

Stadtklimaanalyse Emmendingen



Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Im Auftrag der

Stadt Emmendingen Fachbereich Planung und Bau Referat für Stadtentwicklung, Stadtplanung und Umwelt Februar 2020



Auftrag: Stadtklimaanalyse für Emmendingen und der Vereinbarten

Verwaltungsgemeinschaften

Standort: Stadt Emmendingen

Bundesland: Baden-Württemberg

Deutschland

Auftraggeber: Stadt Emmendingen

3.1.1 Klimaschutzmanagement

Landvogtei 10

79312 Emmendingen

Projektnummer: 2_19_014

Berichtsnummer: 2_19_014_Emmendingen_Klimaanalyse

Version: 2

Datum: 30. April 2020

Erstellt von:

M.Sc. Meteorologie Melanie Schneider

Geprüft von:

M.Sc. Geographie Josephine Förster

GEO-NET

Umweltconsulting GmbH

Geschäftsführer:

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

Große Pfahlstraße 5a 30161 Hannover Germany

Tel. +49 (o) 511 388 72 00 Fax +49 (o) 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



Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
GLOSSAR	IV
1. EINFÜHRUNG	6
Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	8
2.1 Der Wärmeinseleffekt	8
2.2 Stadtklima in Emmendingen	9
2.2.1 Meteorologische Kennzahlen in Emmendingen	11
2.3 Klimawandel in Emmendingen	13
Beobachteter Klimawandel	
2.3.1 Regionalmodelldaten	15
2.3.2 Methodik	16
2.3.3 Erwarteter Klimawandel	19
3. METHODIK DER MODELLGESTÜTZTEN STADTKLIMAANALYSE	24
3.1 Untersuchungsgebiet	24
3.2 Betrachtete Wetterlage	25
3.3 Das mesoskalige Modell FITNAH 3D	26
3.4 Modelleingangsdaten	27
Aufbereitung der Eingangsdaten	29
3.5 Methodik Zukunftsrechnung	30
Änderungsstatistik	30
4. MODELLERGEBNISSE	31
4.1 Nächtliches Temperaturfeld	31
Ergebnisse	31
4.2 Kaltluftströmungsfeld	35
Ergebnisse	36

4.3	Thermische Belastung am Tage	42
Egebi	nisse	43
	**************************************	4.0
5. Kl	LIMAANALYSEKARTE	46
5.1	Nachtsituation	46
5.1.1	Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen	46
5.1.2	Kaltlufteinwirkbereich	47
5.1.3	Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen	47
5.1.4	Zukünftige Situation	49
5.2	Tagsituation	51
5.2.1	Zukünftige Situation	51
6. PI	LANUNGSHINWEISKARTEN	54
6.1	Standardisierung der Parameter (z-Transformation)	54
6.2	Bewertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Strassenflächen (Wirkunsgraum)	55
6.2.1	Bewertung der Nachtsituation	55
6.2.2	Bewertung der Tagsituation	55
6.3	Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	56
6.3.1	Bewertung der Grünflächen in der Nacht	56
6.3.2	Bewertung der Grünflächen am Tage	59
6.4	Berücksichtigung des Klimawandels	61
6.5	Demographische Betroffenheit	61
6.6	Ergebnisse Planungshinweiskarten	62
6.6.1	Planungshinweiskarte Nacht	62
6.6.2	Planungshinweiskarte Tag	66
7. M	AßNAHMENKATALOG STADTKLIMA	69
8. VI	ERTIEFUNGSGEBIETE	77
8.1	Allgemein	77
8.2	Modellierung mit dem mikroskaligen Stadtklimamodell ASMUS Green	77
8.3	Ergebnisse	78
8.3.1	Unterer Lerchacker / Vier Jauchert	78
Nach	ntsituation	78
Tagsi	ituation	79

Maßnahmen und Empfehlungen	80
8.3.1 Herrenmatten	81
Nachtsituation	81
Tagsituation	82
Maßnahmen und Empfehlungen	82
8.3.1 Elzmättle	83
Nachtsituation	83
Tagsituation	84
Maßnahmen und Empfehlungen	85
8.3.1 Festplatz	86
Nachtsituation	86
Tagsituation	87
Maßnahmen und Empfehlungen	88
9. ZUSAMMENFASSUNG	89
Zentrale Ergebnisse	89
Planungshinweiskarten	90
Stadtklimatische Maßnahmen	91
QUELLENVERZEICHNIS	92
ANHANG	Ĭ

Glossar

- **Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.
- Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.
- Ausgleichsraum: Grüngeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → Wirkungsraum angrenzt oder mit diesem über → Kaltluftleitbahnen bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

- Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.
- **Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).
- **Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).
- **Grünfläche:** Als "Grünfläche" werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.
- Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).
- Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen → Kaltluftvolumenstrom > 212 m³/(s*m) durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).
- **Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches.

- Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m³/(s*m)). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → Kaltluftleitbahn fließt. Anders als das → Strömungsfeld berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.
- Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).
- **PET** (Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.
- Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (→ Wirkungsräume) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → Ausgleichsräume in getrennten Karten für die Tagund die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.
- RCP-Szenarien: Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des "Weltklimarats" der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 ("Klimaschutz-Szenario"), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 ("Weiter wie bisher-Szenario") gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m² bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an (*Representative Concentration Pathway*).
- Städtische Wärmeinsel (*Urban Heat Island*): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

- **Strömungsfeld:** Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der → *Flurwinde* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen* 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 Emmendingen einerseits als auch der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen andererseits besteht hier Handlungsbedarf. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

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

Der vorliegende Bericht erläutert die Methodik der Stadtklimaanalyse (Kap. 3) und geht auf die Ergebnisse der Modellrechnung ein (Kap. 4). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer "Klimaanalysekarte" zusammengefasst werden (Kap. 5). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, Bewertungen der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarten; Kap. 6). Der Maßnahmenkatalog Stadtklima (Kap. 7) präzisiert die allgemeinen Planungshinweise. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der mikroskaligen Rechnungen der Vertiefungsgebiete *Unterer Lerchacker/Vier Jauchert, Herrenmatten, Elzmättle* und *Festplatz* und die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen dargestellt und abschließend die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Stadtklimaanalyse zusammengefasst (Kap. 9).

EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

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

Mit dem Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs (BauGB)) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach § 1 (5) BauGB erklärt worden: "Die Bauleitpläne sollen [...] dazu beitragen, eine menschenwürdige

Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern [...]." Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: "Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden."

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

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

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

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

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

2. Fachliche Grundlagen

2.1 DER WÄRMEINSELEFFEKT

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

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

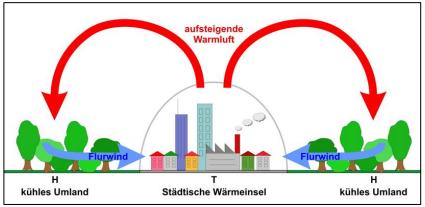


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

[8]

GFO-NFT

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

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme (anthropogener Wärmefluss), kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo², sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der stärkeren Versiegelung bzw. des geringeren Grünanteils (und zudem meist geringerer Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Stadt herabgesetzt³ (Schönwiese 2008).

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

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

2.2 STADTKLIMA IN EMMENDINGEN

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

Allgemein befindet sich die Stadt Emmendingen in einer Region mit besonders hoher bioklimatischer Belastung. Bereits heute leiden insbesondere die vulnerablen Bevölkerungsgruppen (z.B. Senioren, Kleinkinder, Menschen mit Vorerkrankungen) in der Oberrheinregion unter dem Zusammenspiel von hohen Lufttemperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit bzw. einer hohen Anzahl an Schwületagen. Die Oberrheinregion ist eine der am stärksten von der Klimaerwärmung betroffenen Regionen Deutschlands und Mitteleuropas (vgl. Kap. 2.3). Die Bioklimakarte von Deutschland zeigt die im langjährigen Mittel zu erwartende thermische Beanspruchung des Menschen. Dargestellt ist die Häufigkeit, mit der Wärmebelastung im Sommerhalbjahr trotz angepasster Bekleidung zu erwarten wird, überlagert mit der Häufigkeit von Kältereizen im Winterhalbjahr (Abb. 2). Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichem, gering bewölktem Hochdruckwetter mit hohen Lufttemperaturen, hoher Feuchte und geringer Luftbewegung auf. Kältereize sind bei kaltem, windigem Wetter mit starker Bewölkung zu erwarten.

Mit Blick auf Gesamtdeutschland tritt eine extreme Wärmebelastung mit kaum einem Tag pro Jahr noch eher selten auf. Im Oberrheingraben sind es bereits durchschnittlich bis zu drei Tage pro Jahr mit extremer Wärmebelastung. Im Vergleich dazu blieben Helgoland, die Gipfellagen der Alpen und die

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

² Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

höheren Mittelgebirge (Harz, Rhön, Schwarzwald) von einer extremen Wärmebelastung verschont und in den unmittelbaren Küstenbereichen in Norddeutschland kommt solch ein Extremereignis äußerst selten vor (DWD 2020).

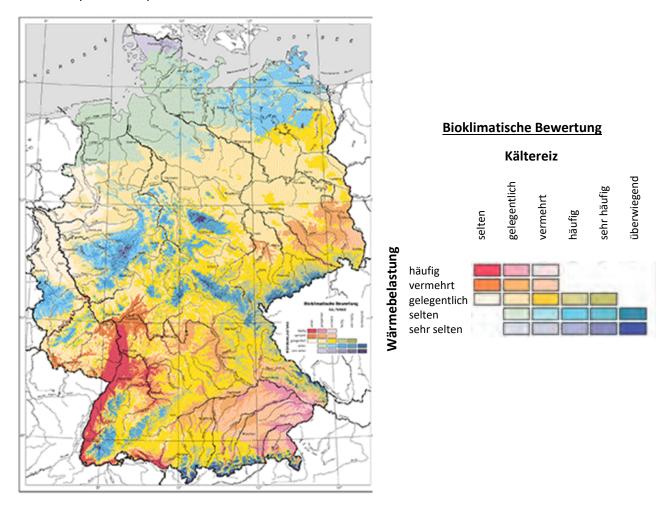


Abb. 2: Das Bioklima in der Bundesrepublik Deutschland (Zeitraum 1971-2000, Quelle: DWD (2020))

Das heutige Belastungsniveau ist mittlerweile jedoch höher als in der Klimaperiode 1971-2000, auf welche sich die Abb. 2 bezieht. Hinzu kommt, dass infolge des Wärmeinseleffektes (vgl. Kap. 2.1) die Hitzebelastung im Stadtkern Emmendingens deutlich stärker ist als im der unbesiedelten Umgebung. Da sich die Belastungssituation in Emmendingen im Zuge des Klimawandels verschärfen wird, besteht im Hinblick auf Klimaanpassung dringender Handlungsbedarf.

2.2.1 METEOROLOGISCHE KENNZAHLEN IN EMMENDINGEN

Emmendingen liegt in einer gemäßigten Klimazone, im Übergangsbereich zwischen maritimem und kontinentalem Klima. Das Großraumklima wird von wechselnden Wetterlagen bestimmt. West-Wetterlagen bringen einen maritimen Einfluss mit gemäßigten Temperaturen, starker Wolkenbildung und häufigeren Niederschlägen. Der kontinentale Einfluss bei Ost-Wetterlagen zeichnet sich durch Trockenheit, hohe Temperaturen im Sommer und niedrige Temperaturen im Winter aus.

In der landschaftsräumlichen Einstufung zählt Emmendingen zum Naturraum Oberrhein-Tiefland. Klimatisch zählt dieser Raum zu den sonnenscheinreichsten Gebieten Deutschlands mit hohen Durchschnittstemperaturen und moderaten Niederschlagssummen (Parlow et al. 2006).

Anhand der nahegelegenen DWD-Stationen Emmendingen-Mundingen (ca. 4 km nordwestlich von Emmendingen) und Freiburg (ca. 16 km südlich von Emmendingen) können die klimatischen Gegebenheiten in Emmendingen abgeleitet werden. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die folgenden Kennzahlen auf die DWD-Station Freiburg da nur für diese Station eine Windrose im betrachteten Zeitraum bestimmt werden kann. Die Station befand sich von 1967 bis 2006 am Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung des DWDs in der Stefan-Meier-Straße.

Die Lufttemperatur geht tendenziell mit zunehmender geographischer Breite sowie Höhe über dem Meeresspiegel zurück. Das langjährige Mittel der **Lufttemperatur** liegt bei 11,1 °C. Sie zeigt einen ausgeprägten Jahresgang und auch für den Niederschlag ist ein charakteristischer Jahresverlauf zu erkennen (Abb. 3). Im Mittel treten die höchsten Niederschlagssummen, bedingt durch Schauer und Gewitter, in den Monaten Mai bis Juli auf. Über das ganze Jahr fallen durchschnittlich 930 mm Niederschlag (Tab. 1).

Tab. 1: Mittelwert der Lufttemperatur (in 2 m über Grund), des Auftretens Heißer Tage ($T_{max} \ge 30$ °C) sowie des Jahresniederschlags im Zeitraum 1971 -2000 an den DWD-Station Freiburg [1443] bzw. Emmendingen-Mundingen [1224] und weiteren Standorten in Deutschland (nach DWD 2019b).

DWD-Station (Höhe über Grund)	Lufttemperatur [°C] Mittelwert	Heiße Tage [Anzahl pro Jahr] Mittelwert	Jahresniederschlag [mm] Mittelwert
Freiburg (237 m)	11,1	12,6	930 ⁴
Frankfurt am Main (100m)	10,2	10,7	621
Schwerin (59 m)	8,7	3,8	614
Essen (150 m)	9,9	4,1	934
Hannover (55 m)	9,3	5,2	641
Würzburg (268m)	9,4	8,4	575
Karlsruhe (112 m)	10,7	16,3	771

Das Wohlbefinden bzw. die Belastung einer Stadtbevölkerung wird weniger durch die allgemeine Erwärmung als vielmehr durch Hitzeereignisse bestimmt. Als besonders belastend gelten "Heiße Tage", an denen Temperaturen von 30 °C und mehr erreicht werden. Mit knapp 12 Heißen Tagen pro Jahr liegt der Raum Emmendingen im Mittel über den Vergleichswerten nord- und westdeutscher Städte,

_

⁴ Werte zum Jahresniederschlag stammen von der Messstation Emmendingen-Mundingen

während Karlsruhe erneut den Ausreißer nach oben bildet (Tab. 1). Das Auftreten der Kenntage ist von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterworfen und lag im Beobachtungszeitraum zwischen einem Heißen Tag im Jahr 1977 und 26 Heißen Tagen in 1994.

Die langjährige **Windrichtungsverteilung** im Raum Emmendingen zeigt vornehmlich südwestliche Anströmungen (DWD-Station Freiburg; Abb. 4). Ein etwas geringeres sekundäres Maximum verzeichnen südwestliche und nordnordwestliche Windrichtungen, während Strömungen aus dem westlichen bzw. östlichen Sektor vergleichsweise selten vorkommen. Bedingt durch die Hinderniswirkung insbesondere von Gebäuden, herrschen im Stadtgebiet modifizierte Strömungsverhältnisse vor.

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).

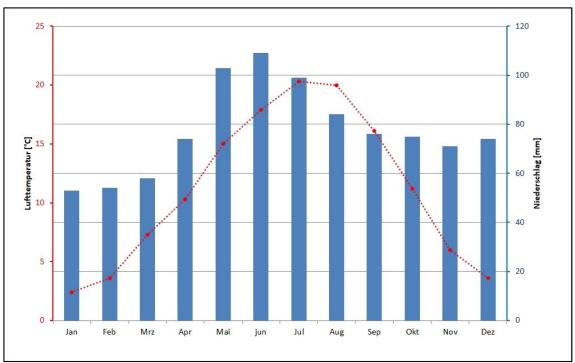


Abb. 3: Monatliche Lufttemperatur- und Niederschlagswerte im 30-jährigen Mittel (1971-2000, DWD-Station Freiburg; nach DWD 2019b)

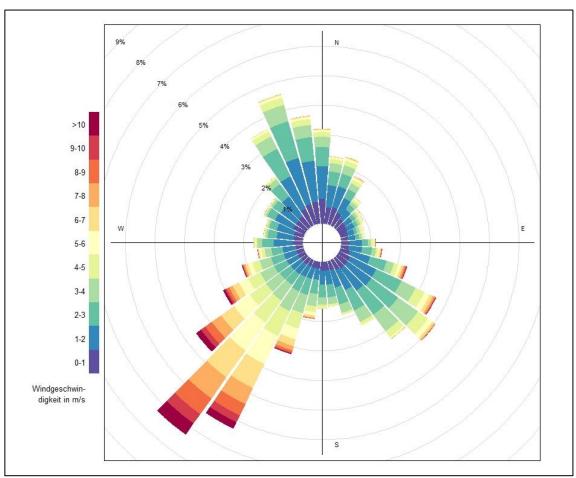


Abb. 4: Windrichtungsverteilung in 10 m über Grund für den Zeitraum 1971-2010 (Windrichtung erst ab 1975) an der DWD-Station Freiburg (bezogen auf stündliche Werte; eigene Berechnung nach DWD 2019b)

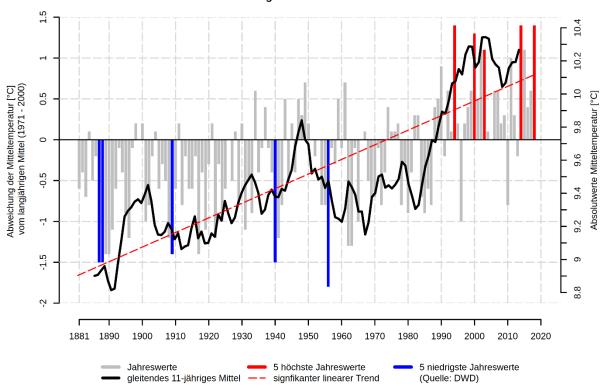
2.3 KLIMAWANDEL IN EMMENDINGEN

BEOBACHTETER KLIMAWANDEL

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). Die Baseler Messreihe, welche sogar bis Mitte der 1750er Jahre zurückreicht (und hier stellvertretend für die Stadt Emmendingen steht), zeigt einen Temperaturanstieg von 2,5 °C seit Beginn der Temperaturmessungen. In der gesamten Metropolregion Oberrhein ist von einer Temperaturzunahme auszugehen, die sowohl über dem globalen als auch dem Baden-Württemberger Durchschnitt liegt (Parlow 2016). Die Oberrhein-Region zählt somit zu den Gebieten, welche besonders stark vom Klimawandel betroffen sind. Die Stadt Emmendingen wird sich daher auch auf eine verstärkte Hitzebelastung einstellen müssen. Des Weiteren führen zunehmende Winterniederschläge zu einer erhöhten Hochwassergefahr im Oberrhein. Im Sommer rechnet man hingegen mit längeren und intensiveren Dürrephasen, aber auch mit zunehmenden Starkregenereignissen, welche örtlich zu schweren Schäden führen können (Riach 2019).

In Emmendingen treten seit den 90er Jahren überdurchschnittlich warme Jahre vermehrt auf. Damit geht zugleich auch eine deutliche Zunahme an heißen Tagen (Maximaltemperatur ≥ 30°C) einher (Abb. 5). Extremhitzeereignisse wie der Sommer 2003 sind mit Blick auf die letzten Dekaden keine Seltenheit mehr.

Entwicklung der Mitteltemperatur im Kalenderjahr (Jan-Dez) in Emmendingen im Zeitraum 1881 bis 2018



Entwicklung der Anzahl an heißen Tagen im Kalenderjahr (Jan-Dez) in Emmendingen im Zeitraum 1881 bis 2018

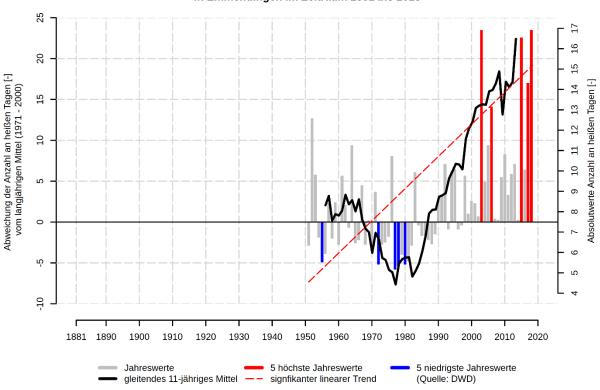


Abb. 5: Entwicklung der Mitteltemperaturen und der Anzahl an heißen Tagen in Emmendingen im Zeitraum von 1881 bis 2018

Neben der Lufttemperatur hat auch die Luftfeuchtigkeit einen starken Einfluss auf das Wärmeempfinden des Menschen. Wenn hohe Lufttemperaturen gemeinsam mit hoher Luftfeuchtigkeit auftreten, empfindet der Mensch das Gefühl von Schwüle. Die hohe Wassersättigung der Luft behindert die Temperaturregulation des menschlichen Körpers und ruft ein Gefühl des Unbehagens hervor. Aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte lässt sich ein Dampfdruck berechnen, welcher als Indikator für schwüles Wetter genutzt wird. Ab einem Dampfdruck von 18 hPa (Matzarakis 2007) spricht man von schwülen Wetterbedingungen, welche in der Abb. 6 für die Stadt Freiburg erfasst sind. Seit 1950 hat sich die Anzahl an schwülen Tagen in Freiburg von 7 auf über 18 Tage pro Jahr mehr als verdoppelt (Wattendorf et al., 2012). Für die Stadt Emmendingen ist von einem ähnlichen Belastungsniveau auszugehen.

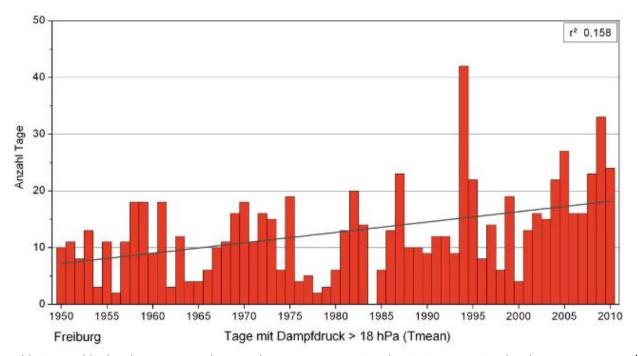


Abb. 6: Anzahl schwüler Tage pro Jahr in Freiburg im Zeitraum 1950 bis 2010; graue Gerade = lineare Regression / Trend (Wattendorf et al., 2012)

Die verschiedenen Langzeit-Messreihen zeigen, dass es im Großraum vom Emmendingen kontinuierlich wärmer geworden ist (linearer Trend) und sich Hitzeereignisse in den letzten Jahren gehäuft haben. Dies entspricht auch den beobachteten globalen Änderungen des Klimas. Mit Blick auf die bereits bestehende hohe Wärmebelastung (vgl. Kapitel 2.2) und die besonders starken Temperaturzunahmen in der Oberrhein-Region zählt Emmendingen innerhalb Deutschlands zu den Städten mit der höchsten Klimavulnerabilität.

2.3.1 REGIONALMODELLDATEN

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen basiert auf Daten von numerischen, regionalen Klimamodellen der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, welche regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009).

Tab. 2: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM - Globales Klimamodell (Global Climate Model), RCM - Regionales Klimamodell (Regional Climate Model).

	GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CNRM-CM5	CCLM	×	✓	✓
2	CNRM-CM5	RCA4	×	✓	✓
3	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	\checkmark
4	EC-EARTH	HIRHAM5	✓	✓	✓
5	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓
6	EC-EARTH	RACMO22E	×	✓	✓
7	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	\checkmark
8	IPSL-CM5A	RCA4	×	✓	✓
9	HadGEM2-ES	CCLM	×	✓	✓
10	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	\checkmark
12	MPI-ESM	CCLM	×	✓	✓
13	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	\checkmark
14	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓
15	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	\checkmark

EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt (www.euro-cordex.net). Verwendet wurden tägliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11°). Tab. 2 listet die zum Zeitpunkt der Durchführung der Auswertungen verfügbaren Modellrechnungen von EURO-CORDEX auf, welche die Grundlage für das zusammengestellte Ensemble bilden. EURO-CORDEX ist ein fortlaufendes Projekt, d.h. die Datenbanken mit den Modellergebnissen werden permanent aktualisiert. Somit sind eventuell in der Zeit bis zur Erstellung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen, die hier jedoch nicht berücksichtigt werden konnten.

2.3.2 METHODIK

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Somit ist es möglich einen analytischen Blick in die klimatische Zukunft zu werfen. Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht "perfekt". Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik sowie der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble. Diesem Ansatz folgend wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Emmendingen ein Ensemble bestehend aus 15 Regionalen Klimamodellen verwendet (Tab. 2). Die Mitglieder des Regionalmodell-Ensembles werden gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet.

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die

Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abb. 7):

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass das RCP 2.6 oft auch als "Klimaschutzszenario" bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das Szenario RCP 8.5 weist hingegen den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem Zeitraum 1985-2005 bewirken würde. Das Szenario RCP 8.5 wird auch als "Weiter wie bisher Szenario" bezeichnet.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts einen permanenten Anstieg, wobei in den vergangenen Jahren der größte Anteil durch Emissionen aus Asien beigetragen wurde (vgl. Boden 2017). Nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes⁵ befinden wir uns somit, gemessen an den globalen CO₂-Emissionen, aktuell auf dem "Pfad" des RCP 8.5-Szenarios (Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen.

Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt von Emmendingen am nächsten gelegenen Gitterpunkt sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen 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.

-

⁵ www.globalcarbonproject.org

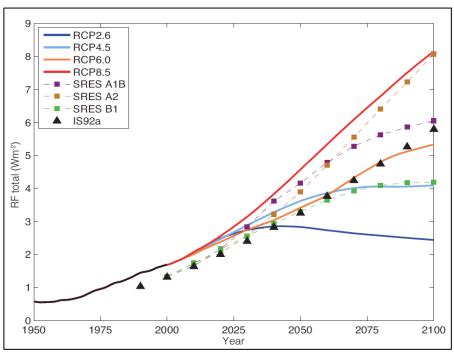


Abb. 7: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in welchem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die WMO (World Meteorological Organisation) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Da jedoch 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.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurde für jede Variable zeitliche Mittelwerte 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

Die nachstehenden Abbildungen (Abb. 9, Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12) 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 (siehe Abb. A 1 im Anhang zur Erläuterung der Plots). 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.

