstreifen Dr.-Rosenthal-Weg / René-Schickele-Straße und das nördliche Kinzig-Tal (Mündungsbereich zum Rhein), welche Kaltluft bis in das thermisch belastete Siedlungsgebiet tragen. Die beiden Kaltluftleitbahnen weisen eine Mindestbreite von  $50 \text{ m}$  auf (Mayer et al. 1994) und sind durch einen sehr hohen Kaltluftvolumenstrom ( $\geq 10 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ) charakterisiert.

---

<sup>18</sup> Der Kaltluftvolumenstrom betrachtet nicht nur die bodennahe Strömung, sondern auch die Höhe der Kaltluftschicht.

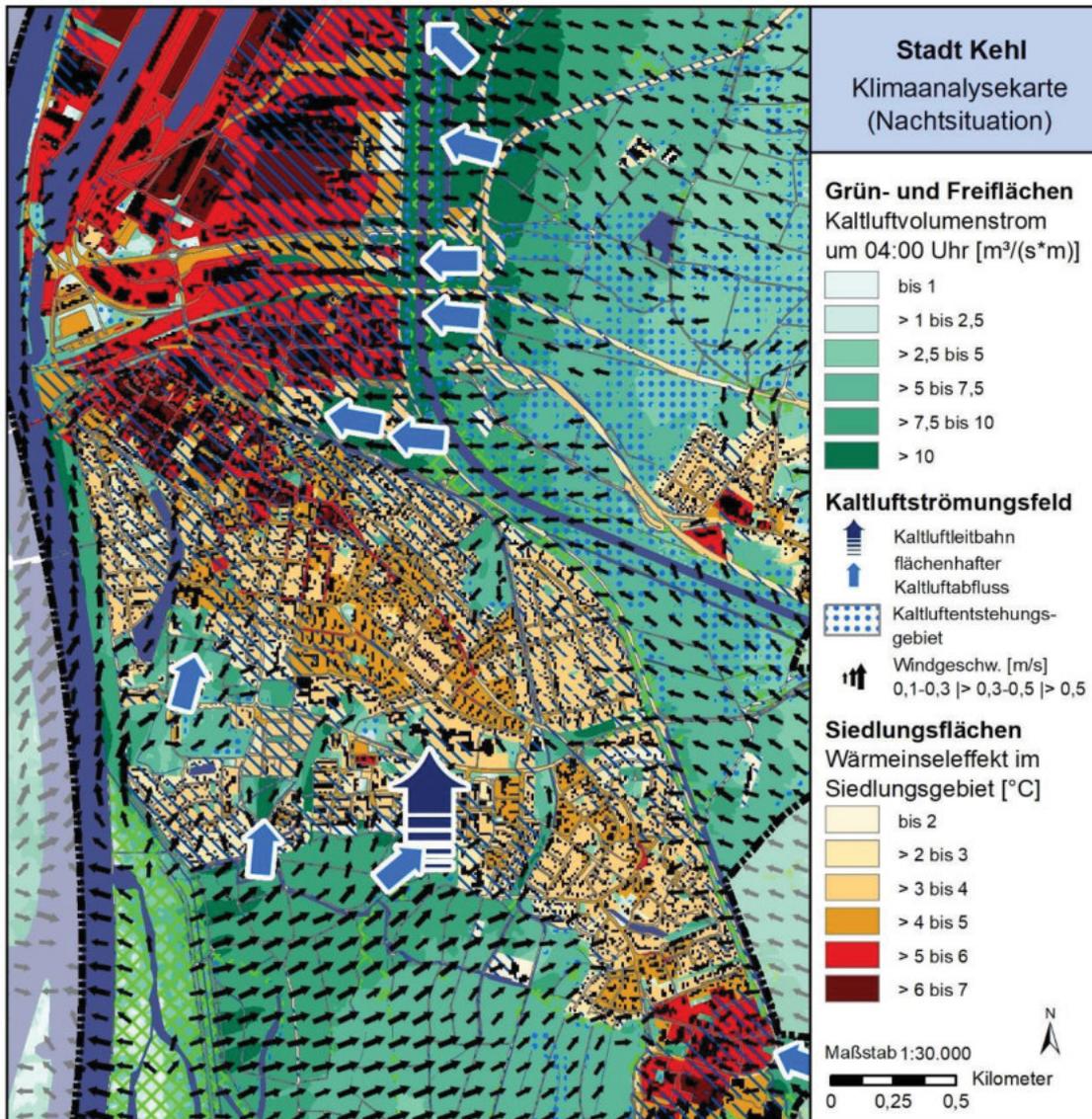


Abb. 24: Klimaanalysekarte (Nacht) in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (heutige Situation)

Von hoher Bedeutung für das Kehler Stadtklima ist außerdem die Kinzig-Aue (einschließlich der Grünflächen entlang der Kinzigallee) als flächenhaft durchlüfteter Grünraum mit Siedlungsbezug. Sie weist zwar keine klassische Leitbahnstruktur<sup>19</sup> auf, verhindert mit ihren **flächenhaften Kaltluftabflüssen** jedoch die Ausbildung eines noch stärkeren Wärmeinseleffekts. Weiterhin dienen die Sportplätze im Bereich der Schwimmbadstraße sowie die Ackerfläche an der Bärmattstraße / Iringheimer Straße als wichtige Grünflächen zur Belüftung der Kernstadt. Weitere für das Kaltluftprozessgeschehen wichtige Flächen sind die von Ortslagen umgebenden Acker- und Freiflächen, über die flächenhaft Kaltluft abfließt (z.B. nördlich und östlich von Bodersweier und Auenheim, südöstlich von Leutesheim, Zierolshofen und Hohnhurst).

Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf ihr näheres Umfeld haben. Diesbezüglich ist der Friedhof Kehl hervorzuheben, dessen kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Friedhöfen wirken oftmals auch Kleingärten (z.B. Gartenfreunde Kehl-Sundheim e.V.) oder Parks aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

<sup>19</sup> Leitbahnstrukturen haben eine linienhafte (statt eine flächenhafte, in der Breite unbegrenzte) Ausprägung.

**Kaltluftentstehungsgebiete** kennzeichnen Grünflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate, die die verschiedenen Kaltluftleitströmungen speisen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftströmung) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mindestens  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  Kaltluft produzieren.

#### 5.1.4 ZUKÜNFTIGE SITUATION (2021-2050)

In der nahen Zukunft erwärmen sich die Kehler Grünflächen zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts im Schnitt um  $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$  und weisen damit eine mittlere Temperatur von  $14,3 \text{ }^\circ\text{C}$  auf. Ausgehend von diesem Bezugswert wurde der zukünftige Wärmeineffekt<sup>20</sup> auf den Siedlungsflächen neu berechnet. Mit dem Klimawandel erwärmen sich die Kehler Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen überproportional gegenüber den Grün- und Freiflächen (vgl. Kap. 4.1), was sich in einem höheren maximalen Wärmeineffekt von bis zu  $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$  niederschlägt (Abb. 25 bzw. im Anhang). Die mittlere nächtliche Lufttemperatur auf den Siedlungs- und Gewerbeflächen nimmt um  $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$  (von  $18$  auf  $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und auf den Verkehrsflächen um  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  (von  $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) gegenüber der heutigen Situation zu. Das Kaltluftprozessgeschehen bleibt auch mit dem Klimawandel und der Realisierung der Entwicklungsflächen weitestgehend erhalten.

