

Auftraggeber: Amt für Stadtentwicklung und Gebäudewirtschaft
Stadtverwaltung Neckarsulm
Marktstraße 18
74172 Neckarsulm

Stadtklimaanalyse für die Stadt Neckarsulm

Projekt-Nr.: 20-12-20-FR

Umfang: 105 Seiten

Datum: 27.04.2023

Bearbeiter: Dr. Christine Ketterer, M.Sc. in Climate Sciences
Dr. Tobias Gronemeier, M.Sc. in Meteorologie
Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe
Dr. Markus Hasel, Diplom-Meteorologe

IMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Eisenbahnstraße 43
79098 Freiburg

Tel.: 0761/ 202 1662

Fax: 0761/ 202 1671

E-Mail: ketterer@ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	9
Gunstfaktoren.....	10
Belastungen	10
Maßnahmenempfehlungen.....	11
1 Einführung und Aufgabenstellung	13
2 Vorgehensweise	15
3 Datengrundlage und Methoden	17
3.1 Daten.....	17
3.1.1 Topographie	17
3.1.2 Nutzungsstruktur	17
3.1.3 Messdaten und Klimadaten	19
3.2 Methoden	22
3.2.1 Mesoskalige Simulation mit FITNAH	22
3.2.2 Betrachtung des Klimawandels.....	22
3.2.3 Mikroskalige Simulation mit PALM-4U.....	23
3.2.4 Human-Biometeorologie	25
4 Bestandsbeschreibung	27
4.1 Örtliche Verhältnisse	27
4.2 Klimatische Einordnung der Stadt Neckarsulm	30
4.3 Strömungsverhältnisse	32
5 Auswirkungen des Klimawandels	33
5.1 Klimamodellierung	34
5.2 Lufttemperatur	34
5.3 Niederschlag	35
5.4 Klimatologische Kenntage	38
5.4.1 Heiße Tage, Sommertage und tropische Nächte	38
5.4.2 Frosttage	39
5.4.3 Hageltage	40
6 Ergebnisse der Simulationen	44
6.1 Kaltluftströmung.....	44
6.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen.....	44
6.1.2 Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen.....	45
6.1.3 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen.....	45
6.1.4 Ergebnisse der Modellierung	46
6.2 Thermische und human-biometeorologische Verhältnisse.....	51
6.2.1 Human-biometeorologische Verhältnisse	51
6.2.2 Urbane Wärmeinsel	54
6.2.3 Häufigkeit von Sommertagen.....	58
6.3 Stadtgrün und Klimavielfalt	59
6.4 Empfindlichkeit	66
6.5 Betroffenheit	69

7	Klimaanalysekarte	72
8	Planungshinweiskarte	74
9	Handlungsstrategien für die Stadtplanung	78
	9.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung	78
	9.2 Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung.....	79
10	Literatur	84
A1	Daten und Methodik	87
	A1.1 Aufbereitung der Eingangsdaten für FITNAH.....	87
	A1.2 Methodik.....	87
	A1.2.1 Das prognostische Modell FITNAH	87
	A1.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit.....	88
	A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit.....	89
	A1.2.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme.....	90
A2	Beschreibung der Klimatope	93

Glossar

Fachbegriffe, die im Glossar genauer erläutert werden, sind bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit einem „*“ gekennzeichnet.

Anthropogen	Durch den Menschen verursachte Einflüsse.														
Atmosphärische Gegenstrahlung	Der Anteil der langwelligen Strahlung, der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde gerichtet ist.														
Atmosphärische Grenzschicht	Als atmosphärische Grenzschicht (auch planetare Grenzschicht) wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 500 m – 2000 m der Atmosphäre reicht, wobei die Höhe der Schicht von der Rauigkeit des Untergrundes, der vertikalen Temperaturschichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt. Der Mittelwert der Höhe beträgt ca. 1000 m. In der atmosphärischen Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.														
Ausbreitungsklasse	Die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier charakterisiert die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre. Die thermische Schichtung bestimmt neben der Bodenrauigkeit die atmosphärische Turbulenz, die ein Maß für das "Verdünnungsvermögen" der Atmosphäre ist.														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Klasse</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre</td> </tr> <tr> <td>III₁</td> <td>stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter</td> </tr> <tr> <td>III₂</td> <td>leicht labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>mäßig labile atmosphärische Schichtung</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre</td> </tr> </tbody> </table>	Klasse	Beschreibung	I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre	III ₁	stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter	III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung	IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung	V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre
Klasse	Beschreibung														
I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre														
III ₁	stabile bis →neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter														
III ₂	leicht labile atmosphärische Schichtung														
IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung														
V	sehr labile atmosphärische Schichtung, hohe Sonneneinstrahlung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre														
Autochthone Wetterlagen	Austauscharme Strahlungswetterlagen (Hochdruckgebiet), bei denen sich lokalklimatische Besonderheiten im Mikro- und →Mesoklima ausprägen.														
Belastungsraum	→ Wirkungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet ist														
Bergwind	Talabwind: Nachts kühlt sich die Luft in Tälern stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt zunächst die Hänge hinunter (Hangabwind), sammelt sich in den Geländeeinschnitten und Tälern und fließt schließlich als Bergwind talabwärts. Der Bergwind beginnt 2 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang und hält bis kurz nach Sonnenaufgang an.														
Eistage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur unter 0 °C liegt, d.h. es herrscht durchgehend Frost.														
Frischluff	Herantransportierte Luft, die geringer durch Luftschadstoffe belastet ist als die vorhandene Luft.														
Frosttage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Minimum der Lufttemperatur < 0 °C beträgt.														
Geostrophischer Wind	Wind, der außerhalb der Reibung der Erdoberfläche weht und sich mit dem Luftdruckgradient und der Coriolis-Kraft (eine Scheinkraft hervorgerufen durch die Erdrotation) im Gleichgewicht befindet.														

Hangwind	Hangabwind/Hangaufwind sind Teil der Berg-/Talwindzirkulation. Sie setzen schon kurz nach Beginn der abendlichen Abkühlung bzw. nach Einsetzen der Sonneneinstrahlung am Morgen ein. Nach einigen Stunden Verzögerung treten Ausgleichsströmung zwischen Tal und Vorland als → Bergwind (nachts) bzw. → Talwind (tags) ein.
Heiße Tage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt.
Human-Biometeorologie	Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation transportiert. → Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab.
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter → Kaltluft. Dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen → Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (→ Wirkungsraum) von Bedeutung sind (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)).
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftproduktionsrate	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur → Kaltluftbildung. Die Stärke der Kaltluftbildung kann über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche erfolgen.
Klimatop	Fläche mit einer einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaft werden in der Landschaftsökologie sowie in der Stadtklimatologie als Klimatop bezeichnet (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)).
Konvektion	Vertikaler Luftaustausch; Aufsteigen erwärmter Luftmassen bei gleichzeitigem Absinken kälterer Luft in der Umgebung.
Latenter Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in die Verdunstung von Wasser, ohne eine Änderung der Lufttemperatur zu bewirken.
(Luft-) Leitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer → Rauigkeit, d.h. frei von flächiger Bebauung und hoher, dichter Vegetation (z.B. Wälder).
Lufttemperatur	Physikalisch betrachtet ist die Lufttemperatur ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens. Dieser wird bestimmt durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Molekularbewegung in der Luft. Je größer die mittlere Geschwindigkeit aller Moleküle in einem Luftvolumen ist, umso höher ist auch seine Lufttemperatur.

Median	Der Median oder Zentralwert bezeichnet einen Mittelwert. Der Median ist der mittlere Wert aus einer Liste an Werten, wenn diese der Größe nach sortiert werden. Der Median teilt demnach die Liste von Werten genau in der Mitte.
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich sub-regional bis lokal innerhalb der atmosphärischen → Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischet & Endlicher (2018)).
Mikroklima	Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das Großklima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei → autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.
Morbidität	Häufigkeit der Erkrankungen innerhalb der Bevölkerung.
Mortalität	Sterblichkeit, Sterberate der Bevölkerung.
Neutrale (Indifferente) Schichtung	Eine neutrale oder indifferente Schichtung liegt vor, wenn ein Luftpaket bei Vertikalbewegungen stets die gleiche Temperatur wie die Umgebungsluft aufweist.
Phänologische Phase	Die Phänologie befasst sich mit den Entwicklungserscheinungen der Natur, die aufgrund der Jahreszeitenwechsel auftreten. Die Phänologischen Phasen bezeichnen dabei die verschiedenen Phasen innerhalb eines Jahres, z.B. die Frühlingsphase, welche mit dem Austrieb der Pflanzen gekennzeichnet ist.
Perzentil	Ein Perzentil ist ein Wert auf einer Skala von Null bis Hundert, der den Prozentsatz an Datensatzwerten angibt, der gleich oder niedriger als er selbst ist. Das Perzentil wird oft genutzt, um die Extremwerte einer Verteilung abzuschätzen. So kann z.B. das 90. (10.) Perzentil verwendet werden, um die Schwelle für die oberen (unteren) Extremwerte zu bezeichnen
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur. Ein Index zur Beschreibung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der menschlichen Energiebilanz.
Rauigkeit	Ein Maß für die Rauigkeit ist der z_0 -Wert, der in Meter angegeben wird. Er beschreibt die Wirkung von Vegetation und Bebauung auf die bodennahe Strömungsreduktion.
Sommertag	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt.
Strahlungsantrieb	Netto-Strahlungsflussdichte an der Tropopause, welche z.B. durch die veränderte Konzentration von Treibhausgasen zustande kommt.
Strahlungsbilanz	Die Strahlungsbilanz ist die Differenz aus der Einstrahlung und Ausstrahlung auf eine Oberfläche. Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche wird dabei hauptsächlich von der solaren, kurzwelligen Einstrahlung und der terrestrischen, langwelligen Ausstrahlung bestimmt.
Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde in der zweiten Nachthälfte.
Urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während → autochthonen Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.

Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte ist ein Maß für die Menge der abfließenden → Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit.
Vulnerabilität	Die Vulnerabilität bezeichnet die Verwundbarkeit oder Verletzbarkeit der Bevölkerung aufgrund von klimatischen Extremereignissen wie beispielsweise Hitzeperioden.
Wahre Ortszeit	Die auf den Sonnenstand bezogene Zeit. Die Sonne steht um 12:00 Uhr wahrer Ortszeit im Zenit.
Wärmebelastung	Wärmebelastung liegt vor, wenn der menschliche Organismus Probleme bekommt, die Kerntemperatur von 37 °C zu halten. Die Wärmebelastung wird anhand von Wärmehaushaltsmodellen des Menschen ermittelt. Dabei gehen neben physiologischen Größen die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Strahlungsströme und die Windgeschwindigkeit ein. Besondere Belastungssituationen ergeben sich insbesondere bei einer längeren Dauer der Wärmebelastung, z.B. in Hitzeperioden.
Wirkungsraum	Raum, in den die → Kaltluft oder → Frischluft eindringt. Ist der Wirkungsraum bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet wird er auch als → Belastungsraum oder belasteter Wirkungsraum bezeichnet.

Zusammenfassung

Die Stadt Neckarsulm plant bei zukünftigen Stadt- und Grünflächenplanungen verstärkt stadtklimatische Aspekte zu berücksichtigen. Grundlage hierfür ist eine Stadtklimaanalyse.

Die Stadt Neckarsulm liegt in einer der wärmsten Regionen Deutschlands, im Neckartal des nördlichen Kraichgaus. Die höhere Anzahl an Sommertagen*¹ ist in den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst meist erwünscht, führt aber im Sommer häufig zu Hitzebelastungen. Tage mit Hitzestress werden im Rahmen des Klimawandels weiter zunehmen. Ziel ist es, sowohl die Bereiche mit hoher Belastung zu lokalisieren wie auch die Faktoren und Raumschaften zu ermitteln, die für eine Entlastung sorgen.

In der Stadtklimaanalyse Neckarsulm werden die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum*) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen analysiert. Dabei wird ein heißer Tag* betrachtet, der in der Regel bei wolkenarmen und wind-schwachen Wetterlagen auftreten kann. Bei diesen Wetterlagen prägen sich die lokaltypischen klimatischen Eigenheiten am stärksten aus.

Die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen wie auch der Entlastungen unterstützt die Planer in der Flächennutzungsplanung, in der Bauleitplanung und bei der Projektierung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

Eine Belastungssituation in den Wirkungsräumen ergibt sich sowohl tags (Hitze) wie auch nachts (urbane Wärmeinsel). Um die Be- und Entlastungseffekte zu bewerten, wird die Betroffenheit der Bevölkerung herangezogen. Diese ergibt sich aus der Intensität der Belastung bzw. Entlastung und der Empfindlichkeit der betrachteten Fläche. Die Empfindlichkeit wird über die Bevölkerungsdichte und die Lage klimasensibler Nutzungen, wie Krankenhäuser oder Pflegeheime ermittelt. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische* Methoden herangezogen.

Die wesentlichen Faktoren für eine Entlastung stellen die Durchlüftung und innerstädtische Grünflächen dar. Für die Durchlüftung sind insbesondere nächtliche Kaltluftabflüsse* maßgebend, die Frischluft* herantransportieren und die tagsüber entstandenen thermischen und lufthygienischen Belastungen verringern. Die Bedeutung wird jedem klar, der in einer Hitzeperiode in den Nachtstunden Schlaf sucht. Wird die Wohnung und das Schlafzimmer bei geöffneten Fenstern gut belüftet, stellen sich verträglichere Verhältnisse ein, als wenn keinerlei Luftbewegung vorhanden ist.

Innerstädtische Grünanlagen haben verschiedene positive lokalklimatische Effekte. Sie stellen an heißen Tagen sowohl Ausgleichs- wie auch Aufenthaltsbereiche dar. Die Qualität dieser Bereiche wird geprägt von schattenwerfendem Baumbestand, der Größe der Grünfläche und der fußläufigen Erreichbarkeit.

Um diese Aspekte des Stadtklimas zu erfassen und aufzuarbeiten, wurden mittels umfangreicher Modellsimulationen die Gunstfaktoren und die thermischen Belastungen ermittelt. Dabei wurde auf die Aktualität der Eingangsdaten geachtet. Auf der Basis dieser Informationen wurden eine Klimaanalyse- und eine Planungshinweiskarte erarbeitet. Die flächendeckenden Klimainformationen des vorliegenden Gutachtens stellen für die Stadt Neckarsulm eine gute Grundlage für die Einordnung

¹ Fachbegriffe werden bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit „*“ gekennzeichnet und im Glossar erläutert.

planerischer Maßnahmen aus klimatischer Sicht dar. Sie dienen neben der Flächennutzungsplanung auch der Lokalisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

Gunstfaktoren

Die abendliche und nächtliche Kaltluftzufuhr bei austauscharmen wolkenarmen Wetterlagen, sogenannten „autochthonen Wetterlagen*“, erfolgt im Raum Neckarsulm durch Kaltluftabflüsse* aus dem Sulmtal und von den Hängen des Scheuerbergs, die einen Großteil von Neckarsulm belüften. Armorbach wird hauptsächlich durch Kaltluftabfluss aus dem Osten, welcher über die „Grüne Mitte“ und von dort in die angrenzenden Wohnsiedlungen einströmt. Das Gewerbegebiet entlang des Neckars wird durch eine dem Neckarverlauf folgende Strömung belüftet. Obereisesheim wird von einem Kaltluftabfluss entlang des Osthangs des Schellenbergs belüftet. Dahenfeld wird von verschiedenen kleineren Kaltluftabflüssen entlang der nördlichen Hänge des Stadtwalds erreicht.

Parkflächen (z.B. der Neckarsulmer Stadtpark), Grünflächen (am Scheuerberg) und auch Waldgebiete und Flussläufe stellen für die Bevölkerung wichtige Freizeit- und Naherholungsbereiche dar. Allerdings stellen die Autobahn 6 und die Bundesstraße 27, sowie die beinahe Nord-Süd-verlaufende Bahnlinie und vor allem die Industrie- und Gewerbeflächen Barrieren dar, die den fußläufigen Zugang zu größeren Erholungsflächen einschränken.

Im Stadtgebiet von Neckarsulm sind die kleineren Grünflächen überwiegend gut erreichbar, lediglich 5 % der Einwohner insbesondere in Teilen der Südstadt und des Heilbronner Felds haben einen erhöhten Bedarf an zusätzlichen Parkanlagen. Grün- und Freiflächen dienen als klimatische Ausgleichsräume und haben somit eine wichtige klimatische Funktion innerhalb der Stadt inne. Mit Blick auf den Klimawandel sind der Erhalt und die Weiterentwicklung ihrer Funktionalität auch in Zukunft wichtige Aspekte.

Belastungen

Die thermische Belastung wird durch die Lage im Neckarbecken des nördlichen Kraichgaus geprägt. Die geringe Höhenlage und der reduzierte Luftaustausch in Tallagen führt im Sommer häufig zu Überwärmungen. Neben der, durch die großräumige Lage vorgegebene thermische Belastung, steigern aber auch ein erhöhter Anteil versiegelter Flächen sowie ein Mangel an klimatisch relevanten Grün-, Frei- und Wasserflächen innerhalb der städtischen Bebauung die Wärmebelastung*.

In den Abend- und Nachtstunden ist dies an den urbanen Wärmeinseln*, die die Überwärmung der verdichteten Siedlungs- und Gewerbebereiche gegenüber dem Umland zeigen, sichtbar. Die Überwärmung ist in den Industrie- und Gewerbegebieten mit bis zu 5,2 K und in den versiegelten Gebieten entlang der B 27 besonders ausgeprägt. Vegetationsreiche, durch Baumkronen tagsüber abgeschattete Bereiche weisen eine geringere nächtliche Überwärmung auf als wenig verschattete Straßenzüge, wie z.B. Teile der Neuenstädter Straße oder der Marktstraße. Im Übergang von gut zu weniger gut durchlüfteten Bereichen (siehe z.B. Neuberg IV, Armorbach Obereisesheim) kann die Überwärmung um 1 K bis 2 K zunehmen.

Die human-biometeorologische Belastung tagsüber ist hauptsächlich von der Sonnenexposition abhängig. In besonnten, windstillen und versiegelten Bereichen z.B. auf Industrie- und Gewerbegebieten oder in Innenhöfen ist der größte Hitzestress vorzufinden. Beispiele hierfür sind der Marktplatz und der Bereich um das Bahnhofshotel. In durch Bäumen abgeschatteten Bereichen beträgt

die PET* weniger als 30 °C, so dass hier zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitze-stress vorzufinden sind. Deshalb ist der Erhalt und die Schaffung von klimatisch wirksamen Ausgleichsräumen mit grün-blauer Infrastruktur für die Stadtbewohner im Zuge des Klimawandels von größter Bedeutung.

Neben der Intensität der Wärmebelastung ist auch deren Auftretswahrscheinlichkeit entscheidend. Zur Bewertung der Häufigkeit der Wärmebelastung dient die Anzahl an Sommertagen pro Jahr. Im Mittel treten in Neckarsulm etwa 48 Sommertage pro Jahr auf. Da die Anzahl an Sommertagen direkt von der Lufttemperatur* abhängig ist, treten mehr Sommertage in überwärmten Gebieten auf (z.B. in Gewerbegebieten: 59 Tage) als in kühleren Bereichen (Waldgebiete: 30 – 45 Tage). Die dicht bebauten Stadtgebiete (Südstadt bis Viktorshöhe) verzeichnen mehr Sommertage (56 Tage) und erfahren somit häufiger Wärmebelastung als die thermisch gering belasteten Ortsteile Amorbach und Dahenfeld (52 Tage).

Zur Bewertung der thermischen Belastung der Bevölkerung wird die thermische Betroffenheit ausgewiesen. Dies geschieht unter Einbezug der Empfindlichkeit der Bevölkerung, basierend auf der Einwohnerdichte und dem Vorhandensein klimasensibler Nutzungen, wie z.B. Seniorenheimen. Die thermische Belastung selbst setzt sich zusammen aus der nächtlichen Überwärmung, der human-bioklimatischen Belastung in den Tagstunden und der Häufigkeit der thermischen Belastungen, basierend auf der Anzahl an Sommertagen.

Durch die Gewichtung mit der Einwohnerdichte ist die thermische Betroffenheit besonders in den Übergangsbereichen zwischen Wohn- und Gewerbegebieten hoch, insbesondere im südlichen Teil der Südstadt. Des Weiteren besteht eine Tendenz zu höherer Betroffenheit im Zentrum der Siedlungsbereiche und zu niedrigerer Betroffenheit an den Siedlungsgrenzen. Jedoch wird z.B. in Amorbach trotz geringer bis mittlerer thermischer Belastung infolge der hohen Einwohnerdichte eine hohe thermische Betroffenheit ausgewiesen.

Im Zuge des Klimawandels ist mit einer weiteren Zunahme der Wärmebelastungen zu rechnen. Um eine lebenswerte Stadt Neckarsulm zu erhalten, gewinnt die Berücksichtigung des Mikroklimas* und entsprechender Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen, sowohl in der Flächennutzungsplanung wie auch in der Bauleitplanung, zunehmend an Bedeutung.

Maßnahmenempfehlungen

Der Klimawandel bedingt nicht nur eine tendenzielle Zunahme der Lufttemperatur. Probleme ergeben sich hauptsächlich durch die Extreme wie z.B. Hitzewellen, Dürreperioden, Starkniederschläge, Sturmereignisse. Diese können insbesondere Leben und Gesundheit gefährden, aber auch Güter und Produktion schädigen. Diesen Ereignissen ist man meist großflächig ausgesetzt und es gibt keine kurzfristigen Lösungen, diese Belastungen zu entschärfen.

Dürre und Hitze haben Auswirkungen auf die endemische Vegetation (Ernteauffälle, Stress für Waldbestände) und die Fauna (Artenaustausch). Trocken- und hitzeresistente Arten sind meist an ein ausschließlich warmes Klima angepasst. Da allerdings immer noch kalte Winter auftreten können, kann eine allgemeine Empfehlung für die Ansiedlung solcher Arten nicht ausgesprochen werden. Stattdessen muss eine größere Vielfalt angestrebt werden.

Starkniederschläge können auch abseits von Fließgewässern zu Hochwasser führen oder Erdbeben auslösen. Diese sind weder nach Ort noch Eintrittszeit, wie andere Unwetter auch, nicht wirk-

lich zu prognostizieren. Um diesen Gefahren zu begegnen sind entsprechenden Notfall- und Maßnahmenpläne zu entwickeln. Die Analyse potenziell gefährdeter Bereiche bleibt anderen Experten vorbehalten.

Die Berücksichtigung des Schwammstadt-Prinzips wird durch die immer häufiger auftretenden kurzzeitigen Starkniederschläge und langanhaltenden Trockenphasen immer wichtiger. Um die Funktionalität des städtischen Grüns zu sichern, ist die Speicherung von Niederschlagswasser zur Versorgung der Vegetation elementar.

Der Umgang mit Hitze erfordert im Siedlungsraum ein Umdenken. In thermisch belasteten Bereichen, wie es die stark versiegelten Innenstädte darstellen, sollte nicht weiter nachverdichtet werden. Hier ist eine stärkere Durchgrünung in Zusammenhang mit der Retention von Niederschlagswasser zielführender, um aus klimatischer Sicht Entlastungselemente zu schaffen. Ziel ist die Schaffung einer möglichst großen Klimavielfalt in fußläufiger Entfernung, so dass je nach Jahreszeit Aufenthaltsbereiche mit verträglichen Bedingungen aufgesucht werden können.

Die thermische Belastung hat zwei Aspekte. In den Nachtstunden sind die Siedlungsbereiche überwärmt. In Hitzewellen ist innerstädtisch dann mit hohen Belastungen zu rechnen. Minderungsmaßnahme ist der Erhalt der Kaltluftproduktionsbereiche*, von denen eine Strömung in belastete Siedlungsräume ausgeht. Hier ist vor allem der Kaltluftabfluss im Sulmtal, die Hangabwinde vom Scheuerberg sowie der Kaltluftabfluss im Hängelbachtal zu nennen.

Neben der Durchlüftung spielen auch die Aufheizung und die Wärmespeicherung der Bebauung eine Rolle. Fassaden- und Dachbegrünungen reduzieren die Aufheizung. Helle Oberflächen reflektieren stärker die einfallende Strahlung als dunkle Fassaden und heizen sich so weniger stark auf.

Bei Neubauten ist aufgrund der Wärmedämmung im Rahmen der Energieeinsparverordnungen mit einer geringeren Speicherwirkung zu rechnen. Die Fassaden dieser Gebäude heizen sich zwar tagsüber schneller auf, kühlen nachts aber auch wieder rasch ab. Maßnahmen sind hier aber meist nur bei Neuplanungen umsetzbar.