2.3.3 ERWARTETER KLIMAWANDEL

Im zeitlichen Verlauf von 1971 bis zum Jahr 2100 zeigen die Mediane der Jahresmitteltemperaturen des Regionalmodellensembles einen deutlichen Anstieg bei allen drei Szenarien in Emmendingen, wobei Szenario RCP 8.5 den stärksten positiven Anstieg aufzeigt (Abb. 8). Diese Trends sind äußerst robust, ein Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen wird von allen Modellkombinationen des Ensembles bestätigt. Zum Ende des Jahrhunderts nimmt neben der Jahresmitteltemperatur auch die Variabilität zu, dies wird durch die Darstellung der Bandbreite des Modellensembles in Abb. 8 deutlich (Möglichkeitsbereich). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass der im Diagramm abgebildete, bereits vergangene Zeitraum durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

Die Änderungen der Temperatur zeigen für Emmendingen ebenfalls einen deutlichen Anstieg in allen Zeiträumen, wobei zum Ende des Jahrhunderts beim Szenario RCP 8.5 die stärksten Zunahmen und beim Szenario RCP 2.6 die geringsten Zunahmen zu verzeichnen sind (Tab. 3).

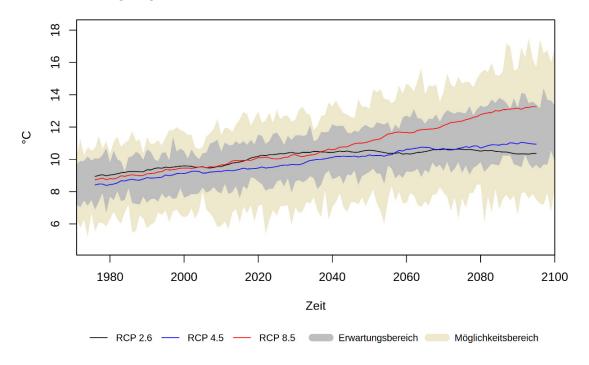


Abb. 8: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur der verschiedenen RCP-Szenarien für die Stadt Emmendingen.

Die Minimumtemperaturen⁶ steigen bei allen Szenarien am stärksten, ebenso fallen die Änderungen der Temperaturmaxima höher aus als die der Mitteltemperaturen. Die höchsten Zunahmen der Mitteltemperatur treten in der Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 bei den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 auf, beim Szenario RCP 2.6 ist eine Stagnation des ohnehin schon geringen Temperaturanstiegs zu erkennen. Hier zeigen sich die projizierten positiven Auswirkungen globaler Klimaschutzmaßnahmen deutlich.

Temperaturminima bzw. –maxima oder das Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind entweder der jährliche oder der 30-jährige Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

Eine Zunahme der Temperaturen ist in allen Regionen Deutschlands beobachtbar und auch in den regionalen Klimaprojektionen erkennbar (DWD 2016, Deutschländer & Mächel 2017). In der 3. Zukunftsperiode (2071-2100) liegt die Temperaturänderung des Szenarios RCP 8.5 in Emmendingen mit 4,3 °C oberhalb des deutschlandweiten Mittelwerts von 3,8 °C. Die Trends der Temperatur und die projizierten Änderungen der langjährigen Mittelwerte sind sehr robust und werden von allen Modellkombinationen des Ensembles als statistisch signifikant ausgegeben.

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, wobei im Sommer und Winter vergleichsweise größere Temperaturänderungen auftreten als im Frühjahr und Herbst (Abb. 9). Dieses Muster zeigt auch das Szenario 2.6 (Abb. 10), wobei die Ausprägung bei Szenario 8.5 am stärksten ist. Wie bei den jährlichen Mitteltemperaturen verstärkt sich auch hier das Klimaänderungssignal deutlich zum Ende des Jahrhunderts.

Der projizierte Anstieg der Temperatur steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung meteorologischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. In Tab. 4 sind die langjährigen mittleren Änderungen ausgewählter Kenntage für Emmendingen aufgeführt. Die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich zu. So ist bspw. in der Zukunftsperiode 3 beim Szenario RCP 8.5 mit 37 zusätzlichen Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen. Damit würden zukünftig im Mittel ca. 49 Heiße Tage im Gegensatz zu ca. 12 Heißen Tagen pro Jahr (Zeitraum 1971-2000) auftreten.

Tab. 3: Statistik der langjährigen mittleren Änderung der Temperatur (in °C) für das Szenario RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 der nahen, mittelfristigen und fernen Zukunft für die Stadt Emmendingen.

Parameter	Szenario	2021- 2050			2041-2070			2071-2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmittel-	RCP 2.6	0,8	1,1	1,6	0,8	1,2	1,6	0,9	1,1	1,7
temperatur [°C]	RCP 4.5	0,9	1,3	1,6	1,1	1,8	2,4	1,6	2,1	2,8
	RCP 8.5	1	1,6	2	2	2,7	3	3,1	4,3	5,1
Mittleres	RCP 2.6	1,2	2,1	4	1,7	2,8	3,5	1,7	2,4	4,4
Tagesminimum der	RCP 4.5	2	2,7	3,7	2,2	3,8	5,6	2,9	4,2	6,4
Temperatur [°C]	RCP 8.5	1,7	3	4,8	2,8	4,8	6,4	5,9	7,3	11,1
Mittleres	RCP 2.6	0,8	1,1	2,6	0,7	1,6	2,3	0,8	1,4	2,4
Tagesmaximum der	RCP 4.5	1,2	1,7	2,5	1,6	2,5	3,2	2	2,6	4,1
Temperatur [°C]	RCP 8.5	1,3	2	2,9	2,4	3,6	4,4	4,4	6,2	8

Tropennächte ($T_{min} \ge 20$ °C) treten derzeit in Emmendingen relativ selten auf (ca. 3 Tage pro Jahr). Ihre Anzahl nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Beim Klimaschutzszenario RCP 2.6 treten in der 3. Zukunftsperiode im Durchschnitt 7 Tropennächte im Jahr häufiger auf als im Referenzzeitraum. Beim Szenario 8.5 sind es bereits 13 zusätzliche Tropennächte pro Jahr (Tab. 4).

Die Zunahme der Heißen Tage (T_{max} ≥ 30°C) lässt in Zukunft eine ansteigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen erwarten. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird der Schwellenwert einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Wert erreicht oder überschritten haben, zeigt sich für Emmendingen beim Szenario RCP 8.5, dass die Länge von Hitzeperioden in Zukunft zunimmt (Abb. 11).

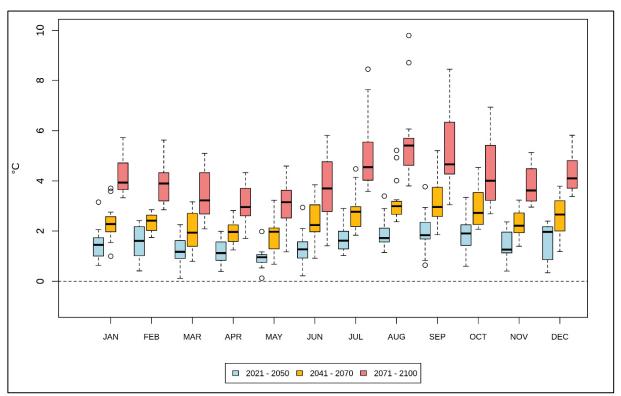


Abb. 9: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Emmendingen (RCP 8.5)

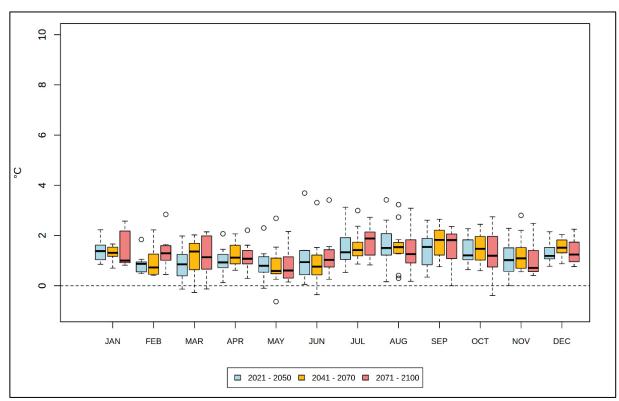


Abb. 10: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Emmendingen (RCP 2.6)

Beim Szenario RCP 2.6 ist ebenfalls eine Zunahme erkennbar, wobei die projizierten Änderungen deutlich niedriger ausfallen (Abb. 12).

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen steht die Zunahme der Minimumtemperaturen im Zusammenhang mit einer Abnahme an Frost- und Eistagen. Dies lässt ein häufigeres Auftreten wesentlich milderer Winter und eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln erwarten. In Emmendingen treten im langjährigen Mittel ca. 51 Frosttage pro Jahr auf. Darin enthalten sind etwa 12 Eistage pro Jahr (Zeitraum 1971-2000). Beim Szenario RCP 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nur noch 10 Frosttage und 1 Eistag pro Jahr auftreten.

Tab. 4: Statistik der langjährigen Änderung thermischer Kenntage (Anzahl pro Jahr) für das Szenario RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 der nahen, mittelfristigen und fernen Zukunft für die Stadt Emmendingen.

Kenntag	Szenario	2021- 2050			2041-2070			2071-2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Commontogo [n/lohr]	RCP 2.6	10	13	21	11	14	22	11	13	22
Sommertage [n/Jahr]	RCP 4.5	10	15	20	13	23	32	19	26	32
(T _{max} ≥ 25°C)	RCP 8.5	12	17	22	25	33	44	46	54	64
Heiße Tege [n/lahr]	RCP 2.6	5	7	13	5	7	13	5	8	14
Heiße Tage [n/Jahr]	RCP 4.5	6	8	12	9	13	17	11	15	19
(T _{max} ≥ 30°C)	RCP 8.5	7	10	18	14	19	31	31	37	51
Tuenenus ebte (n/lebu)	RCP 2.6	3	5	8	3	5	7	3	7	9
Tropennächte [n/Jahr] (T _{min} ≥ 20°C)	RCP 4.5	5	6	8	7	9	11	9	13	15
(1 _{min} ≥ 20 C)	RCP 8.5	5	7	12	12	15	19	25	33	44
Freetters (n/laby)	RCP 2.6	-19	-13	-9	-19	-16	-12	-20	-14	-10
Frosttage [n/Jahr]	RCP 4.5	-20	-17	-12	-29	-21	-13	-31	-27	-20
(T _{min} < 0°C)	RCP 8.5	-23	-19	-13	-31	-28	-23	-43	-41	-37
Eistage [n/Jahr]	RCP 2.6	-6	-5	-4	-6	-4	-4	-7	-5	-5
	RCP 4.5	-8	-5	-3	-9	-6	-4	-10	-8	-6
(T _{max} < 0°C)	RCP 8.5	-8	-6	-3	-10	-8	-5	-11	-11	-10

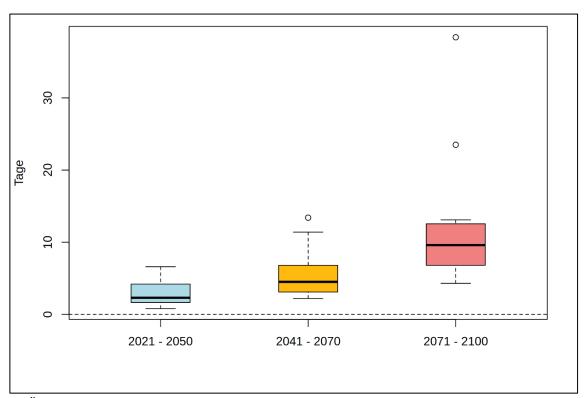


Abb. 11: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \ge 30$ °C) in Emmendingen Szenario RCP 8.5

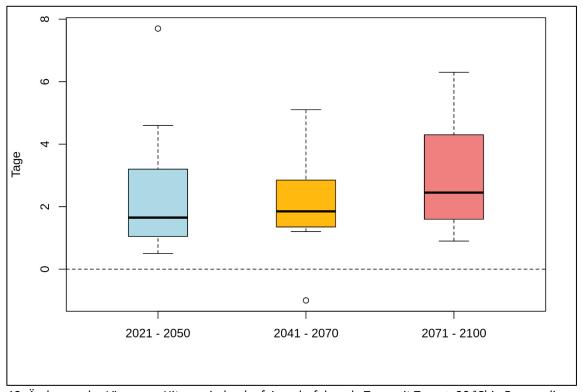


Abb. 12: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit Tmax ≥ 30 °C) in Emmendingen Szenario RCP 2.6.

3. Methodik der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Emmendingen liegt an der Schnittstelle zwischen Freiburger Bucht und Lahr-Emmendinger Vorberge am Rande des Mittleren Schwarzwaldes im Naturraum Oberrhein-Tiefland (LUBW 2020b). Die Kernstadt weist ein relativ moderates Höhenniveau auf, das circa 200 m über Normalhöhennull (NHN) liegt (Abb. 13). Die höchste Erhebung im Stadtgebiet liegt im Norden bei Huttendorf mit 402 m ü. NHN, die tiefste Stelle liegt im Nordwesten an der Grenze zu Teningen (189 m ü. NHN).

Das Stadtgebiet Emmendingens erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von 7,1 km in Ost-Westbzw. 8,3 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von 33,8 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von 336 km² auf (21 km x 16 km), um die Vereinbarte Verwaltungsgemeinschaft Teningen, Malterdingen, Sexau und Freiamt mit abzudecken und die im Umland gelegenen Strukturen mit Einfluss auf das Emmendinger Stadtklima zu erfassen.

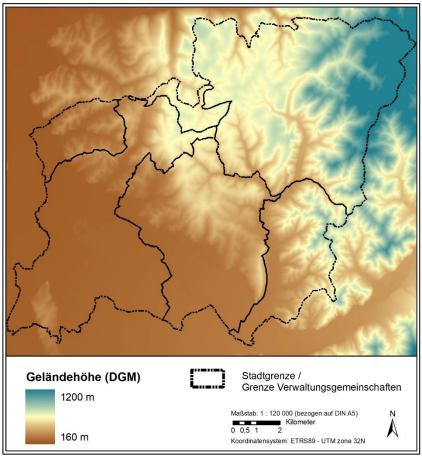


Abb. 14: Darstellung der Geländehöhe im Untersuchungsgebiet.

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. 15 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.

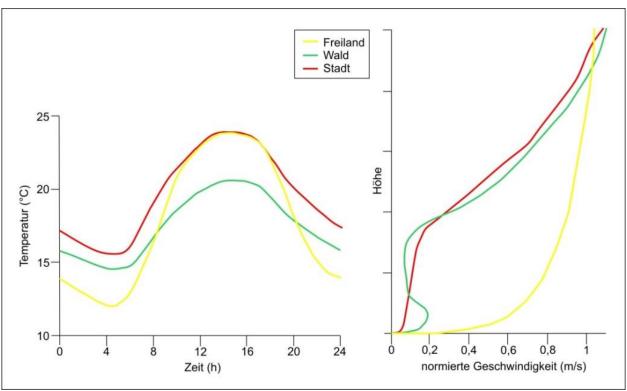


Abb. 15: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

3.3 DAS MESOSKALIGE MODELL FITNAH 3D

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

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

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

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

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 25 m (mesoskalige Modellrechnung). Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben

hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü.Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

3.4 MODELLEINGANGSDATEN

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

- Geländehöhe
 - → Abgeleitet aus einem DGM 1 m (Digitales Geländemodell, Stand 2017)
- Landnutzung
 - → ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem, 2018), ergänzt um
 - ⇒ BASIS-DLM (Digitales Landschaftsmodell, 2018)
 - → Urban Atlas (2012) für den Bereich außerhalb Emmendingen und der VVG
 - → Baumkataster für Emmendingen (2018)
 - → Gebäudegrundrisse (LoD2-Daten, 2018)
 - → DOP (Digitale Orthophotos 2018)
- Strukturhöhe
 - → DOM (Digitales Oberflächenmodell) in 5 m Auflösung (2012)
 - → Gebäudehöhe (LoD2, 2018)
- Versiegelungsgrad
 - Gesplittete Abwassergebühr für Emmendingen (2018)
 - → Von GEO-NET berechneter Normalised Different Vegetation Index (NDVI) f
 ür den Bereich außerhalb Emmendingens (2018)

Die Emmendinger Landnutzung wird über 15 verschiedene Strukturtypen (vgl. Landnutzungsklassen in Abb. 16) definiert. Die Zuweisung der Strukturtypen erfolgte rein auf der Basis der physikalischen Eigenschaften, unabhängig von der tatsächlichen Nutzung. So kann es u.a. vorkommen, dass gewerblich genutzte Flächen als Zeilen- und Hochhausbebauung definiert wurden, wenn diese z.B. einen sehr geringen Versiegelungsgrad aufwiesen. Hinzu kommt, dass die Bebauungsklassen (Stadtkern, Blockrandbebauung, Industrie/ Gewerbe, Zeile / Hochhaus sowie Einzel- und Reihenhausbebauung) lediglich das Umfeld der Gebäude beschreiben. Der reine Baukörper als solcher wird im Raster als Gebäude klassifiziert.

Die Klimaanalyse bildet den Zustand des Stadtgebiets zu einem bestimmten Zeitpunkt ab und ist dabei statisch. Die Auswirkungen möglicher zukünftiger Landnutzungsänderungen wurden unter Einfluss des Klimawandels separat untersucht (vgl. Karten im Anhang). Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels eines Luftbildes abgeglichen.

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.

GFO-NFT

Die Rasterauflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne kleinkronige Bäume⁷ auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden. Die Bäume im Emmendinger Stadtgebiet wurden in der Landnutzung als "Gehölz" klassifiziert, sofern sie 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 Orthophotos in einen Vegetationsindex (NDVI − Normalized Difference Vegetation Index) überführt. Ein NDVI-Schwellwert von 0,17 war geeignet, um die Vegetation von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe (≥ 3 m) konnten so flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet Baumstandorte identifiziert werden. Die auf diese Weise automatisiert erfassten Baumstandorte wurden mit dem Digitalen Orthophoto (2018) und dem Straßenbaumkataster (2018) überprüft und teilweise korrigiert.

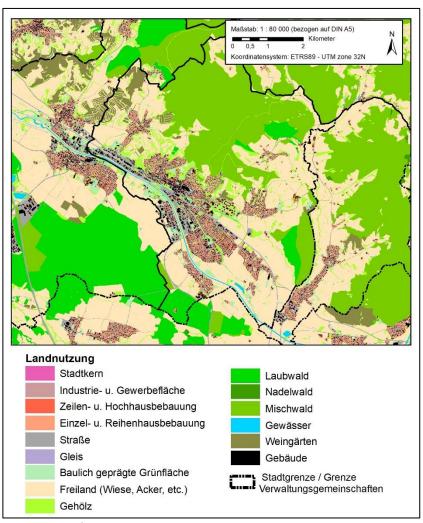


Abb. 16: Landnutzungsklassen auf Rasterebene im Emmendinger Stadtgebiet

⁷ 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.

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. 17; vgl. Abb. 16). 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. 17).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 4 bzw. als Klimaanalysekarten in Kap. 5), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte in Kap. 6).

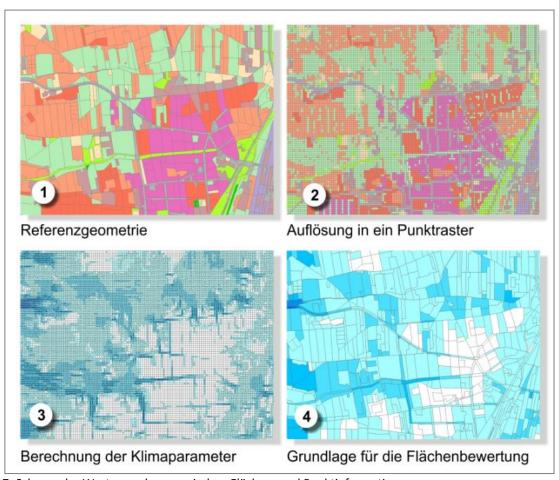


Abb. 17: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

3.5 METHODIK ZUKUNFTSRECHNUNG

Neben der Analyse der gegenwärtigen Situation (Status quo) sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima untersucht werden. Es wurden zwei separate Zukunftsperioden ausgewählt; die angenommene Situation der nahen Zukunft und der fernen Zukunft, welche die Klimaperiode 2021-2050 bzw. 2071-2100 repräsentieren sollen. Analog zur Klimaanalyse des Status quo wurde das Modell FITNAH 3D verwendet. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben erfolgt die Modellierung unter gewissen Rahmenbedingungen, die den Antrieb des Modells darstellen. Um das zukünftige Stadtklima abzubilden, hat sich die sogenannte Delta-Methode bewährt, in der das Modell mit einer um 0,9 und 2,0 K (nahe Zukunft) bzw. 0,9 und 5,3 K (ferne Zukunft) erhöhten Temperatur angetrieben wird (Klimaänderungssignal δ_1 = 0,9 K, δ_2 = 2,0 K und δ_3 = 5,3 K). Neben den Klimaänderungssignalen ist eine Landnutzungsänderung in die FITNAH-Modellierungen eingeflossen. Diese Nutzungsänderung bezieht sich hauptsächlich auf die Bebauungsstruktur Emmendingens. Für das zugrunde gelegte zukünftige Stadtentwicklungsszenario wurden die Potentialflächen, die für die Wohnbebauung sowie gewerbliche und gemischte Nutzung in Frage kommen, ausgewählt und in die Modellläufe integriert.

ÄNDERUNGSSTATISTIK

In den letzten Jahrzehnten haben deutliche klimatische Veränderungen stattgefunden. So ist auch in Deutschland, dem globalen Trend folgend, eine Erwärmung seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen beobachtet worden.

Das für die Modellrechnungen gewählte Änderungssignal basiert in Abstimmung mit der Stadt Emmendingen auf dem 15. Perzentil des RCP-Szenarios 2.6 und dem 85. Perzentil des RCP-Szenarios 8.5 jeweils für die nahe Zukunft sowie die ferne Zukunft, um die Spannweite der klimatischen Entwicklung abzudecken. Da die Differenz des 15. Perzentils des RCP 2.6 der nahen und fernen Zukunft nur 0,1 K beträgt (δ_{nah} = 0,8 K bzw. δ_{fern} = 0,9 K) wurde für beide Zukunftsperioden ein gemeinsamer Wert von 0,9 K angenommen. Daraus ergeben sich für die Klimawandelmodellierungen Klimaänderungssignale von $\delta_1 = 0.9$ K, $\delta_2 = 2.0$ K und $\delta_3 = 5.3$ K. In Tab. 5 ist jeweils die Statistik der Temperaturänderungssignale des Modellensembles für die drei RCP-Szenarien aufgeführt. Für die Stadt Emmendingen schwanken diese für die nahe Zukunft zwischen 0,8 °C (RCP 2.6) und 2,0 °C (RCP 8.5) und für die ferne Zukunft zwischen 0,9 °C (RCP 2.6) und 5,3 °C (RCP 8.5). Exemplarisch werden für die verschiedenen RCP-Szenarien weitere statistische Werte aufgeführt.

Tab. 5: Statistik der langjährigen mittleren Änderung der Temperatur (in °C) für das Szenario RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 der nahen, mittelfristigen und fernen Zukunft für die Stadt Emmendingen.

Parameter [°C]	Szenario	2021- 2050			20	041-207	70	2071-2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
lahrasmittaltamparatur	RCP 2.6	0,8	1,1	1,6	0,8	1,2	1,6	0,9	1,1	1,7
Jahresmitteltemperatur	RCP 4.5	0,9	1,3	1,6	1,1	1,8	2,4	1,6	2,1	2,8
	RCP 8.5	1,0	1,6	2,0	2,0	2,7	3,0	3,1	4,3	5,3

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 25 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. In diesem Kapitel werden sowohl die heutige Situation als auch die nahe (Periode 2021-2050) und ferne Zukunft (Periode 2071-2100) betrachtet. In den Zukunftsszenarien werden sowohl eine geänderte Landnutzung als auch eine höhere Ausgangstemperatur infolge des Klimawandels (vgl. Kap. 3.5) angenommen. Der zusätzliche Temperaturantrieb in der Simulationen der nahen und fernen Zukunft entspricht der Temperaturdifferenz in den Sommermonaten Juni, Juli und August zwischen der nahen bzw. fernen Zukunft und der Referenzperiode im RCP-Szenario 2.6 bzw. 8.5.

4.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kaltbzw. 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 Emmendingens mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird (vgl. Abb. A 2 im Anhang). So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von weniger als 10 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp über 18 °C im Stadtkern Emmendingens eine Spannweite von mehr als 8 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 12,2 °C, innerhalb des Emmendinger Stadtgebiets bei 12,9 °C.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Kernstadt Emmendingens ist die höchste Bebauungsdichte 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 um die 18 °C erreicht (Abb. 18). Mit steigender Entfernung zum Zentrum nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Randbereichen liegt die Temperatur im Bereich 15 - 16 °C (z.B. Unterstadt/Wasser).

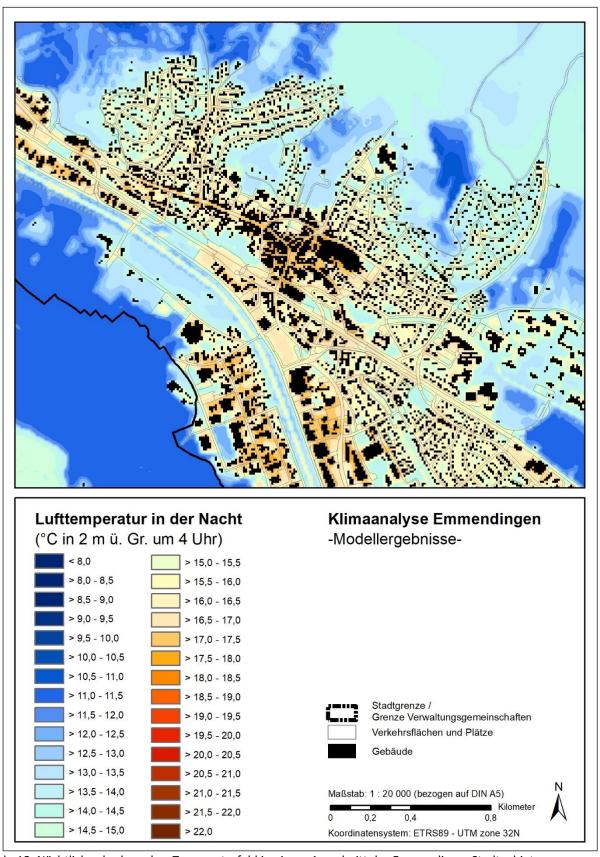


Abb. 18: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets.

Die Bebauungsdichte in Einzel- und Reihenhausbebauungen fällt gering aus während gleichzeitig der Vegetationsanteil hoch ist, sodass mit ca. 14 - 15 °C spürbar niedrigere Temperaturen als im Zentrum auftreten. Höhere Werte bis zu 17 °C und mehr werden in den Zeilen- und Hochhausstrukturen oder in innerstädtischen Kernbebauungen erreicht.

Die geringsten Temperaturen sind in den Wohngebieten bspw. am Kastelberg, in Windenreute sowie den kleineren Gemarkungen im Umland wie bspw. Maleck oder Landeck zu finden, wo kaum noch Temperaturen über 15 °C auftreten (siehe auch Abb. A 2 im Anhang).