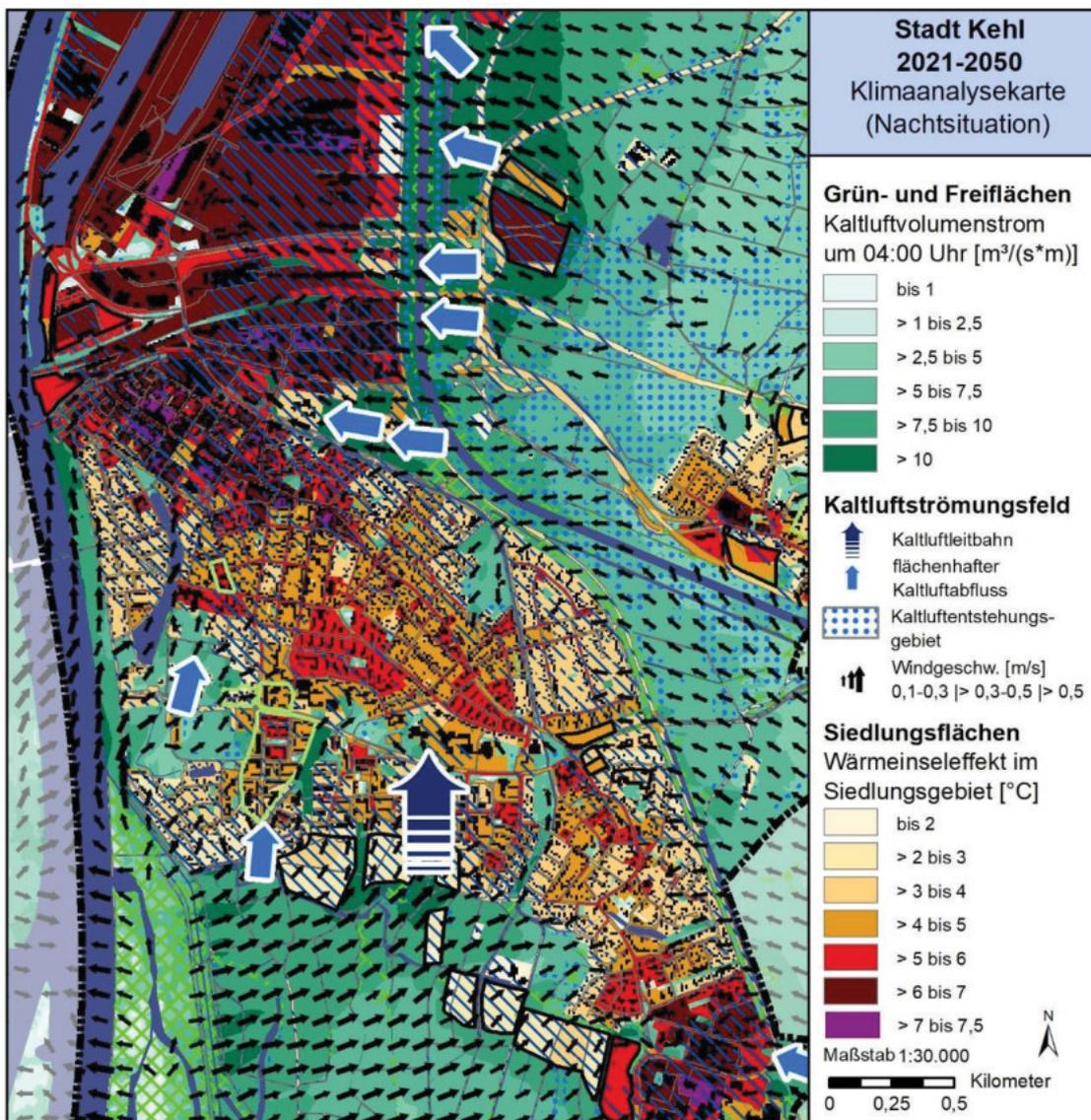


Abb. 25: Klimaanalysekarte (Nacht) in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050)

<sup>20</sup> Zukünftiger Wärmeineffekt ( $^\circ\text{C}$ ) = Siedlungstemperatur ( $^\circ\text{C}$ ) –  $14,3 \text{ }^\circ\text{C}$

## 5.2 TAGSITUATION

Zur Bestimmung der **Aufenthaltsqualität am Tage** ist die PET, als thermischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung, der maßgebende Parameter (vgl. Kap. 4.3). Die Wärmebelastung wird nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 in physiologische Belastungsstufen eingeteilt (vgl. Tab. 2 auf S. 30). Entsprechend dieser Belastungsstufen wurde für die Klimaanalysekarte der Tagsituation eine Einteilung der Klassen vorgenommen und auf die Kehler Blockflächen gemittelt. Für eine bessere Ausdifferenzierung wurden manche Belastungsstufen in zwei Unterklassen aufgeteilt, so die mäßige Wärmebelastung (helles und dunkles Orange) und die starke Wärmebelastung (rot-braun; Abb. 26 bzw. im Anhang). Die nicht vorhandene bis schwache Wärmebelastung wird in Gelbtönen, die extreme Wärmebelastung in violett dargestellt.

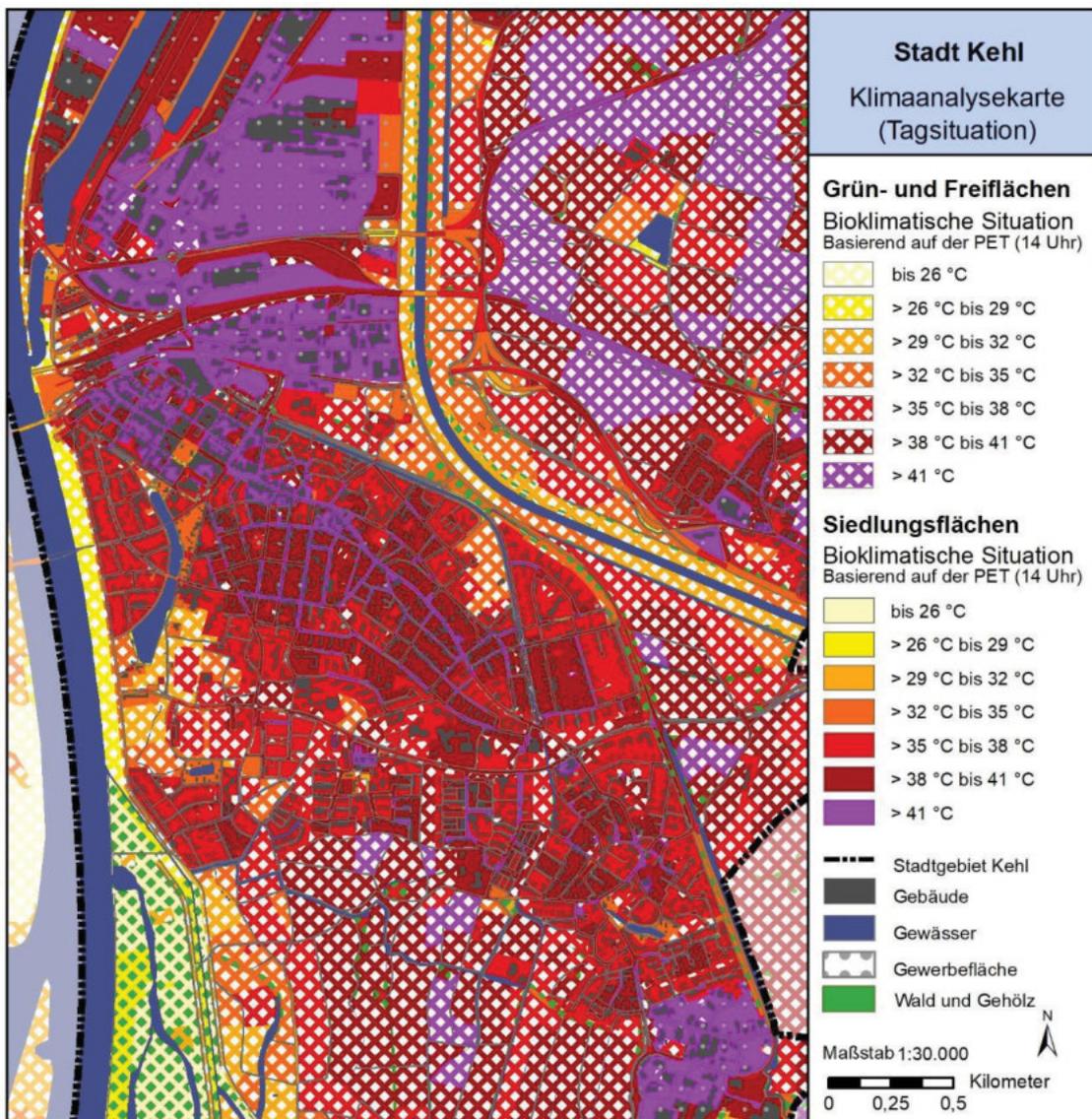


Abb. 26: Klimaanalysekarte (Tag) in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (heutige Situation)

Siedlungsflächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines Strahlungstages tagsüber größtenteils eine *starke*, Gewerbeflächen sogar eine überwiegend *extreme Wärmebelastung* auf, was auf den geringen Grünanteil und den insb. bei Gewerbeflächen meist relativ hohen Versiegelungsgrad zurückzuführen ist. Siedlungsflächen *mäßiger Wärmebelastung* stellen eine Ausnahme dar – dabei handelt es sich um aufgelockerte Flächen mit erhöhtem Grünanteil, die häufig am Siedlungsrand und in der Nähe von Wäldern oder Gewässern liegen.

Versiegelte Plätze und breite Straßen mit geringem Baumanteil sind in der Regel ebenfalls von einer *starken bis extremen Wärmebelastung* betroffen, während es andererseits auch Straßenzüge und Plätze (z.B. südlicher Marktplatz) gibt, die aufgrund der Beschattung durch Bäume, eine nur *mäßige Wärmebelastung* aufweisen.

Bei den Grünflächen ist die geringste Wärmebelastung in Waldgebieten zu finden, die ihrer schatten spendenden Wirkung in Bezug auf das Aufenthaltsniveau des Menschen in 2 m ü. Gr. zugeschrieben werden kann. *Extreme Wärmebelastungen* finden sich zum Teil über den großen Freiflächen im Außenbereich (Ackerflächen). Die übrigen Grünflächen weisen größtenteils eine *mäßige bis starke Wärmebelastung* auf, wobei diese wesentlich über den Anteil an (schatten spendenden) Grünstrukturen gesteuert wird.