In den Tagstunden bestimmt die Einstrahlung das thermische Empfinden stark. Der Aufenthalt in besonnten Bereichen ist bei Hitzewellen kaum möglich. Auch das Zurücklegen von Wegen in der Sonne kann stark belastend sein. Die beste Aufenthaltsqualität wird in parkähnlichen Strukturen erreicht. Großkronige Bäume sorgen für Schatten, die Durchlüftung ist besser als in waldähnlichen Strukturen und die Vegetation kühlt, sofern sie ausreichend bewässert ist.

Aus klimatischer Sicht ist deshalb die Schaffung solcher Grüninseln zielführend. Die Klimaanalyse liefert u.a. die Hinweise, wo diese Maßnahmen zu verorten sind.

1 Einführung und Aufgabenstellung

Die Stadt Neckarsulm möchte bei zukünftigen Stadt- und Grünflächenplanungen verstärkt stadtklimatische Aspekte berücksichtigen. Grundlage hierfür ist eine flächendeckende Stadtklimaanalyse.

Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist neben dem globalen Klima auch das lokale Klima weiter in den Fokus gerückt. Die Zielsetzungen der Sicherung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse erfordert die Berücksichtigung der klimatischen Belange bei zahlreichen planerischen Fragestellungen. Dies fängt bei der Flächennutzungsplanung an, wo es beispielsweise um die Erhaltung der Kalt- und Frischluftzufuhr geht und endet bei kleinräumigen Planungen im Bereich der Bauleitplanung oder lokalen Klimaanpassungsmaßnahmen. In jedem Fall ist die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen wie auch der Entlastungen erforderlich, um mit der Planung richtig reagieren zu können.

Die Stadtklimaanalyse stellt deshalb eine wichtige Grundlage für planerische Entscheidungen dar. Sie basiert auf umfangreichen Modellierungen der thermischen Belastungen und der entlastenden Momente durch Kaltluftabflüsse^{*2} und städtische Klimavielfalt.

Im Rahmen der Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken wurden die Kaltluftströmungen, die thermischen Bedingungen und das Human-Bioklima* modelliert. Für die Stadt Neckarsulm wurden weitere Simulationen mit einem Mikroskalenmodell, welches jedes einzelne Gebäude und auch die Vegetation auflöst, durchgeführt. In die Modellierungen fließen das Höhenmodell, die Realnutzung, die Baukörper und vieles mehr ein. Zudem werden auch die Effekte des prognostizierten Klimawandels behandelt. Aus den zahlreichen Ergebnisebenen ergibt sich die Datengrundlage für Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten.

Um relevante Strömungssysteme* und die zugrunde liegenden Kaltluftentstehungsgebiete* und Luftleitbahnen* zu identifizieren, müssen die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum*) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen ermittelt werden.

Die Wärmebelastung* der Wirkungsräume setzt sich aus der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit der Bevölkerung zusammen. Die thermische Belastung wird für die Tag- und Nachtsituation untersucht. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische Methoden herangezogen. Mit Hilfe der auf der menschlichen Energiebilanz basierenden thermischen Indizes wie der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET*) kann unter Berücksichtigung der Lufttemperatur*, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse die Wärmebelastung flächendeckend quantifiziert werden.

Für die Bewertung des lokalen Klimas gibt es keine Grenz- oder Richtwerte. Der Grad der positiven und negativen Wirkungen ergibt sich aus der Zusammenschau von Intensität und Betroffenheit. Letztere wird durch die Bevölkerungsdichte ausgedrückt.

Die große Kreisstadt Neckarsulm liegt im nördlichen Kraichgau und Neckarbecken und zählt zu einer der wärmeren Regionen Deutschlands. Zur Charakterisierung der Wärmebelastung kann die Zahl der Sommertage*, d.h. Tage mit Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C, herangezogen werden. Exemplarisch sind die langjährigen Mittel der Sommertage in Baden-Württemberg für die Zeiträume

² Fachbegriffe werden bei ihrer ersten Erwähnung im Text mit „*“ gekennzeichnet und im Glossar erläutert.

1961 bis 1990 und 1981 bis 2010 dargestellt (Abbildung 1-1). Im Stadtgebiet Neckarsulm treten maximal 46 (1961 – 1990) bzw. 60 (1991 – 2020) Sommertage pro Jahr auf.

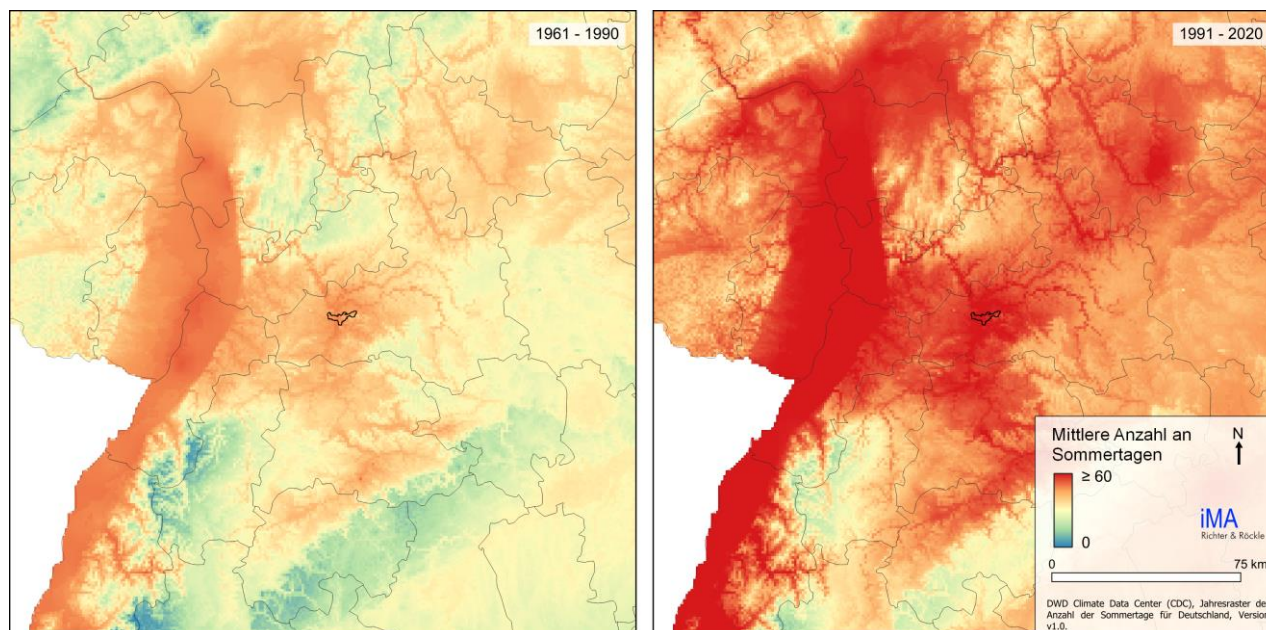


Abbildung 1-1: Langjähriges Mittel der Anzahl an Sommertagen. Klimazeitraum 1961 – 1990 (links) 1991 – 2020 (rechts). Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020, Jahresraster der Anzahl an Sommertagen für Deutschland, Version v1.0.

Durch den anthropogenen* Klimawandel wird im 21. Jahrhundert ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur, der Dauer, Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen und der Anzahl an heißen Tagen* erwartet (Schär et al. (2004); Christidis, Jones & Stott (2015)). Die Vulnerabilität* der europäischen und somit auch deutschen Bevölkerung wurde bereits bei der Hitzewelle 2003 offensichtlich, als die hitzebedingte Mortalität* europaweit mit mehreren zehntausend Fällen beziffert wurde (Robine et al. (2008)). Dabei traf es weniger junge gesunde Menschen, Menschen mit einem guten sozialen Status oder die Landbevölkerung, sondern Kleinkinder, alte und vorbelastete Menschen oder Menschen mit niederem Sozialstatus, die in Städten leben (Basu (2009)). Des Weiteren entsteht durch das verringerte Leistungsvermögen ein volkswirtschaftlicher Schaden (Zander et al. (2015)).

In Städten kühlt die Luft weitaus weniger ab als im ländlich geprägten Umland. Dieses Phänomen wird als urbane Wärmeinsel* bezeichnet und verstärkt den Hitzestress und damit die thermische Belastung in Städten. Die Ausprägung der thermischen und lufthygienischen Belastungen hängt jedoch von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu zählen die geographische Lage, die Höhenlage, das Relief, Bebauungsdichten und -höhen, die Verteilung von versiegelten und durchgrünten Flächen usw.

Eine Abkühlung bzw. Entlastung für die städtische Bevölkerung in Hitzeperioden kann durch Kaltluftabflüsse und Flurwinde* herbeigeführt werden. Diese tragen in der Nacht wesentlich zur thermischen Regeneration von Mensch und Umwelt bei. Die Zufuhr von – möglichst unbelasteter – Kaltluft in die urbanen Siedlungsräume ist daher von hohem Stellenwert für die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung. Daneben sind innerstädtische Grünflächen von Bedeutung. Diese sind für eine ausreichende Klimavielfalt, d.h. die Verfügbarkeit unterschiedlicher Mikroklimata* statt einer homogenen Bebauungssituation, erforderlich.

2 Vorgehensweise

Für die Stadtklimaanalyse Neckarsulm sind umfangreiche Modellierungen und Analysen durchgeführt worden. In Abbildung 2-1 ist die Vorgehensweise in einem Flussdiagramm skizziert. Es verdeutlicht übersichtlich den Weg von den Datengrundlagen über die Simulationen hin zur Bewertung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen.

Meteorologische Phänomene erstrecken sich über mehrere Skalen. Bei Stadtklimaanalysen spielen die Mesoskala mit einer Ausdehnung von mehreren Kilometern und die Mikroskala, bei der Einzelhindernisse (Gebäude, Bäume, etc.) explizit berücksichtigt werden, die wesentliche Rolle.

Um die Strömungsverhältnisse der Mesoskala – insbesondere Kaltluftabflüsse – zu modellieren, müssen großräumige Nutzungs- und Geländestrukturen berücksichtigt werden, so dass die wesentlichen Kaltlufteinzugsbereiche* erfasst werden. Die Nutzung bestimmt u.a. die Erwärmung der Oberflächen und der Luft in den Tagstunden bzw. die Abkühlung und damit die Kaltluftproduktion* in den Nachtstunden. Die Rauigkeit* des Geländes beeinflusst das bodennahe Fließverhalten. Das Relief bestimmt die Strömunglenkung und beeinflusst den Antrieb der Strömung.

Die mesoskaligen Simulationen wurden im Auftrag des Regionalverbands Heilbronn-Franken angefertigt (IMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2023)). Dieser stellt die Daten den Kommunen zur Verfügung.

Zur Bestimmung kleinräumiger stark variierender Größen der Mikroskala wie z.B. der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) bedarf es der Berücksichtigung der Einzelhindernisse. Nur dann kann ermittelt werden, ob beispielsweise ein Aufenthaltspunkt verschattet oder besonnt wird, was sich stark auf die gefühlte Temperatur auswirkt.

Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen werden auf Basis der aufbereiteten Datengrundlagen erstellt. Die Modellergebnisse werden hinsichtlich der Gunstfaktoren (z.B. Kaltluftabflüsse) und der Ungunstfaktoren (Belastungen) ausgewertet. Aus den Ungunstfaktoren und der Empfindlichkeit der Bevölkerung (Bevölkerungsdichte) ergeben sich die Betroffenheiten. Aus der Zusammenschau der Gunstfaktoren und ihrer Intensität sowie der Betroffenheit werden die relevanten Ausgleichsflächen ermittelt. Die Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte, erstellt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015), entsprechen einer Zusammenstellung sämtlicher Simulationsergebnisse und sind folglich das finale Resultat der Klimaanalyse.

Die Klimaanalysekarte, früher als Klimafunktionskarte bezeichnet, ist definiert als Karte, die die räumlichen Klimateigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darstellt, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen. Hierbei wird angenommen, dass „bei ähnlichen oder gleichen Flächennutzungsstrukturen [...] in der Regel von vergleichbaren mikroklimatischen Bedingungen auszugehen [ist], wenn die Reliefeigenschaften nicht stark variieren“ (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)). Zur Ausweisung solcher sogenannter Klimatope* werden i.d.R. das Höhenmodell, Landnutzungsdaten (ATKIS und Luftbilder), Gebäude- und Biotop-/Vegetationskarten herangezogen

Die Planungshinweiskarte ist definiert als informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält. Die Planungshinweiskarte leitet sich aus der Klimaanalysekarte ab und greift wie diese auf die Untersuchungsergebnisse der Klimaanalyse zurück. Wichtiges Element der Planungshinweiskarte ist die Darstellung der Belüftungsfunktion.

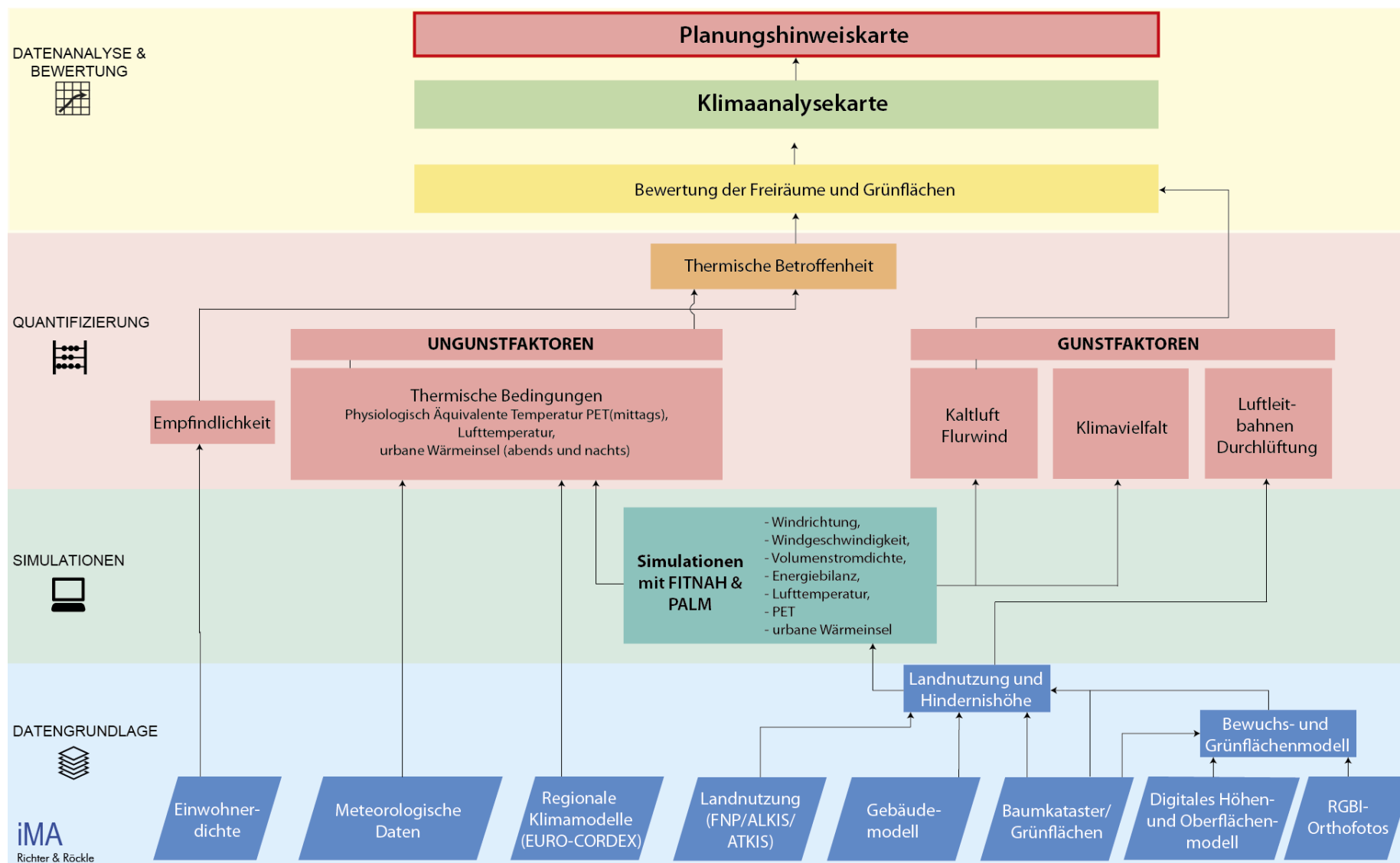


Abbildung 2-1: Vorgehensweise für die Stadtklimaanalyse Neckarsulm.

3 Datengrundlage und Methoden

Räumliche Daten, wie das Gelände- und Gebäudemodell sowie die Landnutzung, werden für die Simulation meteorologischer Größen mit den Modellen FITNAH und PALM-4U benötigt. Aus den Modellergebnissen lassen sich Gunst- und Ungunstfaktoren berechnen. Dabei werden Kaltluftabflüsse, Luftleitbahnen und Klimavielfalt als Gunstfaktoren und Luftqualität, Urbane Wärmeinsel und thermische sowie human-biometeorologische Bedingungen als Ungunstfaktoren berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Betroffenheit aus Ungunstfaktoren und Sensitivität analysiert (s. Anhang A1.2.3), sodass letztlich die Auswertung und Bewertung in Form von Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten erfolgen kann.

Eine Übersicht der verwendeten Daten und Methoden ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik befindet sich im Anhang A1.

3.1 Daten

3.1.1 Topographie

Für die meso- und mikroskaligen Simulationen wird ein digitales Geländemodell (vgl. Abbildung 4-2) und ein digitales Oberflächenmodell verwendet.

Tabelle 3-1: Räumliche Daten für die Klimaanalyse Neckarsulm.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Digitales Geländemodell (DGM)		LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az 2851.9-1/86
Digitales Oberflächenmodell		LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az 2851.9-1/86
Digitales Höhenmodell SRTM V 4.1	1 Bogensekunde	Jarvis et al. 2008, earthexplorer.usgs.gov/

3.1.2 Nutzungsstruktur

Landnutzung und Oberflächenbeschaffenheit spielen für die Ausbildung von Mikroklimaten und damit auch für die Klimamodellierung eine elementare Rolle. Abhängig von der Beschaffenheit der Erdoberfläche wird die Energie der einfallenden lang- und kurzwelligigen Strahlung verschieden umgesetzt. Die klimarelevante Oberflächenbeschaffenheit nimmt bei Flächen mit ähnlichen Landnutzungsstrukturen gleiche Werte an.

Die Landnutzungsdaten aus dem aktualisierten Flächennutzungsplan liefert die Grundlage zur Bestimmung der Landnutzungsstruktur aus klimatischer Sicht (zur Definition der Nutzungsklassen siehe Tabelle A1-1). Die aktuelle Landnutzungsstruktur von Neckarsulm ist gezeigt in Abbildung 3-1.

Der verwendete aktualisierte Flächennutzungsplan bezieht neben dem NORA-ALKIS 2020 und NORA-Basis-DLM 2020 Datensatz auch die zur Verfügung gestellten Bebauungspläne mit ein (siehe Tabelle 3-2).

Aus dem Flächennutzungsplan und den weiteren in Tabelle 3-2 aufgeführten Datensätzen wurden die Eingangsdaten für die FITNAH- und PALM-4U-Simulationen ermittelt und auf die jeweiligen Simulationsgitter übertragen.

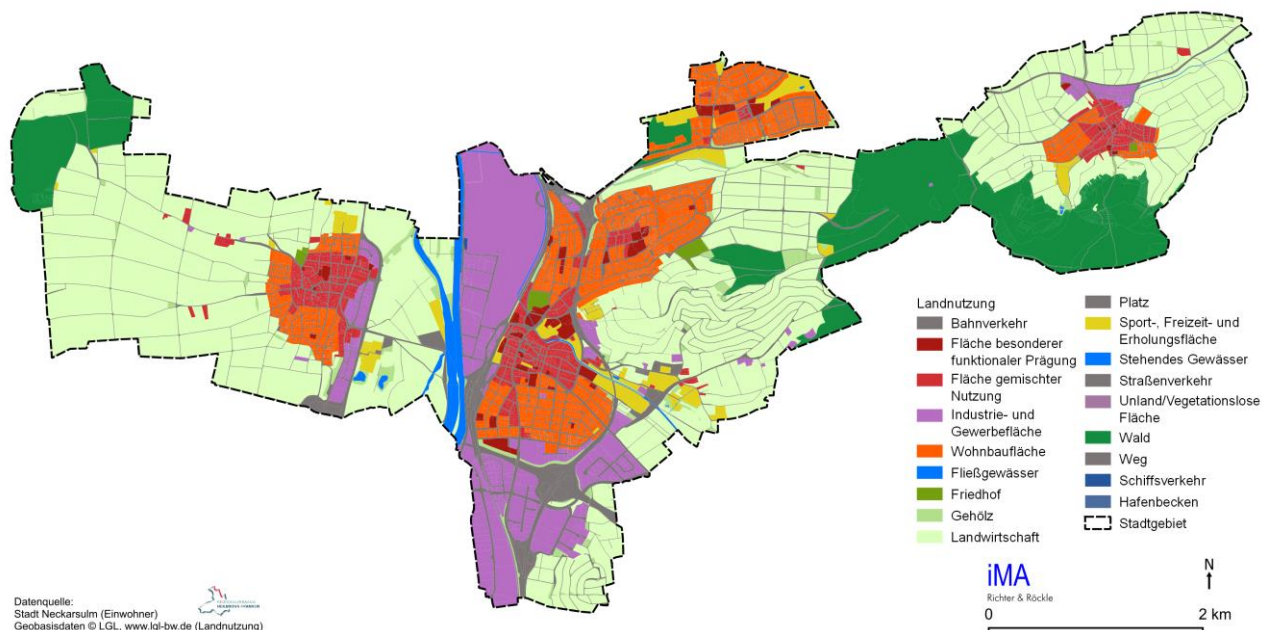


Abbildung 3-1: Aktuelle Landnutzungsstruktur von Neckarsulm.

Tabelle 3-2: Räumliche Daten für die Stadtklimaanalyse Neckarsulm.

Daten	Auflösung/ Datenformat	Bereitgestellt durch
NORA-ALKIS-2020	gdb	LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19
NORA-Basis-DLM-2020	gdb	
DOP - RGBI	tif	
Bebauungspläne (November 2020)	shp	
CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover	100 m x 100 m	European Environment Agency (EEA) 2012
Einwohner pro Gebäude	shp	Einwohnerzahl je Hektar Ergebnisse des Zensus am 9. Mai 2011 pro ha © Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015, ergänzt gemäß Bebauungspläne.
Baumkataster		Stadt Neckarsulm, Stand: März 2022
Grünflächen/Freiflächen		LGL B-W (www.lgl-bw.de); Az.: 2851.9-1/19, Stadt Neckarsulm (Stand: Dezember 2022)
Klimasensible Nutzung (z.B. Pflegeheim, Krankenhäuser, soziale Einrichtungen für Kinder und Jugendliche, etc.)		Klimasensible Nutzung (z.B. Pflegeheim, Krankenhäuser, soziale Einrichtungen für Kinder und Jugendliche, etc.), Stadt Neckarsulm (Stand: Dezember 2022)
LoD2-Gebäudedaten	gml	Stadt Neckarsulm, Stand: März 2022

3.1.3 Messdaten und Klimadaten

Zur klimatischen Einordnung der Stadt Neckarsulm, Analyse der Indikatoren und Validierung der Simulationsergebnisse wurden folgende Daten und Quellen herangezogen:

Tabelle 3-3: Messdaten und weitere klimatologische Daten.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Karten des DWDs	1 km x 1 km	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
Messdaten des DWD	–	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment - European Domain)	Tagesdaten	www.euro-cordex.net

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen. Neben den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse erheblich zu Klimaveränderungen bei. So ist seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche hauptsächlich durch die anthropogen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen verursacht wird.

Um sich an das künftig geänderte Klima frühzeitig anzupassen, werden Klimaprojektionen entwickelt, die die zu erwartenden zukünftigen klimatischen Bedingungen ermitteln. Dabei werden verschiedene Klimaprojektionen betrachtet basierend auf unterschiedlichen möglichen gesellschaftlichen Entwicklungen.

Eine wichtige Grundlage für die unterschiedlichen Klimaprojektionen sind die globalen Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die mögliche Entwicklung der Konzentrationen werden in so genannten „Emissionsszenarien“ (Representative Concentration Pathways, RCP) klassifiziert. Die verschiedenen Szenarien wurden vom zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erarbeitet und im fünften Sachstandsbericht veröffentlicht (IPCC (2013)). Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung des Strahlungsantriebs* aus anthropogenen Quellen innerhalb der verschiedenen Szenarien. Dies ist indirekt ein Indikator für die mögliche Zunahme der globalen mittleren Lufttemperatur.

Die Grundlage der verschiedenen RCP-Szenarien bilden Annahmen über verschiedene sozioökonomische Entwicklungen. Jedem Emissionsszenario liegt ein Bewertungsmodell, welches die zukünftige Energieversorgung, Bevölkerungsentwicklung, Nahrungsmittelproduktion, Weltwirtschaft und ihre Wechselwirkung mit dem Klimasystem und der Landnutzung berücksichtigt, zugrunde (Moss et al. (2008); van Vuuren et al. (2011)). Die Unsicherheiten die durch die Annahmen der zukünftigen Entwicklungen innerhalb jedes Szenarios entstehen, werden in Abbildung 3-2, (dünne farbliche Linien) abgebildet.