Eine Ausnahme stellen Industrie- und Gewerbegebiete dar, deren nächtliche Abkühlung durch die Versiegelung reduziert ist, sodass sie auch außerhalb der großen Siedlungsräume eine hohe Überwärmung aufweisen (z.B. Gewerbegebiet an der B3 Teningen-Mundingen).

Dank der weitläufigen Freiflächen im Umland ist ein deutliches Temperaturgefälle zum Siedlungsraum (großflächig Werte unter 12 °C) zu erkennen. Genau wie der Stadtgarten stellen sie damit eine wichtige siedlungsnahe Ausgleichsfläche dar. Von hoher Bedeutung sind zudem in das Stadtgebiet hineinreichende Grünzüge wie bspw. der Bergfriedhof oder die Grünflächen entlang des Frohnbächles, deren Kühlwirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlen kann.

Verglichen mit den umliegenden Freiräumen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 13 - 15 °C ein höheres Wertespektrum auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 14 °C, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind, auch ist die Kühlleistung anthropogen geprägter Brachflächen eingeschränkt (z.B. Freifläche an Gleisflächen). 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 bspw. der Goethepark oder der Alte Friedhof Emmendingen.

In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 14°C erreicht werden (z.B. Hornwald). 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 Wasser⁸ sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über größeren Gewässern, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sein und deren Abkühlung verringern können. Dies ist bei Stillgewässern stärker ausgeprägt aber auch in Fließgewässern wie der Elz zu erkennen.

Aufgrund des Klimawandels und den dadurch erhöhten Temperaturantrieb ist abhängig vom gewählten RCP-Szenario und Zukunftsperiode zukünftig mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von 0,9 K, 2,0 K bzw. 5,3 K gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) zu rechnen. Entsprechend ergibt sich flächendeckend ein höheres Temperaturniveau – im Stadtgebiet liegt die mittlere bodennahe Lufttemperatur unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,2 °C in RCP 2.6 (ferne und nahe Zukunft), 15,3 °C in RCP 8.5 (nahe Zukunft) und 18,6°C in RCP 8.5 (ferne Zukunft).

⁸ Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

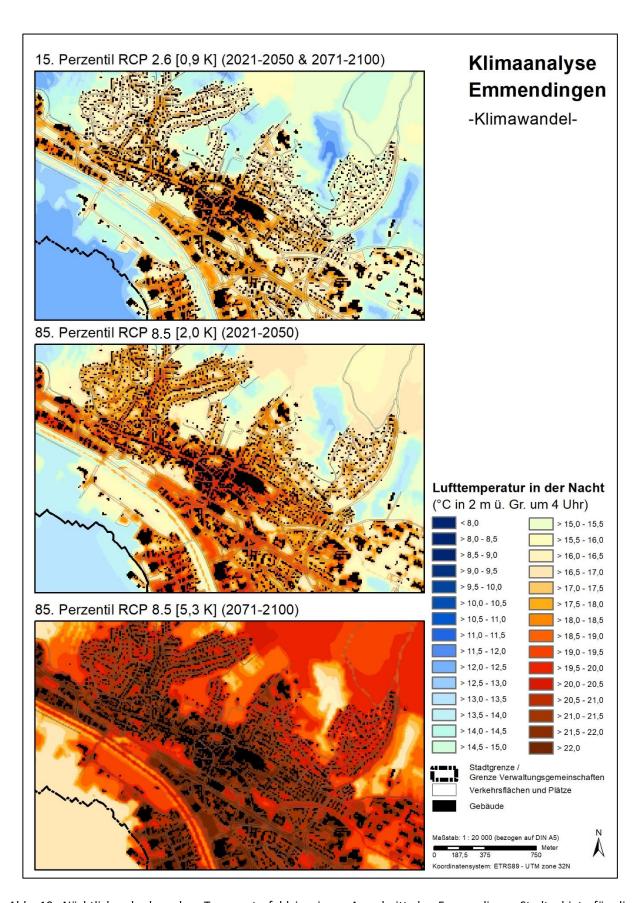


Abb. 19: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für die Zukunftsszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft

Die Zunahme gegenüber der gegenwärtigen Situation beträgt somit 1,3 K, 2,4 K bzw. 5,7 K und fällt damit höher aus als der Temperaturantrieb, was darauf zurückzuführen ist, dass verschiedene Nutzungsstrukturen unterschiedlich stark reagieren. Die nachstehende Abbildung zeigt ebenfalls, dass sich diese Temperaturerhöhung nicht gleichmäßig über das Emmendinger Stadtgebiet verteilt. Mit dem Klimawandel erwärmen sich tendenziell die Emmendinger 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 Emmendinger Stadtklima. Im Bereich der Entwicklungsflächen, wo Freiflächen in bebaute Flächen umgewandelt werden, nimmt die Temperatur am stärksten - und zwar bspw. bis zu 11,1 K (85. Perzentil RCP 8.5) bzw. 6,7 K (15. Perzentil RCP 2.6 und RCP 8.5) und 8,0 K (85. Perzentil RCP 2.6) auf der Gewerbefläche Unterer Lerchacker – gegenüber der heutigen Ist-Situation zu. Bei den in Zukunft erschlossenen Wohngebieten fällt die Änderung abhängig vom betrachteten Szenario geringer aus. Zwar erhöht sich die Lufttemperatur auch über Grünflächen, doch weisen diese weiterhin ein deutliches Temperaturgefälle zum Siedlungsraum auf und nehmen damit eine wichtige Entlastungsfunktion ein (insb. unversiegelte Freiflächen), deren Bedeutung angesichts der Zunahme im Siedlungsraum sogar noch steigt. Abb. 19 (Mitte) verdeutlicht, dass Temperaturen um die 20 °C zukünftig in autochthonen Sommernächten bereits im RCP 2.6 – Szenario in großen Teilen der Kernstadt möglich sind, erst Richtung Stadtrand werden noch als angenehm empfundene Schlaftemperaturen unter 18 °C erreicht.

4.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung der Stadtkörper herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 20). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegelt, sondern diejenige Kaltluftmenge, die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen fließt, der senkrecht zur Strömung zwischen der Erdoberfläche und der Obergrenze der Kaltluftschicht steht, ist der resultierende Parameter nicht als Volumenstrom, sondern als Volumenstromdichte aufzufassen.

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 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.

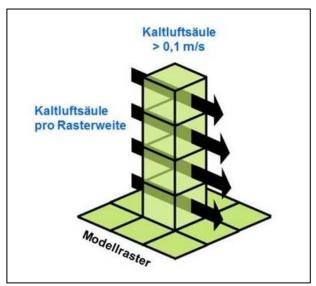


Abb. 20: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

ERGEBNISSE

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine große Variabilität und reicht von nahezu null bis zu maximalen Werten über 1600 m³/(s*m). Der Mittelwert im Emmendinger Stadtgebiet liegt bei 223,4 m³/(s*m).

Im Fokus der Untersuchung steht die Funktion des Kaltlufthaushalts für das Emmendinger Stadtgebiet. Hervorzuheben sind vor allem die Kaltluftabflüsse aus dem Nordosten des Stadtgebiets, die Kaltluft bis weit in die bestehende Bebauung transportieren (Abb. 21). Zudem bilden sich nördlich von Kollmarsreute Kaltluftströmungen aus, von denen zuvorderst Emmendingen-Bleiche profitiert. In Richtung Stadtkern nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung ab.

Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen.

Abb. 22 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur⁹) 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 Emmendinger Stadtgebiet sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 1,8 m/s im Bereich der genannten Ausgleichsräume, sowie entlang des Brettenbachs östlich des

_

⁹ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

Vollrathschen Parks vorzufinden. In 2 m ü. Gr. tritt allerdings die Hinderniswirkung von Gebäuden stärker hervor, sodass einige Bereiche des Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren.

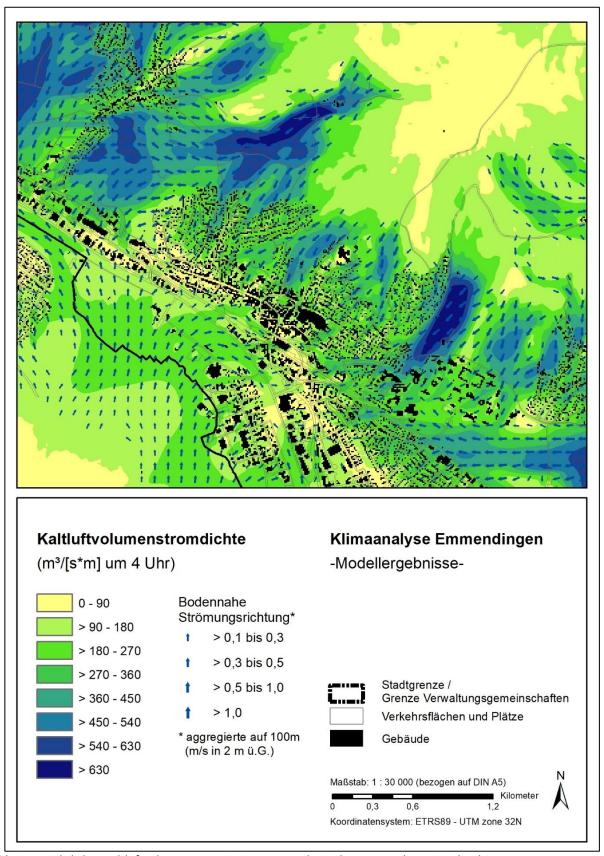


Abb. 21: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets

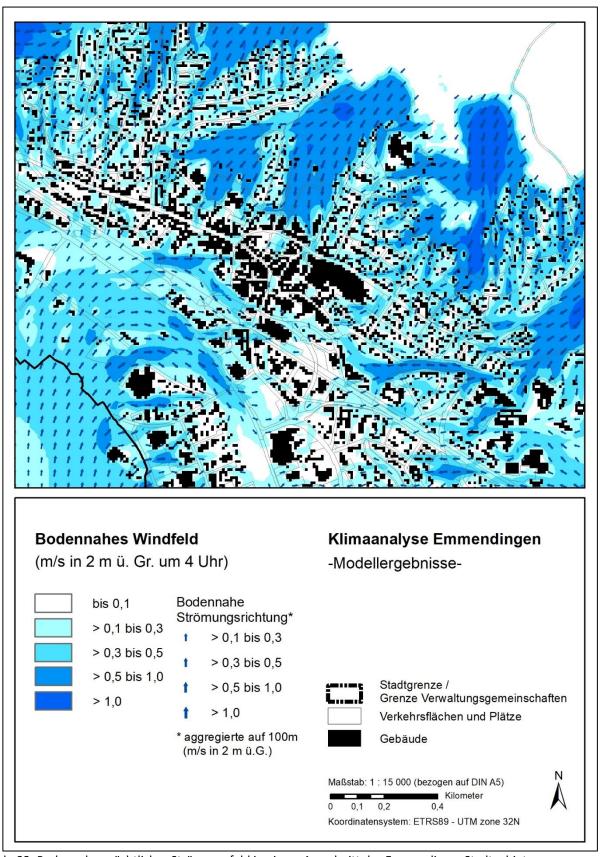


Abb. 22: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets

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

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

Die Auswirkungen der Klimawandelszenarien auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen sind relativ gering (vgl. Abb. 23, Abb. 24). Das Windfeld wird maßgeblich durch Strömungshindernisse gesteuert, auch das Relief übt einen wichtigen Einfluss aus (Hangabwinde) – an beiden Voraussetzungen ändert sich in den Annahmen der Zukunftsrechnungen nichts. 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 bspw. Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit mit der Realisierung der Entwicklungsfläche *Elzmättle* oder *Herrenmatten* im B-Plan-Gebiet deutlich ab. Im Zuge der Landnutzungsänderung (also der Umwandlung einer Freifläche in eine bebaute, versiegelte Fläche) nimmt außerdem die Temperatur auf den Entwicklungsflächen zu, was zu veränderten, thermisch-induzierten Flurwinden führt.

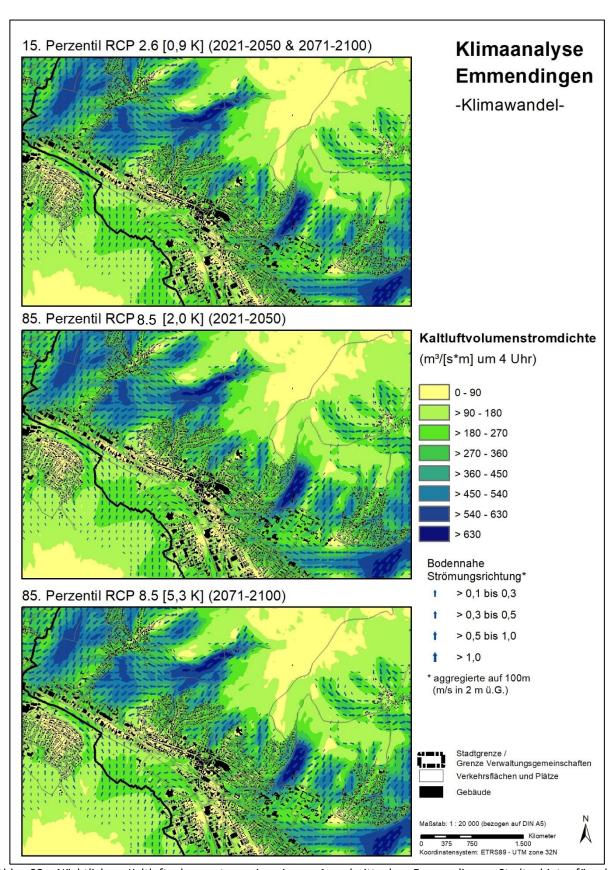


Abb. 23: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für das Zukunftsszenario RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft.

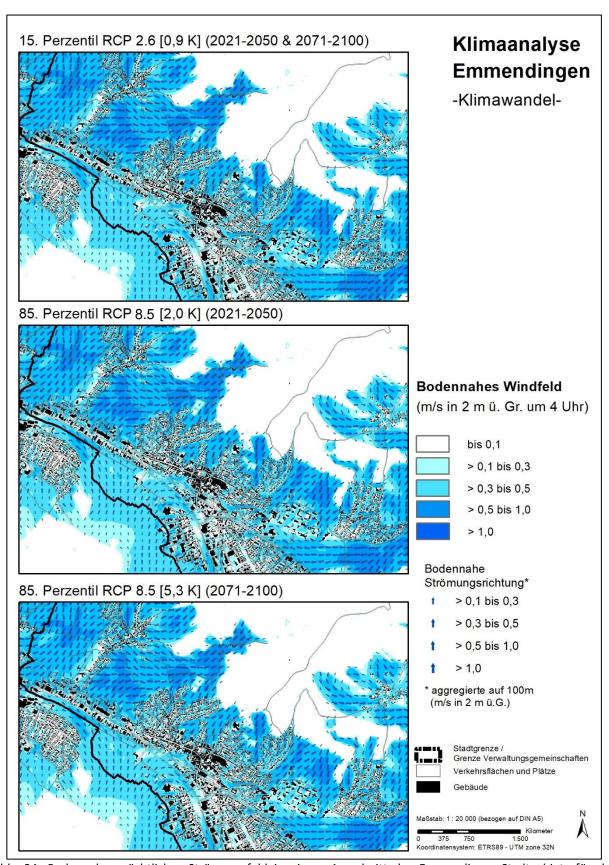


Abb. 24: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für das Zukunftsszenario RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft.

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 abschätzen¹⁰. Die berechneten "gefühlten Temperaturen" liefern Aussagen über das durchschnittliche subjektive Empfinden (Behaglichkeit, Wärmebelastung, Kältestress) des Menschen (Abb. 25).

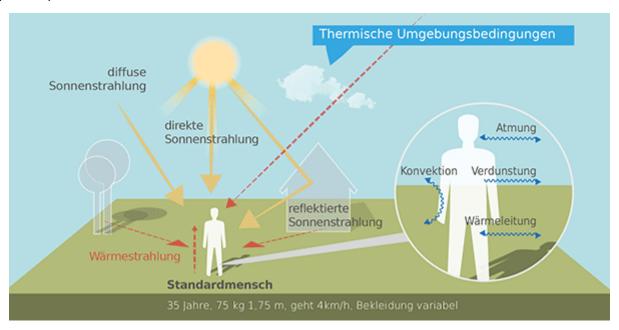


Abb. 25: Schematische Darstellung der verschiedenen Einflüsse auf das Wärmeempfinden des Menschen (DWD 2020)

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 können¹¹. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art "Quasi-Standard" entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. 6).

¹⁰ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson ("Klima-Michel" mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

¹¹ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

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

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

EGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Die geringsten Werte sind über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. Elz; Abb. 26). Flächenhaft heben sich zudem Waldgebiete mit PET-Werten von meist unter 29 °C ab (*keine* bis *schwache Wärmebelastung*). Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (Abb. 26). Zudem vermögen stadtnahe Wälder auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen.

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum zu finden (mehr als 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte. Innerhalb des Stadtgebiets stellen Parkareale wie der Stadtgarten, Vollrathscher Park oder Friedhöfe (z.B. Alter Friedhof) mit ihrer vglsw. geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

In Bezug auf die PET ist unter Klimawandelbedingungen zukünftig ein insgesamt höheres Niveau festzustellen (Abb. 27). Analog zur Lufttemperatur nimmt die PET am Tag in der nahen Zukunft nicht gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt zu. Vor allem im Siedlungs- Gewerbe- und Straßenraum sind in Zukunft höhere Belastungen vorzufinden. Wie zu erwarten, hat auch bei der PET die Landnutzungsänderung einen großen Einfluss. 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 oder durch Gebäude auch eine Reduktion der PET und damit eine verbesserte bioklimatische Situation am Tag (ausgenommen RCP 8.5 – ferne Zukunft).

Auch in Zukunft heben sich Waldflächen mit einer schwachen bis mäßigen Wärmebelastung im Kartenbild ab, wobei in RCP 8.5 (ferne Zukunft) Bereiche mit schwacher Wärmebelastung vollständig wegfallen. Auch die städtischen Grünflächen weisen zukünftig höhere Belastungen auf, doch stellen sie weiterhin wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar. Der Stadtgarten beispielsweise erwärmt sich

von gegenwärtig knapp 34 °C im RCP 2.6 (ferne und nahe Zukunft) auf ca. 35 °C und im RCP 8.5 (ferne Zukunft) auf ca. 39 °C.

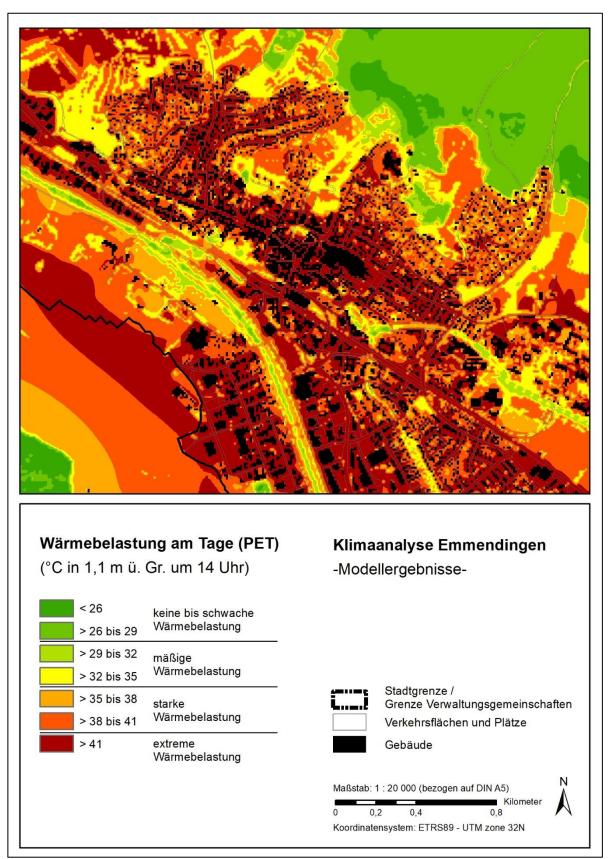


Abb. 26: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets (PET)

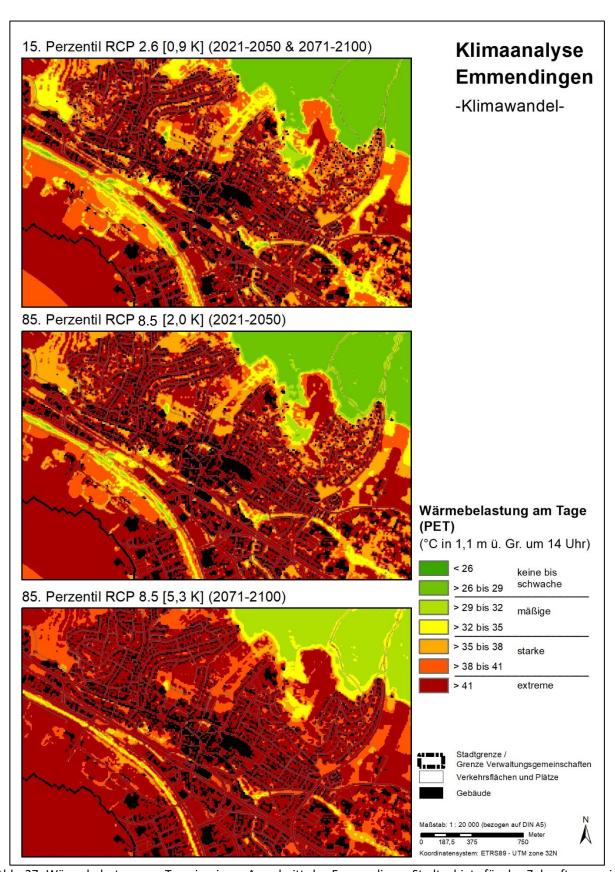


Abb. 27: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für das Zukunftsszenario RCP 2.6 und RCP 8. 5 der nahen und fernen Zukunft.

5. Klimaanalysekarte

5.1 NACHTSITUATION

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

5.1.1 BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu unversiegelten Grünflächen im gesamten Stadtgebiet, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 12,5 °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. Aufgrund der Lage, des Höhenunterschiedes und der geringen Bebauungsdichte wurde für die Siedlungsflächen der Verwaltungsgemeinschaft Freiamt, bei einer mittleren Lufttemperatur der umliegenden Grünflächen von 11 °C, ein hiervon abweichender Wärmeinseleffekt angenommen.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen liegt im gesamten Untersuchungsgebiet bei 15,0 °C und im Emmendinger Stadtgebiet bei 15,3 °C. Knapp ein Viertel der bebauten Flächen zeigt eine, im Untersuchungsgebiet als vergleichsweise gering einzuschätzende, Überwärmung bis 2 °C¹² (Tab. 7). Mit insgesamt 64 % weist mehr als die Hälfte des Siedlungsraum eine Überwärmung > 2 bis 4 °C auf, in ca. 12 % der Flächen liegt ein ausgeprägter Wärmeinseleffekt über 4 °C vor. Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbebauung sowie die Stadtrandbereiche bzw. Ortslagen tendenziell durch eine geringere Überwärmung geprägt sind (Abb. 28). Der stärkste Wärmeinseleffekt mit über 5 °C tritt im Stadtkern und der dort meist dichten Blockbebauung auf. Ähnlich hohe Werte finden sich in den großflächigen Gewerbegebieten, aufgrund der starken Versiegelung selbst dann, wenn sie außerhalb des Stadtkerns liegen.

_

GFO-NFT

¹² 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).

Tab. 7: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerberaum.

Nächtlicher Wärmeinseleffekt [°C]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 2	24,5
> 2 bis 3	38,2
> 3 bis 4	26,3
> 4 bis 5	10,9
> 5	0,9

5.1.2 KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der *Kaltlufteinwirkbereich* kennzeichnet die bodennahe Strömung der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkbereich sind Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 212 m³/(s*m) durchflossen werden. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkbereich ausgewiesen.

Innerhalb des Emmendinger Stadtgebiets stellt mit knapp 54 % die Hälfte der Siedlungs- und Verkehrsflächen einen Kaltlufteinwirkbereich dar. Dabei fällt auf, dass neben kleineren Siedlungsgebieten in den Randbereichen (z.B. Unterstadt oder Kastelberg). Im Bereich der Kernstadt oder des Festplatzes liegen dagegen keine oder nur vereinzelte Kaltlufteinwirkbereiche vor.

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 klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung dargestellt.

Kaltluftleitbahnen (linienhafte Kaltluftabflüsse) verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen – so z.B. der Skulpturenpark und die Grünanlagen am Mühlbach in Bürkle-Bleiche.

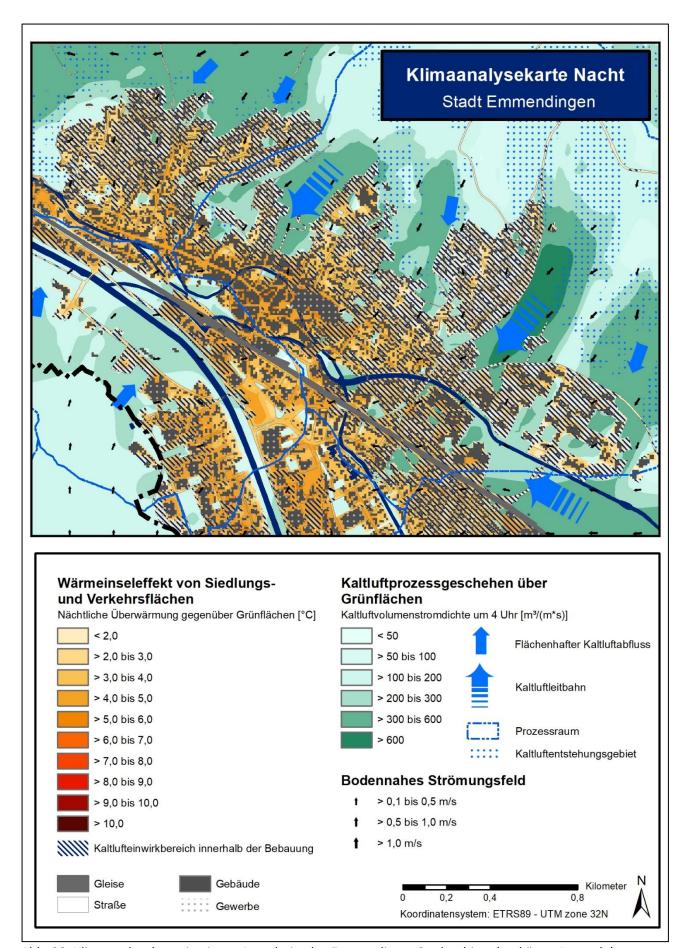


Abb. 28: Klimaanalysekarte in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets (verkürzte Legende)

Besonders wichtige Funktionen als Kaltluftleitbahnen übernehmen in Emmendingen der Bergfriedhof mit Stadtgarten und westlich angrenzenden Freiflächen, die Grün- und Freiflächen entlang des Fronbächles am Weiherberg, sowie der Grünzug Haselwald-Spitzmatten zwischen Brettenbach und Rheintalbahn, die Kaltluft bis weit in den thermisch belasteten Siedlungsraum tragen. Auch die von Landeck bis Mundingen reichenden Freiflächen entlang des Weißbachs sowie die nördlich an Windenreute angrenzenden Wiesen und Äcker dienen den jeweiligen Stadtgebieten als Leitbahnen zur Kaltluftversorgung.

Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf Ihr näheres Umfeld haben. In Emmendingen sind diesbezüglich der Vollrathscher Park, Goethepark und der Stadtgarten hervorzuheben, deren kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Parks wirken oftmals Friedhöfe (z.B. Alter Friedhof), Sportflächen (z.B. des FC Emmendingen) oder Kleingärten aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

5.1.4 ZUKÜNFTIGE SITUATION

Das Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen wird analog zum Status quo abgebildet. Die bioklimatische Belastung im Siedlungsraum wird wiederum über den nächtlichen Wärmeinseleffekt dargestellt, wobei dieser durch den Unterschied zwischen den zukünftigen Temperaturfeldern im Siedlungsraum und der gegenwärtigen mittleren Temperatur über Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet bestimmt wird.

Die nächtliche Lufttemperatur erhöht sich flächendeckend, die Zunahme weist jedoch Unterschiede zwischen verschiedenen Nutzungsstrukturen auf. Besonders relevant ist sie im Siedlungsraum, der bereits im Status quo überwärmt ist und dessen mittlere Lufttemperatur sich von 15,2 °C auf 16,6 °C in RCP 2.6 (nahe und ferne Zukunft), auf 17,7 °C in RCP 8.5 (nahe Zukunft) und auf 20,9 °C in RCP 8.5 (ferne Zukunft) erhöht (+ 1,4 K, + 2,5 K und + 5,7 K; Siedlungsraum inkl. Verkehrsflächen im Stadtgebiet). Der Innenstadtbereich sowie die Gewerbeflächen sind in Zukunft weiterhin die am stärksten überwärmten Flächen, doch auch in den umliegenden Stadtteilen ist ein höheres Niveau vorzufinden (Abb. 29). Das ist vor allem auf den hohen Versiegelungsgrad und die dichte Bebauung zurück zu führen, da tagsüber in diesem Bereich viel Strahlungsenergie aufgenommen und gespeichert wird, die im Verlauf der Nacht dann an die Umgebung abgegeben wird.

Die Grün- und Freiflächen erwärmen sich ebenso unter dem Einfluss des Klimawandels. Im Mittel erwärmen sich die Ausgleichsflächen im Emmendinger Stadtgebiet von ca. 12,5 °C in der Ist-Situation auf 13,7 °C im RCP 2.6 (nahe und ferne Zukunft), auf 14,8 °C im RCP 8.5 (nahe Zukunft) und 18,1 °C im RCP 8.5 (ferne Zukunft).

Wie in Kap. 4.2 beschrieben, sind die Auswirkungen der Zukunftsrechnung auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen minimal und beschränken sich vorwiegend auf die Flächen mit Landnutzungsänderung. Folglich sind der Kaltlufteinwirkbereich und das Strömungsfeld in den Zukunftsszenarien sehr ähnlich zum Status quo und die Klimaaustauschflächen sogar als identisch einzustufen.

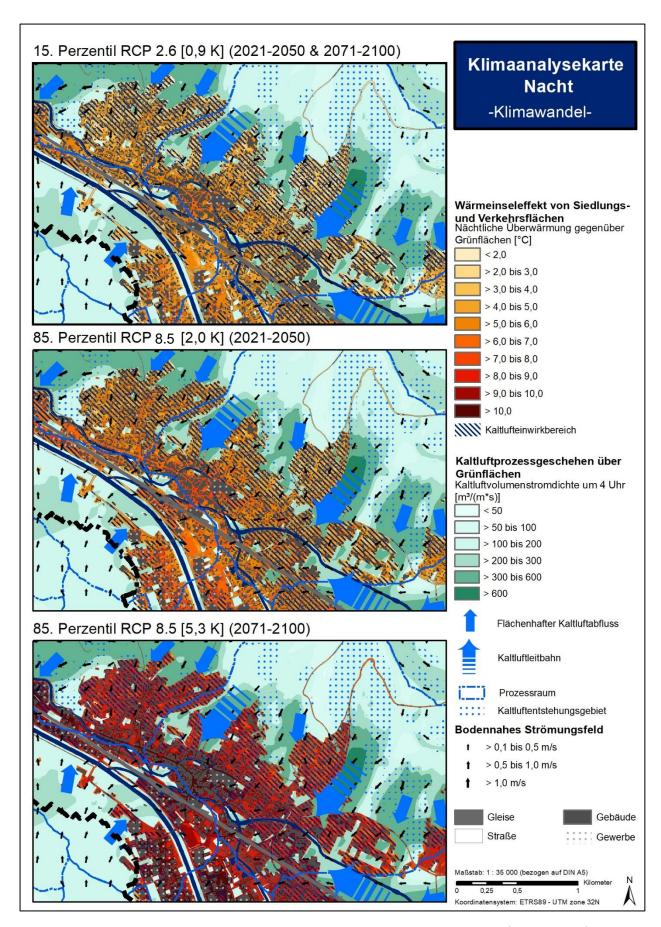


Abb. 29: Klimaanalysekarten Nacht in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für das Zukunftsszenario RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft.

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). Die Wärmebelastung wird in der Klimaanalysekarte für die Tagsituation nicht nur für Grünflächen sowie den Siedlungs- und Gewerberaum, sondern zusätzlich (und im Unterschied zur Nachtsituation) auch für Straßen, Wege und Plätze quantitativ dargestellt und nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 in physiologische Belastungsstufen eingeteilt (vgl. Tab. 6 in Kap. 4.3).

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 (Abb. 30 bzw. Abb. A 7 im Anhang). 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 der Elz liegen.

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

5.2.1 ZUKÜNFTIGE SITUATION

Für die Darstellung der bioklimatischen Belastung in den Grün- und Siedlungsflächen der Klimaanalysekarten Tag wird, analog zum Status quo, der humanbioklimatische Index PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) um 14 Uhr herangezogen.

In Bezug auf die PET ist unter Klimawandelbedingungen zukünftig ein insgesamt höheres Niveau festzustellen (Abb. 31). Vor allem im Siedlungsraum sind in Zukunft höhere Belastungen vorzufinden, wobei die extreme Wärmebelastung sich weiterhin sowohl im RCP 2.6 als auch im RCP 8.5 der nahen Zukunft hauptsächlich im Straßenraum, der Kernstadt und über versiegelten Plätzen bzw. in Gewerbegebieten zu finden ist.

Auch die städtischen Grünflächen weisen zukünftig höhere Belastungen auf, doch stellen sie weiterhin wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar. Der Stadtgarten beispielsweise erwärmt sich von gegenwärtig ca. 34 °C auf bis zu ca. 39 °C im stärksten Klimawandelszenario der fernen Zukunft.

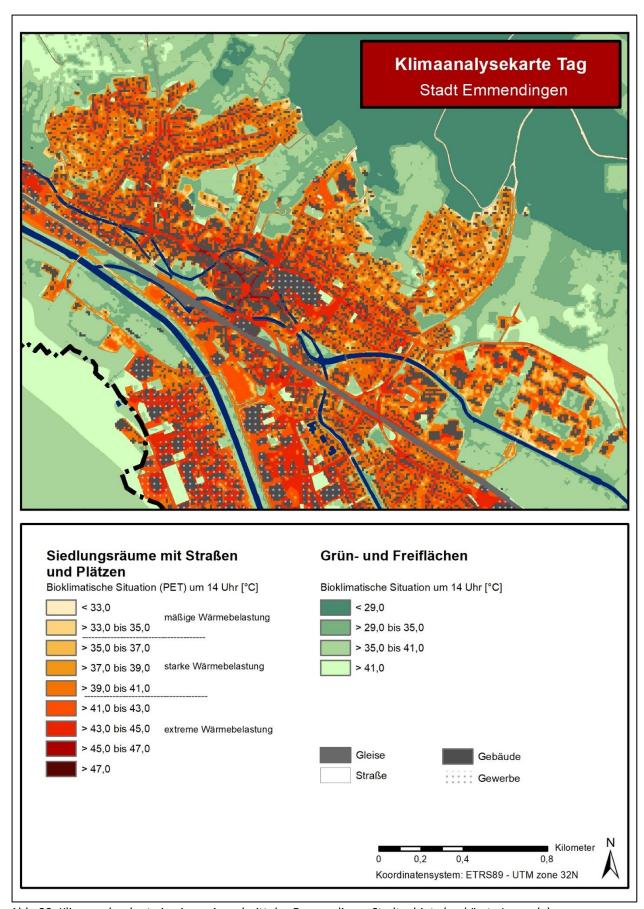


Abb. 30: Klimaanalysekarte in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets (verkürzte Legende)

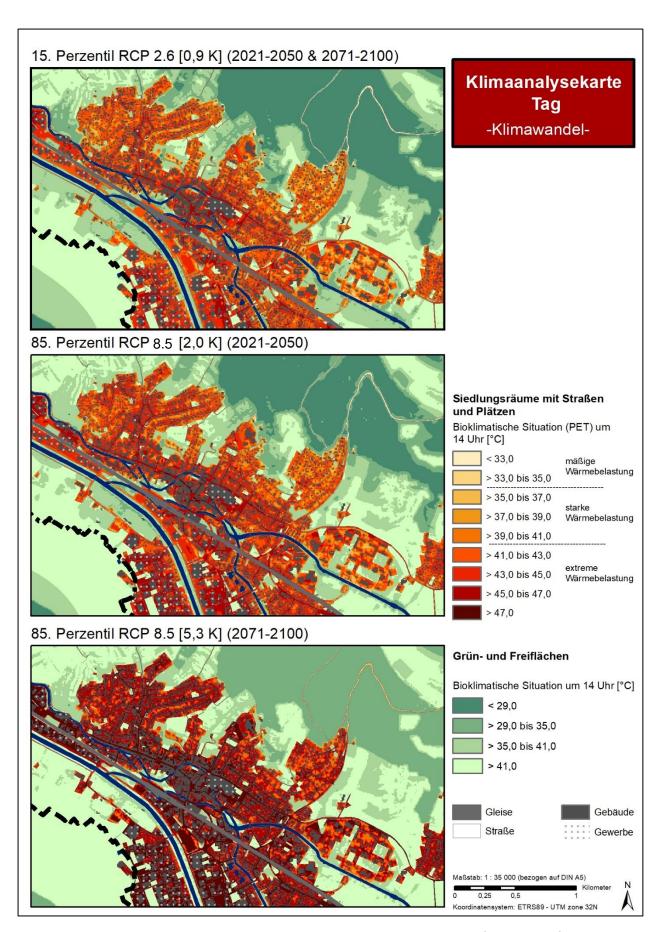


Abb. 31: Klimaanalysekarten Tag in einem Ausschnitt des Emmendinger Stadtgebiets für das Zukunftsszenario RCP 2.6 und RCP 8.5 der nahen und fernen Zukunft.

6. Planungshinweiskarten

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

6.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarten bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage die Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

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

Erstrebenswert wäre es zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine **z-Transformation** standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_i) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungs-kategorien durch Mittelwert, obere und untere S₁-Schranke; Abb. 32).

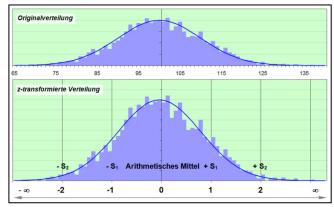


Abb. 32: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern

Tab. 8: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung im Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation (Mittelwert und Standardabweichung basieren auf der nächtlichen Lufttemperatur in Siedlungsflächen in Emmendingen).

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung
bis -0,3	1 = Sehr günstig
> -0,3 bis 0,7	2 = Günstig
> 0,7 bis 1,2	3 = Mittel
> 1,2 bis 1,7	4 = Ungünstig
> 1,7	5 = Sehr ungünstig

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

Der Siedlungsraum stellt den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation geschildert.

6.2.1 BEWERTUNG DER NACHTSITUATION

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die "Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe" für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), entsprechend definiert das Climate Service Center Germany seinen "Schlecht-Schlaf-Index" als Nächte, in denen die Temperatur 18 °C nicht unterschreitet (GERICS 2019). Als besonders belastend gelten Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C - eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum jedoch (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte Nacht erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Überwärmung (Wärmeinseleffekt). Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von sehr günstig bis sehr ungünstig eingeteilt (Tab. 8). Der Straßenraum steht 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). Die Bewertung der thermischen Belastung in Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet Emmendingens wurde in Anlehnung an die in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 quantifizierten physiologischen Belastungsstufen in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 9, siehe auch Tab. 6 in Kap. 4.3).

Am Tage ist die bioklimatische Situation im Straßenraum und auf Plätzen ebenfalls von Bedeutung, da sie die Aufenthaltsqualität von Fahrradfahrer, Fußgängern und Pendlern steuert. 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. 9: Einordnung der Wärmbelastung am Tage im Siedlungs- und Gewerberaum mittels z-Transformation (Mittelwert und Standardabweichung basieren auf der nächtlichen Lufttemperatur in Siedlungsflächen in Emmendingen).

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung
bis -1,5	1 = Sehr günstig
> -1,5 bis -0,2	2 = Günstig
> -0,2 bis 0,8	3 = Mittel
> 0,8 bis 1,6	4 = Ungünstig
> 1,6	5 = Sehr ungünstig

6.3 BEWERTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)

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

Die Grünflächen wurden für die Tag- bzw. 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 Kaltluftleitbahnen eine *sehr hohe* und flächenhafte Kaltluftabflüsse eine mindestens *hohe Bedeutung*. Zudem spielen der Kaltluftvolumenstrom und der Siedlungsbezug von Grünflächen eine Rolle. Im Einzelnen wurde folgender hierarchischer Bewertungsschlüssel verwendet:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

- a) Grünflächen, die Teil einer Kaltluftleitbahn sind
- b) mindestens 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen sehr ungünstiger bzw. ungünstiger bioklimatischen Situation (bis 250 m Entfernung)

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

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünflächen, die direkt an eine Kaltluftleitbahn angrenzen
- d) Grünflächen mit flächenhaften Kaltluftabflüssen
- e) Grünflächen < 1 ha im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen sehr ungünstiger bzw. ungünstiger bioklimatischen Situation (bis 250 m Entfernung)
- f) mindestens 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen weniger günstiger bioklimatischen Situation (bis 250 m Entfernung)
- g) Mindestens 1 ha große Grünflächen mit Wohnsiedlungsbezug (bis 500 m Entfernung), die sehr hohe Kaltluftvolumenströme aufweisen oder bei denen es sich um eine Freifläche mit mindestens hohem Kaltluftvolumenstrom handelt

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- h) Straßenbegleitgrün¹³ im Nahbereich belasteter Siedlungsflächen (vgl. b))

 Straßenbegleitgrün ist i.d.R. eine kleine Grünfläche, die bei sehr dichtem Bestand sogar ein Hindernis in
 Bezug auf die Durchströmbarkeit darstellen kann. Tagsüber sorgt es für Verschattung, sodass sich Straßen,
 Plätze und Parkplätze weniger stark aufheizen und auch in der Nacht weniger Wärme abgeben.
- i) Grünflächen < 1 ha im Nahbereich von Wohnsiedlungsflächen weniger günstiger bioklimatischen Situation (bis 250 m Entfernung)
- j) Waldflächen (sofern nicht bereits bewertet)
- k) Mindestens 1 ha große Grünflächen mit Wohnsiedlungsbezug (bis 500 m Entfernung), die mindestens hohe Kaltluftvolumenströme aufweisen oder bei denen es sich um eine Freiflächen handelt

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

I) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen

-

¹³ Straßenbegleitgrün wurde teilautomatisiert anhand folgender Kriterien bestimmt: Verhältnis "Umfang: Fläche" ≥ 0,15 (1/m) und Entfernung zu Straßen bzw. Bahnflächen ≤ 5 m (zusätzlich Validierung anhand des Luftbildes).

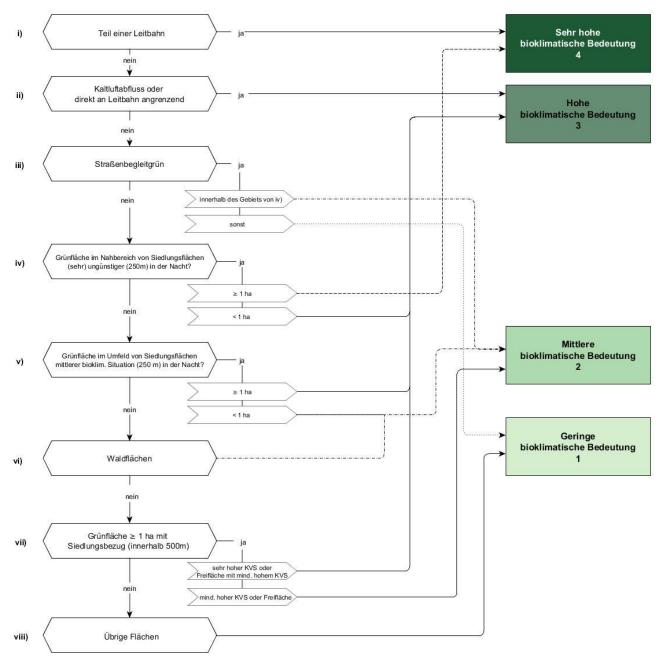


Abb. 33: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht.

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). Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten. Der Einstufung liegt folgender hierarchischer Bewertungsschlüssel zugrunde:

Sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung (4)

- a) Aus Siedlungsräumen *sehr ungünstiger* bzw. *ungünstiger humanbioklimatischen Situation* fußläufig *sehr gut erreichbare*¹⁴ Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 35 °C
 - Je stärker die bioklimatische Belastung im Siedlungsgebiet, desto wichtiger ist eine für alle Bevölkerungsgruppen fußläufige Erreichbarkeit schattenspendender Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist die Existenz ausreichend beschatteter Flächen, d.h. ein gewisser Verschattungsanteil sollte vorhanden sein.
- b) Aus Siedlungsräumen weniger günstiger humanbioklimatischen Situation fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 29 °C

Hohe humanbioklimatische Bedeutung (3)

- c) Aus Siedlungsräumen sehr ungünstiger bzw. ungünstiger humanbioklimatischen Situation fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 38 °C
- d) Aus Siedlungsräumen weniger günstiger humanbioklimatischen Situation fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 35 °C
- e) Aus Siedlungsräumen ab einer *weniger günstiger humanbioklimatischen Situation* fußläufig *erreichbare*¹⁵ Grünfläche mit einer mittleren PET ≤ 29 °C
- f) Übrige Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 29 °C
 Dabei handelt es sich vielfach um Waldgebiet, die, selbst wenn sie nicht fußläufig erreichbar sind, wichtige Rückzugsorte für die Naherholung darstellen können
- g) Straßenbegleitgrün im Umfeld belasteter Siedlungsflächen (vgl. b))

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

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- h) Übrige aus Siedlungsräumen sehr ungünstiger bzw. ungünstiger humanbioklimatischen Situation fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen
- i) Aus Siedlungsräumen weniger günstiger bioklimatischen Situation fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 38 °C

_

¹⁴ Eine *sehr gute* fußläufige Erreichbarkeit wird bis zu einer Entfernung von 300 m Luftlinie definiert – diese entspricht einem Fußweg bis ca. 500 m (BBSR 2017). Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m/s (3,6 km/h) würde dies eine Wegstrecke bis zu 5 min bedeuten.

¹⁵ Bis zu einer Entfernung von 700 m Luftlinie (ca. 1000 m Fußweg) wird eine Grünfläche als erreichbar angesehen und kann als Ausgleichsraum dienen, insb. wenn es sich um größere Grünflächen handelt (vgl. BBSR 2017).

- j) Aus Siedlungsräumen ab einer *weniger günstiger humanbioklimatischen Situation* fußläufig *erreichbare* Grünfläche mit einer mittleren PET ≤ 35 °C
- k) Übrige Grünflächen mit einer mittleren PET ≤ 35 °C
- I) Übriges Straßenbegleitgrün

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

m) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen

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

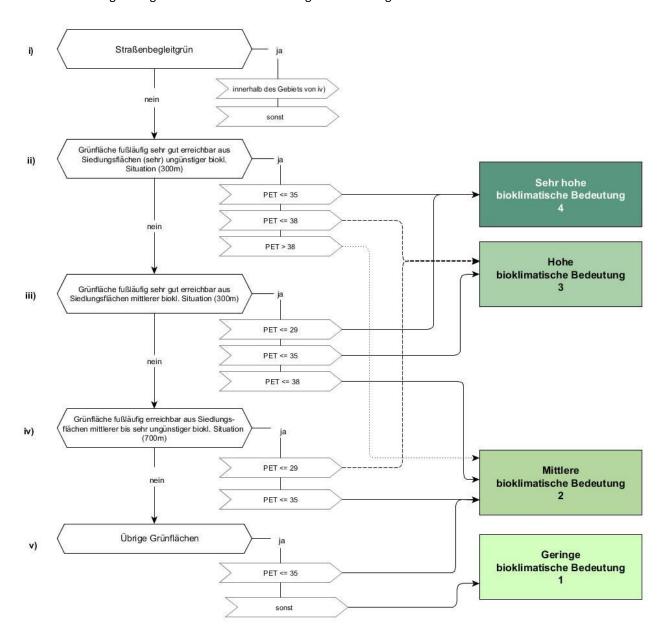


Abb. 34: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tag.

6.4 BERÜCKSICHTIGUNG DES KLIMAWANDELS

Um die praktische Arbeit mit den Planungskarten handhabbar zu gestalten, wurden keine neuen Planungshinweiskarten für die Zukunft erzeugt, sondern die bestehenden Karten um die Informationen eines Zukunftszenarios erweitert. In Abstimmung mit der Stadt Emmendingen wurde in den Planungshinweiskarten das 85. Perzentil des RCP-Szenarios 8.5 der nahen Zukunft (vgl. Kap. 2.3.1) berücksichtigt.

Sowohl in der Nacht- als auch in der Tagkarte wurden im Siedlungsraum diejenigen Flächen mit einem Symbol (Dreieck) markiert, welche zukünftig eine (sehr) ungünstige bioklimatische Situation aufweisen oder deren bioklimatische Situation sich in Zukunft um mindestens zwei Belastungsstufen verschlechtern wird.

6.5 DEMOGRAPHISCHE BETROFFENHEIT

Es existiert ein Zusammenhang zwischen thermischem Stress und Morbidität (Krankheitsfälle) bzw. Mortalität (Sterberate) sowie der Leistungsfähigkeit und dem Wohlbefinden einer Stadtbevölkerung. Neben kranken bzw. verletzten Menschen (mit bedingt durch ihre geringere Mobilität) gelten Kleinkinder (bis 6 Jahren) sowie Seniorinnen und Senioren (ab 65 Jahren) als besonders verletzlich. Eine 30 Jahre umfassende Zeitreihenstudie mit Gesamt-Mortalitätsdaten in Tagesauflösung in Baden-Württemberg konnte zeigen, dass mit zunehmender Wärmebelastung die Sterberaten ansteigen (Abb. 35).

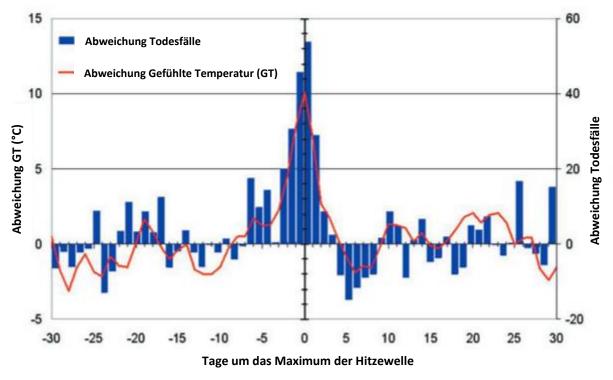


Abb. 35: Mittlere Hitzewelle (+/- 30 Tage) aus 9 Extremereignissen in Baden-Württemberg (10,7 Mio. Einwohner) zwischen 1968 und 1997. Basislinie: standardisierte Normalbedingungen; Erwartungswert (Koppe et al., 2003)

Allein im Hitzesommer 2003 kam es zu 35 000 zusätzlichen Todesfällen in Europa, davon 7000 in Deutschland und 1100 in Baden-Württemberg (Parlow 2016). Während dieser Hitzewelle kam es zu einer extrem langen Andauer von heißen Tagen und Rekordtemperaturen in den mittleren Breiten Westeuropas. Dank relativ trockener Luftmassen in Südwest- und Westdeutschland kam es zu weniger

Todesfällen als im Nachbarland Frankreich, wo die Hitze zusätzlich sehr schwül war (Koppe et al., 2003). Extrem hohe Gefühlte Temperaturen treten nämlich insbesondere bei einem hohen Wasserdampfgehalt auf (vgl. Abb. 6 in Kap. 2.3), welcher den thermischen Stress verstärkt. Die im Zusammenhang mit Hitze stehenden Todesfälle beinhalten verschiedene Todesursachen, wie etwa Herz-Kreislauf-Versagen, Dehydrierung, Thrombosen, Atemwegsprobleme und Nierenversagen. Zwar stirbt der Mensch nicht unmittelbar an Hitze, jedoch ist bei einer erhöhten Wärmebelastung ist davon auszugehen, dass die Krankheiten einen schwereren Verlauf nehmen und leichter zum Tod führen können.

Vor diesem Hintergrund wird das Thema der Hitzebelastung im Hinblick auf Bevölkerungsdichte und Risikogruppen in der Planungshinweiskarte aufgegriffen. In den Karten wird jeweils zwischen Demographischer Betroffenheit und Hoher demographischer Betroffenheit unterschieden. Als Grundlage dienen hierbei die demographischen Daten der Stadt Emmendingen zur Bevölkerungsdichte und zum Anteil an Kleinkindern und Senioren, welche mit den Siedlungsflächen verschnitten wurden. Eine demographische Betroffenheit liegt vor, wenn die Siedlungsfläche eine weniger günstige bioklimatische Situation oder schlechter aufweist und eine hohe Bevölkerungsdichte vorliegt. Eine Hohe demographische Betroffenheit liegt vor, sofern die Siedlungsfläche als (sehr) ungünstig bewertet wurde und eine hohe Bevölkerungsdichte sowie ein hoher Anteil an Kleinkindern und/oder Senioren aufweist.