Im Zuge der Klimaerwärmung nimmt die Wärmebelastung am Tag in der nahen Zukunft zu und auf den Entwicklungsflächen (hellgrün und schwarz umrandet) ergeben sich teilweise neue Belastungsniveaus (Abb. 27 bzw. im Anhang). Die Entwicklungsflächen mit vorhandenem B-Plan (hellgrün umrandet) haben eine bessere Aussagekraft als die übrigen Entwicklungsflächen, da dort die einzelnen Gebäude und Baumstandorte bereits mitberücksichtigt werden konnten.

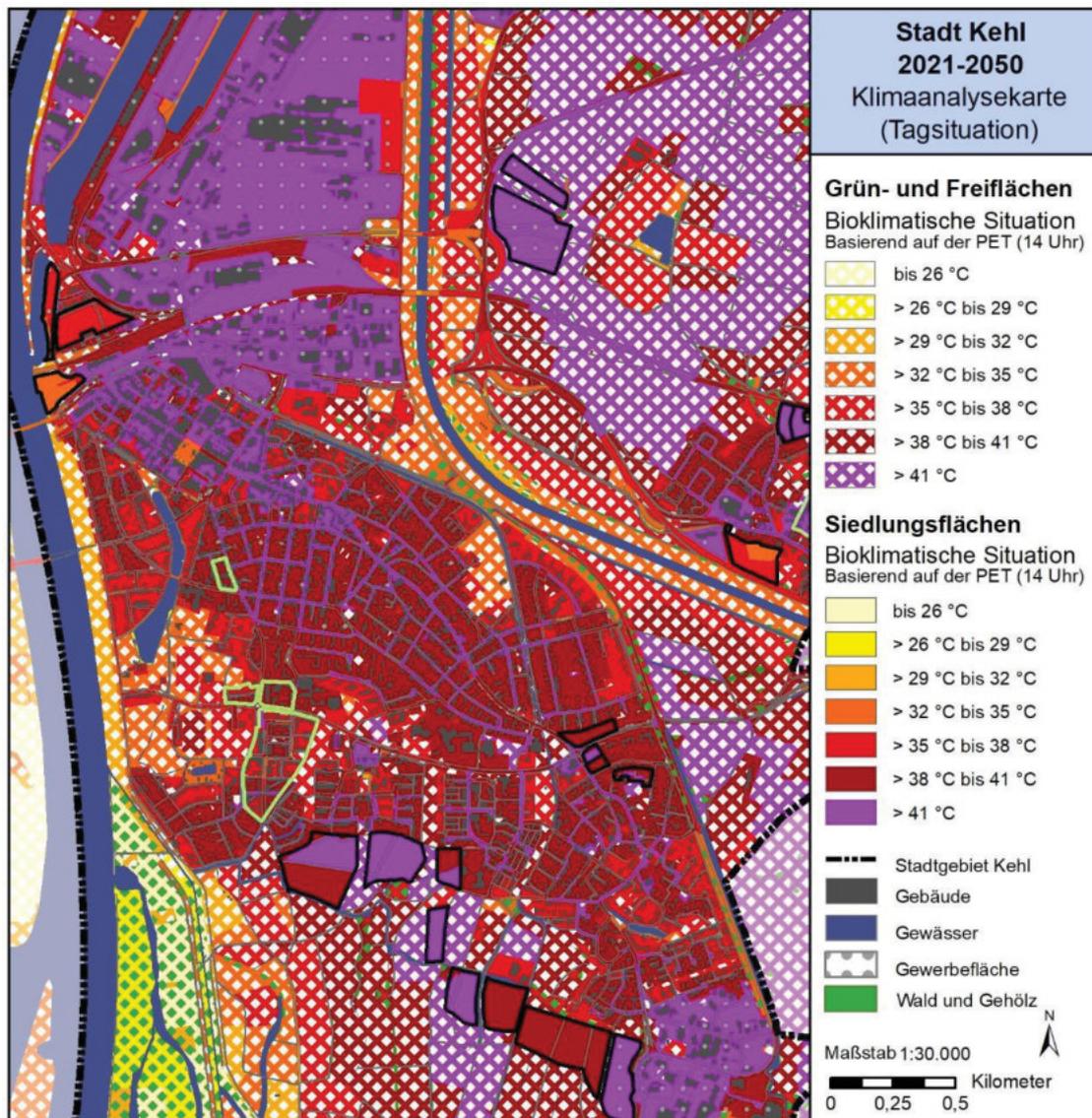


Abb. 27: Klimaanalysekarte (Tag) in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050)

## 6. Planungshinweiskarte Hitze

Im Unterschied zu den Klimaanalysekarten wurde lediglich eine Planungshinweiskarte (PHK) für die Gesamtbetrachtung von Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich nur auf das zukünftige Stadtgebiet Kehls bezieht. 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 Planungshinweiskarte stellt das aus klimafachlicher Sicht gewonnene 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 Wertenniveau 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. 28).

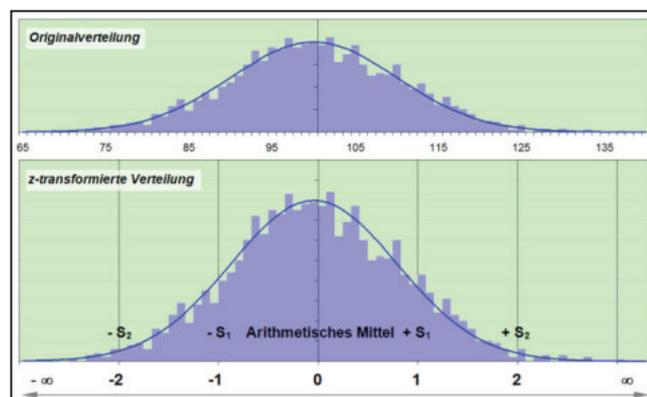


Abb. 28: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

Tab. 3: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Lufttemperatur 4 Uhr [°C] Siedlungsflächen *	Lufttemperatur 4 Uhr [°C] Verkehrsflächen **	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 16,9	bis 16,6	1 = Sehr günstig
> -1 bis 0	> 16,9 bis 18,4	> 16,6 bis 18,3	2 = Günstig
> 0 bis 1	> 18,4 bis 19,8	> 18,3 bis 20	3 = Weniger günstig
> 1	> 19,8	> 20	4= Ungünstig

\* Mittelwert: 18,35 °C, Standardabweichung: 1,46 °C  
 \*\* Mittelwert: 18,29 °C, Standardabweichung: 1,66 °C } Gesamtstatistik aus Ist- und Zukunftsrechnung

## 6.2 BEWERTUNG VON WOHN-, GEWERBE- UND VERKEHRSFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

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  $\geq 20$  °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. Mittelwert und Standardabweichung wurden jeweils separat für die Siedlungsflächen (Wohnen & Gewerbe) und die Verkehrsflächen ermittelt. In der Berechnung der Kennzahlen sind jeweils die gesamten Werte aus der Ist- und Zukunftsrechnung eingegangen. Die bioklimatische Belastung der Siedlungs- und Verkehrsflächen wurde in vier Klassen von *sehr günstig* bis *ungünstig* eingeteilt (Tab. 3). 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.

### 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 Siedlungs- und Verkehrsflächen im Stadtgebiet Kehls wurde analog zur Nachtsituation in vier Klassen von *sehr günstig* bis *ungünstig* eingeteilt (Tab. 4).

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.

Tab. 4: Einordnung der Wärmebelastung am Tage im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	PET 14 Uhr [°C] Siedlungsflächen *	PET 14 Uhr [°C] Verkehrsflächen **	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 36,2	bis 36	1 = Sehr günstig
> -1 bis 0	> 36,2 bis 39,1	> 36 bis 39,5	2 = Günstig
> 0 bis 1	> 39,1 bis 42	> 39,5 bis 43,1	3 = Weniger günstig
> 1	> 42	> 43,1	4 = Ungünstig

\* Mittelwert: 39,08 °C, Standardabweichung: 2,87 °C  
 \*\* Mittelwert: 39,53 °C, Standardabweichung: 3,54 °C } Gesamtstatistik aus Ist- und Zukunftsrechnung

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

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-Ausgleichsraum-Systeme im Stadtgebiet. Der während einer autochthonen Sommernacht über Grünflächen entstehenden Kaltluft wird nur dann eine planerische Relevanz zugesprochen, wenn sie in Zusammenhang mit Siedlungsräumen steht, die von ihrer Ausgleichsleistung profitieren. Erfüllt eine Grünfläche dagegen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellt keinen Ausgleichsraum dar, ist ihre klimaökologische Bedeutung geringer einzustufen. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt bewertet und in vier Stufen von *geringe* bis *sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt.