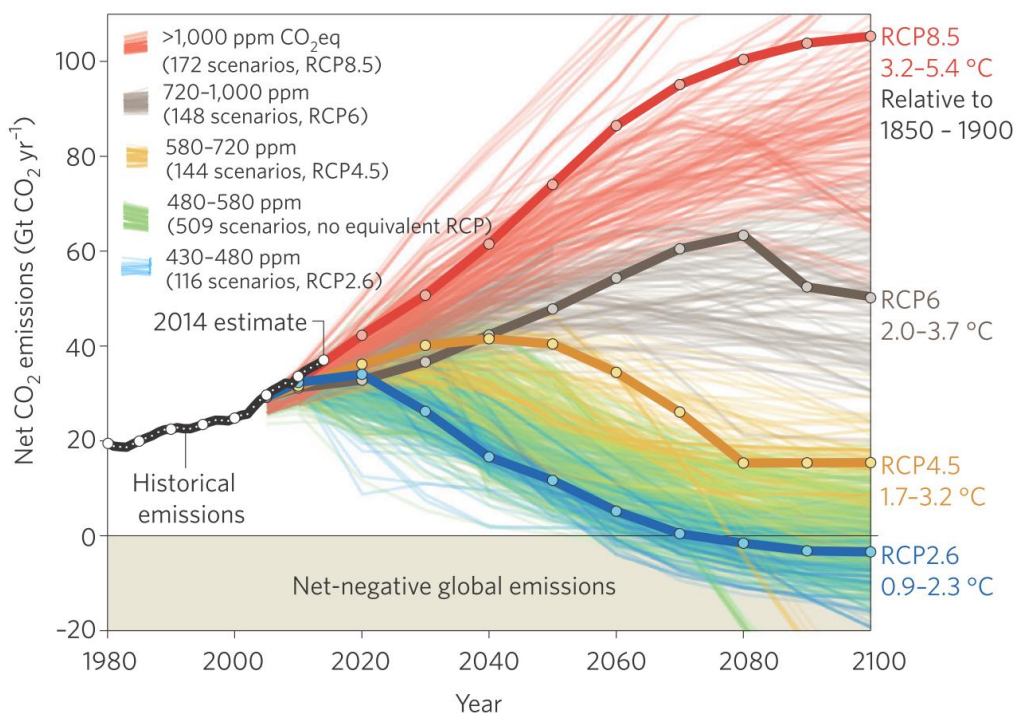


Abbildung 3-2: Zeitreihe des anthropogenen Strahlungsantriebs (W/m²) für verschiedene Emissionsszenarien (RCP; Quelle: Fuss et al. (2014))

Tabelle 3-4: Beschreibung der Representative Concentration Pathways (RCP).

Szenario	Beschreibung
RCP8.5	Bis über das Jahr 2100 ansteigender Strahlungsantrieb. Dieser beträgt im Jahr 2100 8,5 W/m ² oder 1370 ppm CO ₂ -Äquivalent.
RCP6.0	Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei ca. 850 ppm CO ₂ -Äquivalent.
RCP4.5	Moderate Entwicklung. Anstieg des CO ₂ -Äquivalents auf 650 ppm bis 2100.
RCP2.6	„Peak-Szenario“, d.h. Anstieg der Treibhausgasemissionen bis 2020 auf ca. 490 ppm, danach konstanter Treibhausgasemission- und Strahlungsantriebsrückgang auf etwa 2,6 W/m ² im Jahr 2100. Durch den drastischen Rückgang der Emissionen wird eine globale Erwärmung um mehr als 2 °C im Jahr 2100 sehr wahrscheinlich nicht überschritten. Das Szenario entspricht einem Ziel der Vereinbarungen von Paris.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade für den fünften Sachstandsbericht ausgewählt (IPCC (2013)): RCP2.6 (relativ niedriger Strahlungsantrieb), RCP4.5 (mittlerer Strahlungsantrieb), RCP6.0 (hoher Strahlungsantrieb) und RCP8.5 (sehr hoher Strahlungsantrieb) (Abbildung 3-2, dicke Linien).

Mit RCP8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von 8,5 W/m² erreicht. RCP2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Er führt zu einem Strahlungsantrieb von etwa 3 W/m² um 2040 und geht zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von 2,6 W/m² zurück. Die beiden übrigen RCPs bewegen sich im mittleren Bereich (siehe auch Tabelle 3-4 und Abbildung 3-2).

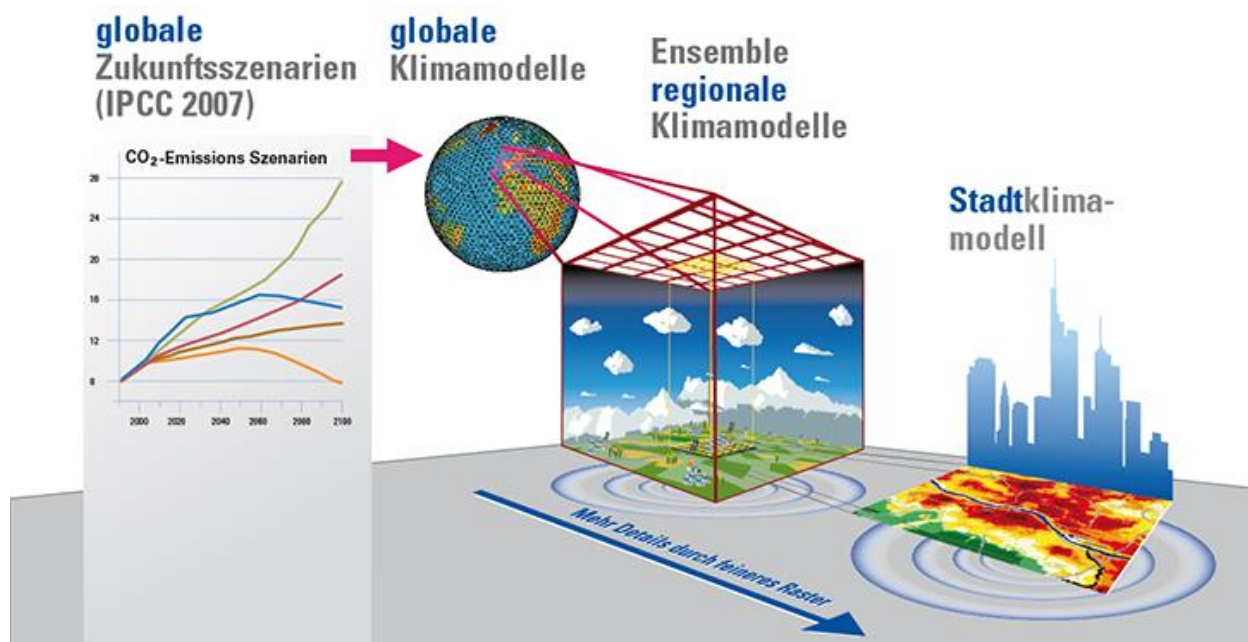


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der räumlichen Verfeinerung (Downscaling) der Klimasimulationsrechnungen von der globalen Skala zur städtischen Skala. Die auf IPCC-Emissions-szenarien basierenden globalen Klimasimulationen dienen als Antrieb für ein Ensemble höher auflösender regionaler Klimamodelle. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dienen wiederum als Eingabedaten des Stadtklimamodells (Grafik: Koßmann, Noppel & Früh (2014)).

Auf Grundlage der verschiedenen RCP-Szenarien werden auf globaler Ebene Klimaprojektionen errechnet. Mit regionalen Klimamodellen werden die Ergebnisse anschließend für einzelne Regionen verfeinert (Abbildung 3-3). Dies erlaubt genauere Aussagen über die Änderungen der mittleren Zustände und der Wetterextreme. Das Verfahren wird als Downscaling-Verfahren bezeichnet und verwendet sowohl statistische als auch dynamische Methoden. Bei dem Downscaling werden komplexe Topographie und die jeweilige Landnutzung durch die feinere Auflösung (Gitterweite) besser repräsentiert als in den globalen Klimaprojektionen (Wang et al. (2004)).

Aus der Vielzahl an Ergebnissen unterschiedlicher Regionalmodelle und Szenarien werden Ensemble-Datensätze erstellt, sogenannte Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensemblemodelle. Diese bündeln die Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle für verschiedene eine Region, z.B. Europa, und ermöglichen somit eine Abschätzung der Unsicherheiten in den Klimamodellen und deren Parametrisierungen (Hewitt (2004); Murphy et al. (2004)).

Konkrete, zeitlich eindeutig zuordenbare Vorhersagen sind mit Hilfe der Klimaprojektionen nicht möglich. Die hohe Unsicherheit in der Entwicklung lässt lediglich eine Aussage über die statistisch betrachtete wahrscheinliche Klimaentwicklung zu.

Im 2021/2022 veröffentlichten sechsten Sachstandsbericht (IPCC (2021)) werden die Zukunftsszenarien aktualisiert. Die Entwicklung des anthropogenen Strahlungsantriebs ist vergleichbar mit denen der RCP-Szenarien des fünften Sachstandsberichts, wobei das Szenario RCP2.6 als unwahrscheinlich eingestuft und nicht mehr betrachtet wird. Da die Ergebnisse des sechsten Sachstandsberichts erst vor kurzem veröffentlicht wurden, liegen noch keine Ensembledatensätze von regionalen Klimamodellen vor. Die Unterschiede in den betrachteten Szenarien zwischen dem fünften und sechsten Sachstandsbericht sind allerdings nur gering. Daher werden für die regionale Klimanalyse weiterhin die RCP-Szenarien des fünften Sachstandsberichts verwendet.

Für die Zukunftsprojektionen der Stadtklimaanalyse wurden die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 verwendet. Diese stellen die beste mögliche Entwicklung (RCP4.5; RCP2.6 wird seitens des IPCC bereits als unrealistisch eingestuft) und die schlechteste mögliche Entwicklung (RCP8.5) dar. Dadurch kann die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklung des Klimas in der Stadt Neckarsulm abgedeckt werden.

3.2 Methoden

3.2.1 Mesoskalige Simulation mit FITNAH

Die mesoskaligen Simulationen der meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit) wurden mit dem Mesoskalenmodell FITNAH angefertigt. Die räumliche Auflösung des FITNAH-Rechengebietes für die Klimaanalyse des Regionalverbandes Heilbronn-Franken beträgt horizontal 50 m x 50 m. Eine Beschreibung des Modells kann dem Anhang A1.2.1 entnommen werden.

Für die FITNAH-Simulation wurde von einer autochthonen Wetterlage* ausgegangen. Die Luftdruckverteilung weist kaum Druckunterschiede auf (wie es z.B. im Kern von Hochdruckgebieten typischerweise der Fall ist) und es gibt keine übergeordnete bzw. überregionale Strömung. Lokalklimatische Besonderheiten im Untersuchungsgebiet können sich unter diesen Bedingungen am besten ausbilden.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand sind:

- Lufttemperatur um 18:00 Uhr bodennah im Mittel 30 °C,
- relative Feuchte 20 %,
- kein übergeordneter geostrophischer Wind*,
- wolkenloser Himmel.

Die Ergebnisse der Simulation repräsentieren damit typische hochsommerliche Verhältnisse.

Das Modell rechnet kontinuierlich in die Zeit mit einer feinen zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich. Aus dem berechneten Tagesgang werden folgende Zeiträume ausgewertet:

- Abend-/Nachtstunden (2 Stunden nach Sonnenuntergang, 22:00 Uhr wahre Ortszeit*).
- Thermische Bedingungen (Wärmebelastung) tagsüber (14:00 Uhr wahre Ortszeit)

Als Ergebnis liefert FITNAH flächendeckend die Strömungsverhältnisse (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Volumenstromdichte*), die Lufttemperatur sowie alle meteorologischen Größen zur Berechnung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET).

Zur Validierung der Modellergebnisse werden die oben beschriebenen Messdaten herangezogen. Die Winddaten werden mit besonderem Augenmerk auf die Strömungsverhältnisse zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang während autochthonen Wetterlagen im Hochsommer beurteilt.

3.2.2 Betrachtung des Klimawandels

Die EURO-CORDEX-Daten wurden mittels der vom Deutschen Wetterdienst entwickelten „Quader“-Methode (Früh et al. (2011)) in eine Auflösung von 50 m x 50 m überführt.

Die EURO-CORDEX-Daten wurden genutzt, um die möglichen Extremwerte der meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während der zukünftigen Dekaden zu ermitteln. Die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum („Quader“). Für die acht Eckpunkte dieses Quaders wurden acht FITNAH-Läufe durchgeführt (siehe Abbildung 3-4). Für die Werte der EURO-CORDEX-Daten wurde innerhalb des Ereignisraumes durch dreifache lineare Interpolation für jeden Punkt im FITNAH-Rechengitter eine Zeitreihe generiert. Damit kann beispielsweise die mittlere jährliche Anzahl klimatischer Kenntage, z.B. die Anzahl an Sommertagen, für die vergangene Klimanormalperiode (1971 – 2000) und unter zukünftig geänderten Klimabedingungen (für die Klimanormalperioden 2031 – 2060, 2071 – 2100) für das RCP4.5 und RCP8.5 berechnet werden.

Darauf aufbauend wurde die Zunahme der Häufigkeit von Wärmebelastung für die Mitte und für das Ende des 21. Jahrhunderts abgeleitet (siehe Kapitel 5.4).

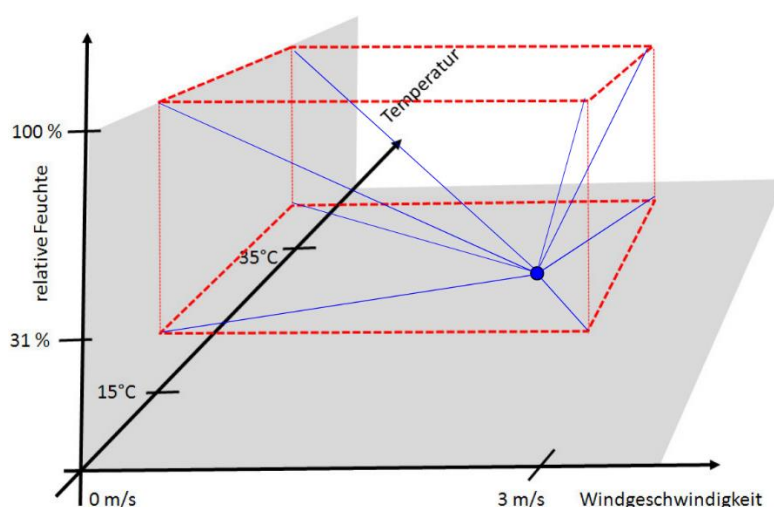


Abbildung 3-4: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der multiplen linearen Interpolation. Die Quadereckpunkte werden durch Simulation der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bestimmt. Der terminbezogene Zielwert (blauer Punkt) wird durch eine multiple lineare Interpolation berechnet, wobei die Jahreszeitreihe der EURO-CORDEX-Daten als Eingangsdaten dient.

3.2.3 Mikroskalige Simulation mit PALM-4U

Das Stadtklimamodell PALM-4U basiert auf dem prognostischen turbulenzauflösenden Grobstruktursimulationsmodell (engl.: Large-Eddy simulation model, LES model) PALM und ist daher in der Lage, turbulente atmosphärische Strömungen in hoher räumlicher Auflösung (< 10 m) zu simulieren (Maronga et al. (2020)). Atmosphärische Turbulenz wird explizit aufgelöst und ermöglicht eine exakte Simulation der Auswirkung der Turbulenz auf die Wind- sowie Temperatur- und Feuchteverteilung. In der gewählten Auflösung von 5 m ist neben der guten Wiedergabe der baulichen Strukturen im Untersuchungsgebiet auch die detailgetreue Berücksichtigung der Vegetation möglich.

Die Landnutzung wird über verschiedene Bodenmodelle in der Simulation berücksichtigt. Dabei wird zwischen versiegelten Oberflächen, mit Vegetation bedeckten Oberflächen, Wasseroberflächen oder Gebäudestrukturen unterschieden. Je nach Klassifizierung werden entsprechende Parameter für die Beschaffenheit der Oberfläche angesetzt (Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Bodenfeuchte, usw.).

Durch die direkte Berücksichtigung von Konvektion* und Turbulenz wird die an Oberflächen durch zum Beispiel Sonneneinstrahlung entstehende Wärme im Modellgebiet weitertransportiert und sorgt für eine realistische Temperaturverteilung.

Die Vegetation wird mit Hilfe eines Vegetationsmodells detailliert berücksichtigt. Dabei werden einzelne Bäume und Sträucher, sofern es die Gitterweite zulässt, explizit als Strömungshindernis sowie über den Schattenwurf sowohl dynamisch (Einfluss auf Windgeschwindigkeit und -richtung) als auch thermisch (Einfluss auf Temperatur und Feuchte) berücksichtigt.

Der hohe Detaillierungsgrad im Modell PALM-4U ergibt sich aus der hohen Auflösung, die es erlaubt, sowohl kleine Strukturen wie einzelne Bäume bis hin zu ganzen Stadtkreisen zu betrachten. Durch die Interaktion zwischen mikroskaligen (z.B. Umströmung einzelner Gebäude) und mesoskaligen Prozessen (z.B. städtische Wärmeinsel) können die Verhältnisse realitätsnah abgebildet werden.

PALM-4U wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich im Bereich der Stadtklimafor- schung validiert und angewandt und wird seit Kurzem erfolgreich im gutachterlichen Bereich für Stadtklimaanalysen verwendet.

Wie bereits für die FITNAH-Simulationen wird auch für die PALM-4U-Simulation eine wolkenarme windschwache Situation berücksichtigt. Da die gesamte Stadtfläche von ca. 11,5 km x 5,6 km durch technische Begrenzungen nicht vollständig in einer mikroskaligen Simulation betrachtet werden kann, deckt der Simulationsbereich nur die Kernstadt und Amorbach ab (Modellgebietsgröße: 5,8 km x 4,5 km, Abbildung 3-5). Die Auflösung der Simulation, d.h. die Maschenweite des Modellgitters, beträgt 5 m in horizontaler Richtung und 3 m in vertikaler Richtung.

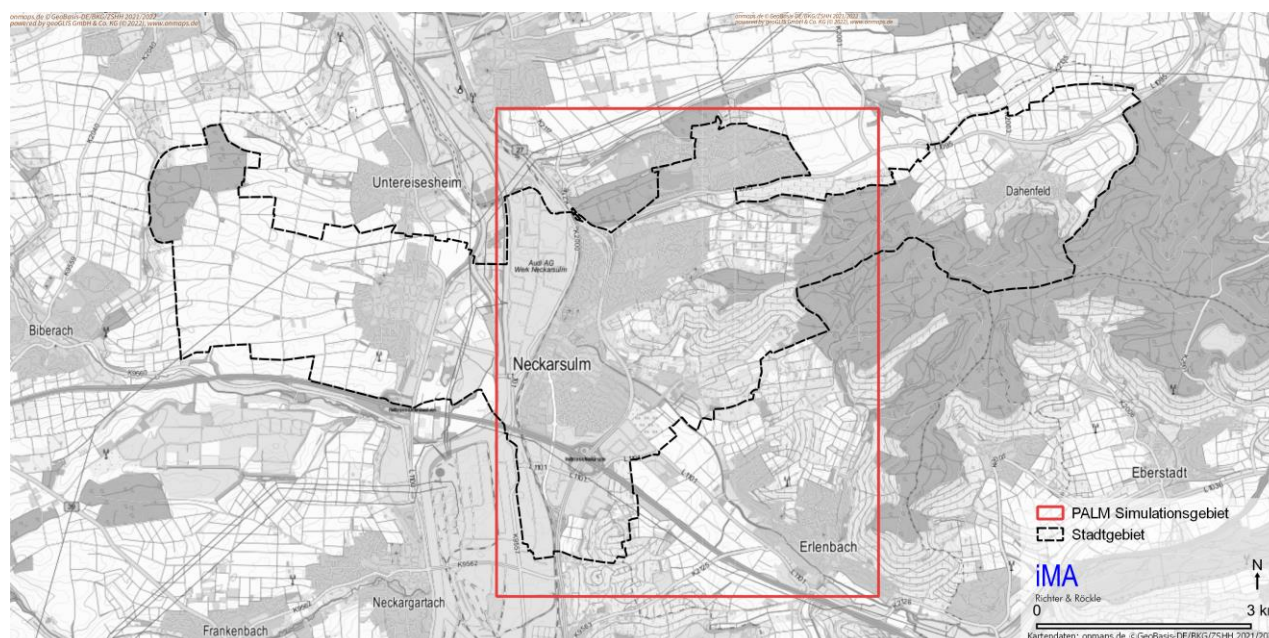


Abbildung 3-5 Simulationsgebiet für die mikroskalige Simulation mit PALM-4U.

Durch die geringe räumliche Ausdehnung der mikroskaligen Simulation können großskalige Einflussfaktoren wie Gebirgszüge oder große Talflächen nicht direkt in der Simulation berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen dieser Faktoren auf die meteorologischen Größen Wind, Temperatur und Feuchte dennoch in der mikroskaligen Simulation mit einzubeziehen, wird in PALM-4U ein sogenanntes Nesting verwendet (Kadasch et al. (2021)). An den Modellgebietsrändern werden die

Daten der mesoskaligen FITNAH-Simulation vorgegeben, welche alle relevanten Einflussfaktoren beinhalten. Auf diese Weise können auch Einflussfaktoren, welche außerhalb des mikroskaligen Modellgebiets liegen, indirekt berücksichtigt werden.

3.2.4 Human-Biometeorologie

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Mayer & Höppe (1987)), berücksichtigen den integralen Effekt der meteorologischen Größen Lufttemperatur (T_a), Luftfeuchte (VP), Windgeschwindigkeit (v) sowie der Strahlungsflüsse (T_{mrt}) auf die menschliche Energiebilanz (siehe Abbildung 3-6). Die physiologischen Parameter Aktivität, Kleidung sowie weitere physische Faktoren werden dabei konstant gehalten.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältestress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts für den mitteleuropäischen Raum wurde die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis & Mayer (1997) verwendet (Tabelle 3-5).

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur ist konform mit der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022) und eignet sich aufgrund ihrer Definition besonders für die (Stadt-)Planung, wird aber auch im Bereich der Kurort-Zertifizierung (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10 (2010)) und im Bereich Tourismus angewandt.

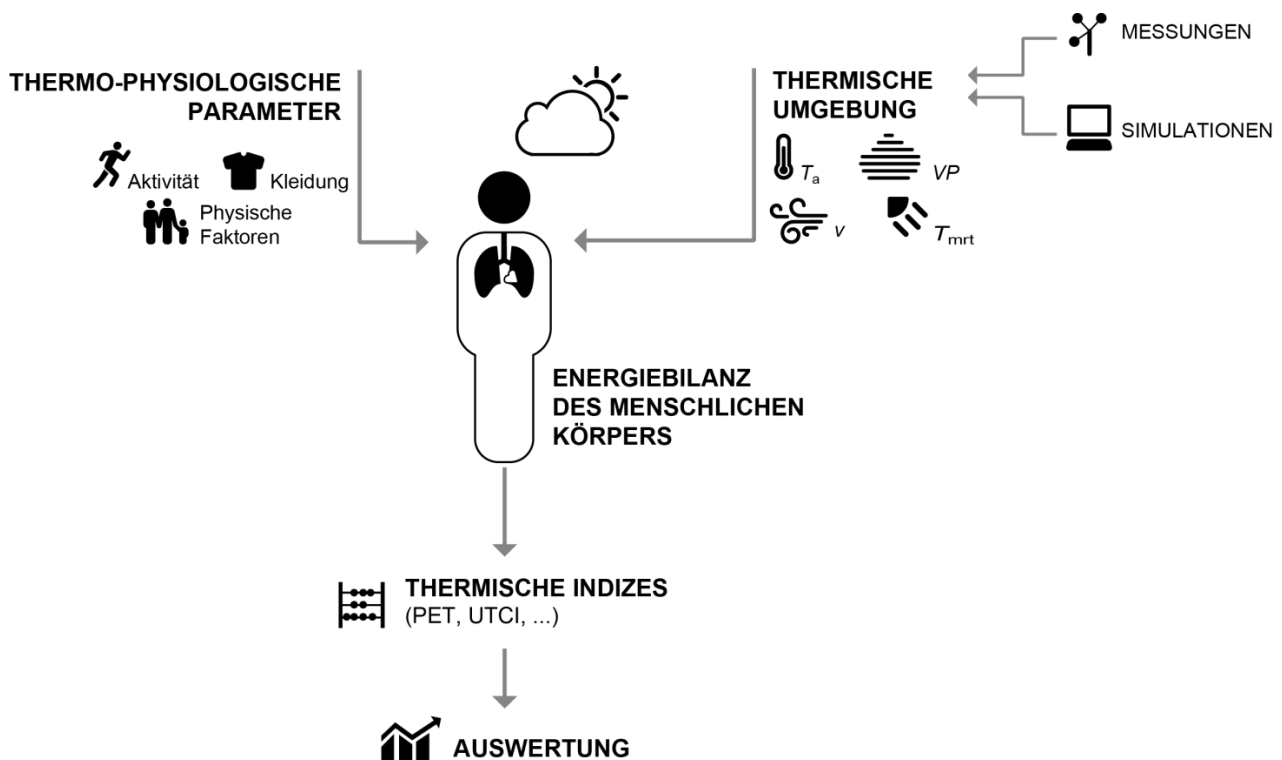


Abbildung 3-6: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes.