6.6 ERGEBNISSE PLANUNGSHINWEISKARTEN

6.6.1 PLANUNGSHINWEISKARTE NACHT

Etwa 13 % der Emmendinger Siedlungsflächen weisen eine weniger günstige bioklimatische Situation auf und fallen damit in die mittlere Kategorie (Tab. 10). Dem stehen ca. 10 % (sehr) ungünstig bewerteter Siedlungsräume gegenüber, die überwiegend im Zentrum vorzufinden sind (Abb. 36). In diesen Flächen sollte nicht nur keine weitere Verdichtung erfolgen (insb. zu Lasten von Grünflächen), sondern vielmehr Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation angestrebt werden (Durchlüftung fördern, Vegetationsanteil erhöhen, etc.).

Die bioklimatische Belastung nimmt zum Siedlungsrand hin sowie in den kleineren Ortschaften ab. In Summe weisen mit etwa 76 % vergleichsweise viele Siedlungsflächen in Emmendingen mindestens günstige bioklimatische Bedingungen auf. Diese sind weniger empfindlich gegenüber Nutzungsintensivierungen, jedoch sollten klimaökologische Aspekte beachtet werden, um das günstige Bioklima nicht zu gefährden.

Tab. 10: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Sehr günstig	13,6	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Der Vegetationsanteil sollte erhalten werden.
2 = Günstig	62,7	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und die Baukörperstellung beachtet werden. Der Vegetationsanteil sollte erhalten werden.
3 = Weniger günstig	12,9	Mittlere bis hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Nachverdichtungen sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und die Baukörperstellung beachtet sowie möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
4 = Ungünstig	9,5	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Sie sollten sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Nachverdichtungen sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
5 = Sehr ungünstig	1,3	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sie sollten sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün/Freiflächen) erfolgen, stattdessen der Erhalt der Freiflächen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. Entsiegelungsmaßnahmen angestrebt werden.

Beinahe der Hälfte der Grünflächen im Emmendinger Stadtgebiet kommt eine hohe bzw. sehr hohe bioklimatische Bedeutung zu (ca. 35 % bzw. 7 %, Tab. 11). Neben den Kaltluftleitbahnen handelt es sich um größere städtische Grünflächen wie bspw. dem Stadtgarten, dem Goethepark oder dem Vollrathschen Park. Auf diesen Flächen sollten bauliche Eingriffe möglichst vermieden werden bzw. unter Berücksichtigung stadtklimatischer Belange erfolgen (Gebäudekörperstellung, Begrünung, etc.), um deren Funktion und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung zu erhalten.

Knapp 60 % der Grünräume weist eine *geringe* bis *mittlere bioklimatische Bedeutung* in der Nacht auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen einen ergänzenden Ausgleichsraum dar – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Ackerflächen und Waldgebiete. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

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

Tab. 11: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächen- anteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	2,8	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
2 = Mittlere	56,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
4 = Hohe	34,6	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
5 = Sehr hohe	6,6	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

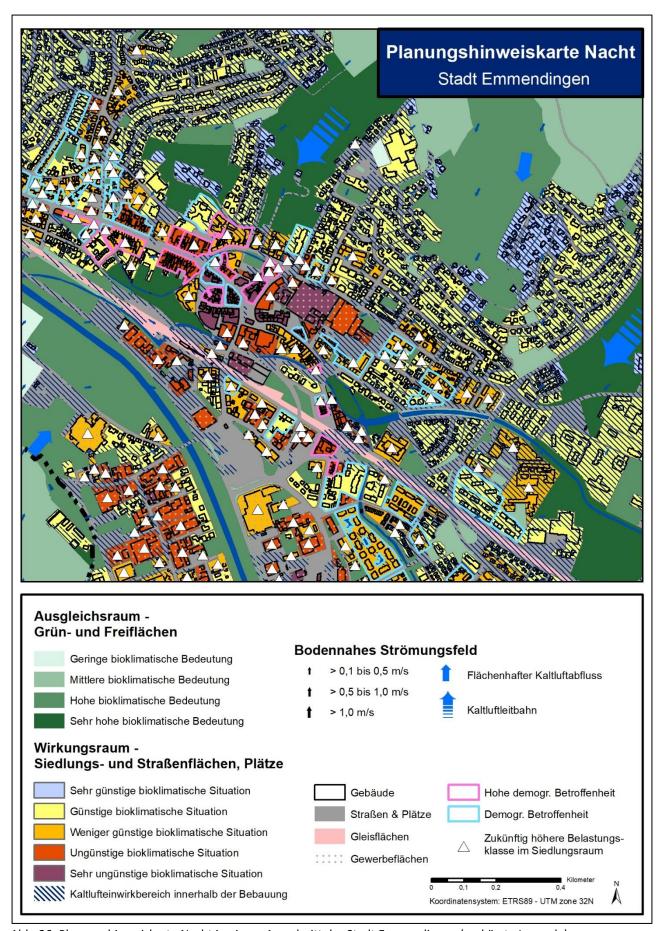


Abb. 36: Planungshinweiskarte Nacht in einem Ausschnitt der Stadt Emmendingen (verkürzte Legende)

6.6.2 PLANUNGSHINWEISKARTE TAG

Anders als in der Nacht zeigen die Siedlungsflächen am Tage mehrheitlich (81 %) eine *günstige* bis weniger günstige bioklimatische Situation (ca. 26 % bzw. 55 %, Tab. 12) und der Anteil an Flächen mit ungünstiger bioklimatischer Belastung überwiegt gegenüber denen mit sehr günstiger bioklimatischer Situation (14 % gegenüber 2 %). Sehr ungünstig bewertete Siedlungsflächen besitzen mit knapp 3 % den geringsten Anteil und sind überwiegend im Zentrum und im Bereich von Gewerbeflächen zu finden. Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen. Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und thermische Belastung am Tage höher ausfällt.

Etwa die Hälfte (52 %) der Grünflächen im gesamten Emmendinger Stadtgebiet besitzen aktuell eine geringe bzw. mittlere klimaökologische Bedeutung (ca. 35 % bzw. 17 %, Tab. 13). Dies betrifft hauptsächlich landwirtschaftlich genutzte Ackerflächen, die am Tage keine oder eine nur sehr geringe Aufenthaltsqualität bieten. Grünflächen mit einer sehr hohen klimaökologischen Bedeutung besitzen einen Anteil von knapp 4 % und enthalten überwiegend aus humanbioklimatisch belasteten Siedlungsflächen gut erreichbare Parkanlagen wie bspw. den Vollrathscher Park. Die übrigen 44 % der Grünräume im Stadtgebiet erfüllen eine Funktion als Ausgleichsraum und besitzen eine hohe klimaökologische Bedeutung. Hierbei handelt es sich überwiegend um Waldgebiete, welche fußläufig weniger gut erreichbar sind.

Tab. 12: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Sehr günstig	2,2	Es liegen humanbioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
2 = Günstig	25,8	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
3 = Weniger günstig	55,6	Auf einzelnen Teilflächen kann eine thermisch belastende Situation auftreten. Maßnahmen zur Verbesserung können sinnvoll sein, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
4 = Ungünstig	13,8	Es liegen überwiegend humanbioklimatisch ungünstige Bedingungen mit einem relevanten thermischen Belastungsniveau vor. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein. Dezentrale Grünanlagen sollten neugeschaffen werden.
5 = Sehr ungünstig	2,6	Es liegen sehr ungünstige Bedingungen mit einem hohen thermischen Belastungsniveau vor. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein. Dezentrale sollten neu geschaffen werden.

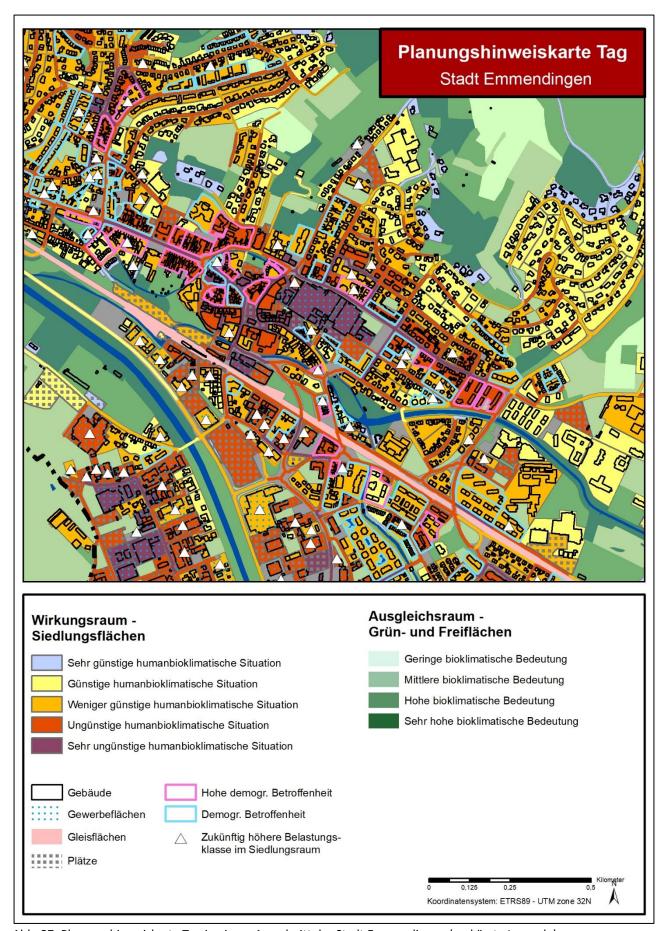


Abb. 37: Planungshinweiskarte Tag in einem Ausschnitt der Stadt Emmendingen (verkürzte Legende)

Tab. 13: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächen- anteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	34,6	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
2 = Mittlere	17,0	Frei- und Grünflächen mit einem geringen Anteil an verschattenden Vegetationselementen (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Grünstrukturen zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
3 = Hohe	44,5	Grünflächen, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch die Grünstrukturen überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. zu bewässern) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung außerhalb einer fußläufigen Erreichbarkeit, die an heißen Tagen aber als Rückzugsorte dienen können (z.B. Wälder).
4 = Sehr hohe	3,9	Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität (Verschattung), die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten als Rückzugsorte an heißen Tagen erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. zu bewässern), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.

7. Maßnahmenkatalog Stadtklima

Für Emmendingen wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert, die einzelnen Blockflächen räumlich zugeordnet werden können. Die Auswahl der Maßnahmen sowie deren Übertragung auf konkrete Stadtstrukturtypen erfolgten durch fachgutachterliche Einschätzung und basierend auf einer Literaturauswertung sowie den Erkenntnissen anderer Klimaanalysen (vgl. Berlin 2015, MUNLV 2010, MVI 2012).

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets (s. Tab. 14 bzw. Tab. 15) aus dem Portfolio der 19 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten ab (bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage). Zusätzlich fließen weitere Sachinformationen wie die demographische Betroffenheit ein. Die Ergebnisse sind jeweils als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Maßnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (bspw. ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich ist). Die einzelnen Maßnahmen sind stickpunktartig in Tab. 16 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 Emmendinger Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Einige Ausführungsbeispiele in der Stadt Emmendingen finden sich in der nachstehenden Abbildung (Abb. 38).



Abb. 38: Klimaanpassung in Emmendingen: Fassadenbegrünung am Rathaus (links), schattenspendende Bäume auf dem Schlossplatz (Mitte), erlebbares Wasser in der Kernstadt (rechts).

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Stadtgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (\rightarrow M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, \rightarrow 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 (\rightarrow 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.

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 (\rightarrow M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung

GFO-NFT

des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente¹⁶ oder energetische Sanierung¹⁷ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (\rightarrow *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.

Tab. 14: Handlungsempfehlungen für Emmendingen in Abhängigkeit der bioklimatischen Belastung am Tage (siehe Planungshinweiskarte Tag) und der Landnutzung.

Landnutzung	Bioklimatische Situation	Demographische Betroffenheit	Maßnahmen
	Ungünstig		M01: Innen- / Hinterhofbegrünung M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen M19: Anpassung des Raumnutzungskonzepts
Stadt- / Dorfkern	Sehr ungünstig		M01: Innen- / Hinterhofbegrünung M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen M19: Anpassung des Raumnutzungskonzepts
		X	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M04: Entsiegelung M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Weniger günstig	-	M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen
Industrie- / Gewerbefläche	Ungünstig		M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen M19: Anpassung des Raumnutzungskonzepts

-

 $^{^{\}rm 16}$ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

¹⁷ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.

	Sehr ungünstig		M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen M19: Anpassung des Raumnutzungskonzepts
		X	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
	Ungünstig		M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
Zeilen-/ Hochhausbebauung	Sehr ungünstig		M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
		X	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Ungünstig		M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
Einzel- / Reihenhausbebauung	Sehr ungünstig		M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M16: Fassadenbegrünung M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
		hoch	M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Weniger günstig		M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen
Straßen / Plätze	Ungünstig		M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M05: Bäume im Straßenraum erhalten und neu pflanzen M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen
	Sehr ungünstig		M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten M04: Entsiegelung M05: Bäume im Straßenraum erhalten und neu pflanzen M06: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen
	Keine		M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen
Grünfläche / Park / Wald	geringe		M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen
	hohe		M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen
	Sehr hohe		M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen

Tab. 15: Handlungsempfehlungen für Emmendingen in Abhängigkeit der bioklimatischen Belastung in der Nacht (siehe Planungshinweiskarte Nacht) und der Landnutzung.

Landnutzung	Bioklimatische Situation	Demographische Betroffenheit	Maßnahmen
	Ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M16: Fassadenbegrünung
Stadt- / Dorfkern	Sehr ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M12: Entdichtung (Rückbau) M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
		Х	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M04: Entsiegelung M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M16: Fassadenbegrünung
Industrie-/ Gewerbefläche	Sehr ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M12: Entdichtung (Rückbau) M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
•		X	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
	Ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten
Zeilen-/ Hochhausbebauung	Sehr ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M12: Entdichtung (Rückbau) M15: Dachbegrünung M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
•		X	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen
		hoch	M02: Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten
Einzel- / Reihenhausbebauung	Sehr ungünstig	-	M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten M16: Fassadenbegrünung M18: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen
•		hoch	M10: Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
G. O. Commi	Ungünstig	-	M13: Vermeidung von Austauschbarrieren
Straßen / Plätze	Sehr ungünstig	-	M13: Vermeidung von Austauschbarrieren
Grünfläche / Park /	Hohe Bedeutung	-	M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen M13: Vermeidung von Austauschbarrieren M14: Schutz und Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen
Wald	Sehr hohe Bedeutung	-	M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen M13: Vermeidung von Austauschbarrieren M14: Schutz und Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen

Tab. 16: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Emmendingen.

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

08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	 Bedeutung für den Kaltlufthaushalt Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodivers 	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)	
)9	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	 Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Standge Rauhigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die a Frischluft transportiert wird (allochthone Wette Während der Sommermonate und speziell Hitze tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Was Oberflächennahe Temperatur kann nachts über Wärmeabgabe bewirken 	Gewässer, Grün- und Freiflächen	
D	Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke	Partizipative Projekte (z.B. Quartiersmanagement) oder aus Bevölkerung heraus (z.B. Trinkpatenschaften, Urban Gardening)	 Minderungen der Vulnerabilität der Quartiersbevölkerung gegenüber thermischem Stress 	(thermisch belastete) Quartiere hoher Einwohnerdichte
ERE	EESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG			
1	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)	 Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in der Innenräumen achten)
2	Entdichtung (Rückbau)	Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen	 Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagsmanagement 	Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen)
3	Vermeidung von Austauschbarrieren	 Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dä (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehend vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Beba Schutz des Luftaustauschsystems 	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege, Plätze	
4	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	 Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung 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 Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft Synergien zur Biodiversität 		

REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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

8. Vertiefungsgebiete

8.1 ALLGEMEIN

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse erfolgten vertiefende Untersuchungen zu insgesamt fünf städtischen Entwicklungsflächen. Hierbei handelt es sich um die Baugebiete "Elzmättle", "Herrenmatten", "Unterer Lerchacker", "Vier Jauchert" und dem "Festplatz".

Dabei kommt das mikroskalige Modell ASMUS Green (Ausbreitungs- und Strömungs-Modell für Urbane Strukturen und Begrünung) zum Einsatz, welches für komplexe urbane Untersuchungsgebiete mit sehr kleinen horizontalen Maschenweiten konzipiert ist. Unterschiedliche Bebauungsstrukturen können detailliert aufgelöst und ihre Auswirkungen auf das Strömungsfeld und den Wärmehaushalt im innerstädtischen Bereich simuliert werden (GROSS 2012a, GROSS 2012b).

Die Modellierung der meteorologischen Parameter erfolgte für alle Vertiefungsgebiete mit einer Zellengröße von 4 m x 4 m. Für die Simulationen mit ASMUS Green müssen Nutzungsstruktur und Strukturhöhe als Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Diese Daten wurden sowohl für den Referenzzustand als auch für den Planzustand aufbereitet. In allen Fällen (Referenzzustand und Planzustand) wurde eine austauscharme Strahlungswetterlage betrachtet, bei der u.a. ein ausgeprägter Tagesgang der Strahlung und Temperatur vorliegt. Für die Modellierung wurden begrünte Flächen, wie Rasen, Fassadenbegrünung, etc. als gut mit Wasser versorgt angenommen. In einer solchen Situation kann die Wirksamkeit der Maßnahmen am besten untersucht werden. Es wurden sowohl die Lufttemperatur um 4 Uhr nachts als auch die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 14 Uhr simuliert.

8.2 MODELLIERUNG MIT DEM MIKROSKALIGEN STADTKLIMAMODELL ASMUS GREEN

ASMUS Green (Ausbreitungs- und Strömungs-Modell für Urbane Strukturen und Begrünung) ist ein numerisches Modell zur mikroskaligen Simulation der dreidimensionalen Wind- und Temperaturverteilung, sowie der thermischen Behaglichkeit innerhalb von Städten. Es gehört zu einer neueren mikroskaligen Modellgeneration und verbindet die Betrachtung der Strömung im Bereich von Gebäuden und Bäumen mit der Berechnung der Energiebilanz von begrünten und unbegrünten Oberflächen.

Die dreidimensionale Dimensionierung, sowie die Bauphysikalischen-/ Vegetationsparameter von Gebäuden und Bäumen haben direkten Einfluss auf die Simulationsergebnisse. So können zum Beispiel der typische Blattflächenindex einer Baumart und die Dachform eines Gebäudes mit in die Strömungsberechnungen einfließen.

Die Oberflächeneigenschaften von Gebäuden und Vegetation beeinflussen die simulierte Lufttemperatur unter anderem über ihre Albedo, Wärmeleiteigenschaften und vegetationsspezifischen Charakteristika (z.B. Transmissivität und Verdunstungseigenschaften).

Das Modell basiert auf den üblichen meteorologischen Grundgleichungen: Navier-Stokes- und Kontinuitäts-Gleichung, 1. Hauptsatz der Thermodynamik und einer Gleichung für die spezifische Feuchte. Gebäude und Bäume werden vom Modell explizit als dreidimensionale Körper mit impermeablem beziehungsweise semipermeablem Gittervolumen dargestellt. Ihre

Oberflächentemperaturen werden in Abhängigkeit von ihrer spezifischen Orientierung und ihren physikalischen Eigenschaften über eine Energiebilanz berechnet. ASMUS Green berechnet den kurz- und langwelligen Wärmestrom inklusive diffuser Mehrfachreflektion von Strahlung an Oberflächen und atmosphärischer Gegenstrahlung, den turbulenten fühlbaren Wärmestrom, den Wärmestrom aus der darunterliegenden Fläche (Erdboden bzw. Gebäude), sowie den turbulenten Verdunstungswärmestrom bei Bäumen und Oberflächenbegrünung. Die Verdunstung ist abhängig von der relativen Feuchte der Luft, der solaren Einstrahlung und insbesondere von dem den Pflanzen zur Verfügung stehenden Bodenwassergehalt. Dieser beeinflusst den Stomatawiderstand in Abhängigkeit von der Art der Vegetation. Der Bodenwassergehalt wie auch die Bodentemperatur kann direkt vorgegeben werden oder mit einer Langzeit-Simulation mittels ASMUS Green berechnet werden.

Das mikroskalige Modellgebiet ist Teil der atmosphärischen Grenzschicht. Die großräumige Wetterlage, ihre Änderung und Wirkung auf das Modellgebiet müssen berücksichtigt werden. ASMUS Green wird daher entweder mit einem eindimensionalen Grenzschichtmodell oder den Ergebnissen des mesoskaligen Modells FITNAH angetrieben, das den Zustand der Atmosphäre und ihre tageszeitlichen Variationen bis in eine Höhe von 2000 m simuliert. Auf diese Weise ist ein Antrieb des Modells mit unterschiedlichen Ausgangstemperaturen und thermischen Schichtungen möglich.

Als Eingangsdaten benötigt ASMUS Green neben den meteorologischen und Bodenwasser-Daten Informationen über die Lage und Größe von Gebäuden, Bäumen, Straßen, begrünten und anderen Oberflächen. Ihre Albedo und Wärmeleitfähigkeit sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften die für eine Simulation notwendig sind.

8.3 ERGEBNISSE

8.3.1 UNTERER LERCHACKER / VIER JAUCHERT

Aufgrund der räumlichen Nähe wurden die beiden Baugebiete *Unterer Lerchacker* und *Vier Jauchert* für die Modellierung zu einem großen Vertiefungsgebiet zusammengefasst. Das Rechengebiet nimmt bei einer Abmessung von 720 m x 600 m eine Gesamtfläche von ca. 43,2 ha ein. Das Areal befindet sich am Siedlungsrand im Norden von Kollmarsreute und ist gegenwärtig von landwirtschaftlicher Nutzung geprägt bzw. liegt als Wiese brach. Der Planbereich ist in den Vorentwurfskonzepten vom 04.10.2018 bzw. 06.11.2018 als Gewerbefläche (Unterer Lerchacker) bzw. als gemischte Baufläche (Vier Jauchert) dargestellt (o. Abb.). Bei den Wohngebäuden im Baugebiet Vier Jauchert handelt es sich um Mehrfamilienhäuser mit drei Vollgeschossen, welche zusätzlich mit einer extensiven Dachbegrünung (50 % der Dachfläche) ausgestattet und modelliert wurden (Abb. 39). Weiterhin wurden Ausgleichspflanzungen (in Form von neuen Bäumen) berücksichtigt, sodass sich der Baumanteil auf den Planflächen selbst trotz der Umgestaltung nicht weiter reduziert.

NACHTSITUATION

Unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen ist über den derzeitigen Freiflächen der Plangebiete eine nächtliche Lufttemperatur um die 17 °C zu verzeichnen (Abb. A 10 im Anhang). Das Temperaturniveau fällt damit höher aus als über siedlungsfernen Grünflächen Emmendingens, übernimmt für die direkt angrenzende Bebauung jedoch eine gewisse Kühlfunktion. Stark versiegelte Flächen wie die südlich an das Baugebiet *Vier Jauchert* angrenzenden Gewerbeflächen, sowie einzelne Straßen (bspw. Hauptstraße, Kollmarsreuter Straße) sind mit mehr als 19 °C am wärmsten. Die durchschnittliche Lufttemperatur um 4 Uhr beträgt 17,9 °C. Abb. A 11 (Anhang) zeigt eine Zunahme der nächtlichen Lufttemperatur, vor allem im Bereich der geplanten Bauflächen.

Im Differenzenplot, Abb. 40 (oben), sind die Unterschiede zwischen den beiden Rechnungen kenntlich gemacht. Die zusätzlichen Baukörper und die Versiegelung von Freiflächen führen zu einer Zunahme der bodennahen nächtlichen Temperatur von lokal bis zu 3,5 K. Die thermische Wirkung beschränkt sich überwiegend auf die Planflächen selbst. Das gesamte Untersuchungsgebiet erwärmt sich durch die modellierte Bebauung um 0,7 K im Vergleich zur gegenwärtigen Situation.



Abb. 39: Planzustände der Vertiefungsgebiete Unterer Lerchacker und Vier Jauchert.

TAGSITUATION

Abgesehen von einzelnen Baumgruppen im Baugebiet *Vier Jauchert* sind die Plangebiete Freiflächen, die unter den angenommenen Bedingungen eines autochthonen Sommertags (d.h. ohne Bewölkung) eine starke Wärmebelastung aufweisen (ca. 38 °C PET; Abb. A 12 im Anhang). Flächen mit mäßiger oder schwacher Wärmebelastung sind vor allem im Verschattungsbereich von Gebäuden und Vegetation zu finden. Grundsätzlich befinden sich solche Verschattungsbereiche aufgrund des Sonnenstands um diese Uhrzeit nördlich und östlich von Gebäuden.

In Abb. A 13 im Anhang, die das Ergebnis der Planfall-Rechnung darstellt, ist wiederum eine Veränderung vorwiegend im Bereich der Baugebiete zu sehen. Der Differenzenplot (siehe Abb. 40 unten), in dem die PET-Unterschiede dargestellt sind, veranschaulicht die Unterschiede und die Wirkung der modellierten Planungen deutlich. Am Tage erreichen die Differenzen zwischen Ist- und Planzustand eine deutlich größere Spannweite als in der Nacht. Aufgrund von Begrünungsmaßnahmen (Dachbegrünung, Grünachsen zwischen den Gebäuden) und Verschattung durch Gebäude und Bäume zeigt sich im Baugebiet *Vier Jauchert* eine Reduktion der Wärmebelastung um bis zu 10,8 K. Wohingegen die Baufläche *Unterer Lerchacker* eine Zunahme der PET um lokal bis zu 6,4 K erfährt. Dies liegt in dem vergleichsweise hohen Versiegelungsgrad der großen Parkplatzflächen begründet. Gegenüber dem Basisszenario nimmt die PET im Untersuchungsgebiet um 0,1 K zu.

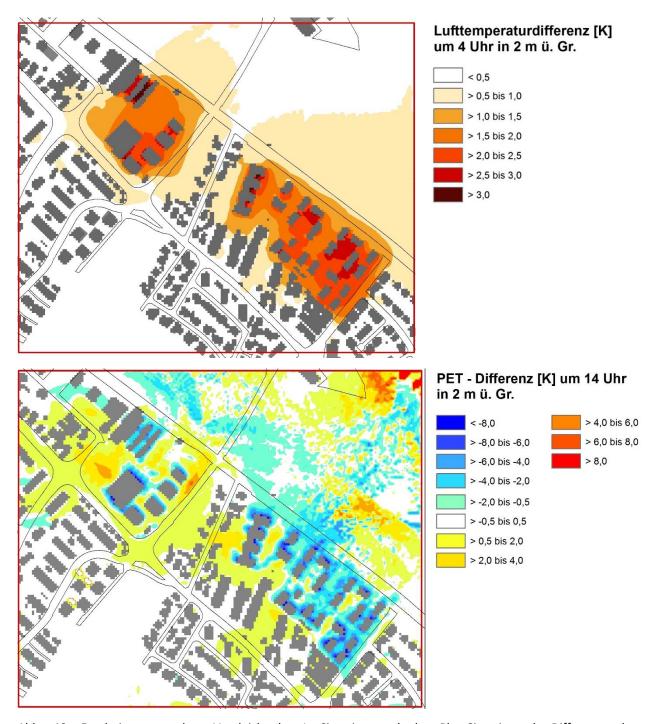


Abb. 40: Ergebnisse aus dem Vergleich der Ist-Situation und der Plan-Situation als Differenzenplots (Lufttemperatur um 4 Uhr - oben, Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr - unten).