#### 6.3.1 BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten alle Kaltluftleitbahnen und Grünflächen mit flächenhaftem Kaltluftabfluss automatisch eine *sehr hohe Bedeutung* und daran angrenzende Grün- und Freiflächen eine *hohe bioklimatische Bedeutung*. Zudem spielt die Kaltluftproduktivität eine Rolle. Vor diesem Hintergrund wurden alle Kaltluftentstehungsgebiete<sup>21</sup> ebenfalls mit einer *hohen bioklimatischen Bedeutung* bewertet. Weitere Bewertungskriterien stellen der Siedlungsbezug, die Kaltluftvolumenstromdichte, der Größe und Art der Grünfläche sowie die Entfernung zu belasteten Siedlungsflächen dar. Wälder produzieren in der Nacht über ihrem Kronendach große Mengen an Kaltluft, sodass auch diesen Flächen eine *hohe bioklimatische Bedeutung* zugewiesen wird<sup>22</sup>. Des Weiteren werden Grünflächen mit Siedlungsbezug<sup>23</sup> oder gar in der Nähe von belasteten Siedlungsflächen als bedeutender eingestuft als entlegene Grünflächen, von denen die Bevölkerung aus klimatischer Sicht nicht profitieren kann. Ebenso sind Grün- und Freiflächen mit überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenströmen und große Grünflächen (≥ 1 ha) als bedeutender zu bewerten als kleine Grün-

<sup>21</sup> Mindestens 30 % des Grünflächen-Polygons muss dazu als Kaltluftentstehungsgebiet (Kaltluftproduktionsrate ≥ 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h) definiert sein

<sup>22</sup> Da sich die Kaltluftproduktionsrate (Ausgabeparameter der Klimamodellierung) auf den Aufenthaltsbereich des Menschen (2 m ü. Grund) bezieht, werden Wälder anhand der (bodennahen) Kaltluftproduktionsrate in der Regel nicht als Kaltluftentstehungsgebiete erfasst, obwohl sie dennoch eine wichtige Funktion im Kaltlufthaushalt erfüllen.

<sup>23</sup> Die Grünfläche ist max. 400 m von der Siedlung entfernt.

flächen mit teilweise geringen Kaltluftvolumenströmen. Der detaillierte Bewertungsschlüssel für die Zuordnung der Bedeutung der Grünflächen in der Nacht ist in der Abb. 29 dargestellt.

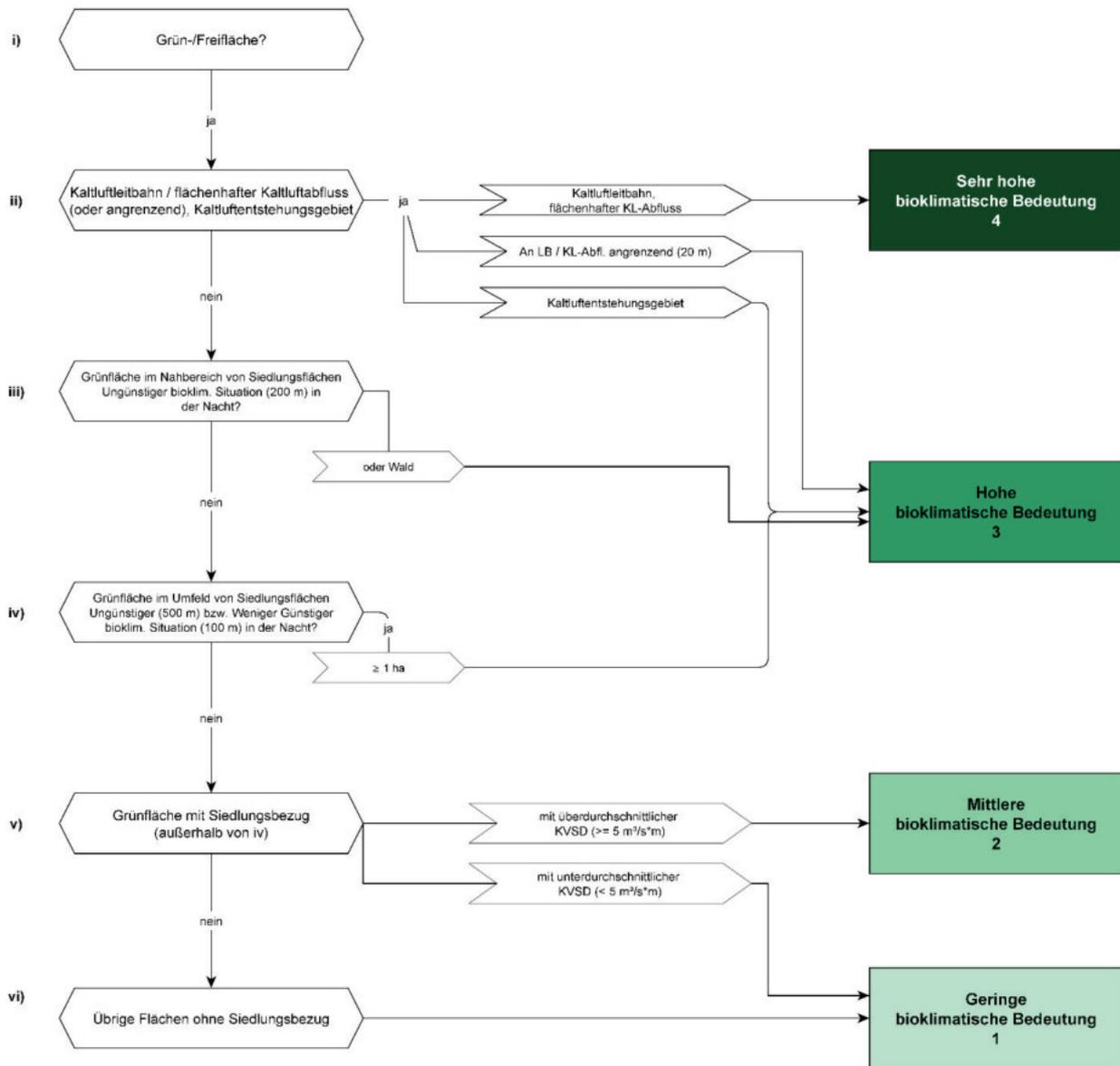


Abb. 29: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht

### 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 um 14 Uhr). 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 (Abb. 30):