Tabelle 3-5: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis & Mayer (1997); VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022)).

PET (°C)	Thermische Sensitivität	Physiologischer Stress
< 4,1	sehr kalt	extremer Kältestress
4,1 - 8,0	kalt	starker Kältestress
8,1 - 13,0	kühl	moderater Kältestress
13,1 - 18,0	leicht kühl	leichter Kältestress
18,1 - 23,0	komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
23,1 - 29,0	leicht warm	leichter Hitzestress
29,1 - 35,0	warm	moderater Hitzestress
35,1 - 41,0	heiß	starker Hitzestress
> 41,0	sehr heiß	extremer Hitzestress

4 Bestandsbeschreibung

4.1 Örtliche Verhältnisse

Die große Kreisstadt Neckarsulm liegt im nördlichen Teil des Kraichgaus und Neckarbeckens an den Flüssen Neckar und Sulm (Abbildung 4-1). Die Stadtfläche umfasst 2.494 ha bei einer Ost-Westausdehnung von ca. 11,6 km (49,17° bis 49,22° nördlicher Breite) und einer Nord-Südausdehnung von ca. 5,6 km (49,17° bis 49,22° nördlicher Breite).

Die Neckarwiesen bilden mit ca. 150 m über Normalhöhennull (NHN) dem tiefsten Punkt und der Stadtwald Dahenfeld mit ca. 335 m ü. NHN den höchsten Punkt.

Neckarsulm liegt östlich des Neckars, welcher in diesem Bereich etwa von Süden nach Nordnordwesten verläuft. Das Weinsberger Tal, in welchem die Sulm verläuft, erstreckt sich von Südost nach Nordwest durch das Stadtgebiet von Neckarsulm. Die Altstadt befindet sich südlich der Sulm. Die Stadtteile Amorbach und Dahenfeld liegen nordöstlich und östlich der Kernstadt und gehören zum Naturraum Hohenloher-Haller Ebene.

Die markantesten Erhebungen im Stadtgebiet von Neckarsulm bilden die Keuperberge Stiftsberg (ca. 256 m ü. NHN) und Scheuerberg (310 m ü. NHN), welche sich südlich bzw. nördlich des Weinsberger Tals befinden. Der Stiftsberg gehört zu den Heilbronner Bergen, der Scheuerberg zur Sulmener Bergeebene, wobei beiden Ausläufer der Schwäbisch-Fränkischen Waldberge bilden. An ihren Hängen wird großflächig Weinbau betrieben.

Westlich des Neckars liegt der Stadtteil Obereisesheim. Der westliche Teil des Stadtgebietes wird dem Naturraum Nördlicher Kraichgau, mit seinen fruchtbaren Lösslehmböden, auf welchen intensiver Ackerbau betrieben wird, zugeordnet. Die Landschaft steigt hier bis zum Schellenberg im äußersten Westen des Stadtgebietes auf etwa 219 m ü. NHN und im Nordwesten im Dornet-Wald auf 240 m ü. NHN an.

Die Siedlungsfläche von Neckarsulm ist nahtlos mit der der südlich gelegenen Stadt Heilbronn zusammengewachsen. Große Industrie- und Gewerbeflächen erstrecken sich über das ganze Stadtgebiet entlang der östlichen Neckaraue, rund um das Autobahnkreuz Neckarsulm/Heilbronn im Weinsberger Tal und östlich von Obereisesheim.

Hinsichtlich der Flächennutzungsstruktur im Stadtgebiet von Neckarsulm haben die versiegelten Flächen etwa einen Anteil von 38,6 %, der Grünflächenanteil beträgt 59,7 % und Gewässer nehmen 1,6 % in Anspruch. Industrie- und Gewerbeflächen beanspruchen 9,9 % des Stadtgebietes, Wohnbauflächen 10,8 % und die Verkehrsflächen 11,7 %. Grün- und Landwirtschaftsflächen nehmen etwa 47,7 % und Waldflächen 38 % der Stadtfläche ein².

In Neckarsulm leben etwa 26.292 Einwohner (Stand 31.12.2021³), davon etwa 23,0 % der Bevölkerung in Amorbach, 4,9 % in Dahenfeld und 16,2 % in Obereisesheim (Stand 17.01.2023⁴). Die Bevölkerungsdichte beträgt damit 1.054 Ew/km².

³ <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Bevoelkerung/01515020.tab?R=GS125065>

⁴ https://www.neckarsulm.de/startseite/unsere+stadt/daten+_+fakten.html

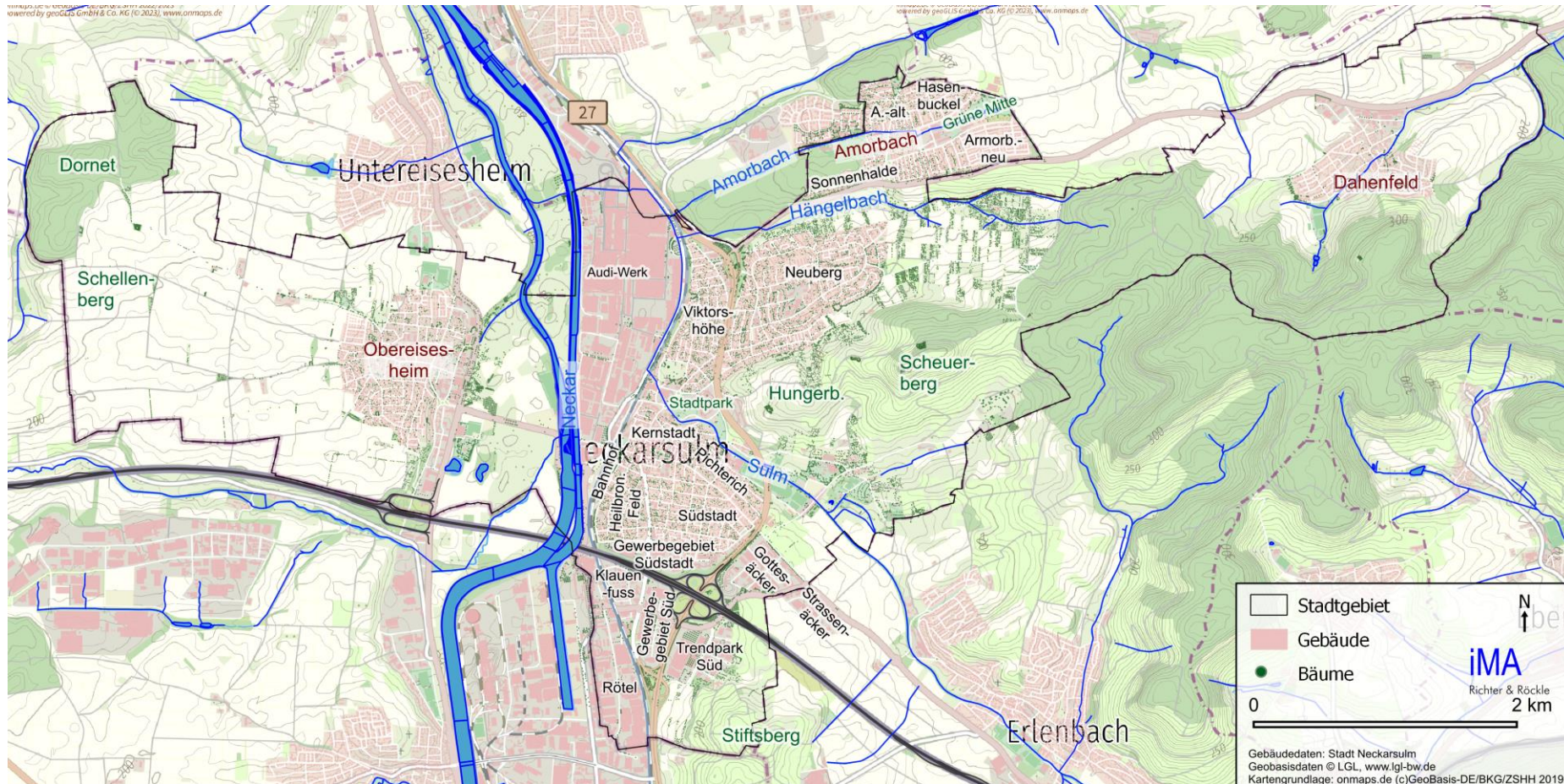


Abbildung 4-1: Gewässer, Erhebungen und Stadtteile von Neckarsulm (Kartendaten: onmaps.de © GeoBasis-DE/BKG 2021).

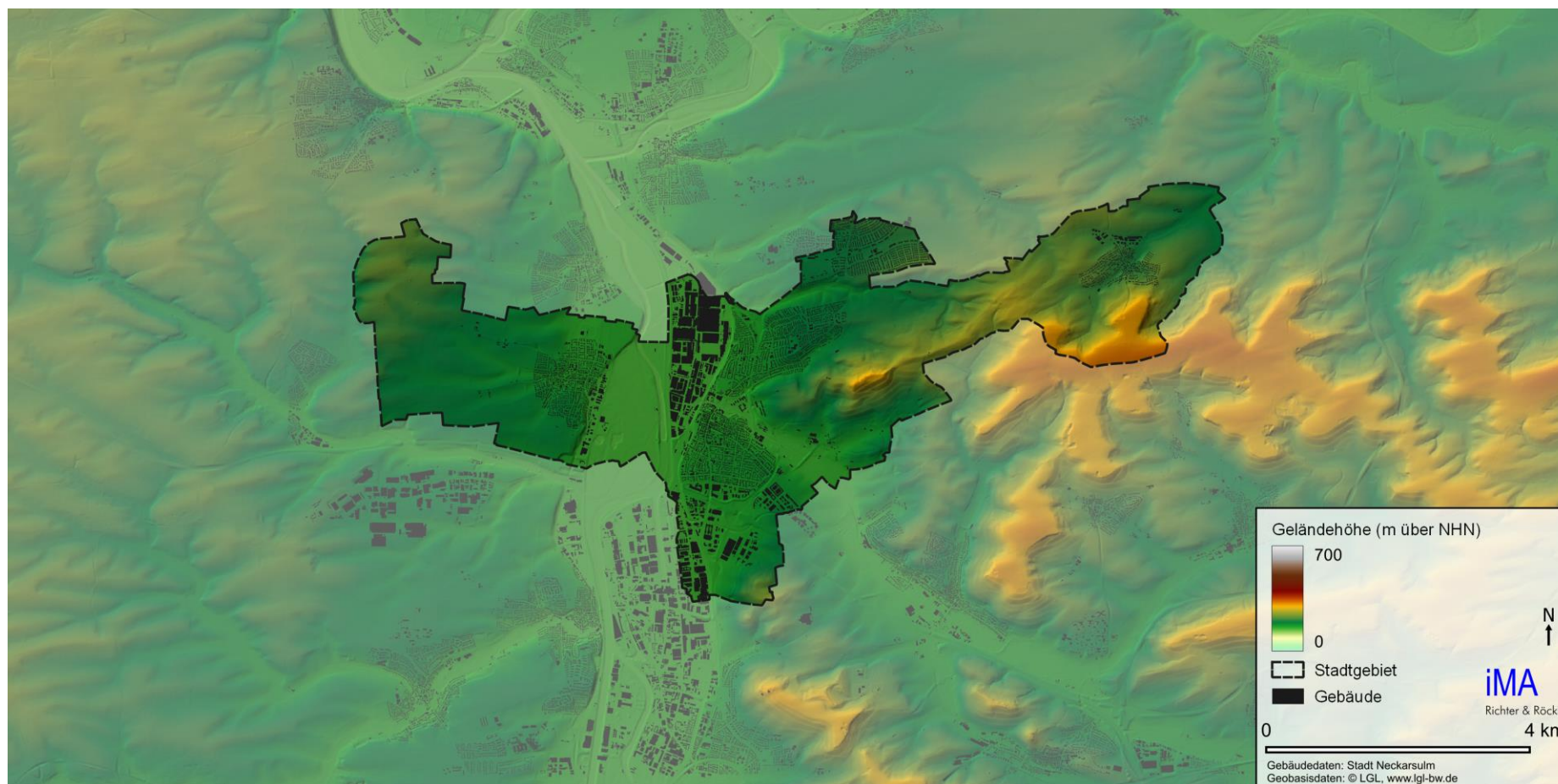


Abbildung 4-2: Topographie der Stadt Neckarsulm und Umgebung.

4.2 Klimatische Einordnung der Stadt Neckarsulm

Neckarsulm lässt sich dem Klima der gemäßigten Breiten unter maritimem Einfluss zuordnen, das sich durch ganzjährige Niederschläge und milden Temperaturen auszeichnet (Cfb nach Köppen und Geiger (Köppen (1936))). Die Lage im Kraichgau und Neckarbecken bedingt im Vergleich zu den mittleren Verhältnissen in Baden-Württemberg eher trockene und heiße Sommer.

Das Klima eines Ortes wird durch die Angabe statistischer Kennzahlen der Klimatelemente beschrieben, welche in der Regel über einen 30-jährigen Zeitraum (die sog. „Klimanormalperiode“) erfasst werden. Für eine klimatisch feinere Einordnung werden thermische Indikatoren gewählt, wie sie in Tabelle 4-1 für die Klimanormalperiode 1961 – 1990 und 1971 – 2000 aufgeführt sind. Generell spielen die Höhenlage, die geografische Lage und lokale Nutzungsstruktur eine entscheidende Rolle für die thermischen Indikatoren.

Die erhobenen Daten beruhen auf Stationsmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Da in Neckarsulm keine langjährigen Messdaten vorliegen, wurden die nächstgelegenen Stationen in Heilbronn (Pfehlstraße), welche im Zeitraum 1958 bis Oktober 2003 betrieben wurde, ausgewertet. Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) betreibt seit 1997 eine Messstation im nördlichen Industrie- und Gewerbegebiet in Heilbronn (Hans-Rießler-Straße). Da sich diese Stationen in unmittelbarer Nähe zu Neckarsulm befinden und auf einem vergleichbaren Höhenniveau liegen, gibt die Auswertung der Messstationen in Heilbronn eine gute Abschätzung des Klimas für Neckarsulm wieder.

In Tabelle 4-1 sind Klimaindikatoren für Heilbronn und für ausgewählte Orte in Deutschland aufgeführt. An der Messstation Heilbronn wurden zwischen 0 und 47 Eistage* (im Mittel 14) und 29 bis 102 Frosttage* (im Mittel 69) im Bezugszeitraum (1961 – 1990) beobachtet. Auf dem Feldberg im Schwarzwald, auf 1.490 m ü. NHN, liegt die Anzahl an Eistagen bei 85 und an Frosttagen bei 163.

Mit 23 bis 73 Sommertagen und 2 bis 28 Heißen Tagen in der Klimanormalperiode 1961 – 1990 weist die Region um Neckarsulm mit Freiburg die höchste Wärmebelastung der aufgeführten Städte auf. Geringere Wärmebelastungen finden sich im Norden Deutschlands (z.B. Hamburg mit 20 Sommertagen und 3 Heißen Tagen) oder in der Höhe des Schwarzwaldes (z.B. Feldberg ohne Sommertage oder Heiße Tage).

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei etwa 758 mm/a in Heilbronn im Zeitraum 1961 bis 1990 und liegt somit im Bereich des deutschlandweiten Mittelwerts von 789 mm. Die Sonnenscheindauer liegt bei etwa 1.604 Stunden in Heilbronn.

In Tabelle 4-1 sind zusätzlich die Indikatoren und klimatologischen Kenntage für die Klimanormalperioden 1971 – 2000 und 1981 – 2010 dargestellt. Zwischen 1961 – 1990 und 1971 – 2000 stieg die Jahresmitteltemperatur in der Region um etwa 0,2 K an, bis zur Periode 1981 – 2000 nochmals um 0,4 K. Dementsprechend erhöhten sich im selben Zeitraum z.B. die Anzahl an Sommertagen um etwa 3 Tage pro Jahr. Die Anzahl an Eistagen verringerte sich um etwa 2 Tage pro Jahr und die Anzahl an Frosttagen um etwa 5 Tage pro Jahr.

Der Niederschlag ging zwischen 1961 – 1990 und 1971 – 2000 um 69 mm/a zurück, stieg aber im Zeitraum 1981 – 2010 wieder auf das Niveau von 1961 – 1990 (Tabelle 4-1).

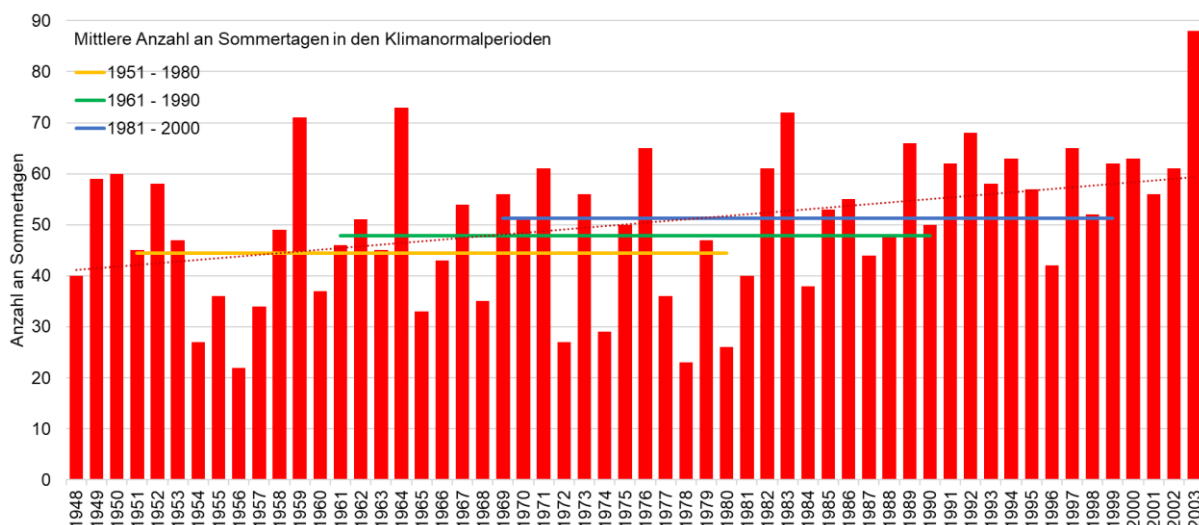


Abbildung 4-3: Mittlere Anzahl an Sommertagen im Zeitraum 1948 bis 2003 in Heilbronn (rote Säulen). Die Linien zeigen den Median* der mittleren Anzahl an Sommertagen für die jeweiligen 30-jährigen Zeiträume (Klimanormalperioden) an (Daten: DWD).

Tabelle 4-1: Jahresmittelwerte verschiedener Indikatoren für die Umgebung von Neckarsulm und für ausgewählte Orte in Deutschland in den Zeiträumen 1961 – 1990, 1971 – 2000 und 1981 – 2010. Datengrundlage: Messdaten des DWD Climate Data Center (CDC).
Eistag: $T_{max} < 0\text{ °C}$, Frosttag: $T_{min} < 0\text{ °C}$, Sommertag: $T_{max} \geq 25\text{ °C}$, Heißer Tag: $T_{max} \geq 30\text{ °C}$

Ort/Messstation	Stationshöhe (m)	Eistage (d)	Frosttage (d)	Sommertage (d)	Heiße Tage (d)	Niederschlag (mm)	Lufttemperatur (°C)	Sonneneindauer (h)
1961 – 1990								
Heilbronn (DWD)	167	14	69	48	10	758	9,9	1.604
Freiburg	236	16	61	49	10	908	–	–
Feldberg	1.490	85	163	0	0	1.909	3,3	1.641
Frankfurt/Main	100	17	82	42	9	658	9,7	1.586
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	21	77	20	3	770	8,6	1.557
1971 – 2000								
Heilbronn (DWD)	167	12	64	51	12	689	10,1	1.608
Freiburg	236	12	51	54	13	930	11,1	1.748
Feldberg	1.490	78	157	0	0	1.753	3,6	1.643
Frankfurt/Main	100	13	72	46	11	621	10,2	1.614
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	16	70	23	4	–	9,0	1.585
1981 – 2010								
Heilbronn	-	-	-	-	-	759	10,5	-
Freiburg	236	12	57	60	15	934	11,4	1.768
Feldberg	1.490	75	151	1	0	1.637	3,9	1.661
Frankfurt/Main	100	13	70	52	13	629	10,5	1.662
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	16	70	27	5	793	9,4	1.580

In Abbildung 4-3 ist die Entwicklung der jährlichen Anzahl an Sommertagen in Heilbronn über 55 Jahre (1948 – 2003) dargestellt. Die bislang höchste Anzahl an Tagen mit einer Lufttemperatur von über 25 °C wurde während des Hitzesommers im Jahr 2003 erzielt und betrug 88 Tage.

Die Dauer und Intensität sommerlicher Wärmebelastung spiegelt sich nicht automatisch in hohen Jahresmittelwerten. Diese sind nicht nur auf heiße Sommer zurückzuführen, sondern können sich auch durch warme Wintermonate ergeben. So sticht z.B. das Jahr 2003 trotz des sehr heißen Sommers bei den Jahresmittelwerten nicht hervor, da es gleichzeitig mit 89 Frosttagen im Winter relativ kalt war.

4.3 Strömungsverhältnisse

Eine Luftströmung wird gekennzeichnet durch die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung (Himmelsrichtung aus der der Wind weht). Luftströmungen entstehen durch horizontale Druckunterschiede. In großer Höhe ist die Strömung nahezu ungestört. In Bodennähe (0 bis etwa 1 km über dem Boden) wird die Strömung durch Reibung abgebremst und durch das Geländere relief kanalisiert und umgelenkt.

Abbildung 4-4 zeigt die Windverhältnisse im Raum Neckarsulm (Ostwert: 516643, Nordwert: 5449809, Höhe 160m) im Zeitraum vom 01.04.1994 bis 30.06.2001. Die Messstation Neckarsulm zeigt ein primäres Maximum aus Südwestlicher Richtung und ein sekundäres Maximum aus nord-nordöstlicher Richtung. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 1,9 m/s. Bei Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s zeichnet sich ein Maximum aus dem östlichen Halbraum und aus Norden ab.

Tabelle 4-2: Beschreibung der Messstation Neckarsulm (LUBW).

LUBW-Messstation Neckarsulm	
Lage Ostwert / Nordwert	516643 / 5449809
Höhe ü. NHN	160 m
Messzeitraum	01.04.1994 – 30.06.2001
mittlere Windgeschwindigkeit	1,9 m/s

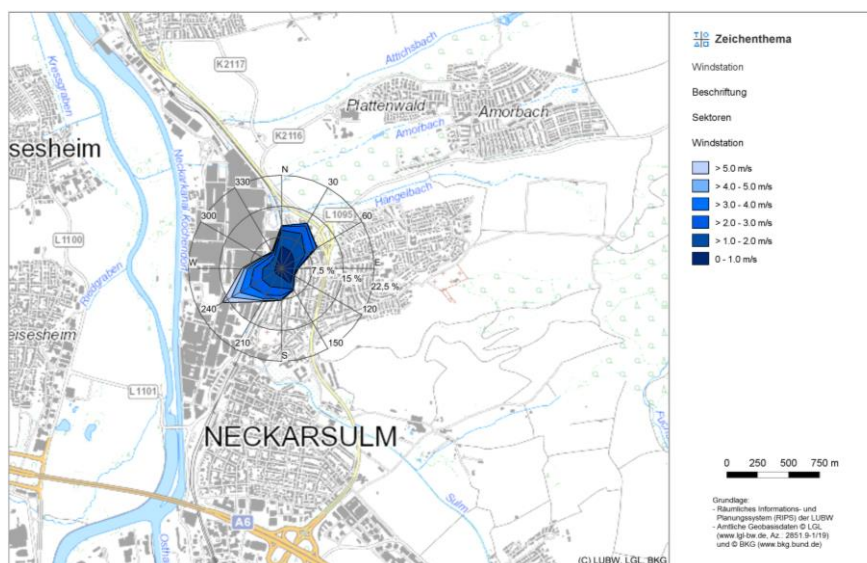


Abbildung 4-4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an den Messstellen der LUBW in Neckarsulm.