MAßNAHMEN UND EMPFEHLUNGEN

Während für die Gewerbefläche "Unterer Lerchacker" insbesondere die Tagsituation relevant ist, sind Tag- und Nachtsituation auf der gemischten Baufläche "Vier Jauchert" gleichermaßen wichtig. Die Parkplatzfläche des unteren Lerchackers stellt am Tag einen Belastungsschwerpunkt dar und sollte nach Möglichkeit klimaökologisch optimiert werden. Damit sich die Asphaltoberflächen tagsüber nicht so stark aufheizen, empfiehlt sich die Verwendung von teilversiegelten (anstelle von vollversiegelten) Materialen, wie etwa Rasengittersteinen. Weiterhin ist es möglich, helle Betonfarben zu verwenden und damit die Aufheizung am Tage zu reduzieren. Ein weiteres Problem der Parkplatzfläche stellt die mangelnde Verschattung dar. Ausgewachsene, große Bäume werfen einen größeren Schatten als

Jungbäume. Eine bessere Verschattungssituation durch Bäume (und damit auch geringere PET-Werte) ist daher erst nach vielen Jahren mit dem Auswachsen der Bäume zu erwarten. Auf der gemischten Baufläche "Vier Jauchert" kann das Temperaturverhalten optimiert werden, indem die Dächer intensiv (statt extensiv) begrünt und zusätzlich mit Fassadenbegrünung ergänzt werden. Statt einer Fassadenbegrünung können auch weiße bzw. helle Fassaden dafür sorgen, die Temperaturen zu senken.

8.3.1 HERRENMATTEN

Das Rechengebiet *Herrenmatten* nimmt bei einer Abmessung von 448 m x 300 m eine Gesamtfläche von ca. 13,4 ha ein. Das Areal befindet sich im Ortsteil Kollmarsreute direkt an den südlichen Siedlungsrand der Emmendinger Kernstadt angrenzend. Das Baugebiet ist gegenwärtig von landwirtschaftlicher Nutzung geprägt und ist im städtebaulichen Entwurf vom 09.02.2016 als Wohnbaufläche dargestellt (o. Abb.). Bei den modellierten Wohngebäuden handelt es sich überwiegend um Doppelhaushälften und Reihenhäuser (zwei Vollgeschosse) und am südlichen Saum um Mehrfamilienhäuser mit vier Vollgeschossen (Abb. 41). Es wurden keinerlei gebäudebezogene Maßnahmen umgesetzt.

NACHTSITUATION

Die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im gesamten Vertiefungsgebiet beträgt zwischen 15,1 °C auf siedlungsfernen Wiesen und Feldern und 20,6 °C im Siedlungsgebiet (Abb. A 14 im Anhang). Die durchschnittliche Lufttemperatur um 4 Uhr liegt bei 16,3 °C. Das Plangebiet ist gegenwärtig unbebaut und weist in der Nacht ein insgesamt niedriges Temperaturniveau von 16 °C auf. Aufgrund der geplanten Bebauung des Areals zeigt das Modell eine bodennahe Erwärmung des gesamten Untersuchungsgebiets um 0,8 K (Abb. A 15 im Anhang).

Aufgrund der zusätzlichen Bebauung und Versiegelung erhöht sich der Anteil der erwärmten Baumasse, während gleichzeitig die flächeninterne Kaltluftproduktion größtenteils verloren geht. Dies führt zu einer Zunahme der bodennahen nächtlichen Temperatur von lokal bis zu 3,7 K (Abb. 42, oben). Zudem werden die im Norden angrenzenden Bestandsflächen bis zur Kepplerstraße durch das Baugebiet mit einer Temperaturerhöhung um 1 K beeinflusst.



Abb. 41: Planzustand des Vertiefungsgebiets Herrenmatten.

TAGSITUATION

Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung auf die Freiflächen des Plangebiets *Herrenmatten* weisen diese gegenwärtig eine starke Wärmebelastung auf (37,1 °C bis 38,9 °C; Abb. A 16 im Anhang). Auch die angrenzenden Wohngebäude sind thermisch belastet. In stark begrünten und vor allem mit Bäumen bepflanzten Gärten treten vereinzelt geringere Temperaturen der PET auf. Mit Umsetzung des Planvorhabens verringert sich die mittlere Physiologisch Äquivalente Temperatur im Untersuchungsgebiet um 1 K auf durchschnittlich 37 °C (Abb. A 17 im Anhang).

Die im Vergleich zu den Doppel- und Reihenhäusern deutlich höheren Mehrfamilienhäuser im Süden des Baugebiets besitzen einen ausgeprägten Schattenwurf und reduzieren die PET lokal um bis zu 9 K (Abb. 42). Im Gegensatz dazu erwärmen sich versiegelte Freiflächen wie Straßen und Stellplätze am Tage zum Teil stärker als landwirtschaftlich genutzte Ackerflächen, so dass in diesen Bereichen die PET im Planfall um bis zu 2,7 K höher liegt.

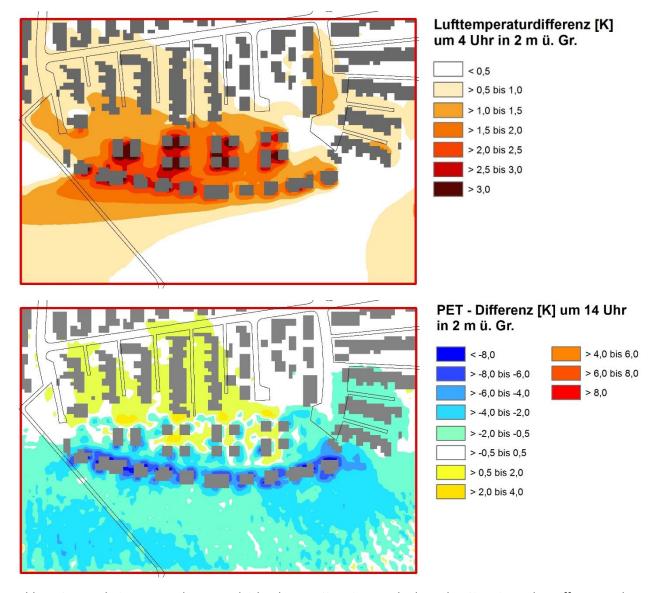


Abb. 42: Ergebnisse aus dem Vergleich der Ist-Situation und der Plan-Situation als Differenzenplots (Lufttemperatur um 4 Uhr - oben, Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr - unten).

MAßNAHMEN UND EMPFEHLUNGEN

Das Plangebiet Herrenmatten befindet sich am südlichen Siedlungsrand im unmittelbaren Einfluss von flächenhaften Kaltluftabflüssen. Die gegenwärtigen, noch unbebauten Ackerflächen haben insbesondere

nachts eine hohe bioklimatische Bedeutung (vgl. Planungshinweiskarte Nachtsituation). Die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen ist dementsprechend hoch. Bei der Erschließung des Gebietes muss daher insbesondere auf die nächtliche Strömungssituation geachtet werden. Die Wohnbebauung nördlich des Plangebietes profitiert derzeit von der Kaltluft aus dem Süden bzw. Südosten. Damit sich die Bestandsbebauung weiterhin im Einwirkbereich von Kaltluft befindet, sollten die neu geplanten Gebäude sehr niedrig sein und sich parallel zur Kaltluftströmung ausrichten (Südost-Nordwest-Orientierung der Gebäude, inbesondere bei den Reihenhäusern). Der südliche Saum mit den relativ dichten viergeschossigen Mehrfamilienhäusern stellt keine optimale Erschließung für den Siedlungsrand dar. Diese Gebäude behindern die Kaltluftströmung aus dem Südosten, was einen Nachteil für die nördlich angrenzenden Gebäude darstellt. Aus Sicht des Kaltlufthaushaltes empfiehlt es sich, auf die Bebauung des südlichen Saumes zu verzichten oder zumindest nur die Hälfte der Mehrfamilenhäuser zu realisieren und damit mehr Abstandsflächen zwischen den einzelnen Gebäuden zu schaffen.

Um dennoch mehr Wohneinheiten realisieren zu können, besteht auch die Möglichkeit einer "doppelten Innenentwicklung". Dies bedeutet, dass Flächenreserven nicht nur baulich, sondern auch in Bezug auf Stadtgrün entwickelt werden. Mit einer geringen Flächeninanspruchnahme (wenige hohe statt viele breite, flache Gebäude) ist es möglich, bestehende Grünflächen zu schützen oder gar aufzuwerten. Bei hohen Gebäuden muss jedoch besonders auf die richtige Ausrichtung der Baukörper und ausreichend Abstandsflächen zwischen den Gebäuden geachtet werden, damit die Kaltluftströmung nicht zu stark beeinträchtigt wird.

8.3.1 ELZMÄTTLE

Das Rechengebiet *Elzmättle* nimmt bei einer Abmessung von 200 m x 400 m eine Gesamtfläche von 8,0 ha ein. Das Baugebiet befindet sich im Nordwesten des Ortsteils Wasser zwischen der Baseler Straße und der Elz. Die Planfläche wird zurzeit landwirtschaftlich genutzt und ist in der Vorentwurfsplanung von Dezember 2018 als Wohnbaufläche dargestellt (o. Abb.). Bei den modellierten Wohngebäuden handelt es sich um Doppelhäuser, Reihenhäuser und Geschosswohnungsbauten mit zwei bis drei Vollgeschossen. Alle Pultdächer sind mit extensiver Dachbegrünung versehen. Außerdem sind etwa 40 % der Stellflächen als teilversiegelt in die Modellierung eingegangen (Abb. 43).

NACHTSITUATION

Das Plangebiet ist gegenwärtig unbebaut und weist in der Nacht ein insgesamt niedriges Temperaturniveau von 16,7°C bis 17,3°C auf (Abb. A 18 im Anhang). Das Temperaturfeld wird am Westrand durch die Bestandbebauung beeinflusst. Die hier auftretenden Werte liegen in einer Größenordnung von 18,0 °C bis 23,5 °C. Die durchschnittliche Lufttemperatur um 4 Uhr liegt bei 17,5 °C. Aufgrund der geplanten Bebauung des Areals zeigt das Modell eine bodennahe Erwärmung des gesamten Untersuchungsgebiets um 0,8 K (Abb. A 19 im Anhang).

Die Zunahme der bodennahen nächtlichen Temperatur beträgt bis zu 2,4 K (Abb. 44, links). Die angrenzenden Siedlungsflächen bleiben durch die Bebauung nahezu unberührt.

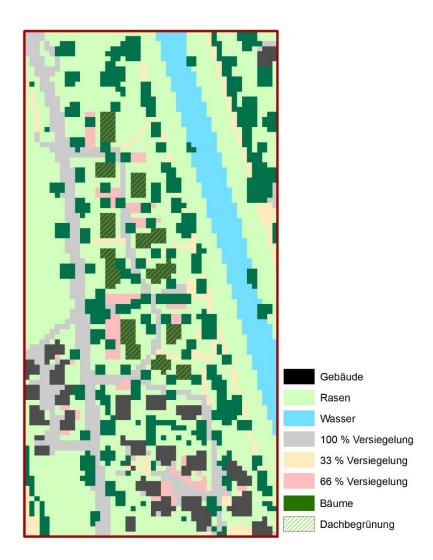


Abb. 43: Planzustand des Vertiefungsgebiets Elzmättle.

TAGSITUATION

Das Plangebiet *Elzmättle* weist gegenwärtig eine große Spannweite der Physiologisch Äquivalenten Temperatur von 32,7 °C bis nahezu 39 °C auf (Abb. A 20 im Anhang). Das entspricht einer mäßigen bis starken Wärmebelastung. Die mit bis zu 41 °C höchsten Temperaturen herrschen tagsüber auf den versiegelten Flächen des südlich angrenzenden Siedlungsgebiets. Mit Umsetzung des Planvorhabens erhöht sich die mittlere Physiologisch Äquivalente Temperatur im gesamten Untersuchungsgebiet um 0,9 K von durchschnittlich 35,4 °C auf 36,3 °C (Abb. A 21 im Anhang).

Im Differenzenplot (Abb. 44, rechts) lässt sich erkennen, das vor allem die dreigeschossigen Gebäude sowie die zusätzlichen Baumpflanzungen im Norden des Baugebiets aufgrund ihrer Verschattungswirkung positiven Einfluss auf die dortige PET besitzen. In diesem Bereich führt das Planvorhaben zu einer Abkühlung um bis zu 8,8 K. Im Gegensatz dazu nimmt die Physiologisch Äquivalente Temperatur im übrigen Plangebiet überwiegend zu (lokal bis zu 6 K) und beeinflusst auch die Umgebung inkl. Bestandsgebäude mit einer Erhöhung der PET um die 2 K.

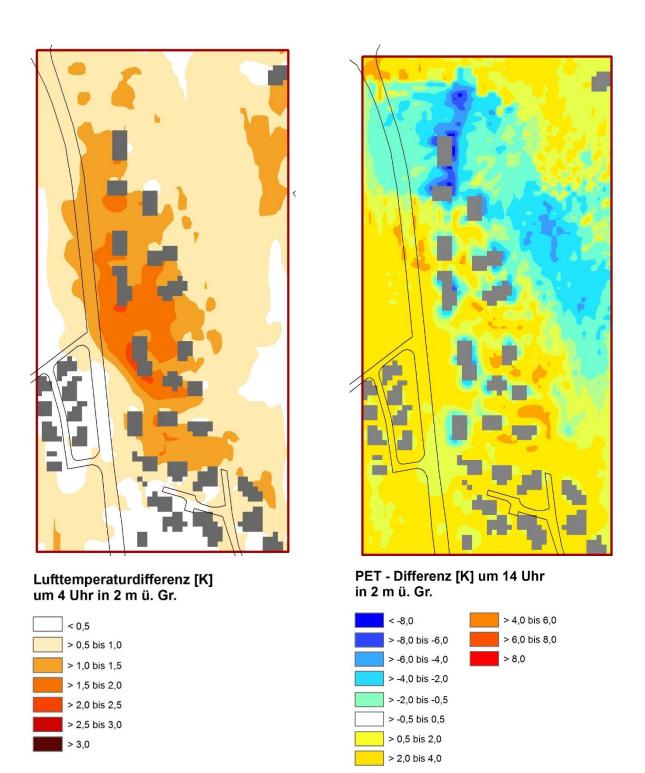


Abb. 44: Ergebnisse aus dem Vergleich der Ist-Situation und der Plan-Situation als Differenzenplots (Lufttemperatur um 4 Uhr - links, Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr -rechts).

MAßNAHMEN UND EMPFEHLUNGEN

Da im Plangebiet "Elzmättle" unter austauscharmen Bedingungen südwestliche Winde vorherrschend sind, wäre eine Ausrichtung der Baukörper entlang dieser Strömungsrichtung empfehlenswert. Fast alle Baukörper in der westlichen Hälfte des Plangebiets haben eine Nord-Süd-Ausrichtung und schwächen damit die Kaltluftströmung ab. Insbesondere bei den höheren Gebäuden (mehr als 2 Geschosse) sollte die Orientierung in Südwest-Nordost-Richtung gegeben sein, um die Barrierewirkung zu minimieren. Dagegen kann die Kaltluft Gebäude mit nur 1-2 Geschossen leichter überströmen, sodass die Baukörperausrichtung in diesem Fall nicht so entscheidend ist. Dachbegrünung ist insbesondere auf den

niedrig-geschossigen Gebäuden empfehlenswert, weil sie auch noch in Bodennähe (2 m ü. Grund) zu einer Reduzierung der Temperatur beitragen kann, wogegen bei höheren Gebäuden lediglich die oberen Geschosse von der Dachbegrünung profitieren können. Der Abkühlungseffekt im Plangebiet kann neben der Dachbegrünung zusätzlich durch Fassadenbegrünungen, helle Fassaden oder Bäume vor den Gebäudekörpern (insbesondere an Süd- und Westfassaden) sinnvoll ergänzt werden.

8.3.1 FESTPLATZ

Das Rechengebiet *Festplatz* nimmt bei einer Abmessung von 300 m x 384 m eine Gesamtfläche von ca. 11,5 ha ein. Die Planfläche befindet sich im Süden der Emmendinger Kernstadt direkt an der B3. Das Areal ist derzeit nahezu vollversiegelt und wird als öffentliche Parkplatzfläche genutzt. Laut Rahmenplan vom 10.02.2019 soll die Fläche mit Wohn- und Gewerberäumen umstrukturiert und im Nordwesten zudem ein Parkhaus errichtet werden (o. Abb.). Die modellierten Gebäude besitzen eine Höhe von drei bis vier Vollgeschossen und sind, wie auch das Parkhaus, mit einer extensiven Dachbegrünung von 50 % in die Modellierung eingegangen (Abb. 45). Die Nordöstlich angrenzenden Grünflächen bleiben zu einem Großteil erhalten bzw. werden stellenweise erweitert.

NACHTSITUATION

Die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im gesamten Vertiefungsgebiet beträgt zwischen 18,0 °C und 23,2 °C. (Abb. A 22 im Anhang). Stark versiegelte Flächen mit einem hohen Bauvolumen sind mit mehr als 20 °C am wärmsten. Das Plangebiet ist gegenwärtig großflächig versiegelt und weist in der Nacht ein für Emmendingen relativ hohes Temperaturniveau von 19,4 °C auf. Aufgrund der geplanten Bebauung des Areals zeigt das Modell eine bodennahe Erwärmung des gesamten Untersuchungsgebiets um 0,4 K (Abb. A 23 im Anhang). Vor allem die geplanten Gebäude im Baugebiet sorgen in der Nacht für eine Zunahme der bodennahen nächtlichen Temperatur um stellenweise bis zu 1,9 K (Abb. 46, links).

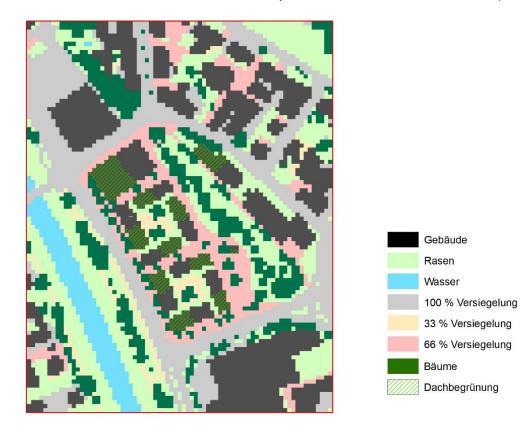


Abb. 45: Planzustand des Vertiefungsgebiets Festplatz.

TAGSITUATION

Aufgrund der wenigen Verschattungselemente im Zentralbereich des Plangebiets weist der öffentliche Parkplatz derzeit eine starke bis extreme Wärmebelastung auf (38,9 °C bis 41,8 °C; Abb. A 24 im Anhang). Auch die angrenzenden Wohngebäude sind thermisch stark belastet. Im Bereich der Elz und deren Grünflächen ist, überwiegend bedingt durch die Verdunstungskühlung, eine geringere Physiologisch Äquivalente Temperatur vorzufinden. Die Umsetzung des Planvorhabens führt innerhalb des gesamten Vertiefungsgebiets zu einer Verringerung der PET um durchschnittlich 0,9 K (Abb. A 25 im Anhang). Auffällig ist die Reduktion der PET am Tage um bis zu 11,4 K im Nahfeld der Gebäude. Grund hierfür ist zum einen der Schattenwurf der Gebäude an sich sowie die mit Dachbegrünung umgesetzten Maßnahmen, gebäudebezogenen zum anderen die modellierten Entsiegelungs-Teilversiegelungsmaßnahmen (Abb. 46, rechts). Eine Zunahme der Physiologisch Äquivalenten Temperatur findet in nur geringem Maße und nur vereinzelt statt (bspw. durch das Entfernen der Bäume südlich des Gebäudes der KFZ-Zulassungsstelle).

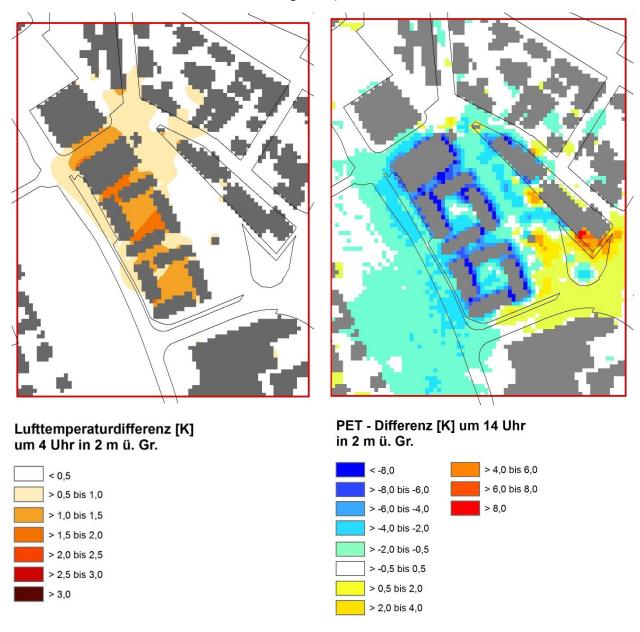


Abb. 46: Ergebnisse aus dem Vergleich der Ist-Situation und der Plan-Situation als Differenzenplots (Lufttemperatur um 4 Uhr - oben, Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr - unten).

MAßNAHMEN UND EMPFEHLUNGEN

Während sich das Klima in der Tagsituation infolge des Planvorhabens sogar verbessert, kommt es zu einer Verschlechterung in der nächtlichen Situation. Gerade im Wohnraum sollte sich die nächtliche Temperatur aber möglichst nicht zu stark erhöhen. Dem ist entgegenzuwirken, indem der Versiegelungsgrad weiter reduziert wird (z.B. bei den Erschließungswegen), die Innenhöfe stärker begrünt werden (Rasen statt Teilversiegelung) und die Albedo (durch helle Oberflächenmaterialien) erhöht wird.

9. Zusammenfassung

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation berechnet. Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel). Zur Innwertsetzung und Erstellung von Planungskarten wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

ZENTRALE ERGEBNISSE

Bei Betrachtung der bodennahen Lufttemperatur zeigt sich eine nächtliche Überwärmung der städtischen Bereiche – so weisen die Emmendinger Kernstadt oder hochversiegelte Gewerbeflächen um bis zu 5 °C höhere Temperaturen als das natürliche, weitgehend unbebaute Umland auf. Dieser für Städte 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 Emmendingens 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.

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 Emmendingen der Bergfriedhof mit Stadtgarten und westlich angrenzenden Freiflächen, die Grün- und Freiflächen entlang des Fronbächles am Weiherberg, sowie der Grünzug Haselwald-Spitzmatten zwischen Brettenbach und Rheintalbahn, die Kaltluft bis weit in den thermisch belasteten Siedlungsraum tragen. Auch die von Landeck bis Mundingen reichenden Freiflächen entlang des Weißbachs sowie die nördlich an Windenreute angrenzenden Wiesen und Äcker dienen den jeweiligen Stadtgebieten als Leitbahnen zur Kaltluftversorgung.

Zudem können (intakte) städtische Grünflächen einen kühlenden Effekt auf Ihr näheres Umfeld haben. In Emmendingen sind diesbezüglich der Vollrathscher Park, Goethepark und der Stadtgarten hervorzuheben, deren kühlende Wirkung auf die umliegende Bebauung ausstrahlt. Neben Parks wirken oftmals Friedhöfe (z.B. Alter Friedhof), Sportflächen (z.B. des FC Emmendingen) oder Kleingärten aufgrund ihrer Grünprägung positiv auf das Stadtklima ein.

PLANUNGSHINWEISKARTEN

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Emmendinger Stadtklimaanalyse und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist das Inwertsetzen der Ergebnisse, z.B. in Form der beiden nach Nacht und Tag unterschiedenen Planungshinweiskarten (PHK). In diesen wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als "Wirkungsraum" sowie der Grünflächen als "Ausgleichsraum" hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation vorgenommen und mit allgemeinen Planungshinweisen verbunden. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnene Abwägungsmaterial dar.

In der Planungshinweiskarte Nacht orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt des Stadtgebiets, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen bzw. den für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden. Auf diesen Flächen sollten bauliche Eingriffe möglichst vermieden werden bzw. unter Berücksichtigung stadtklimatischer Belange erfolgen (Gebäudekörperstellung, Begrünung, etc.), um deren Funktion und die Durchlüftung der angrenzenden Bebauung zu erhalten. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur ausgerichtet, d.h. (siedlungsferne) Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind von geringerer Bedeutung. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung jedoch ggf. neu vorgenommen werden. Neben den Kaltluftleitbahnen ist in der Karte das Strömungsfeld in Pfeilsignatur dargestellt, um das Strömungssystem außerhalb der Siedlungsräume abzubilden und damit mögliche klimaökologische Konflikte bei etwaigen größeren Vorhaben erkennen zu können.

Die Bewertung des Siedlungsraums spiegelt die nächtliche Überwärmung wider. Entsprechend weist die Emmendinger Innenstadt die ungünstigsten Bedingungen auf. Auch in den hochversiegelten Gewerbegebieten fällt die Belastung hoch aus, doch liegt der Fokus in der Planungshinweiskarte Nacht auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit auf der Wohnbebauung. In den ungünstig bewerteten Flächen sollte nicht nur keine weitere Verdichtung erfolgen (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen), sondern vielmehr Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation angestrebt werden (Durchlüftung fördern, Vegetationsanteil erhöhen, etc.). Günstige bioklimatische Bedingungen sind vornehmlich am Stadtrand und den umliegenden Gemarkungen zu finden. Diese sind weniger empfindlich gegenüber Nutzungsintensivierungen, jedoch sollten klimaökologische Aspekte beachtet werden, um das günstige Bioklima nicht zu gefährden. Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, doch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Die Planungshinweiskarte Tag betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung, um die Auswirkungen auf die Wohn- sowie arbeitende Bevölkerung abzubilden. In den Vordergrund rücken zudem der Straßenraum für Wegebeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen. Die Bewertungen einzelner Flächen weichen teilweise von der Nachtsituation ab, was durch eine andere Farbwahl kenntlich gemacht werden soll.