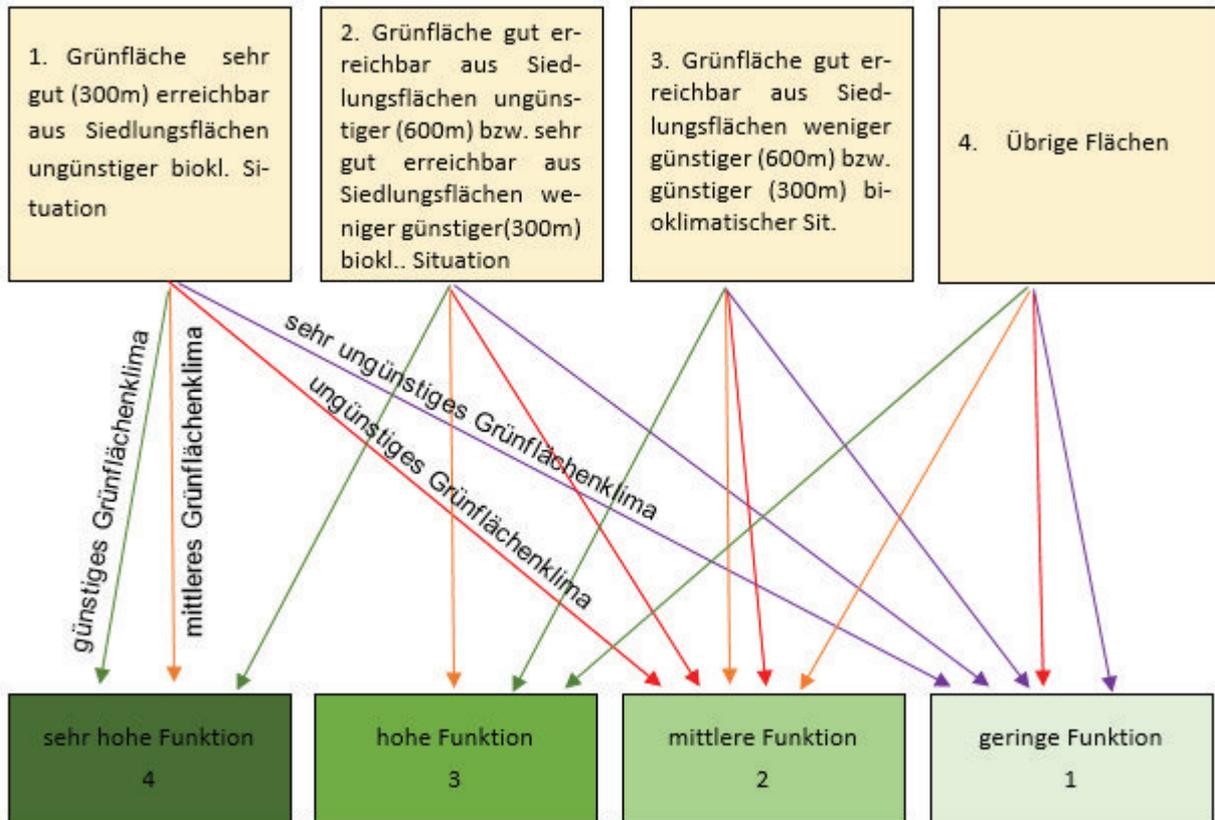


Abb. 30: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage

Dem (Grünflächen-)Bioklima liegt eine 4-stufige Einteilung (günstig – mittel – ungünstig – sehr ungünstig) zugrunde. Grundlage dafür bildet die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufe anhand der PET quantifiziert. So ist bei einer PET bis max. 29 °C von einem günstigen Grünflächenklima die Rede. Grünflächen mit einer PET zwischen > 29 und 35 °C haben ein mittleres Grünflächenklima. Bei Werten zwischen > 35 und 41 °C handelt es sich um ein ungünstiges Grünflächenklima und ab einer PET von über 41 °C um ein sehr ungünstiges Grünflächenklima. Dieses auf der PET basierende Bewertungsschema wird in Kombination mit der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerbeflächen als Parameter zur Beschreibung der Aufenthaltsqualität am Tage genutzt. Zu unterscheiden ist die gute und sehr gute fußläufige Erreichbarkeit: Bei einer Entfernung von 300 m Luftlinie (rund 500 m Fußweg) ist von einer sehr guten fußläufigen Erreichbarkeit (5 Gehminuten) und bei einer Entfernung von 600 m Luftlinie von einer guten fußläufigen Erreichbarkeit (10 Gehminuten) auszugehen (BBSR 2017).

#### 6.4 VERKNÜPFUNG DER PLANUNGSHINWEISKARTEN TAG UND NACHT ZU EINER GESAMTEN KARTE

In der Planungshinweiskarte für die Stadt Kehl wird eine flächendeckende Bewertung der stadtklimatischen Situation in der nahen Zukunft dargestellt. Sie fasst die Situation am Tage und in der Nacht in einer Karte zusammen und stellt die fachliche Informations- und Abwägungsgrundlage sowohl für gesamtstädtisch als auch für teilräumlich ausgerichtete Planungen dar. Den Ausgleichsräumen (Grün- und Freiflächen) liegt eine 5-stufige Bewertung hinsichtlich ihrer klimaökologischen Funktionalität zugrunde. Die thermische Situation in den Wirkungsräumen (Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen) wird durch eine 5-stufige Skala von *sehr günstig* bis *sehr ungünstig* repräsentiert.

Die Gesamtbewertung für die Grünflächen ergibt sich aus der Kombination von Tag- und Nachtbewertung entsprechend der in Tab. 5 dargestellten Verrechnungsvorschrift. Je dunkler der Farbton, desto größer ist die Bedeutung der Grünfläche in der Gesamtheit. Demnach steht die Zahl 1 für *keine bioklimatische Bedeutung*, wogegen die Zahl 5 eine *sehr hohe bioklimatische Bedeutung* beschreibt. Während in der Einzelbewertung (Tag- bzw. Nachtsituation) eine 4-stufige Bewertung vorliegt, reicht die Skala in der Gesamtbewertung bis 5. Um die Grünflächen hervorzuheben, die sowohl am Tag als auch in der Nacht die höchste Bedeutung haben, wurde die 5. Klasse der *sehr hohen bioklimatischen Bedeutung* eingeführt. Hierbei handelt es sich um Flächen, die in jedem Falle erhalten bleiben sollen und grundsätzlich von Bebauung freizuhalten sind. Kaltluftleitbahnen und Grünflächen mit flächenhaftem Kaltluftabfluss werden unabhängig von ihrer Tag-Situation als Flächen mit *sehr hoher bioklimatischer Bedeutung* bewertet. Die daran angrenzenden Grünflächen (Toleranz 20 m) haben in der Gesamtbetrachtung mindestens eine *hohe bioklimatische Bedeutung*, wenn die Bedeutung nicht schon zuvor höher eingestuft wurde. Dieses Vorgehen soll dem Effekt entgegenwirken, dass für den nächtlichen Kaltlufthaushalt sehr bedeutende Flächen (meist Acker- und Freiflächen, die tagsüber relativ warm sind) in der Verrechnung von Tag- und Nachtsituation insgesamt an Bedeutung verlieren.

Tab. 5: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Grünflächen

Grünflächen		Bedeutung in der Nacht			
		1	2	3	4
Bedeutung am Tag	1	1	2	3	3
	2	1	2	3	4
	3	2	3	4	5
	4	3	3	4	5

Bei den Siedlungsflächen muss in der Gesamtbewertung zwischen unbewohnten und bewohnten Areas unterschieden werden. Die unbewohnten Flächen werden im Folgenden als Gewerbe- und Verkehrsflächen bezeichnet. Bei letzteren ist die Aufenthaltsqualität am Tage deutlich entscheidender als in der Nachtsituation. Es ist davon auszugehen, dass sich nachts nicht so viele Menschen auf den unbewohnten Flächen aufhalten wie im bewohnten Siedlungsraum. Vor diesem Hintergrund erhält die Tagsituation bei den unbewohnten Flächen eine stärkere Gewichtung als die Nachtsituation. Daraus ergibt sich die in Tab. 6 dargestellte Verrechnungsvorschrift. Nur wenn die nächtliche Überwärmung in der höchsten Klasse (4) liegt, nimmt dies Einfluss auf die Gesamtbewertung. In allen anderen Fällen entscheidet die Tagsituation über die abschließende Gesamtbewertung.

Tab. 6: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Gewerbe- und Verkehrsflächen

Gewerbe- und Verkehrsflächen		Nächtliche Überwärmung			
		1	2	3	4
PET 14 Uhr	1	1	1	1	2
	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	4
	4	4	4	4	5

Bei den bewohnten Siedlungsflächen fällt hingegen die nächtliche Lufttemperatur stärker ins Gewicht als bei den Gewerbe- und Verkehrsflächen. Zur Gewährleistung eines erholsamen Schlafes darf die Lufttemperatur in der Nacht nicht zu hoch ausfallen. Gleichzeitig ist in den Wohngebieten das Klima am Tag von Bedeutung, weshalb Tag- und Nachtsituation nahezu gleichermaßen gewichtet werden. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die in Tab. 7 dargestellte Verrechnungsvorschrift.

Tab. 7: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Siedlungsflächen

Siedlungsflächen		Nächtliche Überwärmung			
		1	2	3	4
PET 14 Uhr	1	1	2	3	3
	2	1	2	3	4
	3	2	3	4	5
	4	3	3	4	5

## 6.5 ERGEBNISSE

Die Planungshinweiskarte für die Stadt Kehl bewertet die räumlichen klimatischen Auswirkungen im Siedlungsraum (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume. Sie fasst Tag- und Nachtsituation in einer Karte zusammen (vgl. Kap. 6.4), wenngleich auch Einzelbewertungen für die beiden Situationen (vgl. Kap. 6.2 und 6.3) vorliegen. Neben der Bewertung der Wirkungs- und Ausgleichsräume sind in der Planungshinweiskarte der nächtliche Kaltlufthaushalt mit seinen Kaltluftleitbahnen, -abflüssen und -entstehungsgebieten dargestellt. Die Elemente des Kaltlufthaushaltes wurden bereits in der Klimaanalysekarte dargestellt und unter methodischen Gesichtspunkten beschrieben (vgl. Kap. 5.1.3). Zusätzlich sind der Planungshinweiskarte Standorte von Krankenhäusern, Pflegeheimen, Kindertagesstätten und Schulen dargestellt, da sich dort zum Großteil die sensiblen Bevölkerungsgruppen aufhalten. Kranke Menschen, SeniorInnen, Kleinkinder und Schüler gelten als besonders empfindlich gegenüber der Hitzebelastung, weshalb Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation in diesen Bereichen von großer Bedeutung sind.

### 6.5.1 GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)

In der Planungshinweiskarte werden die Grünflächen hinsichtlich ihrer klimaökologischen Bedeutung, ihrer Möglichkeit der Optimierung und ihrer Bebaubarkeit bewertet (Tab. 8, Abb. 31 bzw. im Anhang).

Beispiele für Grünflächen mit sehr hoher Bedeutung (4 % der Grünflächen) sind die Grünflächen nördlich der Schwimmbadstraße, der Grünstreifen Dr.-Rosenthal-Weg / René-Schickele-Straße, weite Teile der Kinzig-Uferzone einschließlich der Grünareale in der Kinzigallee und die Ackerfläche an der Kreuzung Bärmattstraße / Iringheimer Straße. Bei den Flächen dieser Kategorie handelt es sich vorrangig um Bereiche, die für den nächtlichen Kaltlufthaushalt eine besondere Rolle spielen (Kaltluftleitbahn, flächenhafter Kaltluftabfluss). Manche dieser Grünflächen haben jedoch auch gleichzeitig eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage und befinden sich in fußläufiger Erreichbarkeit zu wärmebelasteten Siedlungsflächen, wie etwa der Ehrenfriedhof Kehl an der Kinzig.