5 Auswirkungen des Klimawandels

Auf die Auswirkungen und Maßnahmen für unterschiedliche Akteure kann in einer Klimaanpassungsstrategie näher eingegangen werden. Hier sollen als Übersicht die klimatologischen Aspekte beleuchtet werden. Eine Übersicht über die betroffenen Bereiche findet sich auf der Webseite des Umweltbundesamts⁵.

In Tabelle 5-1 sind die potenziellen Änderungen der meteorologischen Größen dargestellt. Welche Auswirkungen sich auf die betroffenen Bereiche ergeben, ist in den anschließenden Kapiteln aufgeführt.

Tabelle 5-1: Veränderung meteorologischer Größen im Laufe des 21. Jahrhunderts.

Meteorologische Größe	Erwartete Änderung im 21. Jahrhundert
Lufttemperatur	EURO-CORDEX_Daten: +2,0 K (Mitte des Jhd.) +4,0 K (Ende des Jhd.)
Niederschlag	EURO-CORDEX-Daten: +6 % (Mitte des Jhd.) +4 % (Ende des Jhd.) Innerhalb dieser Trends muss die jahreszeitliche Variabilität berücksichtigt werden. Hierbei ist generell von winterlicher Zunahme des Niederschlags und sommerlicher Abnahme auszugehen. Gleichzeitig wird eine Zunahme an Starkregenereignissen erwartet. Saisonale Variabilität: +9 % Winter (Mitte des Jhd.) +19 % Winter (Ende des Jhd.) +11 % Frühling (Mitte des Jhd.) +15 % Frühling (Ende des Jhd.) -3 % Sommer (Mitte des Jhd.) -9 % Sommer (Ende des Jhd.) keine Tendenz im Herbst
Starkwind	Zunahme ⁶
Starkregen-Ereignisse	EURO-CORDEX-Daten: steigende Tendenz für Sommer (5 % – 15 %) und Winter (15 % – 25 %)
Hagel	Münchner Rückversicherung: etwa +0,1 Hageltage (Mitte des Jhd.)
Trockenheit	Sommerlicher Rückgang von Niederschlägen

⁵<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse/uebersicht-betroffenheiten>

⁶ Für Starkwind liegen keine belastbaren Prognosen vor. Quelle: Umweltbundesamt. Projekt-Nr. 24309; 2015, „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem-klimawandel>

5.1 Klimamodellierung

Das Klima unterliegt ständigen Schwankungen und Veränderungen, da die Witterungsabläufe während einzelner Jahre sehr unterschiedlich sein können. Zusätzlich zu den natürlichen Klimaschwankungen tragen anthropogene Einflüsse zu Klimaveränderungen bei. So ist seit etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme der globalen Lufttemperatur zu beobachten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der anthropogen bedingten Freisetzung von Treibhausgasen ist. Auch in Baden-Württemberg wird eine Zunahme der Lufttemperatur beobachtet (siehe Abbildung 5-1).

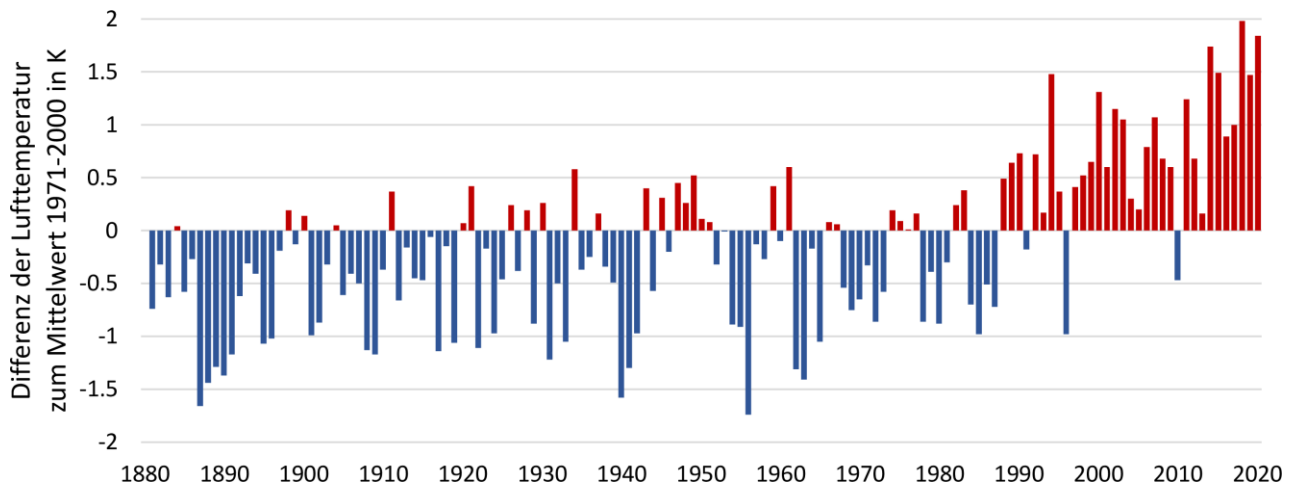


Abbildung 5-1: Beobachteter Klimawandel in Baden-Württemberg. Differenz der mittleren Lufttemperatur zum langjährigen Mittel in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 von 1880 bis heute (Daten: DWD).

Eine wichtige Grundlage zur Projektion des Klimas spielt die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre und deren mögliche Entwicklung. Für die Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Klimas wurden die Klimaprojektionen auf Basis der EURO-CORDEX-Daten ausgewertet (siehe Kapitel 3.1.3). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse in Bezug auf die Stadt Neckarsulm dargestellt. Dabei werden zunächst die Klimaelemente Lufttemperatur und Niederschlag und anschließend klimatologische Kenntage betrachtet.

5.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist die Temperatur der bodennahen Atmosphäre. Deren Messung soll nicht von Sonnenstrahlung oder anderen Wärmeströmen beeinflusst werden. Sie ist ein wesentlicher Parameter bei der Bestimmung der Wärmebelastung.

In Abbildung 5-2 ist die berechnete Zunahme der Lufttemperatur für die Klimanormalperioden 2031 – 2060 und 2071 – 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 dargestellt.

In dem betrachteten Szenario tritt eine deutliche Temperaturerhöhung auf. Diese äußert sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts in einer Zunahme um 2,0 K. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird eine deutliche Zunahme von 4,0 K prognostiziert.

Die grundsätzlich festgestellte Temperaturerhöhung wirkt sich außerdem auf die in den folgenden Kapiteln betrachteten Parameter maßgeblich aus.

Die Zeitreihe des Medians der Lufttemperatur in Abbildung 5-3 verdeutlicht nochmals die prognostizierte Zunahme der Lufttemperatur bis 2100. Der farblich hervorgehobene Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil*, zeigt, dass die Prognose um bis zu 4 K schwankt.

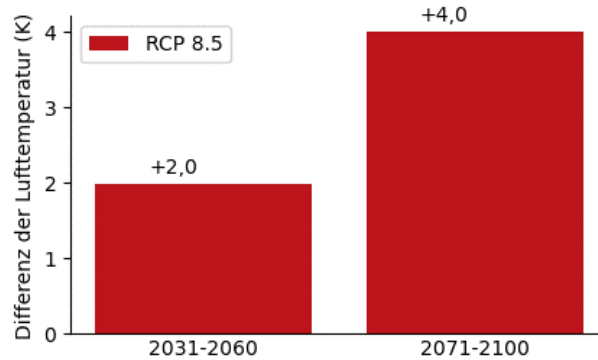


Abbildung 5-2: Änderung der Lufttemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.

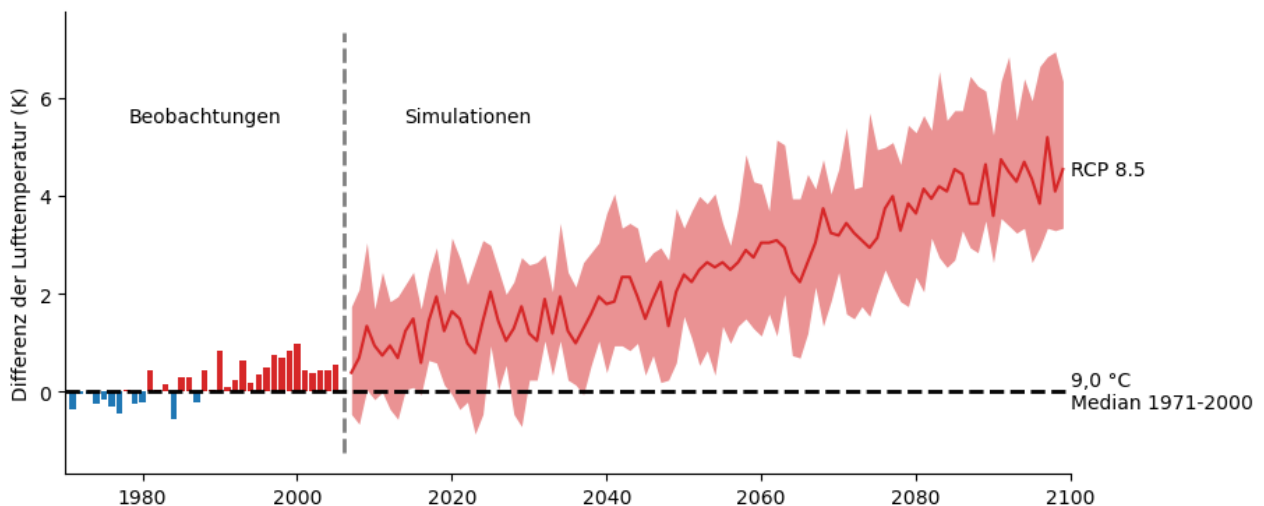


Abbildung 5-3: Lufttemperatur 1971 – 2100 für das RCP 8.5 Szenario (Daten: EURO-CORDEX).

5.3 Niederschlag

Niederschlag ist das in flüssiger oder fester Form aus Wolken auf die Erde fallende Wasser.

Im Frühjahr (Januar bis April) fallen in der Regel die geringsten Niederschlagsmengen an. Das Maximum der Niederschlagsmenge fällt im Mai, Juni und Juli an (Abbildung 5-4).

Für das 21. Jahrhundert wird keine eindeutige Änderung des Jahresniederschlags prognostiziert. Zwar wird im Mittel eine geringe Zunahme von etwa 6 % zur Mitte des Jahrhunderts bzw. von 4 % zum Ende des Jahrhunderts berechnet, allerdings lässt sich durch die hohe Variabilität keine gesicherte Aussage über die Entwicklung treffen (Abbildung 5-5).

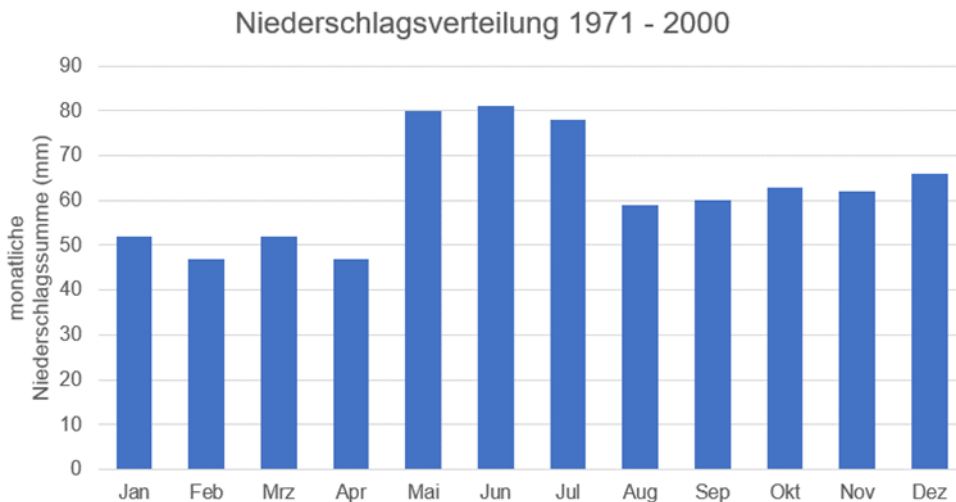


Abbildung 5-4: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1971 – 2000 gemessen in Heilbronn (Daten: DWD).

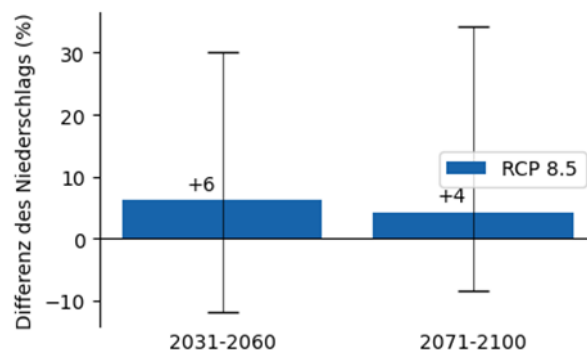


Abbildung 5-5: Niederschlagsänderung in % bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

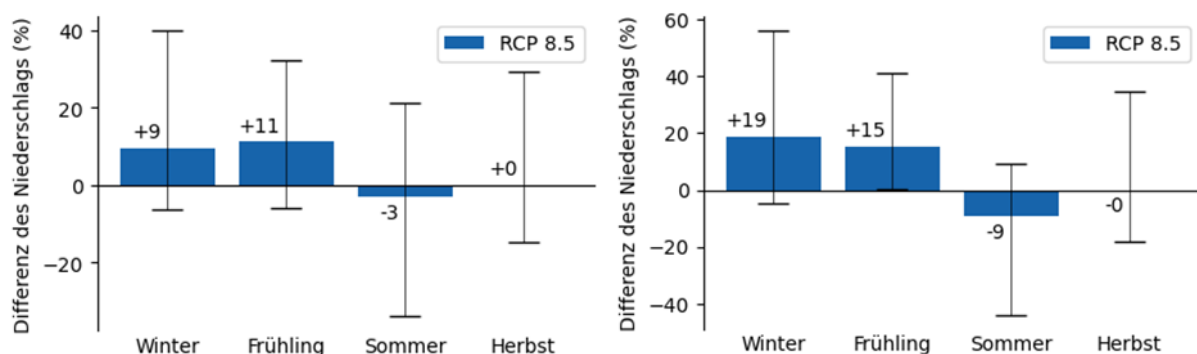


Abbildung 5-6: Saisonale Niederschlagsänderung für den Zeitraum 2031 – 2060 (links) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

Bei der saisonalen Betrachtung des Niederschlags ist von einer Verschiebung der Niederschlagsmenge vom Sommer in den Frühling und Winter auszugehen (Abbildung 5-6). Während die Niederschlagsmengen im Winter und Frühling um 9 % bis 11 % (Mitte 21. Jhd.) bzw. um bis zu 19 % (Ende 21. Jhd.) zunehmen, wird mit einer Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer von 3 %

bis Mitte des Jhd. bzw. 9 % bis Ende des Jhd. ausgegangen. Zu beachten sind die hohen Unsicherheiten, wie auch bereits bei der Betrachtung der Jahresniederschläge. Allerdings ist die Tendenz der Verschiebung vom Sommerniederschlag zum Winter- und Frühlingsniederschlag besonders gegen Ende des Jahrhunderts durchaus zu erkennen.

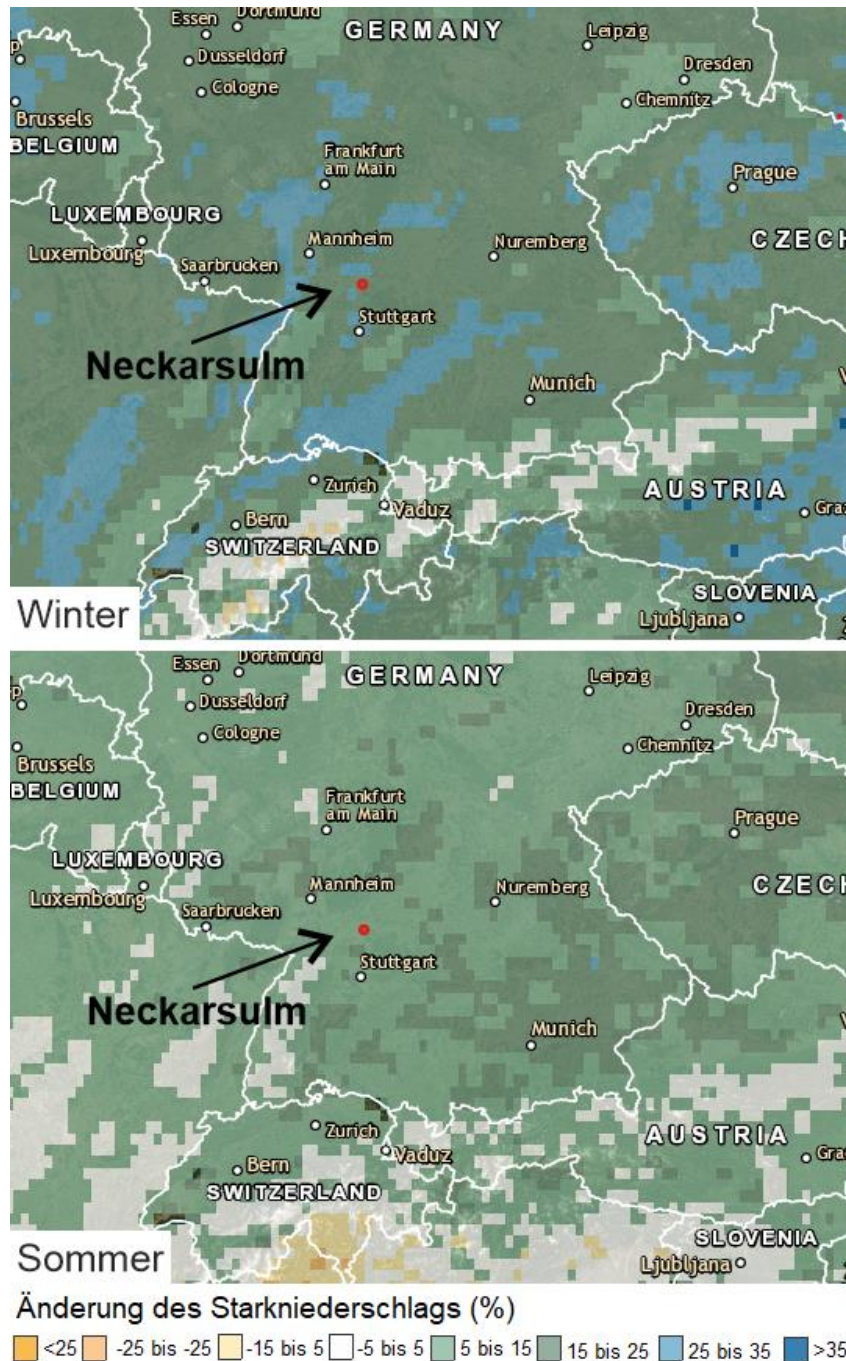


Abbildung 5-7: Änderung des Starkniederschlags im Winter (oben) und Sommer (unten) im Zeitraum 2071 – 2100 im Vergleich zum aktuellen Klima (1971 – 2000) bei Betrachtung des RCP 8.5. Starkniederschlag wird definiert als 95. Perzentil der Intensität aller Regenereignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020⁷).

⁷ <https://experience.arcgis.com/experience/5f6596de6c4445a58aec956532b9813d>

Neben der Gesamtregenmenge ist auch die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen (z.B. kräftige Gewitter) von Bedeutung. Die Analyse zeigt, dass im Sommerhalbjahr mit einer leichten Zunahme von 5 % bis 15 % zu rechnen ist. Für den Winter wird eine Zunahme von 15 % bis 25 % für den Raum Neckarsulm prognostiziert (Abbildung 5-7).

5.4 Klimatologische Kenntage

In Tabelle 5-2 sind die klimatologischen Kenntage aufgeführt, die sowohl für den Zeitraum 1971 – 2010 (siehe Kapitel 4.2), als auch mit den Multi-Modell-Multi-Szenario-Klimadaten für die 30-jährigen Zeiträume (Klimanormalperioden) 2031 – 2060 und 2071 – 2100 ermittelt wurden.

Die hier untersuchten klimatologischen Kenntage beziehen sich bis auf die Hageltage direkt auf Neckarsulm. Hagelereignisse treten sehr lokal und selten auf und werden nur an wenigen Stationen gemessen (s. Kapitel 5.4.3). Die EURO-CORDEX Klimamodelldaten weisen keine Daten zu Hagelereignissen aus, wodurch es nicht möglich ist belastbare Aussagen zu diesem Thema zu treffen.

Tabelle 5-2: Klimatologische Kenntage für verschiedene Klimanormalperioden ermittelt aus EURO-CORDEX Klimamodelldaten auf dem Gebiet von Neckarsulm. Kenntage für zukünftige Perioden basieren auf dem Szenario RCP 8.5.

Klimatologischer Kenntag	1971 – 2000	2031 – 2060	2071 – 2100
Frosttage	71	42	22
Eistage	14	5	2
Sommertage	48	74	105
Heiße Tage	8	22	43

5.4.1 Heiße Tage, Sommertage und tropische Nächte

Die Anzahl an heißen Tagen beschreibt in erster Linie ein Gütekriterium für den Sommer, was durch die Anzahl an Sommertagen ergänzt wird⁸.

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird prognostiziert, dass die Anzahl der heißen Tage um etwa 14 Tage (RCP 8.5) ansteigt (Tabelle 5-2, Abbildung 5-8). Bis 2100 wird ein Anstieg um 35 Tage auf dann 43 Tage jährlich (RCP 8.5) erwartet. Zu beachten ist hier die große Unsicherheit, welche durch die Variabilität in der Temperaturzunahme bedingt ist (vgl. Abbildung 5-3).

Eine ähnliche Tendenz wie für die Anzahl an heißen Tagen lassen sich in Tabelle 5-2 auch für die Anzahl an Sommertagen erkennen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts könnte die Anzahl der Sommertage um etwa 26 Tage (RCP 8.5) ansteigen (Abbildung 5-8). Bis 2100 könnten es letztlich etwa 57 Tage (RCP 8.5) mehr sein als im Zeitraum 1971 – 2000.

⁸www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html

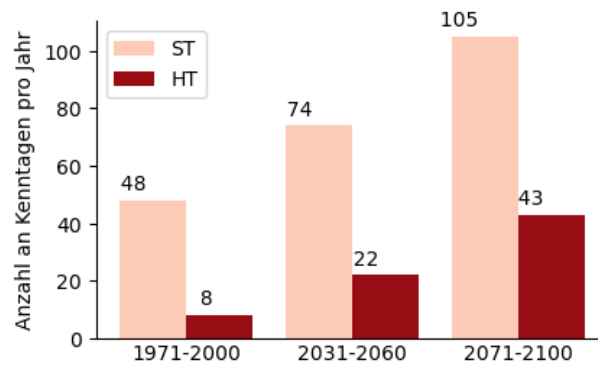


Abbildung 5-8: Anzahl der Sommertage (ST) und der heißen Tage (HT) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5.

Über die zukünftige Anzahl an Tropennächten kann aufgrund ihres seltenen Vorkommens aus statistischer Sicht keine aussagekräftige Tendenz abgeleitet werden. Mit einer Erhöhung der Lufttemperatur werden diese jedoch analog zu den heißen Tagen ebenfalls häufiger auftreten.

5.4.2 Frosttage

Die Anzahl an Frosttagen wird tendenziell abnehmen (Tabelle 5-2, Abbildung 5-9). Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird sich deren Anzahl um 29 Tage (RCP 8.5) verringern. Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die Anzahl um bis zu 49 Tage (RCP 8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 auf dann lediglich 22 Frosttage jährlich.

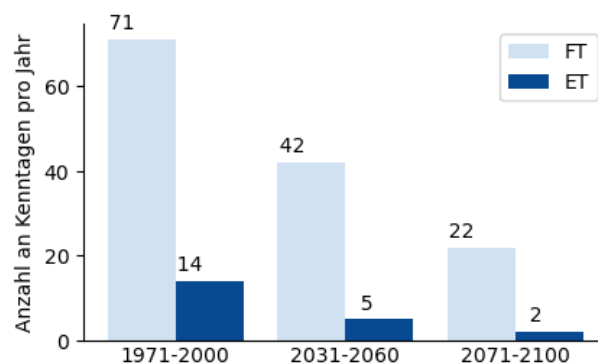


Abbildung 5-9: Anzahl der Frosttage (FT) und Eistage (ET) für den Zeitraum 1971 – 2000 und für die Prognosezeiträume bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts basierend auf dem Szenario RCP 8.5.

In der Landwirtschaft (speziell im Weinbau) sind insbesondere Spätfröste im April und Mai von Bedeutung, da diese zu Erfrierungen im Austriebs- und Blühstadium führen. Obwohl ein Rückgang der Frosthäufigkeit die Frostschäden reduzieren könnte, führen die milden Winter häufig schon zu einem verfrühten Austrieb der Pflanzen, so dass die kritische phänologische Phase* in Monate mit erhöhter Frostrate fällt.