Dies wird gerade bei den Grünflächen deutlich, deren Bedeutung dann am höchsten ist, wenn sie eine hohe Aufenthaltsqualität durch verschattete Bereiche bieten und fußläufig gut erreichbar sind. Für den Kaltlufthaushalt wichtige Freiflächen wie bspw. Haselwald-Spitzmatten sind an Sommertagen dagegen

von geringerer Bedeutung, da die fehlende Verschattung zu einer starken Wärmebelastung führt. Umgekehrt weisen kleinere Parkanlagen am Tage teilweise eine höhere Bewertung als in der Nacht auf (z.B. Parkanlage am Maturanahaus). Die höchsten klimaökologischen Funktionen erfüllen Grünflächen, denen sowohl tagsüber als auch nachts eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird. Grünflächen wie bspw. der Stadtgarten, der Goethepark oder Vollrathscher Park sind somit aus stadtklimatischer Sicht besonders erhaltens- und schützenswert.

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

STADTKLIMATISCHE MAßNAHMEN

Für Emmendingen 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 Emmendinger 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

- BBSR (2017) Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- Berlin (2015) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Planungshinweiskarte Stadtklima 2015. Begleitdokument zur Online-Version. Online: www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db411_01.htm (Abruf 27.01.2020).
- BfN (2016) Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Cubasch U., et al. (2013): Introduction. In: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Deutschländer T., Mächel H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur G., Jacob D., Schuck-Zöller S. (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Deutschland.
- DFG (1988) Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD Deutscher Wetterdienst (2016): Nationaler Klimareport 2016.
- DWD (2019a) Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon (Abruf 21.01.2020).
- DWD (2019b) Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: https://cdc.dwd.de/portal/ (Abruf 21.01.2020).

- DWD (2020) Deutscher Wetterdienst: Unwetterklimatologie: Hitze . Online: www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hitze/hitze.html (Abruf 27.04. 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 (Abruf 21.06.2019).
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, WMO Bulletin, 58(3):175-183.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynmics Research (10): 483-498.
- CORDEX framework, WMO Bulletin, 58(3):175-183.
- Gross, G (2012a): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. Meteorol. Z. 21, No. 2, 173–181.
- Gross, G. (2012b): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. Meteorol. Z. 21, No. 4, 400–412.
- 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.
- Koppe, Ch., G. Jendritzky, G. Pfaff (2003): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. In: DWD, Klimastatusbericht 2003: 152-162.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn.

- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich.Teil 2, Maßnahmen. Environmental SciencesEurope 2011: 23:21.
- LUBW (2020a) Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Klimawandel und Anpassung: Klimawandel betrifft alle. Online: https://www.lubw.badenwuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung (Abruf am 14.1.2020).
- LUBW (2020b) Landesanstalt für Umwelt,
 Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:
 Daten- und Kartendienst der LUBW
 Online: https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pag
 es/map/default/index.xhtml (Abruf am 4.2.2020).
- 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.
- Matzarakis, A. (2007): Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus, Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 16: 73-80.
- Moss R. H., et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756.
- MUNLV (2010) Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- MVI (2012) Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Parlow, E., Scherer, D., & Fehrenbach, U. (2006): Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein

- (REKLISO)-Abschlussbericht. Regionalverband Südlicher Oberrhein, Freiburg.
- Parlow, E. (2016): Regionale Klimaveränderungen und sich daraus ergebende Auswirkungen auf das Stadtklima, Schwerpunkt Region Oberrhein.

 Online: https://www.fortbildung-klimawandel.de/wp-content/uploads/2016/08/Vortrag-1.Seminar_1_Prof-Parlow.compre ssed.pdf (Abruf am 28.4.2020).
- Peters G. P., et al. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. Nat. Clim. Change 3, 4–6.
- Riach, N., N. Scholze, R. Glaser, S. Roy, B. Stern (2019): Klimawandel am Oberrhein: Ein zweisprachiges Dossier mit 24 Karten und 6 Begleittexten.
- 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 (Abruf am 4.2.2020).
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5.
 Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1.

 Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- 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 (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.
- Wattendorf, P., F. Philipps, P. Höldin & W. Konold (2012): Entwicklung eines Konzepts zum Monitoring von Klimafolgen und Anpassungsmaßnahmen für einen Modellraum in Baden-Württemberg. Forschungsbericht KLIMOPASS.

Anhang

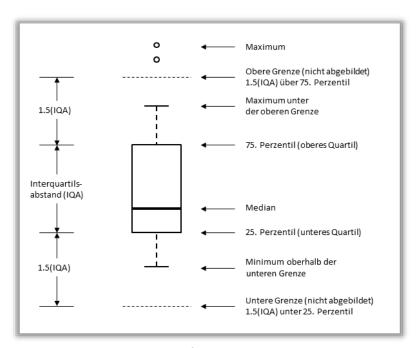


Abb. A 1: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.

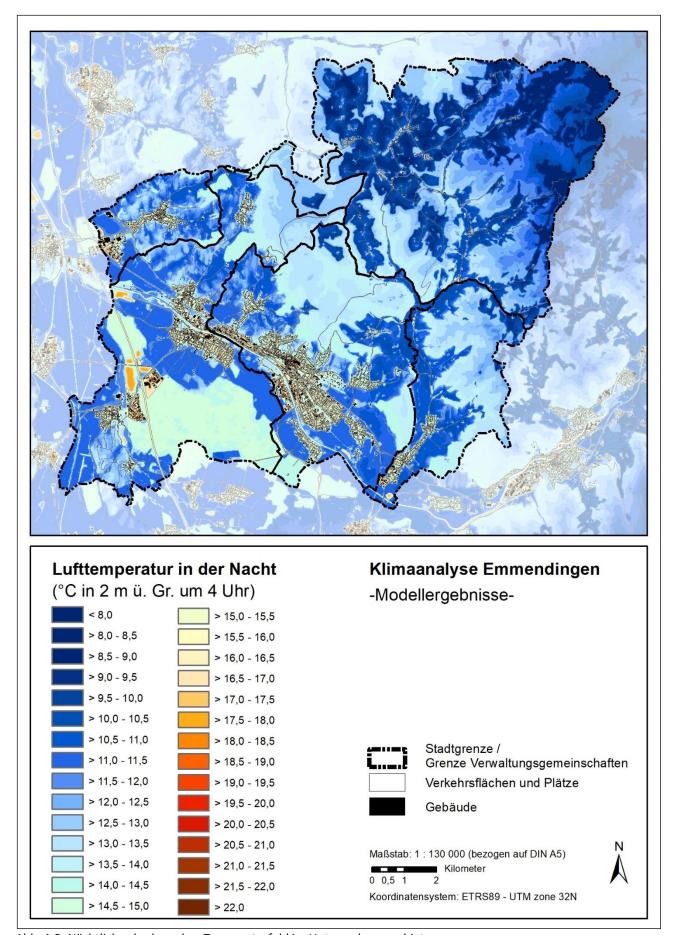


Abb. A 2: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld im Untersuchungsgebiet.

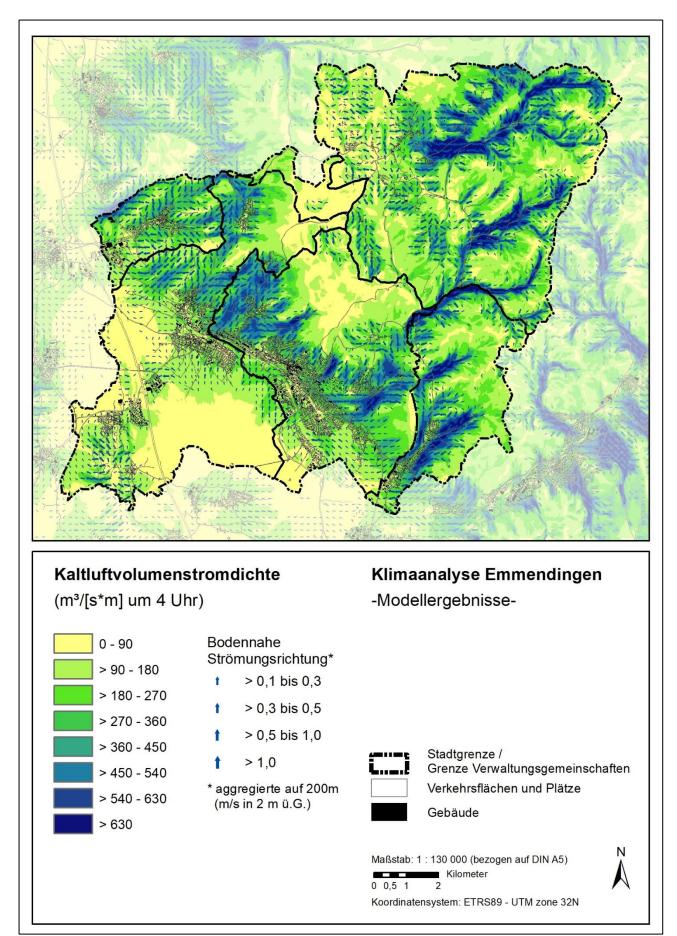
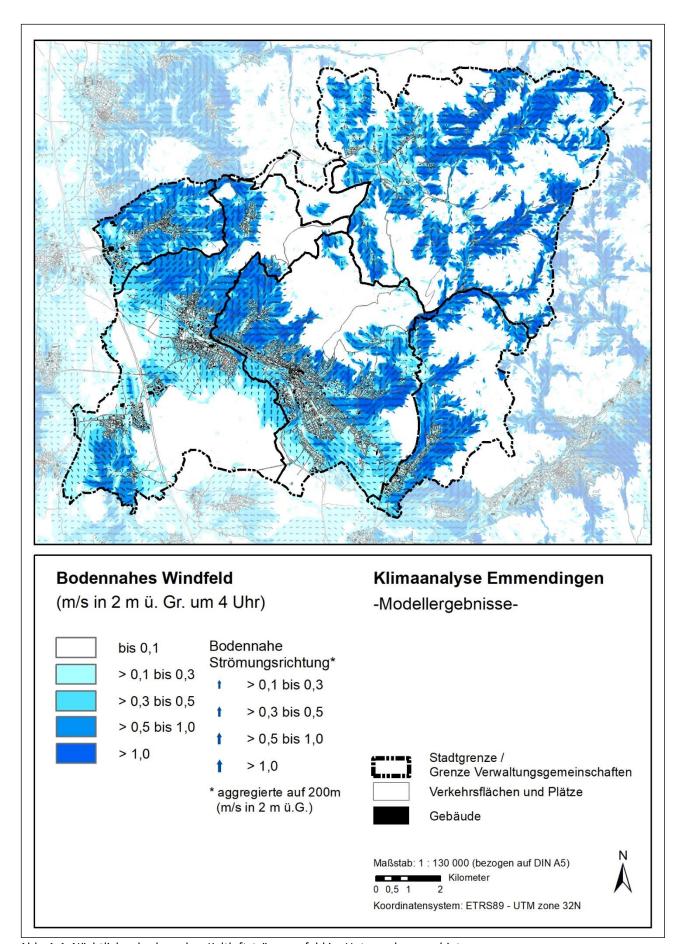


Abb. A 3: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Untersuchungsgebiet.



 $Abb.\ A\ 4:\ N\"{a}chtliches\ bodennahes\ Kaltluftstr\"{o}mungsfeld\ im\ Untersuchungsgebiet.$

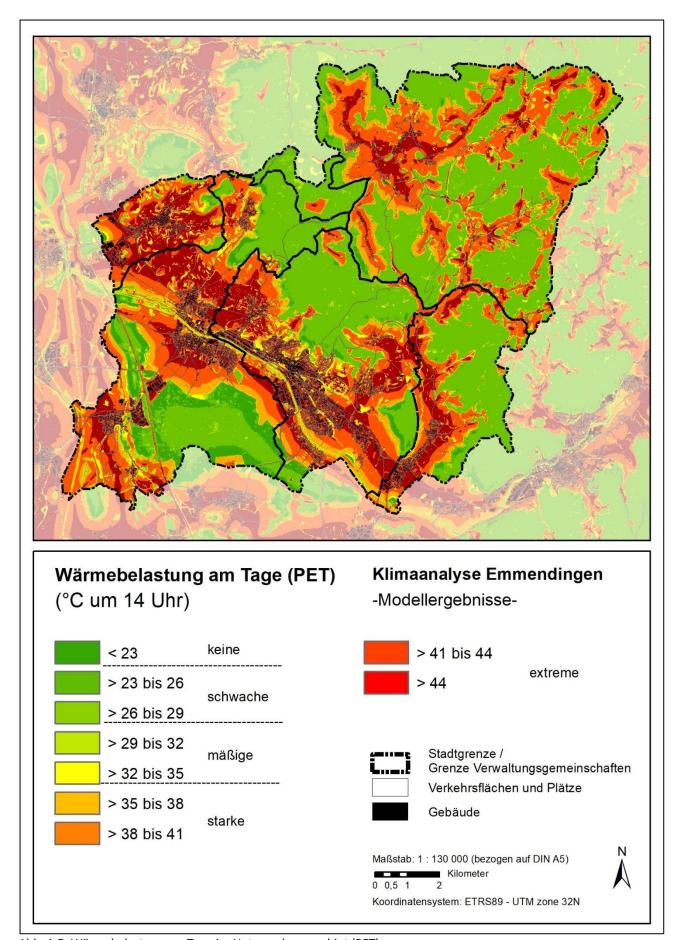


Abb. A 5: Wärmebelastung am Tage im Untersuchungsgebiet (PET)

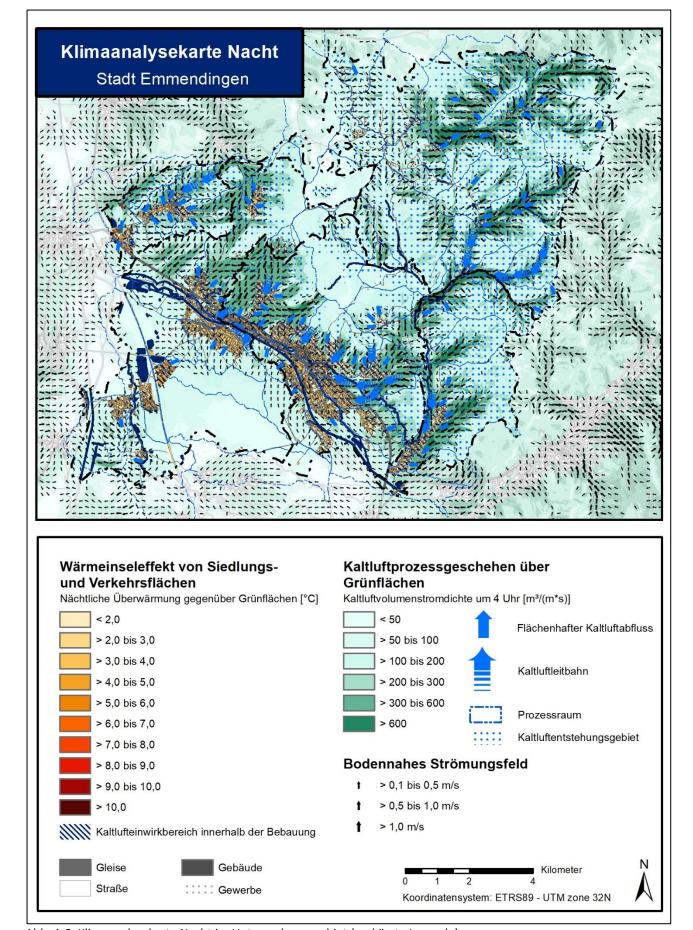


Abb. A 6: Klimaanalysekarte Nacht im Untersuchungsgebiet (verkürzte Legende).

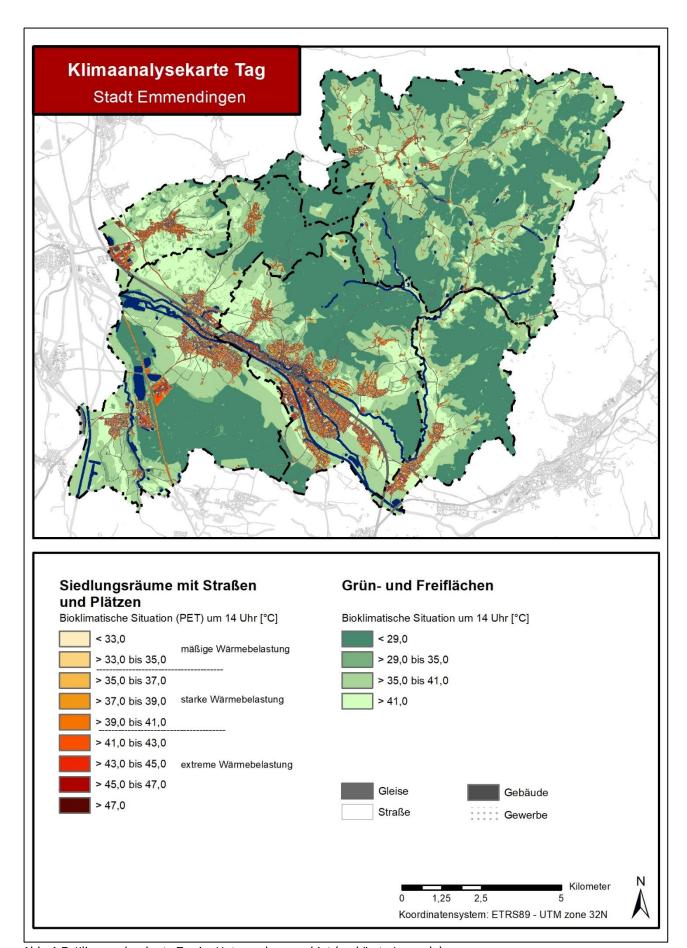


Abb. A 7: Klimaanalysekarte Tag im Untersuchungsgebiet (verkürzte Legende).

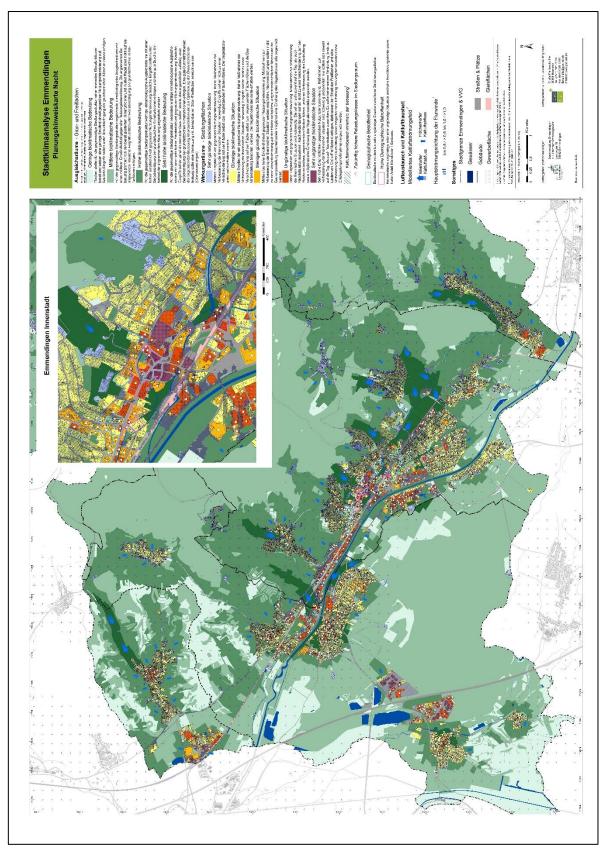


Abb. A 8: Planungshinweiskarte der Nachtsituation.

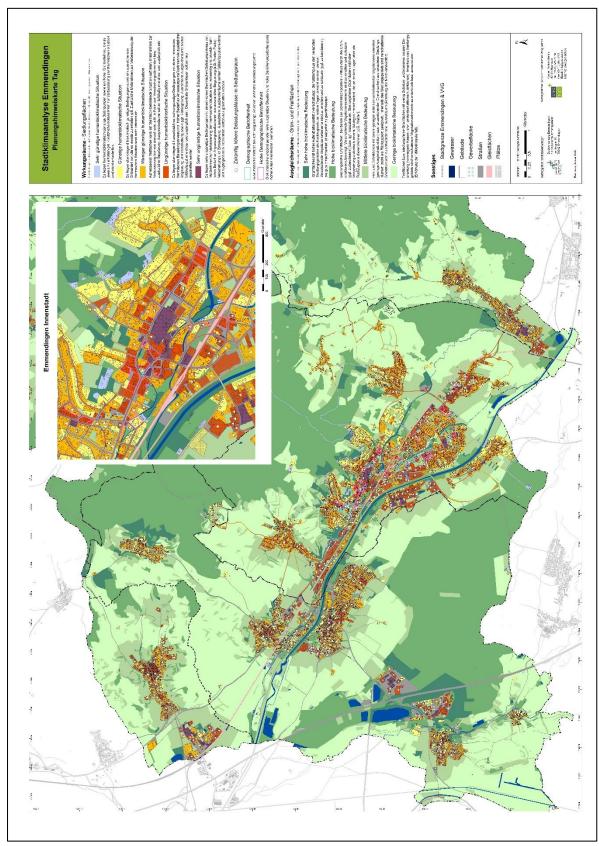


Abb. A 9: Planungshinweiskarte der Tagsituation.

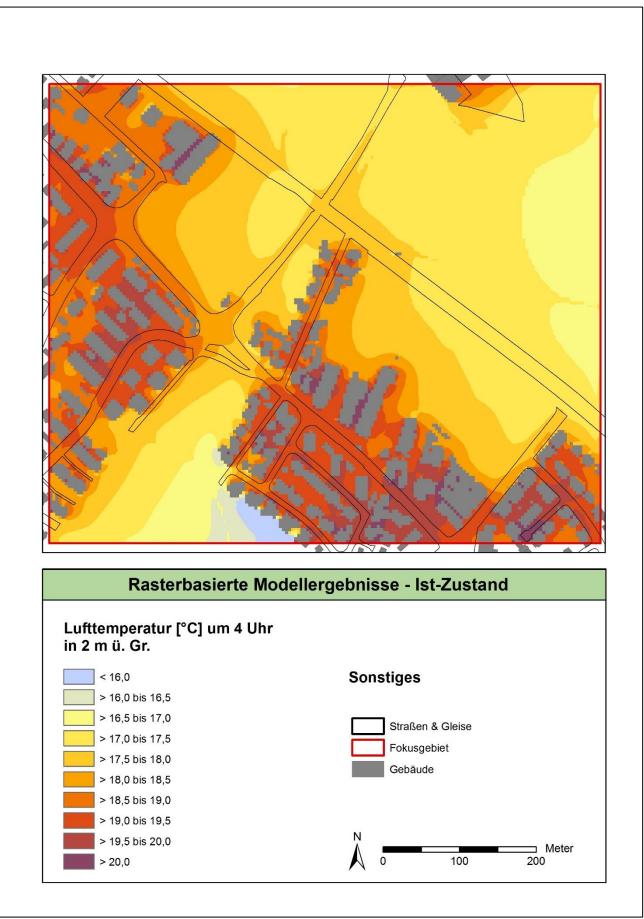


Abb. A 10: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Unterer Lerchacker/Vier Jauchert".

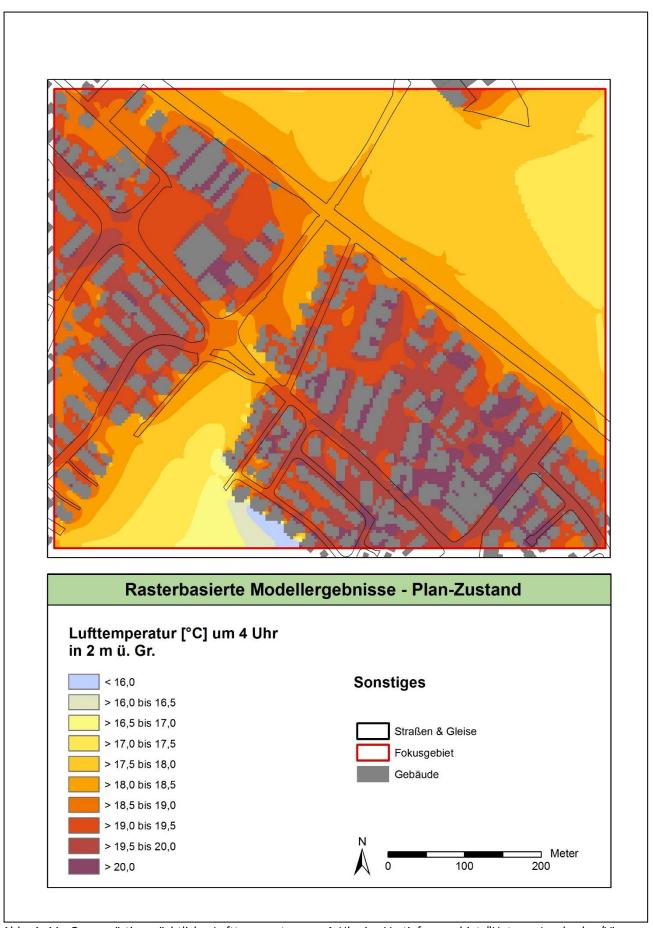


Abb. A 11: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Unterer Lerchacker/Vier Jauchert".

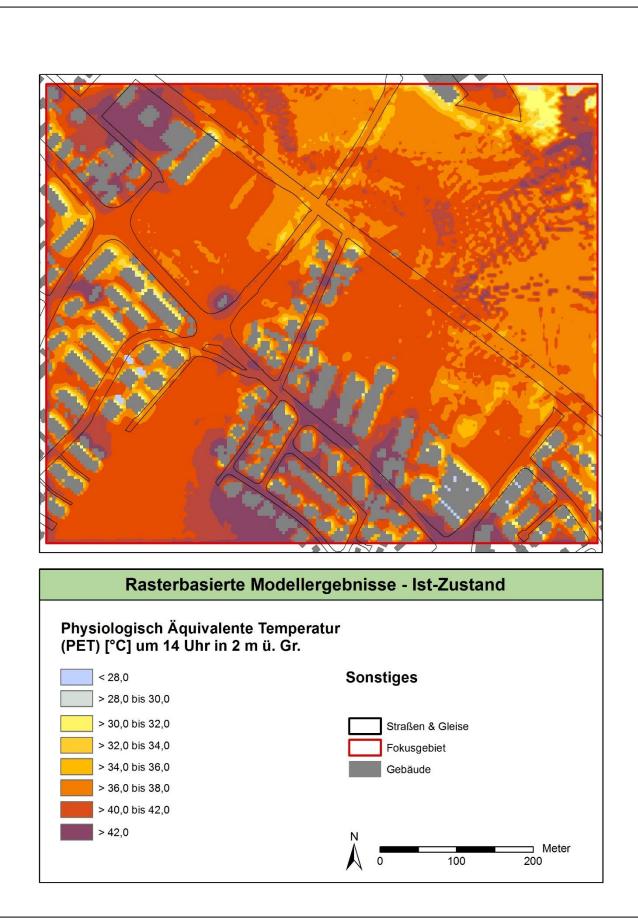


Abb. A 12: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Unterer Lerchacker/Vier Jauchert".