Mehr als ein Viertel der Grünflächen erfüllt mit einem Flächenanteil von 26,1 % eine hohe bioklimatische Bedeutung. Dazu zählen beispielsweise der Stadtfriedhof Kehl, weite Teile des Rheinufer, die südliche Kinzig-Aue, der Campingplatz Kehl und das Freibad Kehl. Ebenso haben die an die Kaltluftleitbahnen bzw. -abflüssen angrenzenden Grünflächen eine hohe bioklimatische Bedeutung. Alle Grünflächen der Kategorie „hohe bioklimatische Bedeutung“ erfüllen nur zu einer Tageszeit optimale klimaökologi-

sche Bedingungen (z.B. an Kaltluftleitbahnen angrenzende Grün- und Freiflächen vorrangig in der Nacht, Rheinufer nahe des Zentrums vorrangig am Tag) oder sind tagsüber und nachts etwa gleichermaßen bedeutsam (z.B. Campingplatz und Freibad Kehl). Der Stadtfriedhof Kehl hat u.a. am Tag ein angenehmes Aufenthaltsklima und ist durch eine sehr gute Erreichbarkeit gekennzeichnet. In der Nacht ist er ein wichtiger Kaltluftlieferant für die umgebende Siedlung; jedoch wird die nächtliche Kaltluftströmung durch den Baumbestand etwas abgebremst, sodass die die Bedeutung in der Nacht lediglich mit „hoch“ (und nicht sehr hoch) zu bewerten ist.

Tab. 8: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale und abgeleitete Planungshinweise

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
5 = Sehr hohe	4,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sind gänzlich zu vermeiden oder müssen, sofern bereits planungsrechtlich vorbereitet, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung muss angestrebt und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung ggf. eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
4 = Hohe	26,1	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollen äußerst maßvoll bzw. unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung muss angestrebt und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung ggf. eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
3 = Mittlere	37,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollen unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben.
2 = Geringe	12,6	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollen unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung neu vorgenommen werden.
1 = Keine	19,6	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen keine Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollen unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung neu vorgenommen werden.

Zu den Ausgleichsräumen mittlerer bioklimatischer Bedeutung (37,7 % der Grünflächen) gehören u.a. ein Großteil entlegener Acker- und Freiflächen, die als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren, z.B. zwischen Kork und Auenheim und nördlich von Marlen. Diese Flächen sind zwar wichtig für die Kaltluftbildung in der Nacht, erfüllen jedoch am Tag als überhitzte und entlegene Grünfläche keine Funktion. Ein weiteres Beispiel für eine Grünfläche mittlerer bioklimatischer Bedeutung ist der Riedgraben am Schöneberger Weg. Dieser Bereich könnte u.a. durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird.

Baumloses Straßengleitgrün und entlegene Ackerflächen mit einer maximal leicht erhöhten Kaltluftproduktivität (unter 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h) wie etwa südlich der Kernstadt haben nur eine geringe bioklimatische Be-

deutung (12,6 % der Grünflächen). Sowohl am Tag als auch in der Nacht erfüllen Ausgleichsräume dieser Kategorie keine optimalen Funktionen.

Grünflächen mit keiner bioklimatischen Bedeutung machen 19,6 % der Ausgleichsräume aus. Die meisten Flächen dieser Art befinden sich in peripheren Regionen, etwa zwischen Kork und Querbach. Ihre klimaökologische Bedeutsamkeit ist tagsüber und nachts nur gering. Im Zuge der Erschließung neuer Siedlungen könnten diese Flächen jedoch an Bedeutung gewinnen.

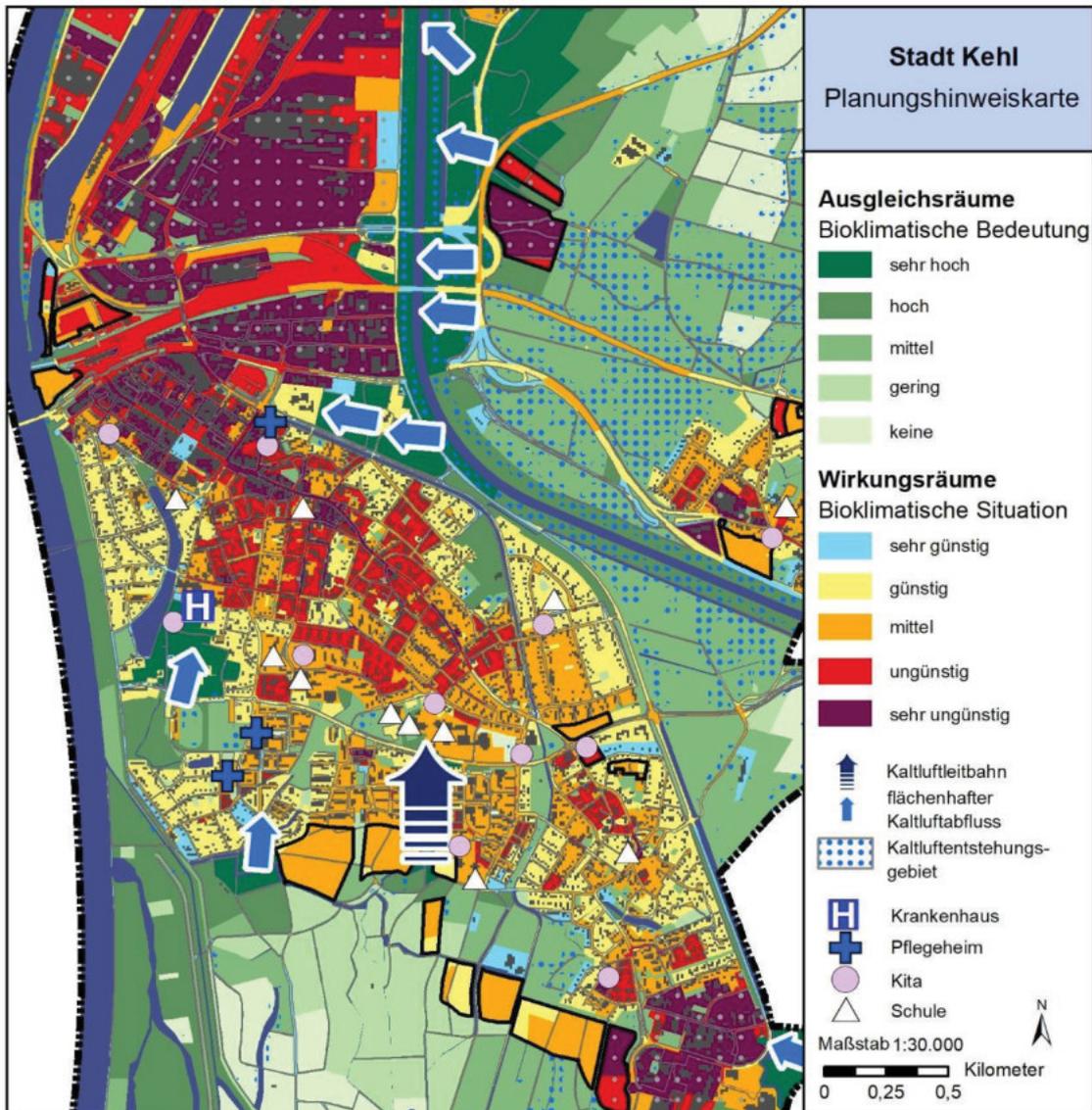


Abb. 31: Planungshinweiskarte in einem Ausschnitt des Kehler Stadtgebiets (Zukunftsperiode 2021-2050)

### 6.5.2 SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

In der Planungshinweiskarte werden Wirkungsräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet. Die Planungshinweise beschreiben die Notwendigkeit von (Klimaanpassungs-) Maßnahmen und liefern Informationen über die Machbarkeit und Gestaltung von Nachverdichtungsvorhaben (Tab. 9, Abb. 31 bzw. im Anhang).

Weniger als ein Zehntel (7,9 %) der Kehler Wohn- und Gewerbeflächen sowie 15,9 % der Verkehrsflächen und Plätze sind durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig Einzel- und Reihenhaussiedlungen am Stadtrand (z.B. in der Kronenhofstraße, Am Riedgraben) dieser Kategorie an. Eine lockere Bebauung begünstigt zum einen die nächtliche

Durchlüftung und sorgt mit einem hohen Grün-(insbesondere Baum-) anteil für ein thermisches Wohlbefinden am Tag. Beispiele für den Verkehrsraum mit günstiger thermischer Situation sind die Kinzigallee, die Daimlerstraße (Abschnitt Wilstätter Straße / Siemensstraße) und die südliche Hälfte des Marktplatzes. Derartige Bereiche werden durch verhältnismäßig viele Bäume verschattet, was sich positiv auf die Klimasituation am Tage auswirkt.