5.4.3 Hageltage

Hagel ist insbesondere für die Landwirtschaft von größerer Bedeutung, da Hagelschäden zu wirtschaftlichem Schaden durch Ertragsverluste führen können. Es ist jedoch schwierig, eine ortsspezifische Aussage über die Häufigkeit von Hageltagen⁹ zu treffen, da diese räumlich sehr variabel sind und lediglich auf Beobachtungen beruhen. Allerdings gilt in Gebirgsregionen und Südwestdeutschland, wo Gewitter im deutschen Vergleich häufiger auftreten, eine höhere Hagelwahrscheinlichkeit. Denn Hagel tritt meist in Verbindung mit Gewittern auf.¹⁰

Vom DWD wurden die Hagelbeobachtungen von 10 Stationen für eine Statistik der mittleren jährlichen Anzahl an Hageltagen in Tabelle 5-3 zusammengetragen. Im Mittel gibt es in deutschen Orten 1 bis 2 Hageltage pro Jahr. Während die Küstengebiete und Inseln etwas unterhalb dieses Mittels liegen (z.B. Helgoland 0,7 Hageltage), kommen in gebirgigen Regionen und Südwestdeutschland bis zu 5 Hageltage wie am Feldberg vor.

Tabelle 5-3: Häufigkeit der Tage mit Hagel für den Zeitraum: 1981 – 2010. Inseln: kursiv, Berggipfel: GROSSBUCHSTABEN (Quelle: DWD¹¹)

Stationen	Höhe über NN (m)	Mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Hagel
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	1,3
Potsdam	81	1,5
Köln-Bonn	92	1,5
Frankfurt-Flughafen	100	1,1
Stuttgart-Echterdingen	371	2,3
München-Flughafen	446	1,5
<i>Helgoland</i>	4	0,7
<i>Kap Arkona</i>	42	0,9
BROCKEN	1134	2,0
WASSERKUPPE	921	2,0
FELDBERG (Schwarzwald)	1490	4,6
ZUGSPITZE	2964	3,8

Für Neckarsulm ist als Ort in Südwestdeutschland mit einer Hagelwahrscheinlichkeit von ca. 2 Hageltagen pro Jahr auszugehen, wobei eine jahreszeitliche Variabilität zu berücksichtigen ist (vgl. Abbildung 5-10). Daher treten mit höherer Wahrscheinlichkeit Hagelereignisse in den Sommermonaten auf, wenn die Wahrscheinlichkeit für Gewitter und die Luftfeuchtigkeit hoch sind.

Eine Analyse der Münchner Rückversicherung geht von 0,5 bis 0,75 Tagen mit Hagel in der Region Neckarsulm aus (Abbildung 5-11)¹².

⁹ Tage, an denen Hagel unabhängig von der Größe auftritt

¹⁰ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

¹¹ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

¹² Diese Zahlen basieren auf einer Studie von Rädler et al. (2018). Die geringere Anzahl an Hageltagen ist unter anderem auf die Verwendung von Reanalysedaten mit einer räumlichen Auflösung von 0,75° und einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden zurückzuführen. Diese Auflösungen sind relativ grob im Vergleich zur räumlichen und zeitlichen Skala eines Gewitter- und Hagelereignisses.

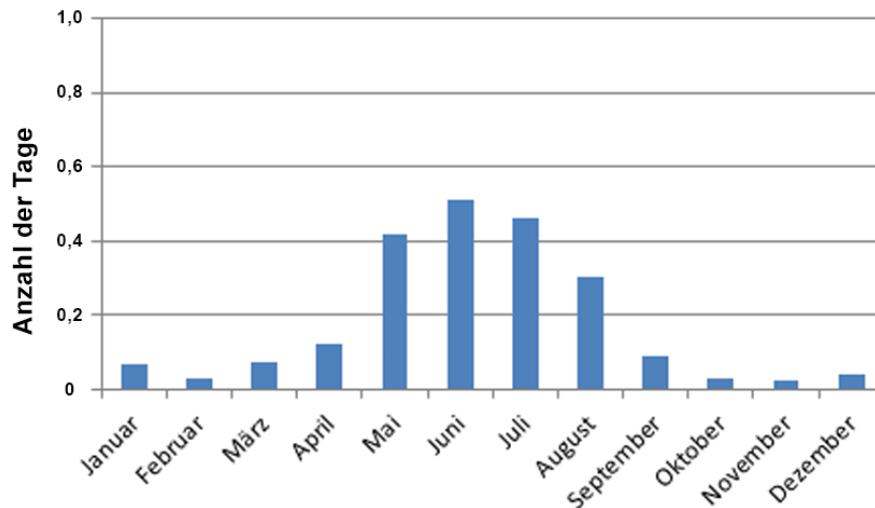


Abbildung 5-10: Mittlere Anzahl an Hageltagen pro Monat für die Klimanormalperiode 1981 – 2010. Als Datengrundlage wurden die oberen 10 Stationen ohne Inselstationen verwendet.¹³

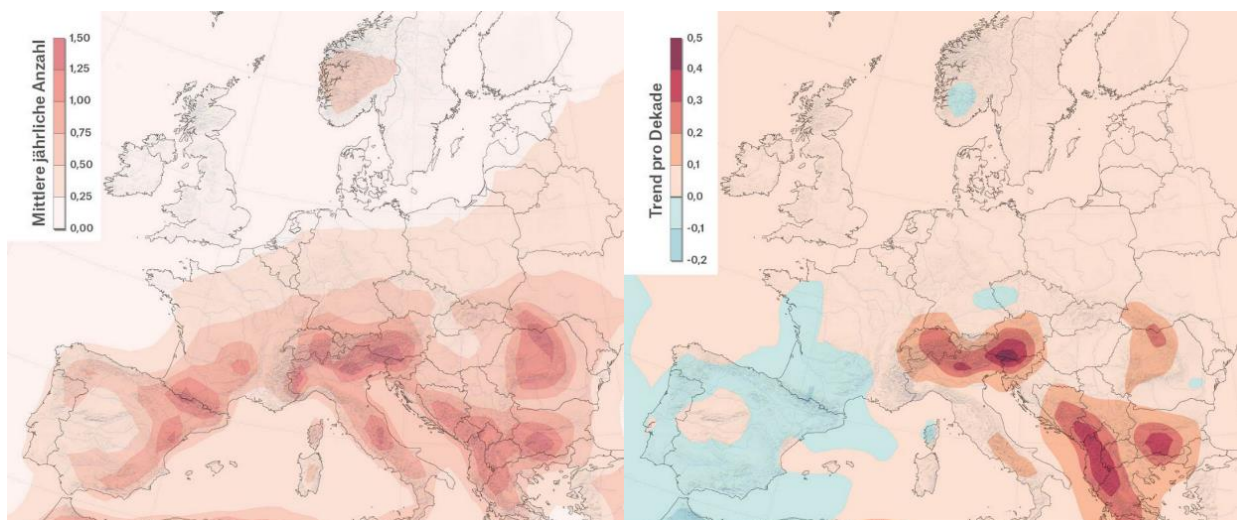


Abbildung 5-11: Mittlere jährliche Anzahl an Hagelereignissen (links) und der Trend pro Dekade in den 37 Jahren von 1979 – 2015 (rechts; Quelle: Münchner Rückversicherung 2019¹⁴).

Auswirkungen des Klimawandels

Aufgrund höherer Temperaturen erwärmen sich Gewässer stärker, wodurch die Verdunstung zunimmt. Gleichzeitig nimmt aufgrund einer wärmeren Lufttemperatur der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu. Dadurch wird bei Wolkenbildung und der Kondensation des Wasserdampfes lokal mehr Energie freigesetzt. Kunz, Sander & Kottmeier (2009) fanden heraus, dass die jährliche Anzahl an Gewittern in Baden-Württemberg zwischen 1974 bis 2003 im Mittel nicht angestiegen ist, sehr wohl aber der Hagelschaden und die Tage mit Hagel in den letzten drei Dekaden. Auch das Hagelpotenzial, abgeleitet aus Stabilitätsmaßen und Großwetterlagen, ist in Baden-Württemberg angestiegen (Brasseur, Jacob & Schuck-Zöller (2017)). Die Münchner Rückversicherung weist einen Trend von etwa +0,1 Hageltagen pro Jahr im Raum Neckarsulm aus (Abbildung 5-11). Im 21.

¹³ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

¹⁴ www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html

Jahrhundert könnte die Anzahl an Hageltagen im Raum Neckarsulm weiter zunehmen (Brasseur, Jacob & Schuck-Zöller (2017)).

Schäden

Die normalisierten Schäden aufgrund von schweren Gewittern in Europa sind signifikant gestiegen. Dies liegt nicht nur an der zunehmenden Zahl an Hagelereignissen in Südwestdeutschland (vgl. Abbildung 5-11). Es gibt Hinweise auf eine höhere Schadenanfälligkeit moderner Gebäude in Zentraleuropa. In der Schweiz, wo die Baustandards ähnlich wie in Deutschland sind, lag der Anteil beschädigter Gebäude bei neueren Baujahren systematisch höher als bei älteren. Bei Hagelschlägen im Kanton Aargau erlitten etwa 8 % der Gebäude aus den 1940er Jahren Schäden, bei Gebäuden mit Baujahr ab 2000 waren es 15 %. Moderne Häuserfassaden sind bei schweren Hagelereignissen besonders schadenanfällig, da Hagelkörner häufig durch den Wind schräg auftreffen. So kann Hagel bei modernen Wärmedämmsystemen den oft dünnen Oberputz abschlagen und so das Gebäude durch Nässe beschädigen. Aufwändige Fassaden moderner Geschäftsgebäude sowie Solaranlagen können ebenfalls abhängig von der Hagelgröße zu erheblichen Einzelschäden führen. Abbildung 5-12 zeigt beispielhaft typische Schadensbilder in Abhängigkeit zur Hagelgröße.

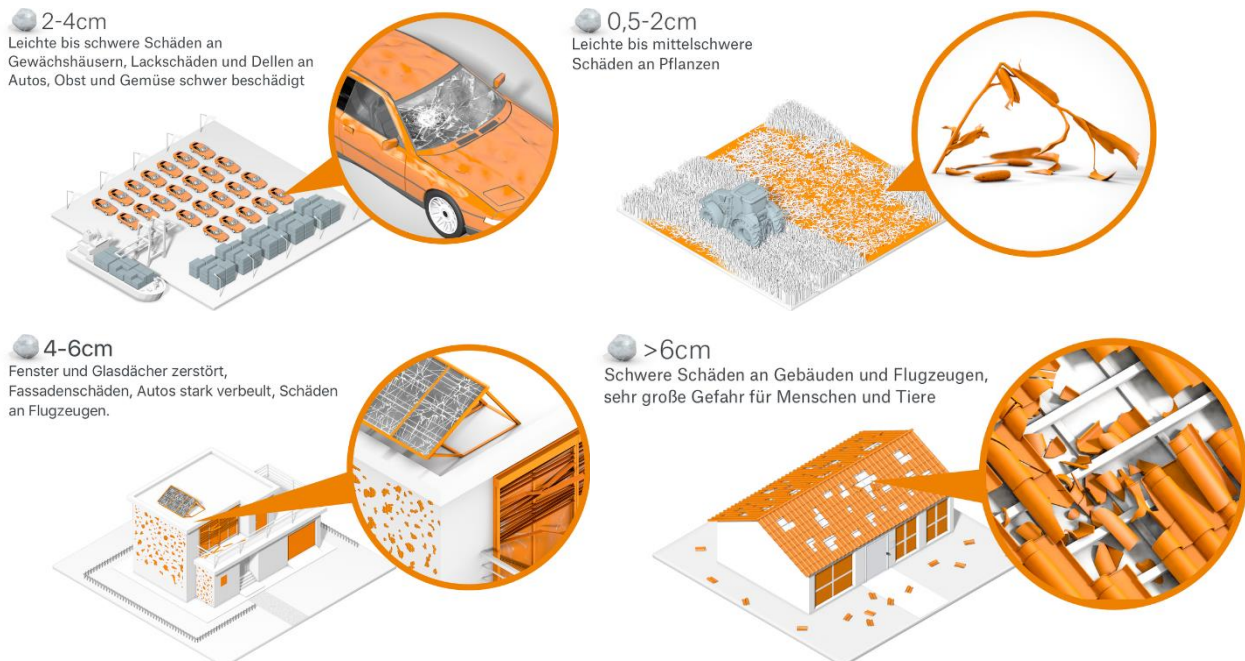
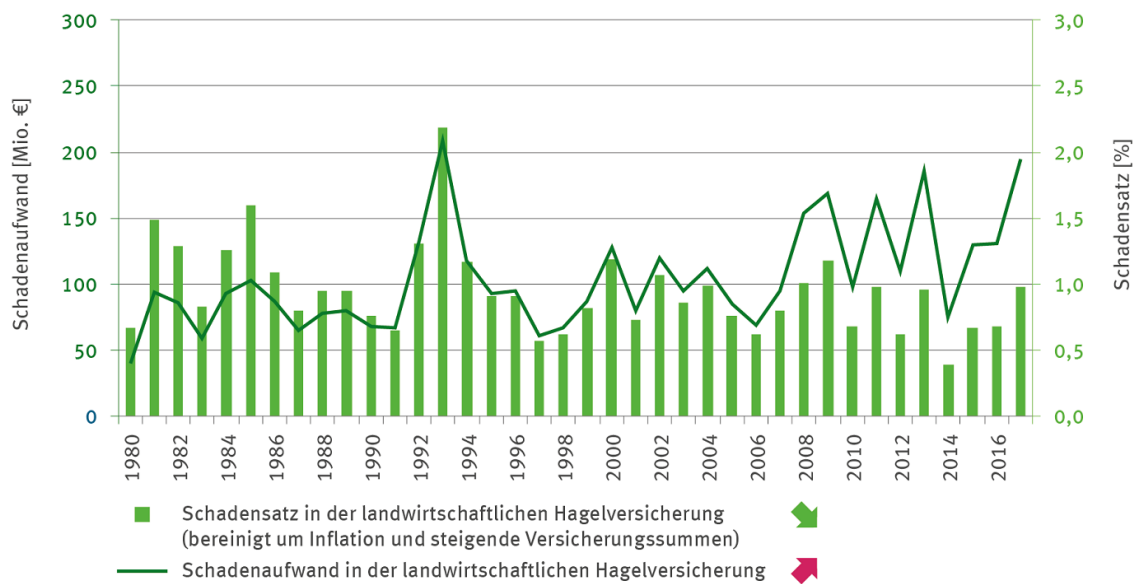


Abbildung 5-12: Verschiedene Hagelgrößen und Schadenbilder (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019¹⁵).

In der Landwirtschaft entstehen durch Hagelereignisse direkte und indirekte Schäden. Neben dem Ernteausfall sind dies der Verlust der Marktpräsenz in einem Hageljahr, die mangelnde Auslastung vorhandener betrieblicher Infrastruktur oder auch ein erhöhter Ernte- und Sortieraufwand.

In Abbildung 5-13 sind Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung abgebildet. Die bereinigte Zeitreihe des Schadensatzes deutet auf einen sinkenden Trend an Hagelereignissen hin, veranschaulicht allerdings auch die starke Variabilität von Hagelereignissen pro Jahr.

¹⁵ www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html



Datenquelle: Institut für Agribusiness (Technische Ziffern Hagel)

Abbildung 5-13: Schadensaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung (Quelle: UBA 2023¹⁶)

¹⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/lw-i-3-das-indikator#lw-i-3-hagelschaden-in-der-landwirtschaft>

6 Ergebnisse der Simulationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten meteorologischen Größen und Parameter beschrieben (vgl. Abbildung 2-1, S. 16).

6.1 Kaltluftströmung

Bei Tiefdruckwetterlagen (bewölkt, windig, regnerisch) herrschen in der Regel gute Austauschbedingungen. Die lokalen Strömungsverhältnisse werden im Wesentlichen durch das Gelände geprägt. In Tallagen treten z.B. Kanalisierungen der Strömung auf. Lufttemperaturunterschiede sind bei diesen Wetterlagen zwischen bebauten und unbebauten Flächen vergleichsweise gering.

Hochdruckwetterlagen können dagegen mit geringen übergeordneten Windgeschwindigkeiten und geringer Bewölkung verbunden sein. Bei diesen sogenannten autochthonen Wetterlagen stellt sich meist ein ausgeprägter Tagesgang der Lufttemperatur ein, d.h. die Luft kann sich nachts stark abkühlen und am Tag stark aufheizen. Aufgrund des geringen großräumigen Luftaustausches beeinflussen die lokalen topographischen Verhältnisse (sowohl das Geländere relief als auch die Realnutzung) signifikant die lokale Strömung.

In reliefiertem oder gegliedertem Gelände bilden sich unter autochthonen Bedingungen tagesperiodische Windsysteme aus. In den Tagstunden sind dies tal- und hangaufwärtsgerichtete, meist böige Winde, in den Nachtstunden dagegen eher turbulenzarme Kaltluftabflüsse. In Ebenen sind insbesondere nachts nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden. Die nächtliche Inversion unterdrückt zusätzlich den Luftaustausch. Deshalb zählen Kaltluftabflüsse in gegliedertem Gelände zu den klimatischen Gunstfaktoren einer Region.

Durch die Lage Neckarsulms im Neckartal mit den Ausläufern der Schwäbisch-Fränkischen Waldberge im Osten und dem Kraichgau im Westen treten entsprechende Höhenunterschiede innerhalb des Stadtgebiets auf. Diese ermöglichen die Entstehung von Kaltluftabflüssen, welche für die Belüftung von Siedlungsgebieten von hoher Bedeutung sind. Kaltluftabflüsse transportieren in den Abend- und Nachtstunden kühlere und meist frischere Luft in die Siedungsbereiche, wodurch thermische und lufthygienische Belastungen spürbar reduziert werden.

Deshalb ist zur Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse der Erhalt und die Verbesserung dieser Strömungssysteme relevant.

6.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen

In klaren windschwachen Nächten ist die Energieabgabe der Boden- und Pflanzenoberflächen aufgrund der Wärmeausstrahlung größer als die atmosphärische Gegenstrahlung*. Dieser Energieverlust verursacht eine Abkühlung der Boden- und Pflanzenoberfläche, so dass die Bodentemperatur niedriger als die Lufttemperatur ist. Der kühlere Boden kühlt daraufhin die bodennahen Luftschichten ab und es entsteht eine bodennahe Kaltluftschicht. Diese ist umso ausgeprägter, je negativer die Strahlungsbilanz*, je geringer die Wärmezufuhr aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche und je schwächer der Luftaustausch mit der darüber liegenden Atmosphäre ist.

In ebenem Gelände bleibt die bodennahe Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände setzt sie sich infolge von horizontalen Dichteunterschieden (kalte Luft besitzt eine höhere Dichte als warme Luft) hangabwärts in Bewegung. Die Geschwindigkeit der Luftmassen ist letztlich von der Hangneigung und dem Dichteunterschied abhängig. Die Reibungskraft bremst die abfließende

Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind in der Regel zeitlich nicht konstant, d.h. es kommt zu „pulserenden“ Kaltluftabflüssen.

In Geländeeinschnitten fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Bergwind* (Talabwind) entstehen. Die vertikale Mächtigkeit des Bergwinds und die Geschwindigkeit hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebiets, der Kaltluftproduktionsrate*, dem Talgefälle und den Rauigkeiten, d.h. den Strömungshindernissen und der Bodenbeschaffenheit, im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Talwärts führende Einsenkungen des Geländes wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen beeinflussen einen Kaltluftabfluss.

In tiefer gelegenen konkaven Geländeformen wie z.B. in Tälern, Talkesseln, Schluchten und Mulden kann sich die Kaltluft sammeln und es kann sich ein Kaltluftsee ausbilden. In dieser stagnierenden Kaltluft können sich intensive Inversionen ausbilden, die den vertikalen Luftaustausch deutlich reduzieren.

Die Kaltluftentstehung und der Kaltluftabfluss hängen somit von folgenden Faktoren ab:

- meteorologische Verhältnisse
- Flächennutzung
- Geländeform und -exposition.

6.1.2 Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen

Hangabwinde setzen ein, wenn sich der Erdboden eines Hanges deutlich abkühlt. Dies ist, abhängig von der Exposition des Hanges, in den Nachmittags- und Abendstunden der Fall. An nicht-besonnten Hängen setzen die Hangabwinde bereits vor Sonnenuntergang ein. Sie dauern die Nacht über an, sofern sie nicht von einem stärkeren Bergwind überlagert werden. Wenn der Hang am Morgen wieder besonnt wird, endet der Hangabwind.

Bergwinde setzen gegenüber den Hangabwinden später ein. Sie beginnen meist erst nach Sonnenuntergang. In den Morgenstunden dauern sie länger an.

6.1.3 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen

Kaltluftabflüsse treten bei windschwachen und gleichzeitig wolkenarmen Wetterlagen auf, da in diesen Fällen gute Ausstrahlungsbedingungen vorliegen und die bodennah gebildete Kaltluftschicht nicht durch Turbulenz zerstört wird. Dies entspricht der Ausbreitungsklasse* I, die in Neckarsulm laut LUBW in etwa 10 % der Jahresstunden vorkommt. Auch bei Ausbreitungsklasse II, die in etwa 20 % der Jahresstunden auftritt, können noch Kaltluftabflüsse auftreten, die aber stärker von den übergeordneten Windrichtungen beeinflusst werden.

Das Maximum von Kaltluftabflüssen wird im Spätsommer/Frühherbst beobachtet, da dann die größten Tagesgänge der Lufttemperatur erfolgen. In den Wintermonaten ist die Wahrscheinlichkeit, auch aufgrund der stabilen Nebellagen, am geringsten.

Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftabflüsse ist abhängig vom Weg, den die Kaltluft nimmt. Liegen entlang der Zugbahn der Kaltluft mehrere Kaltluftproduktionsflächen, können sich schnell große Kaltluftthöhen ergeben.

Trifft die Kaltluft auf Bebauung, dringt diese bodennah in die Bebauungsschicht ein (vgl. Abbildung 6-1, links). Der größere Teil der Kaltluft überströmt jedoch die Bebauung und wird durch die gebäudeinduzierte Turbulenz in die Bebauung herabgemischt (vgl. Abbildung 6-1, rechts). Für die innerstädtische Belüftung ist deshalb die Überdachströmung die relevante Größe.

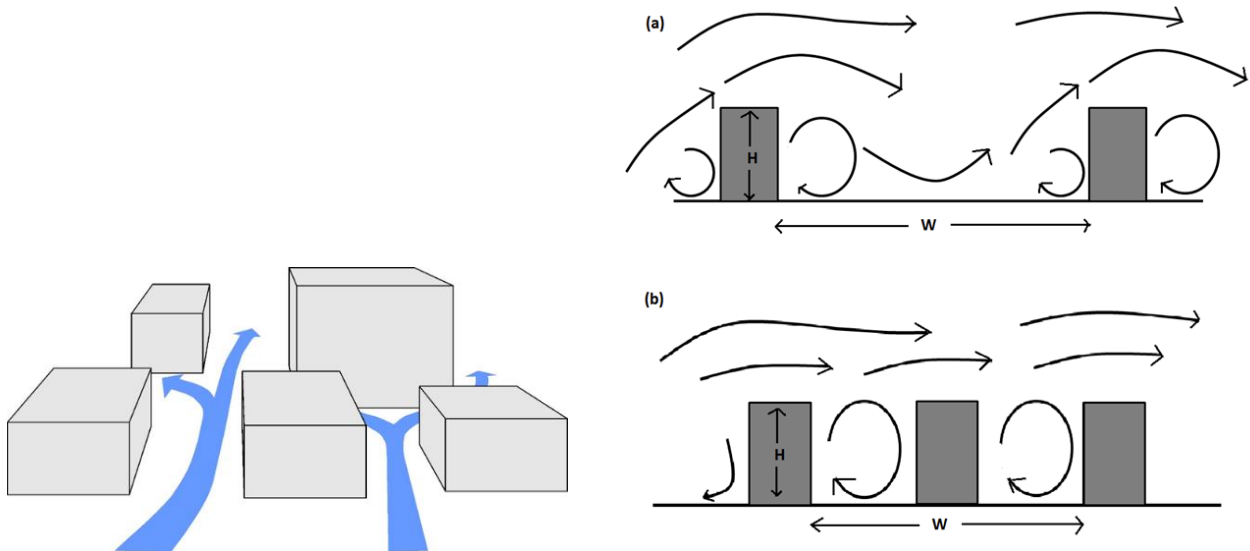


Abbildung 6-1: Bodennahe Belüftung in den peripheren Bereichen (links) und Herabmischen der Luft aus dem Überdachniveau in den Straßenraum (rechts).