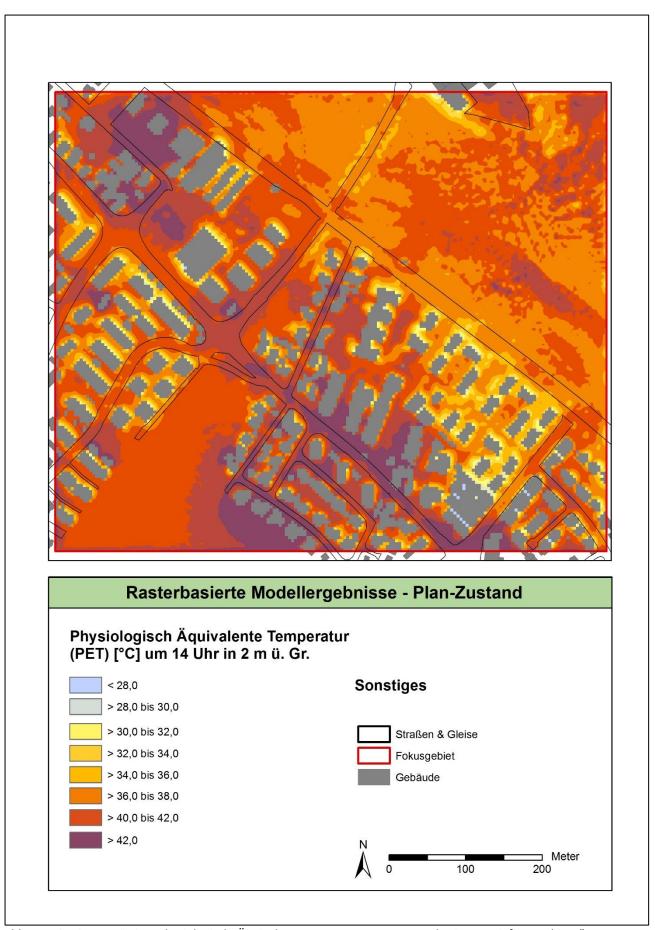


Abb. A 13: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Unterer Lerchacker/Vier Jauchert".

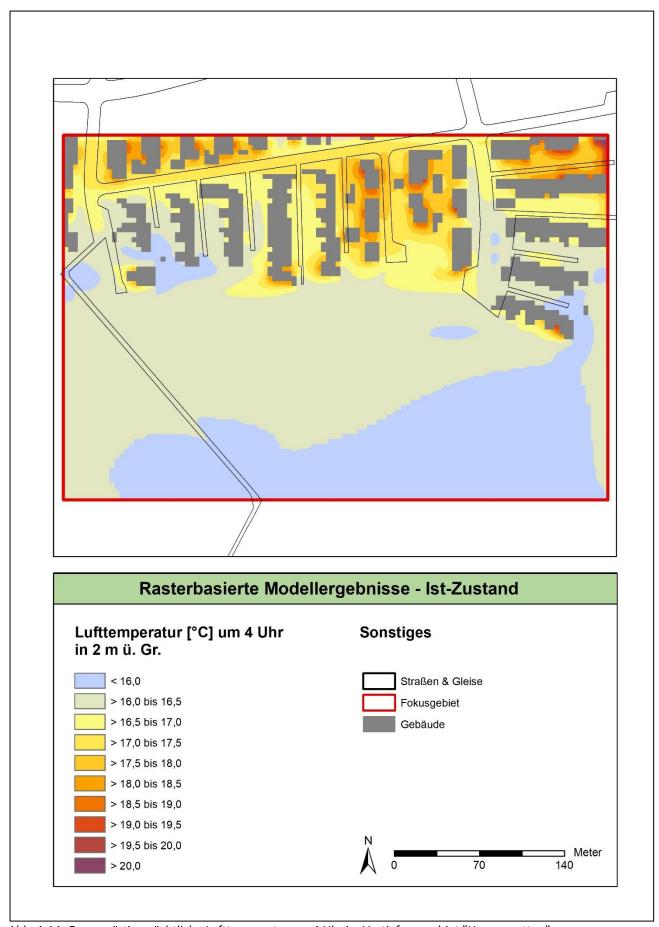


Abb. A 14: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Herrenmatten".

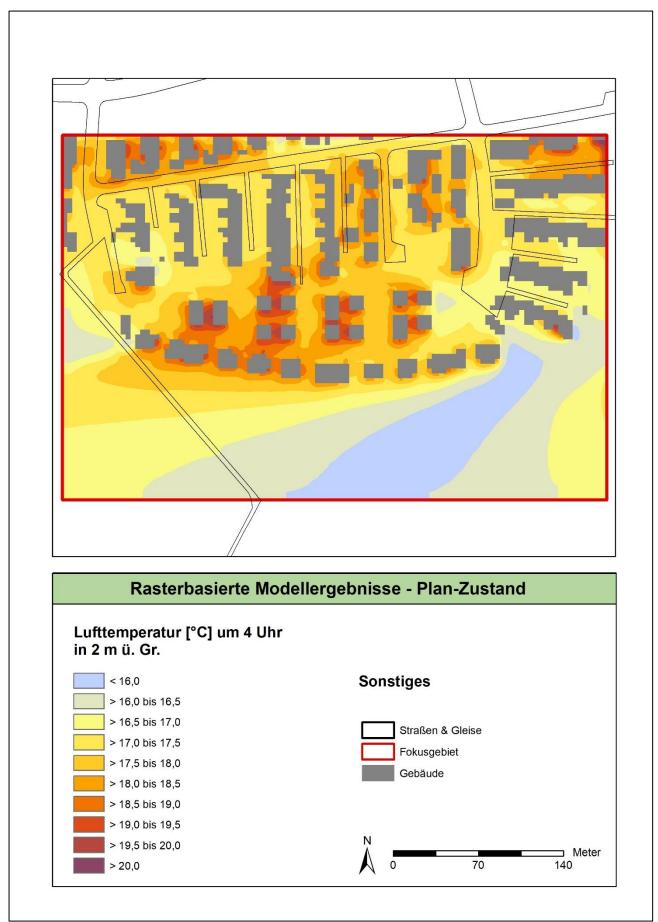


Abb. A 15: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Herrenmatten".

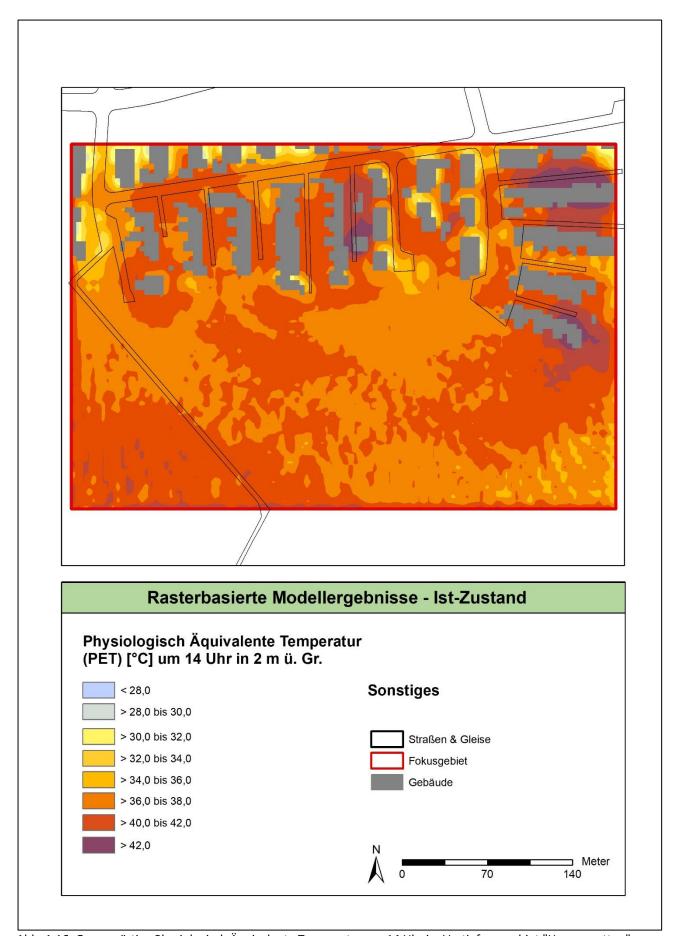


Abb. A 16: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Herrenmatten".

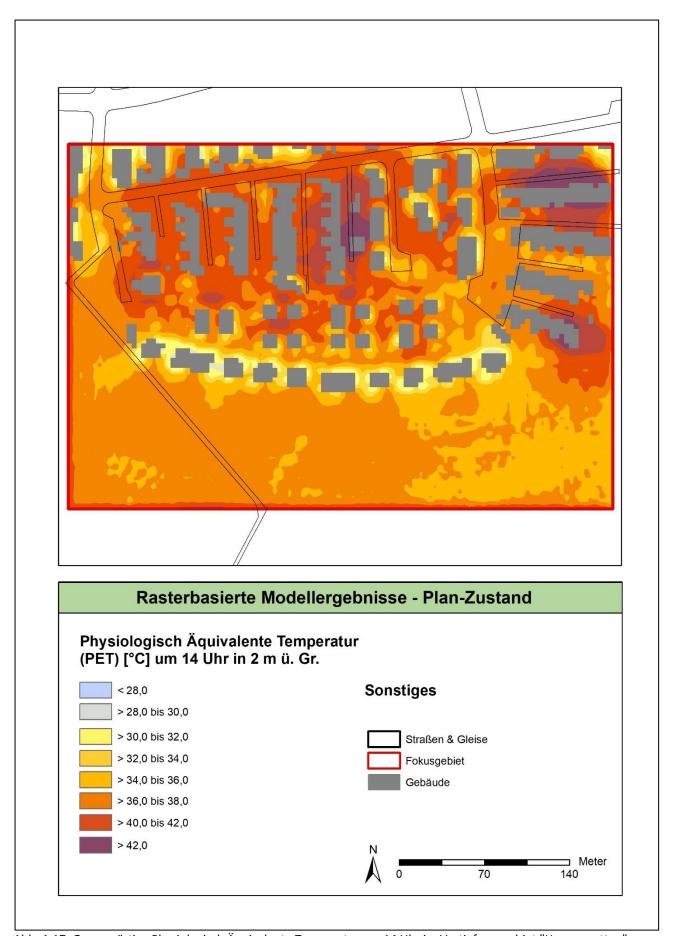


Abb. A 17: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Herrenmatten".

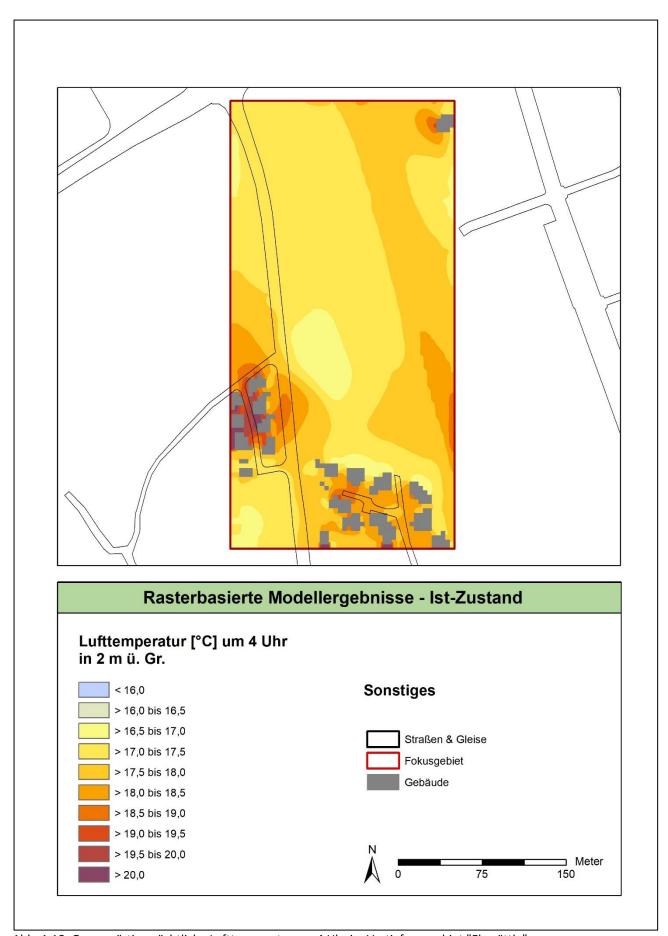


Abb. A 18: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Elzmättle".

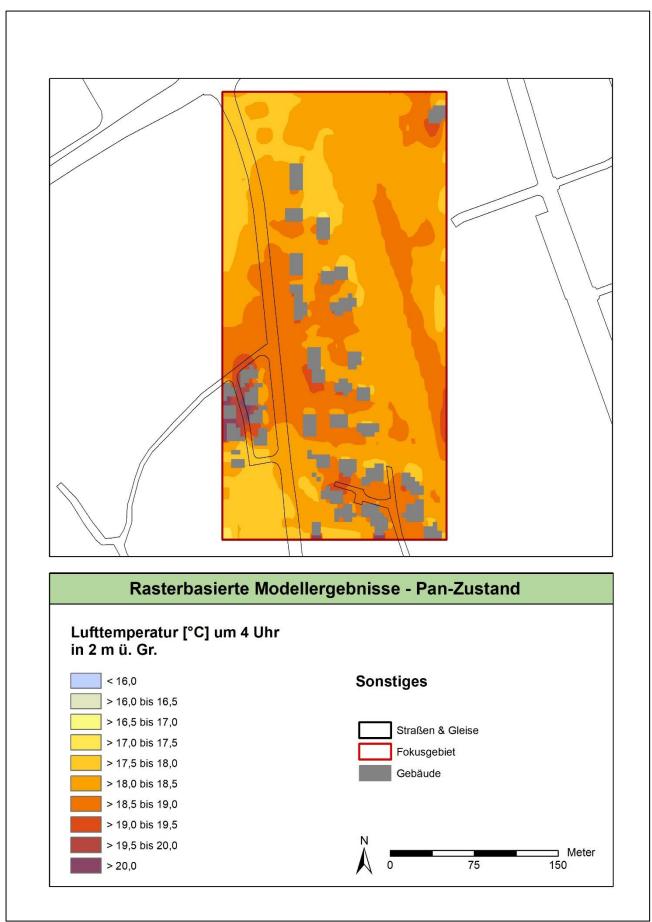


Abb. A 19: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Elzmättle".

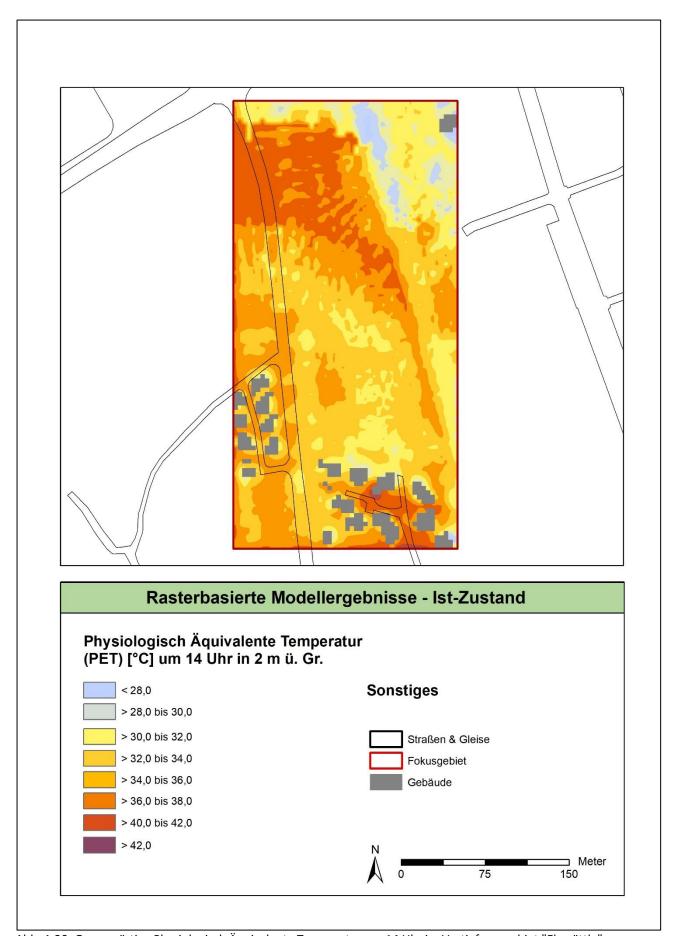


Abb. A 20: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Elzmättle".

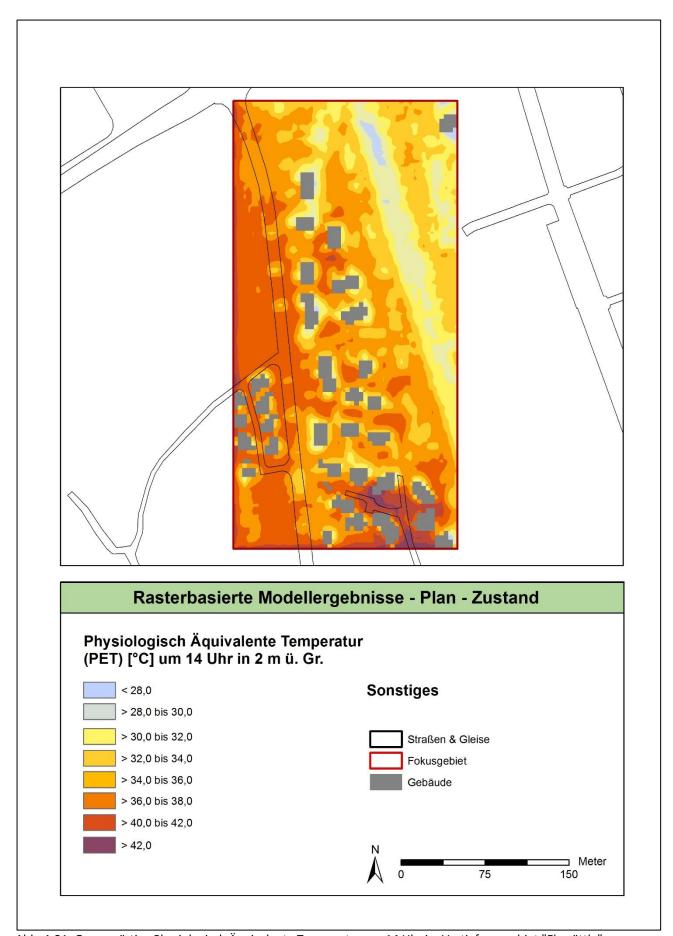


Abb. A 21: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Elzmättle".

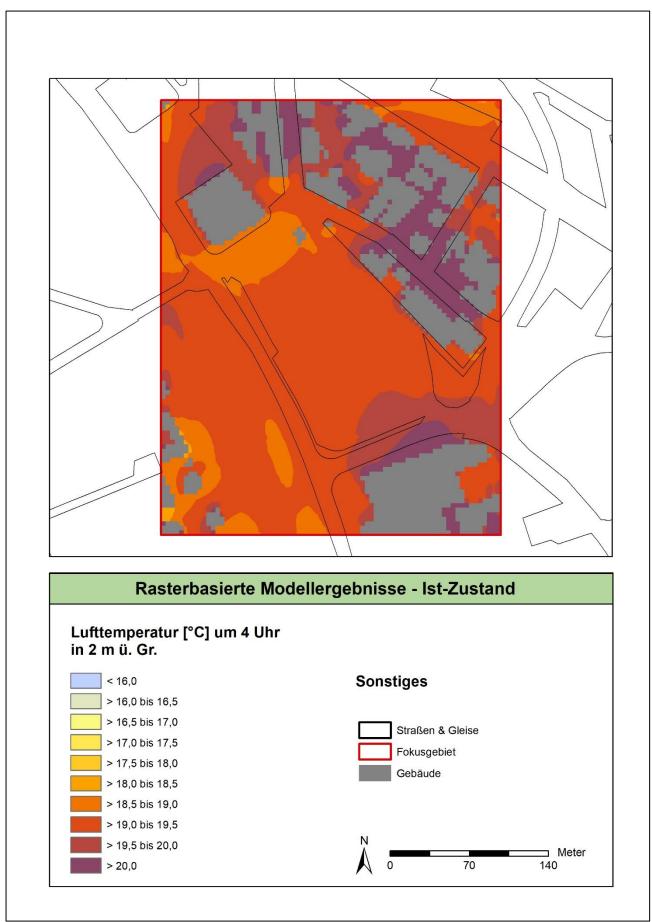


Abb. A 22: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Festplatz".

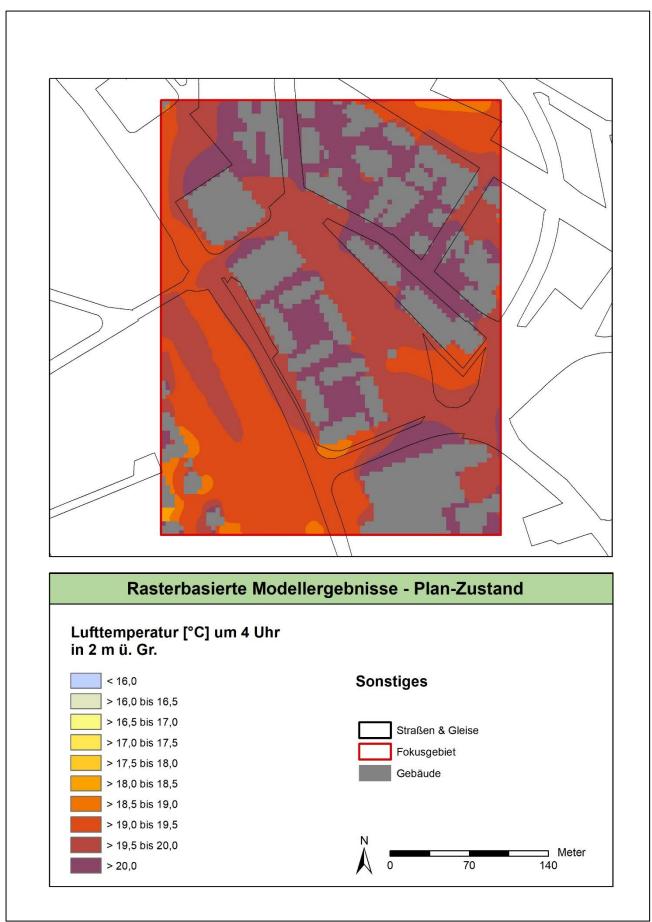


Abb. A 23: Gegenwärtige nächtliche Lufttemperatur um 4 Uhr im Vertiefungsgebiet "Festplatz".

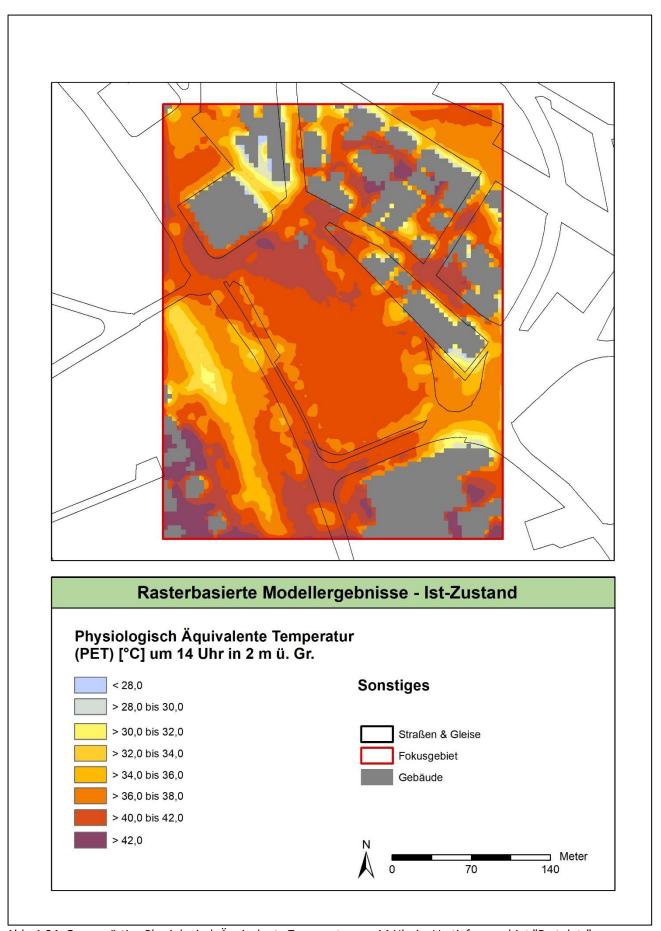


Abb. A 24: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Festplatz".

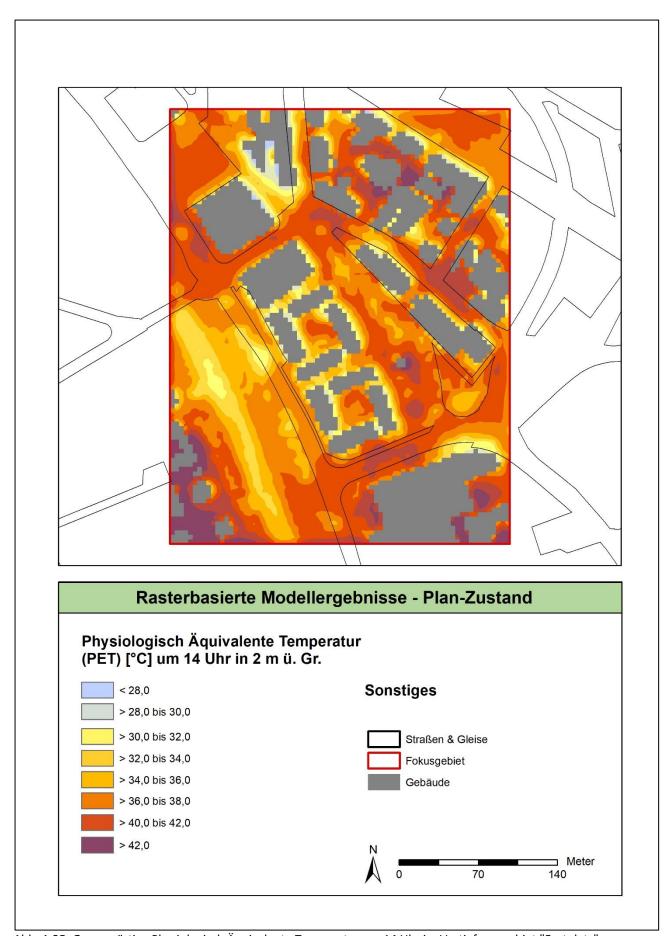


Abb. A 25: Gegenwärtige Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr im Vertiefungsgebiet "Festplatz".