Tab. 9: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungs- und Verkehrsflächen und abgeleitete Planungshinweise

Bewertung der Wirkungsräume	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Wohnen/ Gewerbe	Verkehrsflächen	
1 = Sehr günstig	7,9	15,9	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Eingriffe sollen nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Der Vegetationsanteil soll erhalten werden.
2 = Günstig	23,0	27,6	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht zwingend notwendig. Eingriffe sollen nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und die Baukörperstellung muss beachtet werden. Der Vegetationsanteil soll erhalten werden.
3 = Mittel	28,9	40,2	Mittlere bis hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Nachverdichtungen sollen nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Die Baukörperstellung ist zu beachten und eine Erhöhung des Vegetationsanteils muss angestrebt werden.
4 = Ungünstig	20,4	12,2	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Sie sollen sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Nachverdichtungen sollen nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen („Entkopplung“) und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils müssen angestrebt werden.
5 = Sehr ungünstig	19,8	4,1	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sie sollen sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Es soll keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/ Freiflächen) erfolgen, stattdessen sind der Erhalt der Freiflächen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. Entsiegelungsmaßnahmen anzustreben.

Ein Großteil der Wohngebiete auf der Insel, in Kronenhof und entlang der L75 / Daimlerstraße zählt zu den Wirkungsräumen mit einer günstigen thermischen Situation. 23 % der Wohn- und Gewerbeflächen Kehls fallen in diese Kategorie. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut durchlassen und noch über einen hohen Grünanteil verfügen. Bei den Verkehrsflächen sind 27,6 % der Flächen der günstigen thermischen Situation zuzuordnen. Die Vogesenallee mit ihren relativ großkronigen Bäumen ist ein Beispiel hierfür.

28,9 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie ein Großteil der Verkehrsflächen (40,2 %) weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Bei ersterem handelt sich vor allem um Zeilenbebauung (z.B. entlang der Mozartstraße und zukünftig zu erwarten mit der Fertigstellung von Schneeflären), Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad oder Gebiete im Übergangsbereich von Zentrum und Stadtrand.

Etwa ein Fünftel (20,4 %) der Kehler Wohn- und Gewerbeflächen und 12,2 % der Verkehrsflächen gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Darunter fallen zentrumsnahe Siedlungsräume und einige Gewerbeflächen im Außenbereich, etwa südlich der Industriestraße. Außerdem ist die nördliche Hälfte des Marktplatzes von einer thermisch ungünstigen Situation betroffen. Im Vergleich der nördlichen mit der südlichen Hälfte des Marktplatzes wird deutlich, welche positiven Klimaeffekte großkronige Bäume (im Süden des Platzes) gegenüber kleinkronigen Bäumen (im Norden des Platzes) haben<sup>24</sup>.

Knapp ein weiteres Fünftel (19,8 %) der Wohn- und Gewerbeflächen ist durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und / oder eine mangelnde Verschattung und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Planungshinweiskarte zeigt, dass nicht allein die Innenstadt von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen ist. Letzteres gilt sowohl für den bewohnten als auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen. Die meisten Kehler Gewerbeflächen (z.B. nördlich der Straßburger Straße) weisen sehr ungünstige thermische Bedingungen auf. Oftmals ist der an hoch belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert, u.a. die Schulstraße und die Hauptstraße im Abschnitt Großherzog-Friedrich-Straße/ Allmendzeilstraße.

---

<sup>24</sup> Allerdings waren die Bäume auf der nördlichen Hälfte des Marktplatzes zu kleinkronig, um sie im Modell in einer Gitterauflösung von 10 m zu erfassen. Dennoch überwiegen die Verdunstungskühlung und der größere Schattenwurf der Bäume in der südlichen Hälfte des Marktplatzes deutlich gegenüber den kleinen Straßenbäumen weiter im Norden.

## 7. Maßnahmenkatalog Stadtklima

Für Kehl wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen zusammengetragen, die zur Anpassung an den Klimawandel und sommerlichen Hitzeereignissen in der Stadt dienen. Dieser Katalog ergänzt die allgemeinen Hinweise aus der Planungshinweiskarte mit weiteren Informationen zur klimaangepassten Stadtentwicklung. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgte durch fachgutachterliche Einschätzung und basierend auf einer Literaturlauswertung sowie den Erkenntnissen anderer Klimaana-lysen (vgl. Berlin 2015, MUNLV 2010, MVI 2012).

Die Notwendigkeit und Relevanz bestimmter Maßnahmen aus dem Portfolio der 19 Einzelmaßnahmen hängen von der Art der Fläche (z.B. Grün- oder Siedlungsfläche) und deren Bewertung in der Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 6.5) ab. Bei einem hohen Anteil an vulnerablen Bevölkerungsgruppen (z.B. in Krankenhäusern und Pflegeheimen) sind besondere Vorsichtsmaßnahmen geboten, da diese sehr empfindlich gegenüber Hitzebelastung sind.

Die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen schließt nicht automatisch die Realisierung von Klimaschutzmaßnahmen aus. So können teilweise sogar Synergieeffekte auftreten, die auf den ersten Blick nicht sichtbar werden. Ein Beispiel dafür ist die Installation von Photovoltaikanlagen auf einem begrünten Dach. Nach BUE (2017) erhöht sich der Wirkungsgrad von Photovoltaikanlagen auf einem (kühleren) Gründach jährlich um bis zu 3% gegenüber einem gewöhnlichen Dach.

Alle für die Stadt Kehl relevanten Maßnahmen zur Optimierung des Stadtklimas (einschließlich möglicher Synergieeffekte) 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 Kehler Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Einige Ausführungsbeispiele in der Stadt Kehl finden sich in der nachstehenden Abbildung (Abb. 32).



Abb. 32: Klimaanpassung in Kehl: Straßenbäume in der Hauptstraße (links), Brunnen / Sonnenschirme / Begrünung auf dem Marktplatz (Mitte) und heller Asphalt in der Großherzog-Friedrichstraße (rechts)

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Stadtgebiet erhöht werden, insbesondere 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<sup>25</sup> oder GALK-Straßenbaumliste<sup>26</sup>).

**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

---

<sup>25</sup> [www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes\\_gruen/085113/index.php](http://www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/085113/index.php) (Abruf 24.01.2020)

<sup>26</sup> [www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste](http://www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste) (Abruf 24.01.2020)

(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<sup>27</sup> oder energetische Sanierung<sup>28</sup> sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

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.

---

<sup>27</sup> Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

<sup>28</sup> Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.

Tab. 10: Empfehlungen stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Kehl (Maßnahmenkatalog Klimaanpassung)

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
<b>A) THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM</b>				
01	<b>Innen-/Hinterhofbegrünung</b>	Vegetation und Entsiegelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Hinterhöfe
02	<b>Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</b>	Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Vernetzung von Grünflächen</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
03	<b>Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten</b>	Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> </ul>	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze
04	<b>Entsiegelung</b>	Rasenflächen oder Teilversiegelung (Schotter, Rasengittersteine, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Straßen, Wege, Plätze, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
05	<b>Bäume im Straßenraum erhalten und neu pflanzen</b>	Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung der Haltestellen, Sonnensegel, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts</li> </ul>	Straßen, Wege, Plätze
06	<b>Begrünung und Verschattung von Parkplätzen</b>	Bäume, Sträucher oder Überdachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts</li> <li>Deposition und Filterung von Luftschadstoffen</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Parkplätze
07	<b>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</b>	Vielfältigkeit der Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Synergien zur Biodiversität</li> </ul>	Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze

08	<b>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung für den Kaltlufthaushalt</li> <li>▪ Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
09	<b>Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Standgewässer</li> <li>▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird</li> <li>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks)</li> <li>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken</li> </ul>	Gewässer, Grün- und Freiflächen
10	<b>Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke</b>	<p>Partizipative Projekte (z.B. Quartiersmanagement) oder aus Bevölkerung heraus (z.B. Trinkpatenschaften, Urban Gardening)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Minderungen der Vulnerabilität der Quartiersbevölkerung gegenüber thermischem Stress</li> </ul>	(thermisch belastete) Quartiere hoher Einwohnerdichte
<b>B) VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG</b>			
11	<b>Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten</b>	<p>Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung</li> <li>▪ Reduktion des Wärmestaus</li> </ul>	Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen achten)
12	<b>Entdichtung (Rückbau)</b>	<p>Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts</li> <li>▪ Verbesserung der Durchlüftung</li> <li>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen)
13	<b>Vermeidung von Austauschbarrieren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 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</li> <li>▪ Schutz des Luftaustauschsystems</li> </ul>	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege, Plätze
14	<b>Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung</li> <li>▪ 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</li> <li>▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</li> <li>▪ Synergien zur Biodiversität</li> </ul>	Grün- und Freiflächen

**C) REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

15	<b>Dachbegrünung</b>	Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich</li> <li>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement, Biodiversität und Klimaschutz</li> </ul>	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
16	<b>Fassadenbegrünung</b>	Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zur Luftreinhaltung, Biodiversität, Lärm- und Gebäudeschutz</li> </ul>	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
17	<b>Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</b>	Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie, geeignete Raumlüftung (Verhalten der Bewohner)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wirkung tagsüber und nachts</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zum Klimaschutz</li> </ul>	Gebäude, v.a. Südfassaden und in Bezug auf Fenster- und sonstige Glasflächen (Neubau und Bestand)
18	<b>Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen</b>	Dämmung von Gebäuden, Erhöhung der Albedo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In erster Linie Klimaschutzmaßnahme</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber</li> </ul>	Gebäude (Bestand)
19	<b>Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</b>	Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer (etwa im Krankenhaus))	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)</li> </ul>	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)

## 8. Zusammenfassung

Bislang wurde des Kehler Stadtklima noch nicht untersucht und bisherige Aussagen über das Klima der Stadt können lediglich über die Messdaten der Kehler LUBW-Stationen getroffen werden. Angesichts der Siedlungsentwicklung war im Hinblick auf das derzeitige Belastungsniveau und künftige städtebauliche Planungen eine erste Untersuchung des Stadtklimas notwendig. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine Rechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten.