6.1.4 Ergebnisse der Modellierung

In Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 sind die bodennahen Strömungsverhältnisse bzw. die Strömung im Dachniveau am Abend dargestellt. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind vorrangig die Pfeile bei hoher Volumenstromdichte dargestellt (Algorithmus zur Pfeildarstellung siehe REKLIBO, Schwab & Zachenbacher (2009)). In Abbildung 6-2 ist die Strömung im Bereich der Kernstadt nochmals detaillierter dargestellt.

In den Abendstunden entstehen markante Kaltluftabflüsse entlang des Sulmtals, die insbesondere den südlichen Teil der Kernstadt und die dortigen Gewerbegebiete erreichen. Im Dachniveau reicht der Kaltluftabfluss bis zum Audi-Werk und belüftet somit den gesamten Stadtbereich südlich des Stadtparks. Erkennbar sowohl in Bodennähe als auch im Dachniveau wird der Kaltluftabfluss bereits vor Erreichen der Wohnsiedlungen durch die Gewerbegebiete Strassenäcker und Gottesäcker in einen nördlichen und einen südlichen Arm geteilt. Im Lee dieser Gewerbegebiete ist die Strömung in ihrer Ausprägung reduziert. In einzelnen Ost-West ausgerichteten Straßen oder über größeren unbebauten Flächen setzt sich der Sulmtäler auch wieder bis ins Bodenniveau durch. Die Windgeschwindigkeiten liegen jedoch meist deutlich unter 1 m/s. Die Autobahn bildet ebenfalls eine Luftleitbahn für den Sulmtäler. Vom Autobahnkreuz und der Autobahn werden die Gewerbegebiete Süd, Südstadt und Klauenfuss belüftet.

Das Gewerbegebiet Rötel wird durch die dem Neckar folgende Strömung belüftet.

Im Überdachniveau überströmt der Sulmtäler die Pichterich, die Kernstadt und den südlichen Teil des Audi-Werks. Dort dreht er dann in die dem Neckar folgende Strömung ein. Entlang des Neckars kann sich aufgrund des geringen Gefälles je nach Lage der Hoch- und Tiefdruckgebilde ein Nordwind oder ein Südwind einstellen.

Weitere Kaltluftabflüsse entstehen an den südlichen Hängen des Scheuerbergs, die in etwa im Bereich des Schwimmbads Aquatoll mit dem Kaltluftabfluss des Sulmtals zusammenfließen. An den nördlichen Hängen des Scheuerbergs entstehen ebenfalls Kaltluftabflüsse. Diese fließen dem Hängelbach folgend ab und belüften die nördlichen Randbereiche der Siedlungsgebiete Neuberg und Viktorshöhe, sowie die nordöstlichen Randbereiche des Audi-Werks. Die Kaltluftabflüsse in Neuberg werden durch die Zeilenbebauung zwischen Frankenwaldstraße und Rhönstraße bodennah stark geschwächt. Im Überdachniveau setzt sich die Kaltluftströmung insbesondere nördlich der Spessartstraße durch und kann dort für einen Luftaustausch sorgen. Die südliche Hälfte von Neuberg wird durch die Hangabwinde vom Scheuerberg gut durchlüftet.

Der Stadtteil Viktorshöhe wird von Norden durch die Kaltluftabflüsse aus dem Hängelbachtal, und von Süden durch die Hangabwinde vom Scheuerberg und dem Sulmtal belüftet. Da hier mehrere Strömungen aus verschiedenen Himmelsrichtungen aufeinandertreffen, kann es zu temporären Windrichtungsänderungen kommen.

Dahenfeld

Dahenfeld wird von verschiedenen kleineren Kaltluftabflüssen entlang der nördlichen Hänge des Stadtwalds erreicht. Die Kaltluft aus dem Mönchswald fließt entlang des Dahenbachs über die Sportplätze ab und belüftet den westlichen und nördlichen Teil von Dahenfeld. Die Hangabwinde des Hütt- und Schaubergs (304 m ü. NHN) belüften den südlichen Ortsrand. Auf den nach Süden geneigten Freiflächen nördlich von Dahenfeld bilden sich ebenfalls geländefolgende Kaltluftabflüsse von eher geringer Mächtigkeit aus.

Obereisesheim

Obereisesheim wird von einem Kaltluftabfluss entlang des Osthangs des Schellenbergs belüftet. Aufgrund des geringen Höhenunterschieds zwischen Schellenberg und Neckartal ist der Kaltluftabfluss eher schwach ausgebildet. Auch die vertikale Mächtigkeit ist deutlich geringer als die des Kaltluftabflusses im Sulmtal.

Amorbach

Eine wichtige Luftleitbahn für den Kaltluftabfluss stellt die „Grüne Mitte“ von Amorbach trotz der vorhandenen Rauigkeit durch die Vegetation dar. Diese Kaltluft belüftet die angrenzenden Wohngebiete Hasenbuckel und Amorbach-Neu, indem sie zwischen den Häusern hindurch nach Norden und Süden fließt. Durch die Zeilenbauweise im angrenzenden Amorbach-Alt und der vorgelagerten Vegetation westlich der Grundschule kommt die eher schwache Strömung zum Erliegen und bildet lokal einen Kaltluftsee. Der nördliche Teil von Hasenbuckel wird durch östliche Winde durchlüftet.

Im Hängelbachtal bildet sich ein Kaltluftstrom, dessen Mächtigkeit aufgrund des großen Einzugsgebiets die Talhöhe übersteigt und die südlichen Wohngebiete von Amorbach auch von Süden belüften kann. Durch die dichte Bebauung und Vegetation entlang der L1095 wird die Strömung bodennah jedoch gebremst.

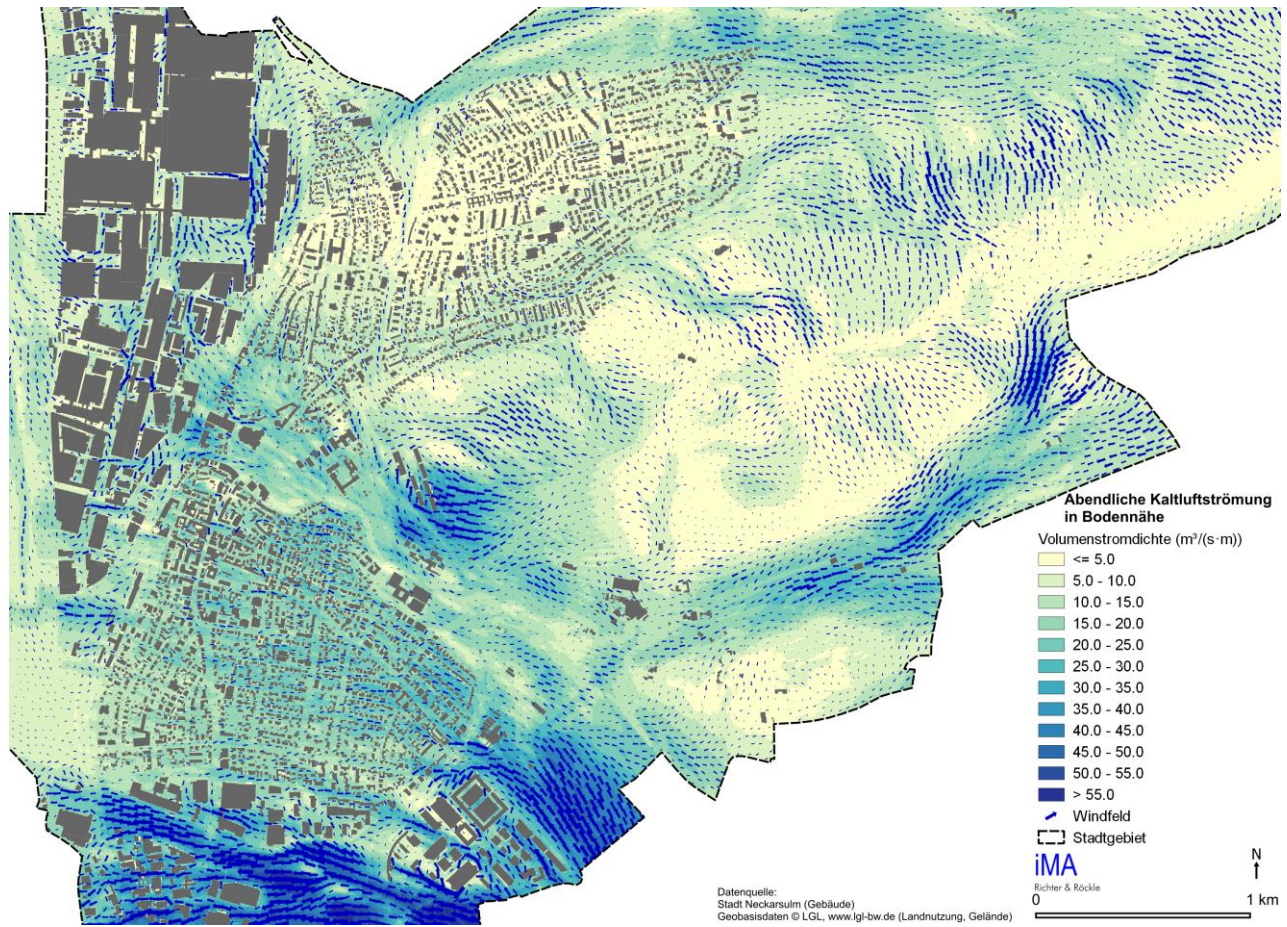
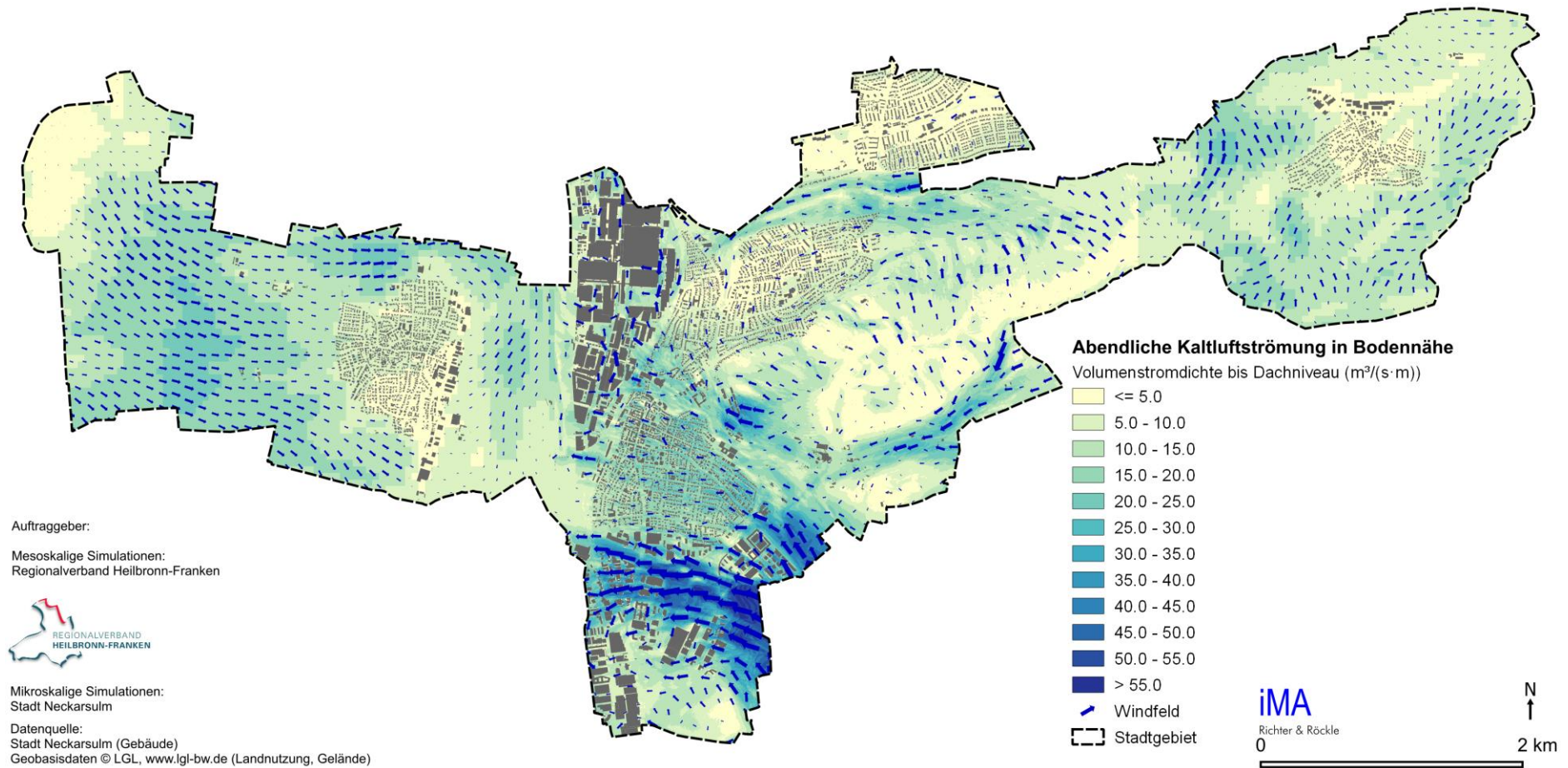


Abbildung 6-2 Vergrößerte Darstellung der bodennahen Durchlüftung (5 m ü. Grund) im Bereich der PALM-4U Simulation.



Auftraggeber:

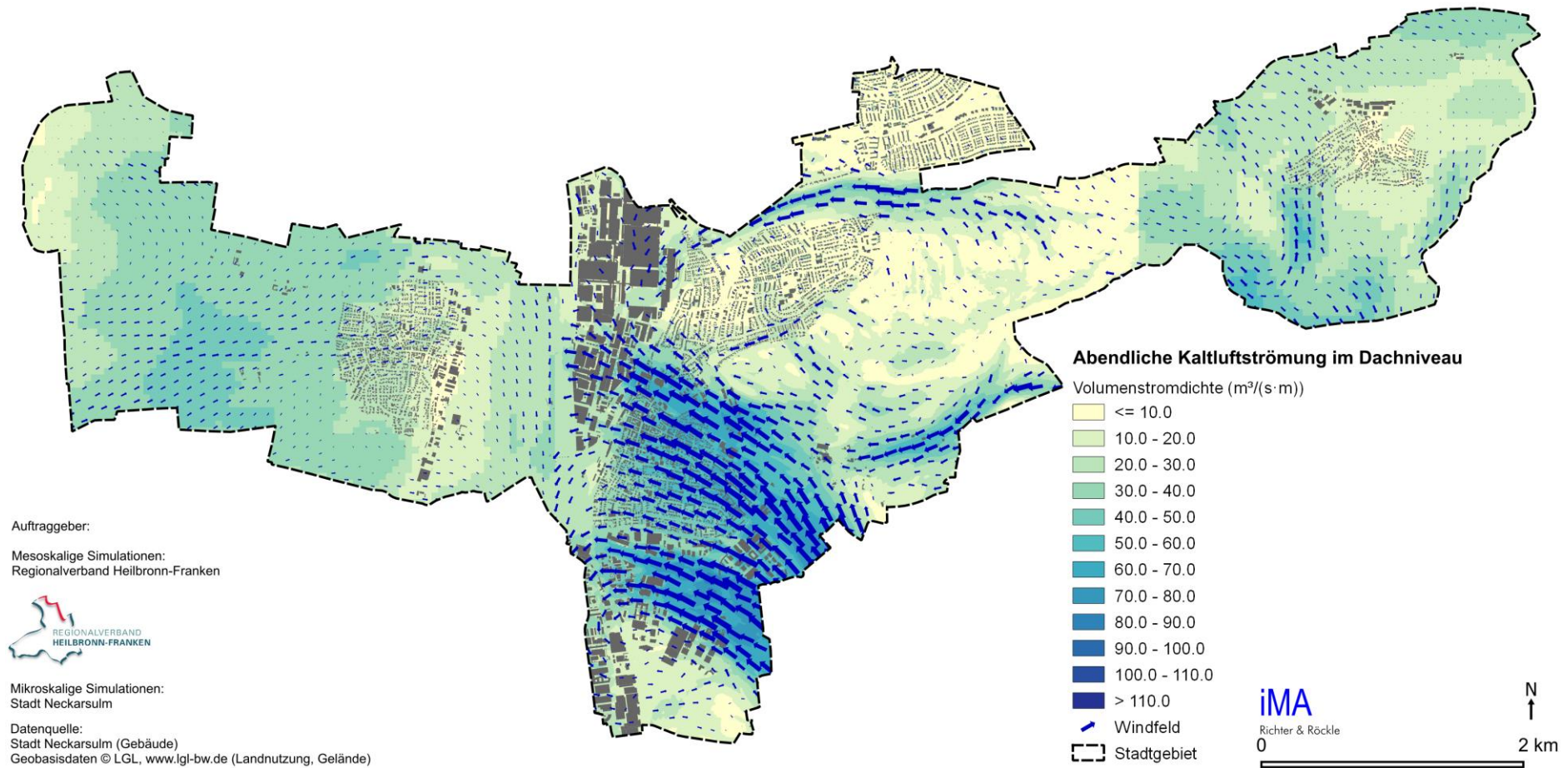
Mesoskalige Simulationen:
Regionalverband Heilbronn-Franken



Mikroskalige Simulationen:
Stadt Neckarsulm

Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Gebäude)
Geobasisdaten © LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-3: Bodennahe Durchlüftung (5 m ü. Grund) in Neckarsulm durch abendliche Hangabwinde. Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.



Auftraggeber:

Mesoskalige Simulationen:
Regionalverband Heilbronn-Franken



Mikroskalige Simulationen:
Stadt Neckarsulm

Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Gebäude)
Geobasisdaten © LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-4: Durchlüftung im Dachniveau (28 m ü. Grund) in Neckarsulm durch abendliche Hangabwinde. Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

6.2 Thermische und human-biometeorologische Verhältnisse

Für die Bewertung der human-biometeorologischen Verhältnisse tagsüber ist die Betrachtung der Lufttemperatur nur bedingt geeignet, da neben der Temperatur auch die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und die Strahlungsflüsse einen erheblichen Einfluss auf das thermische Befinden haben. Als Indikator für die thermische Belastung wird daher die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) betrachtet (siehe Kapitel 3.2.4).

Nachts korrelieren die PET und die Lufttemperatur stark, da vor allem der Einfluss der Sonneneinstrahlung entfällt. Deshalb wird nachts die Lufttemperatur oder genauer die Überwärmung des Stadtgebiets anhand der urbanen Wärmeinsel betrachtet. Diese wird ermittelt aus dem Vergleich der Lufttemperatur zweier Simulationen, eine auf Basis der tatsächlichen Bebauung und Versiegelung und einer weiteren Simulation ohne jegliche versiegelte Flächen.

Zur Einschätzung der Häufigkeit von Wärmebelastungen wird die mittlere Anzahl an Sommertagen im Jahr herangezogen. Dazu werden Daten aus Klimamodellierungen und den Ergebnissen der regionalen Klimanalyse für die Region Heilbronn-Franken herangezogen (iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2023)).

6.2.1 Human-biometeorologische Verhältnisse

In Abbildung 6-5 ist die PET zur Mittagszeit an einem heißen Sommertag dargestellt. Die thermische Belastung ist stark von der Sonneneinstrahlung abhängig. Besonnte Bereiche wie beispielsweise die Freiflächen am Scheuerberg oder westlich von Obereisesheim weisen eine deutlich höhere thermische Belastung auf als die verschatteten Waldgebiete um Dahenfeld. Daher spielen schattenspendende Hindernisse wie Gebäude und Bäume eine wesentliche Rolle.

In durch Bäume abgeschatteten Bereichen beträgt die PET weniger als 30 °C, so dass hier zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitzestress vorzufinden sind (Bewertungsmaßstab siehe Tabelle 3-5). Ebenso sind Gebiete mit hohem Grünflächen- oder Gewässeranteil weniger stark hitzebelastet. Hier wird die Einstrahlung der Sonne in Verdunstungsenergie umgewandelt und die Oberflächen heizen sich im Vergleich zu versiegelten Flächen weniger stark auf.

Die höchsten Belastungen treten in besonnten, windschwachen und stark versiegelten Bereichen auf, wie sie in Industrie- und Gewerbegebieten vorkommen. Entsprechend weisen die Gewerbegebiete südlich der Südstadt oder das Audi-Werk hohe thermische Belastungen auf. Auch größere versiegelte und unverschattete Plätze wie der städtische Bauhof oder zum Teil der Marktplatz zählen zu den hoch belasteten Gebieten. Großer Hitzestress tritt auch auf in versiegelten Innen- und Hinterhöfen, welche nicht ausreichend abgeschattet sind und schlecht durchlüftet werden.

Die mikroskalig berechneten PET-Werte mit expliziter Berücksichtigung der Bebauung und der Bäume ist in Abbildung 6-6 nochmals vergrößert dargestellt. Durch Bäume verschattete Bereiche wie der Stadtpark, der Karlsplatz oder entlang der Friedenstraße weisen deutlich geringere PET-Werte auf. Besonders in den Gewerbegebieten können Straßenbäume die PET effektiv reduzieren wie beispielsweise entlang der Konrad-Zuse-Straße im Gewerbegebiet Gottesacker.

Dahenfeld

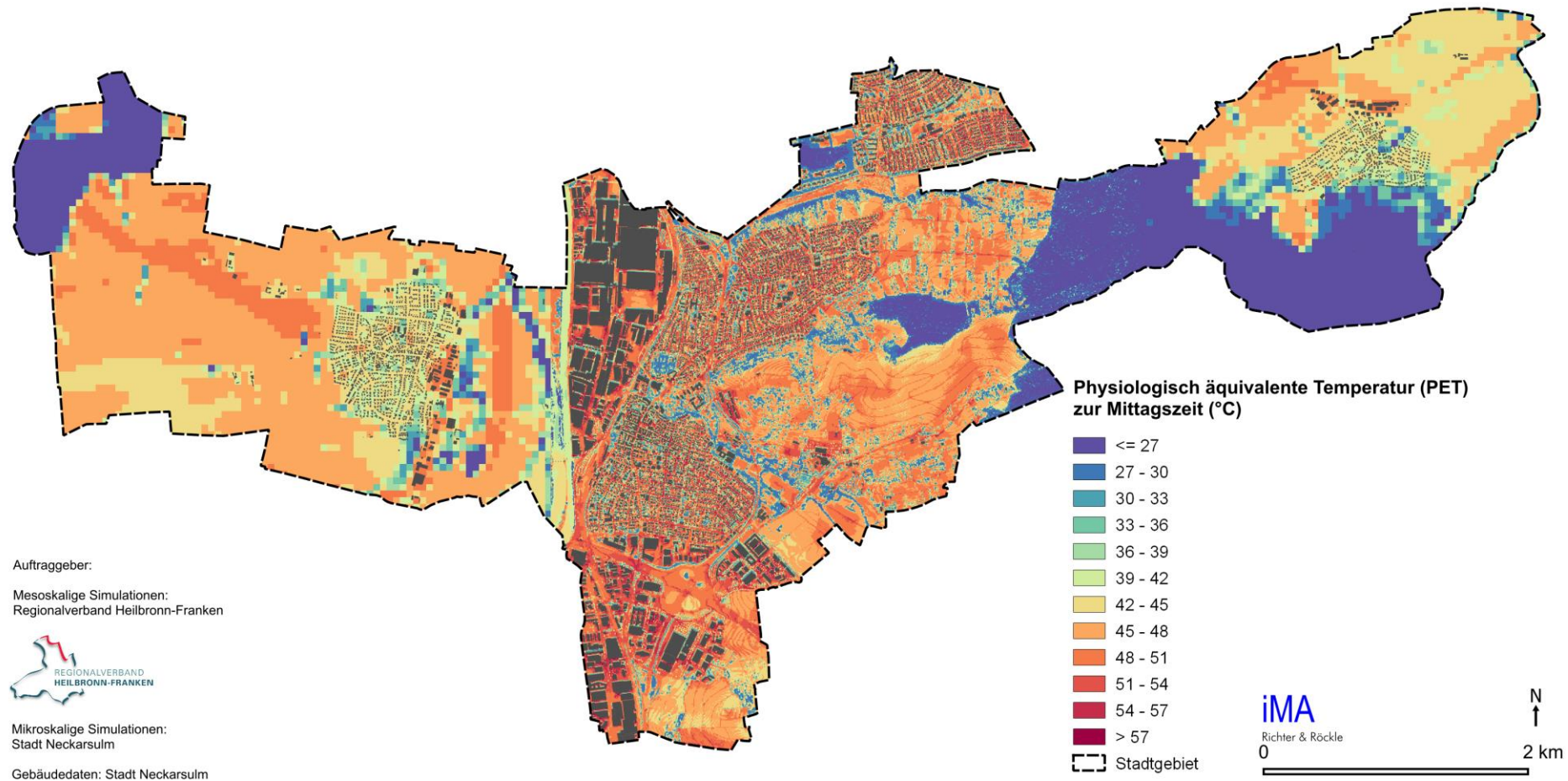
Dahenfeld weist eine gute Durchgrünung auf. Dies führt zu guter Verschattung und somit zu einer geringen Wärmebelastung am Tage. Höhere Belastungen werden im Gewerbegebiet am nördlichen Rand der Ortschaft ausgewiesen.