### *ZENTRALE ERGEBNISSE*

Bei Betrachtung der bodennahen Lufttemperatur zeigt sich eine deutliche nächtliche Überwärmung der städtischen Bereiche – so weisen die Kehler Kernstadt oder hochversiegelte Gewerbeflächen aktuell um bis zu 6,5 °C höhere Temperaturen als das natürliche, weitgehend unbebaute Umland 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.

Infolge des Klimawandels ist im Raum Kehl zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrten Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in den (kern)städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorliegt. In der Zukunftsperiode 2021-2050 ist in Kehl sogar von einem erhöhten Wärmeinseleffekt von bis zu 7,5 °C auszugehen.

Die Modellrechnung beruht auf der Annahme einer sommerlichen Strahlungswetterlage (d.h. ohne Bewölkung), die typischerweise zu den höchsten Belastungen führt. 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 Kehl der Grünstreifen Dr.-Rosenthal-Weg / René-Schickele-Straße und das nördliche Kinzig-Tal (Mündungsbereich zum Rhein), welche Kaltluft bis in das thermisch belastete Siedlungsgebiet tragen. Außerdem ist die Kinzig-Aue (einschließlich der Grünflächen entlang der Kinzigallee) als flächenhaft durchlüfteter Grünraum mit Siedlungsbezug von Bedeutung. Sie weist zwar keine klassische Leitbahnstruktur auf, verhindert mit ihren flächenhaften Kaltluftabflüssen jedoch die Ausbildung eines noch stärkeren Wärmeinseleffekts. Weiterhin dienen die Sportplätze im Bereich der Schwimmbadstraße sowie die Ackerfläche an der Bärmattstraße / Iringheimer Straße als wichtige Grünflächen zur Belüftung der Kernstadt. Weitere für das Kaltluftprozessgeschehen wichtige Flächen sind die von Ortslagen umgebenden Acker- und Freiflächen, über die flächenhaft Kaltluft abfließt (z.B. nördlich und östlich von Bodersweier und Auenheim, südöstlich von Leutesheim, Zierolshofen und Hohnhurst). Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf ihr näheres Umfeld haben. Diesbezüglich ist der Friedhof Kehl hervorzuheben, dessen kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Friedhöfen wirken oftmals auch

Kleingärten (z.B. Gartenfreunde Kehl-Sundheim e.V.) oder Parks aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

#### **PLANUNGSHINWEISKARTE**

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Kehler Stadtklimaanalyse und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist das Inwertsetzen der Ergebnisse, etwa in Form der Planungshinweiskarte. In dieser 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 Planungshinweiskarte stellt das aus klimafachlicher Sicht gewonnene Abwägungsmaterial dar. Die Karte bezieht sich auf das zukünftige Stadtgebiet Kehls mit ihren 54 (potenziellen) Entwicklungsflächen und bildet die Klimasituation der nahen Zukunft (2021-2050) ab. Sie fasst Tag- und Nachtsituation in einer Karte zusammen, wenngleich auch Einzelbewertungen für die beiden Situationen vorliegen, welche in den Ergebnisdaten übermittelt wurden.

In der Nachtsituation 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. Die Bewertung des Siedlungs- und Verkehrsraums spiegelt die nächtliche Überwärmung wider. Entsprechend weist u.a. die Kehler Innenstadt die ungünstigsten Bedingungen auf. Auch in den hochversiegelten Gewerbegebieten fällt die Belastung hoch aus, doch liegt der Fokus in der Nachtsituation auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit auf der Wohnbebauung.

Bei der Bewertung der Tagsituation wird die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden betrachtet. 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 die Erreichbarkeit von (möglichst öffentlichen und kühlen) Grünflächen.

Um mögliche Anpassungsmaßnahmen für gegenüber der Hitzebelastung sensible Bevölkerungsgruppen (bspw. SeniorInnen oder Kleinkinder) verorten zu können, sind in der Planungshinweiskarte zusätzlich Einrichtungen wie Pflegeheime, Kitas, Krankenhäuser und Schulen dargestellt.

Die Planungshinweiskarte zeigt, dass knapp ein Drittel der Kehler Grünflächen mindestens eine hohe bioklimatische Bedeutung aufweist, darunter sind 4 % der Grünflächen von sehr hoher Bedeutung und damit als besonders schützenswert einzustufen. Bei den Flächen dieser Kategorie handelt es sich vorrangig um Bereiche, die für den nächtlichen Kaltlufthaushalt eine besondere Rolle spielen (Kaltluftleitbahn, flächenhafter Kaltluftabfluss). Manche dieser Grünflächen haben jedoch auch gleichzeitig eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage und befinden sich in fußläufiger Erreichbarkeit zu wärmebelasteten Siedlungsflächen, wie etwa der Ehrenfriedhof Kehl an der Kinzig. Auch der Friedhof Kehl hat am Tag ein angenehmes Aufenthaltsklima und ist durch eine sehr gute Erreichbarkeit gekennzeichnet. In der Nacht ist er ein wichtiger Kaltluftlieferant für die umgebende Siedlung. In der Planungshinweiskarte sind derartige Grünflächen als wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung beschrieben. In diesen Bereichen sollen bauliche Eingriffe äußerst maßvoll bzw. unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Es muss eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung ggf. eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Den bedeutsamen Grünflächen stehen Wohn- und Gewerbeflächen gegenüber, die durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert sind (19,8 % der Flächen dieser Art). Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und / oder eine mangelnde Verschattung und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Planungshinweiskarte zeigt, dass nicht allein die Innenstadt von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen ist. Letzteres gilt sowohl für den bewohnten als auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen. Die meisten Kehler Gewerbeflächen (z.B. nördlich der Straßburger Straße) weisen sehr ungünstige thermische Bedingungen auf. Oftmals ist der an hoch belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert, u.a. die Schulstraße und die Hauptstraße im Abschnitt Großherzog-Friedrich-Straße/ Allmendzeilstraße. In den hochbelasteten Siedlungs- und Verkehrsräumen besteht eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Hier sind Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig und prioritär. Die Maßnahmen sollen sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Es soll keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/ Freiflächen) erfolgen, stattdessen sind der Erhalt der Freiflächen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. Entsiegelungsmaßnahmen anzustreben.

#### **STADTKLIMATISCHE MAßNAHMEN**

Für Kehl wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Maßnahmen identifiziert, die als Planungsempfehlungen und Ergänzung zur Planungshinweiskarte zu verstehen sind. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Kehler 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](http://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.
- BUE (2017) – Freie Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (Hrsg.): Hamburgs Gründacher. Eine ökonomische Bewertung. Hamburg.
- Cubasch U., Wuebbles D., Chen D., Facchini M.C., Frame D., Mahowald N., Winther J.-G. (2013): Introduction. In: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016.
- DWD (2019) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: [www.dwd.de/lexikon](http://www.dwd.de/lexikon)
- DWD (2020) – Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten räumlich gemittelt: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/annual/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/) (Abruf am 13.1.2020).
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht-Schlaf-Index (Homepage). Online: [https://gerics.de/products\\_and\\_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php.de](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 Dynamics Research (10): 483-498.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn.
- 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.
- Mayer, H., W. Beckröge und A. Matzarakis (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. In: UVP-report 5/94: 265-268.
- 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.

- LUBW (2020a): Klimawandel und Anpassung: Klimawandel betrifft alle. Online: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung> (Abruf am 14.1.2020).
- LUBW (2020b): Daten- und Kartendienst der LUBW: Windstatistiken – Gemessene Winddaten. Online: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml> (Abruf 14.1.2020).
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.
- UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur.
- Online: [www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur](http://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 humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.

# Anhang

- ↳ Klimaanalysekarte Nachtsituation (heutige Situation)
- ↳ Klimaanalysekarte Nachtsituation (Zukunftsperiode 2021-2050)
- ↳ Klimaanalysekarte Tagsituation (heutige Situation)
- ↳ Klimaanalysekarte Tagsituation (Zukunftsperiode 2021-2050)
- ↳ Planungshinweiskarte Hitze