Obereisesheim

In Obereisesheim herrschen vergleichbare Bedingungen wie in Dahenfeld. Auch hier sorgt der Baumbestand innerhalb der Ortschaft für geringe Hitzebelastungen. Besonders die Grünanlagen östlich der Ortschaft an der L1100 weisen niedrige PET-Werte auf. Die Gewerbegebiete an der Sicherstraße und der Austraße zeigen dagegen eine erhöhte Hitzebelastung.

Amorbach

Die Bedeutung eines gesunden und ausgewachsenen Baumbestandes ist gut erkennbar in Amorbach. Entlang der Eugen-Bolz-Straße können die breit gewachsenen Kronen der Straßenbäume den Straßenraum effektiv abschatten und sorgen für eine niedrige Hitzebelastung. Im Vergleich dazu weist der Großteil von Amorbach-Neu nur einen geringen oder sehr jungen Baumbestand auf. Das Ergebnis ist eine geringe Verschattung und dadurch hohe Hitzebelastung vergleichbar mit der in Gewerbegebieten. Mit der Zeit wird die bereits angelegte Vegetation wachsen, wodurch sich die Verschattung erhöht und sich die human-biometeorologische Situation verbessert.



Auftraggeber:

Mesoskalige Simulationen:
Regionalverband Heilbronn-Franken



Mikroskalige Simulationen:
Stadt Neckarsulm

Gebäudedaten: Stadt Neckarsulm

Abbildung 6-5: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund).

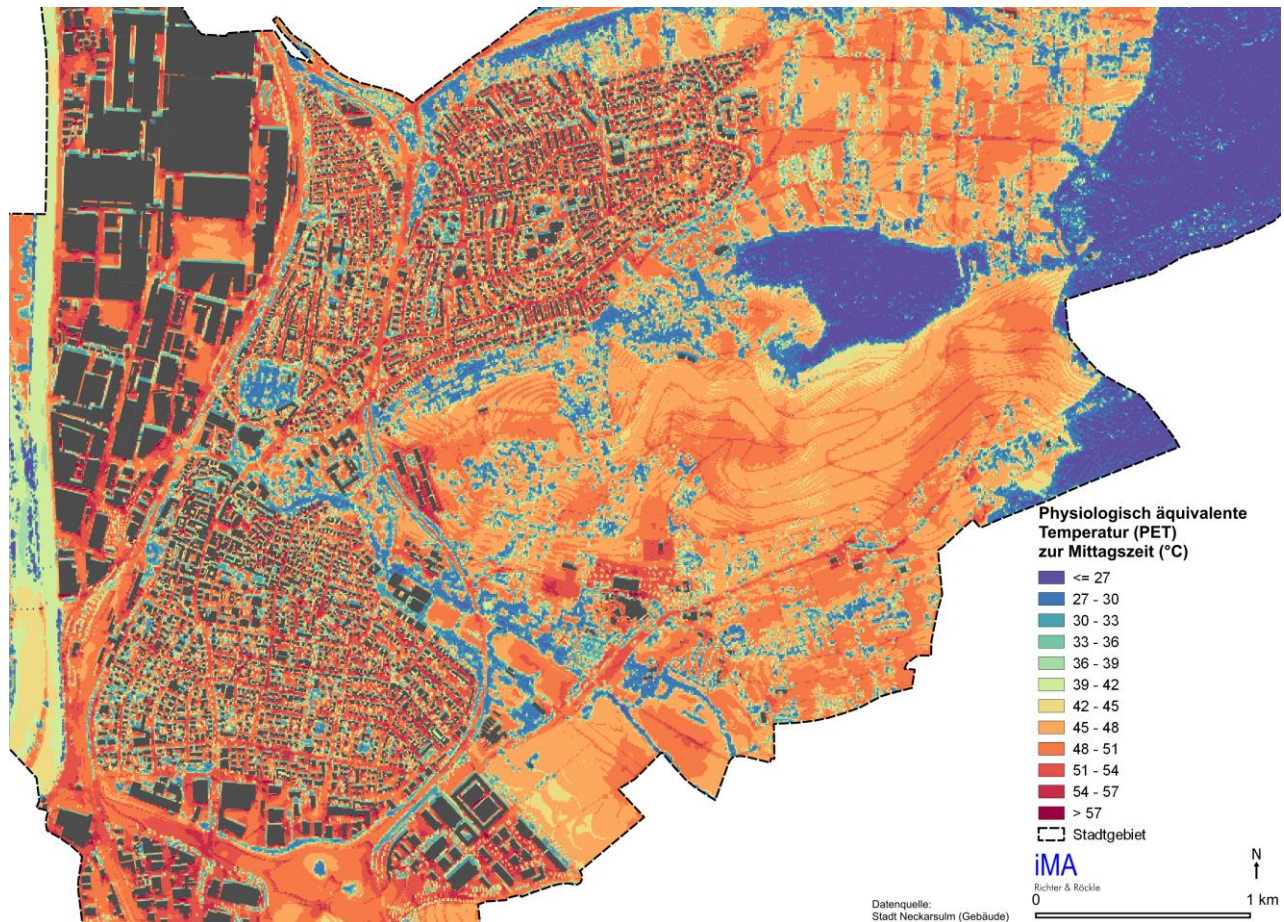


Abbildung 6-6: Vergrößerte Darstellung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund).

6.2.2 Urbane Wärmeinsel

Als urbane Wärmeinsel (urban heat island, UHI) wird die Überwärmung des Siedlungsbereichs gegenüber dem Umland bezeichnet. Die UHI ist insbesondere in der frühen Nacht stark ausgeprägt, während sie am Tage nur nicht oder nur schwach ausgebildet ist. Die Überwärmung des Siedlungsbereiches entsteht durch Unterschiede in der Energieumsetzung der unterschiedlichen Oberflächen zwischen Stadt und Umland. Die überwiegend versiegelten Flächen im Siedlungsgebiet wie Asphaltflächen, gepflasterte Wege und Plätze oder die Bebauung nehmen tagsüber mehr Energie durch die Sonneneinstrahlung auf als Vegetationsflächen. Diese gespeicherte Energie wird nach Sonnenuntergang in Form von Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Das führt lokal zu höheren Lufttemperaturen im Siedlungsbereich als im Umland.

Neben den unterschiedlichen Oberflächen spielen weitere Aspekte bei der Entstehung der UHI eine Rolle. Ein wichtiger zusätzlicher Faktor ist die Abgabe anthropogener Wärme an die Umgebung, d.h. Abwärme aus Kfz-Verkehr, Produktionsverfahren oder aus der Innenraumkühlung (Abwärme durch Klimaanlage). Diese Wärme erhöht zusätzlich die Lufttemperatur. Auch spielt die Horizontüberhöhung (sky view factor, SVF) eine wichtige Rolle. Sie beschreibt die Sichtbarkeit des Himmelsgewölbes von einer Oberfläche aus und kann als Maß für die Wärmeabstrahlung herangezogen werden. Bei stark eingeschränkter Himmelssicht (geringer SVF) wie in Straßenschluchten oder in verschatteten Bereichen wird weniger Wärme in höhere Luftschichten abgestrahlt und es

verbleibt mehr Wärme in den bodennahen Luftschichten. Außerdem trägt die verringerte Durchlüftung durch die dichte Bebauung zur Bildung der UHI bei (erwärmte Luft verbleibt im Stadtgebiet).

Zur Berechnung der UHI wurden die Ergebnisse der Simulation mit denen einer weiteren Simulation verglichen, in der die versiegelten und bebauten Flächen im Stadtgebiet durch Wald- und Feldflächen ersetzt wurden. Die Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen dem Bestand und dieser Simulation wird als UHI ausgewiesen.

In Neckarsulm ist die UHI in den Abendstunden besonders in den Industrie- und Gewerbegebieten mit bis zu 5,2 K ausgeprägt (Abbildung 6-7). Auch die stark versiegelten Bereiche entlang der Bundesstraße 27 weisen eine deutliche urbane Wärmeinsel auf. Das Gewerbegebiet am östlichen Ortsrand von Obereisesheim zeigt ebenfalls eine merkliche Überwärmung. Diese fällt aber durch die geringere Größe weniger stark aus als beispielsweise in den Gewerbegebieten direkt östlich des Neckars.

Durch die vorhandene Stadtbegrünung werden die Flächen innerhalb der verschiedenen Stadtgebiete tagsüber gut abgeschattet, was zu geringeren Temperaturen in der Nacht und somit zu einer weniger ausgeprägten urbanen Wärmeinsel führt. Gering verschattete Straßenzüge wie beispielsweise die Neuenstädter Straße zwischen Viktorshöhe und Neuberg oder die Marktstraße in der Kernstadt kommen in dieser Betrachtung sehr deutlich zum Vorschein.

Auch die Durchlüftung beeinflusst die Stärke der städtischen Überwärmung. Der Bereich östlich der Thüringer Straße in Neuberg IV wird durch Kaltluftabflüsse aus Osten belüftet. Durch die Zeilenbebauung entlang der Frankenwaldstraße und Rhönstraße werden die bodennahen Kaltluftabflüsse bereits stark abgeschwächt, sodass die Überwärmung im Lee um 1 K bis 2 K zunimmt.

Im Laufe der Nacht kühlen sich auch die städtischen Oberflächen ab, wodurch sich die urbane Wärmeinsel auch aufgrund der, im Vergleich zu Großstädten, kleinen Ausdehnung der Stadt Neckarsulm abschwächt. Versiegelte Flächen mit freier Himmelssicht (hohem SVF), wie z.B. die Parkfläche am Hauptbahnhof oder die Gleisanlagen kühlen sich im Laufe der Nacht stärker ab, als z.B. eng bebaute Gebiete in der Kernstadt.

Dahenfeld

Die Ortschaft Dahenfeld weist nur eine geringe Überwärmung von im Mittel 1,2 K aus. Die absolute Lufttemperatur ist im Mittel bis zu 3,2 K kühler im Vergleich zu den Gewerbegebieten Süd und Rötel und 1,6 K kühler im Vergleich zur Kernstadt. Die größte UHI (1,9 K) tritt entlang der Industriestraße auf.

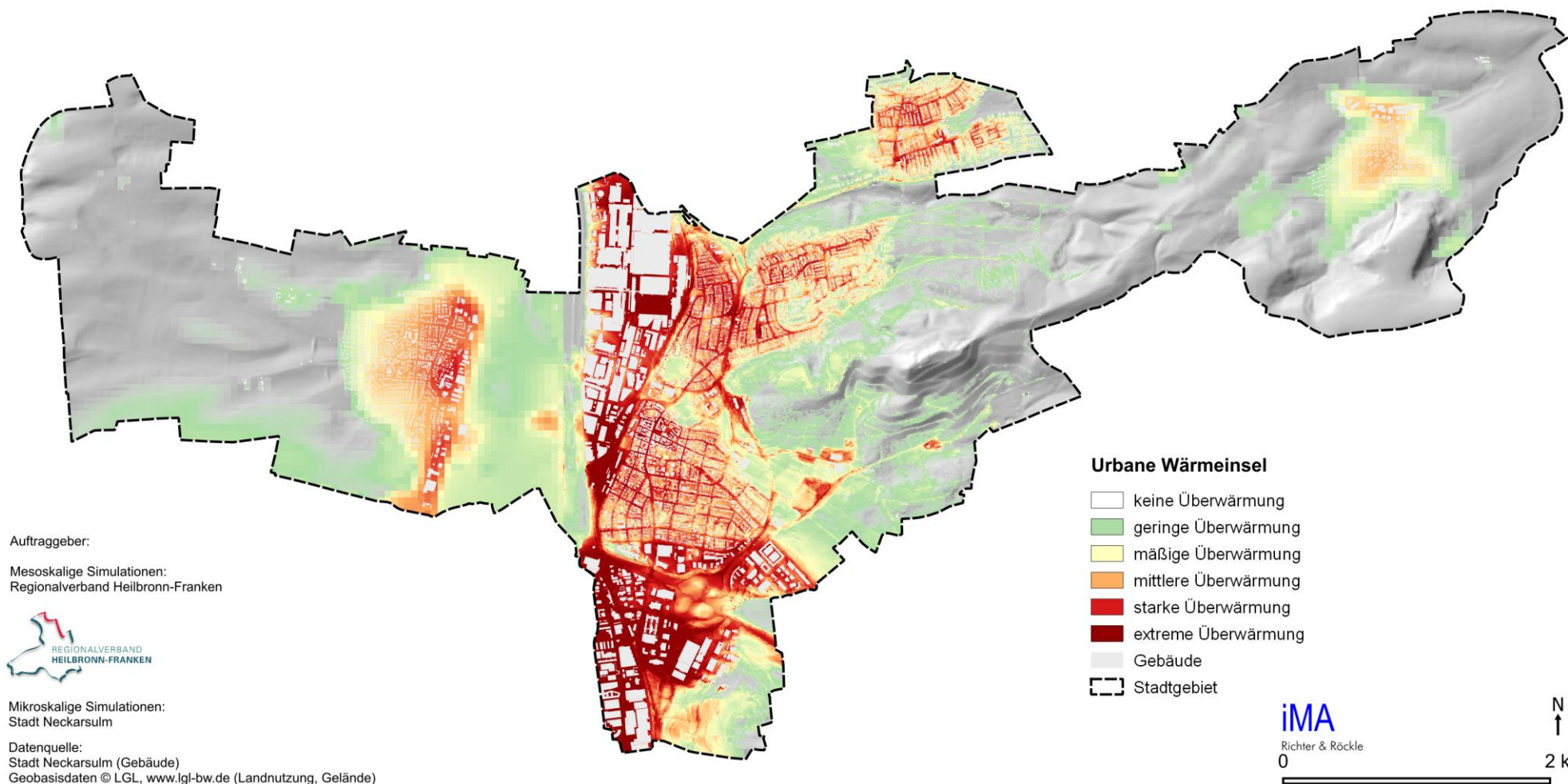
Obereisesheim

Die Gewerbegebiete in Obereisesheim zeigen eine deutliche Überwärmung, die allerdings schwächer ausgeprägt ist als im Audi-Werk oder in den Gewerbegebieten Süd, Rötel oder Klauenfuß. Durch die Durchlüftung mit Kaltluft aus Westen und die Lage der Gewerbegebiete im Osten nimmt die Überwärmung von Ost nach West ab.

Insgesamt weist Obereisesheim im Mittel eine mäßige Überwärmung von 1,6 K auf, vergleichbar mit dem Stadtpark oder Amorbach-Alt.

Amorbach

Durch die gute Durchlüftung von Amorbach in den Abendstunden durch die Kaltluftabflüsse entlang der Grünen Mitte und des Hängelbachtals (siehe Kapitel 6.1.4) weisen große Teile von Amorbach nur eine geringe UHI auf. Im Mittel liegt die UHI bei 1,1 K in Amorbach-Neu und bei 1,6 K in Amorbach-Alt und Hasenbuckel. Eine deutliche Überwärmung tritt stellenweise entlang der westlichen Hälfte der Lautenbacher Straße auf. Durch die dichte Bebauung und die Lage im Ortskern ist auch der Bereich um den Katharinenweg und den umliegenden Straßen überwärmt.



Auftraggeber:

Mesoskalige Simulationen:
Regionalverband Heilbronn-Franken



Mikroskalige Simulationen:
Stadt Neckarsulm

Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Gebäude)
Geobasisdaten © LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-7: Abendliche urbane Wärmeinsel (UHI).

6.2.3 Häufigkeit von Sommertagen

Die Anzahl an Sommertagen im Jahr kann als Indikator für die Auftrittswahrscheinlichkeit von Wärmebelastungen herangezogen werden. Im Rahmen der regionalen Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken wurden die mittlere Anzahl an Sommertagen für den Raum Heilbronn-Franken flächendeckend ermittelt. Die Berechnung basiert dabei auf EURO-CORDEX Modellsimulationen (siehe Kapitel 3.1.3), die mittels Downscaling-Verfahren räumlich verfeinert wurden (iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG (2023), siehe auch Kapitel 3.2.2).

In Neckarsulm wurden im Mittel etwa 48 Sommertage pro Jahr im Zeitraum 1971 – 2000 registriert (siehe Kapitel 5.4). Mittels Downscaling-Verfahren ergibt sich die in Abbildung 6-8 gezeigte räumliche Verteilung. Da die Anzahl an Sommertagen direkt abhängig ist von der Lufttemperatur (ein Sommertag ist definiert als ein Tag mit einer Tageshöchsttemperatur $\geq 25\text{ °C}$), folgt die Verteilung den bereits in den vorigen Abschnitten ermittelten Verteilungen der PET und UHI.

Die Gewerbegebiete weisen im Mittel 59 Sommertage und mehr pro Jahr auf und liegen somit über 10 Tage über dem Durchschnitt in Neckarsulm. Die dicht bebauten Stadtgebiete von der Südstadt bis Viktorshöhe verzeichnen im Schnitt 56 Sommertage, in Neuberg sind es etwa 55 Tage.

Amorbach und Dahenfeld zählen im Durchschnitt 52 Sommertage pro Jahr. In Obereisesheim treten bis zu 57 Sommertage jährlich auf, wobei die Häufigkeit im Gewerbegebiet leicht höher und im übrigen Teil der Ortschaft leicht geringer ist.

Innerhalb der Waldgebiete herrschen durchschnittlich geringere Temperaturen, sodass hier an weniger Tagen im Jahr eine Tageshöchsttemperatur von 25 °C erreicht wird, nämlich nur an 30 bis 45 Tagen im Jahr.

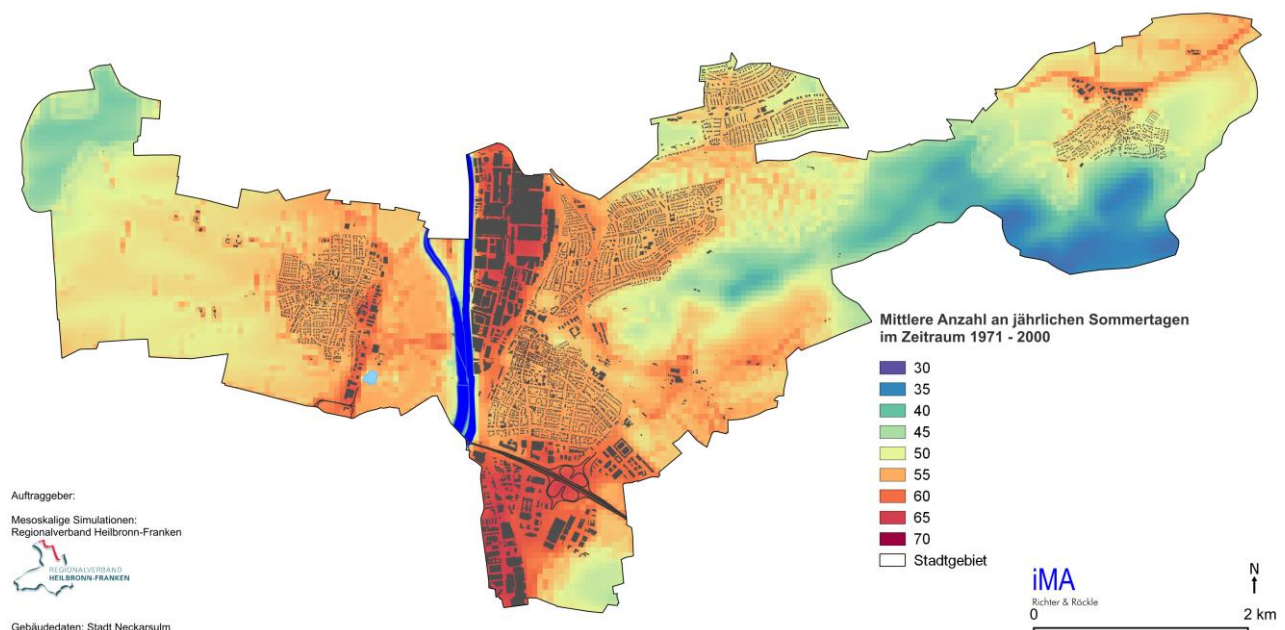


Abbildung 6-8: Verteilung der mittleren jährlichen Sommertage in Neckarsulm.

6.3 Stadtgrün und Klimavielfalt

Alle Formen des städtischen Grüns, von Parkanlagen über Kleingärten, Friedhöfen, Straßengrün oder Fassaden- und Dachbegrünung, bis hin zu Privatgärten oder landwirtschaftlichen Flächen werden als „städtisches Grün“ bezeichnet (BMUB (2015) S. 23 ff.). Grüne Infrastruktur erfüllt viele Funktionen. Sie dient

- als klimatische Ausgleichsfläche insbesondere auch während der Hitzeperioden,
- der Erholung und Freizeitgestaltung,
- dem Regenwasserrückhalt,
- der Verbesserung des Stadtklimas (Klimavielfalt),
- der Filterung von Luftschadstoffen,
- als Lebensraum für Tiere und Pflanzen,
- dem seelischen Wohlbefinden,
- der sozialen Interaktion,
- der Attraktivität einer Stadt.

Gleichzeitig wird die grüne Infrastruktur auch selbst vom Stadtklima und dem Klimawandel beeinflusst, etwa durch Trocken- und Hitzestress, verlängerter Vegetationsperiode und damit auch erhöhtem Spätfrostisiko. Dadurch entstehen zunehmend Schäden durch Trockenstress, Pilzkrankheiten und Schädlinge.

Wärmebelastung im Freien tritt insbesondere tagsüber in den Mittags- und Nachmittagsstunden von Mai bis Oktober auf. Um die Wärme- und Hitzebelastung zu verringern, sollten die Stadtbewohner tagsüber beschattete und begrünte Plätze aufsuchen können.

Auf Grünflächen mit einer Größe von mehr als 0,5 ha kann sich an heißen Sommertagen ein eigenes Kleinklima ausbilden. Ihr Erholungswert und ihre Aufenthaltsqualität können einen Beitrag zur Entlastung an heißen Sommertagen bewirken. In Abbildung 6-9 ist der Bestand an größeren öffentlich zugänglichen Grün- und Freiflächen mit Erholungswert und Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen abgebildet.

Die in Neckarsulm anzutreffenden Flächen mit Stadtgrün lassen sich wie folgt gliedern:

Multifunktionale Parkanlagen

Beispiele:

- Stadtpark
- Karlsplatz
- Grüne Mitte in Amorbach

Die großen multifunktionalen Parkanlagen in Neckarsulm ab einer Fläche von ca. 5.000 m² bieten große innerstädtische Erholungsräume für Anwohner und Touristen. Sie sind von stadtweiter Bedeutung und für die Erholung und Regeneration in Hitzeperioden besonders wichtig. In Abhängigkeit der Gestaltung und Beschaffenheit der Flächen wirken sie aufgrund ihrer



Größe klimatisch günstig auf die angrenzenden Siedlungsbereiche. Als offene Grünflächen übernehmen sie auch die Funktion von Kaltluftentstehungsgebieten.

Kleine Park- und Grünanlagen, Spazierwege

Beispiele:

- Parkanlage an der Klostergasse
- Weg zwischen Steigerwaldstraße und Pfälzer Straße



Kleinere Parks mit weniger als 5.000 m² Fläche oder nur geringer Breite haben meist keine oder nur geringe klimatische Wirkung auf die angrenzenden Siedlungsbereiche, wenn sie nicht an den Außenbereich anschließen. Diese können dennoch für die angrenzenden Anwohner eine wichtige Rolle für die Erholung im Stadtteil, insbesondere in Hitzeperioden, spielen.

Verkehrsbegleitgrün

Beispiele:

- Friedenstraße
- Salinenstraße
- Konrad-Zuse-Straße

Unter das Verkehrsbegleitgrün fallen das klassische Straßenbegleitgrün, Wegraine, Bahndämme und -böschungen. Aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zu Verkehrsachsen sind sie für die Erholung kaum nutzbar, außer an Fuß- und Radwegen. Verkehrsbegleitgrün reduziert die durch die Verkehrswege verursachte thermische Belastung, dient der Filterung und Versickerung von Oberflächenwasser und stellt als linienhafte Grünstruktur oft wichtige Elemente im Grünverbund dar.



Friedhöfe

Beispiele:

- Friedhof Neckarsulm
- Friedhof Obereisesheim
- Friedhof Dahenfeld

Friedhöfe sind Orte der Stille und Erinnerung. Sie sind aber auch Orte der Begegnung, der naturnahen, ruhigen Erholung und der Biodiversität. Sie sollten als Potenzialräume betrachtet und behutsam entwickelt werden.



Außenanlagen an öffentlichen Gebäuden

Beispiele:

- Evangelische Stadtkirche Neckarsulm
- Schulgelände an der Danziger Straße
- Kindergarten Grabenstraße



Grün- und Freiflächen an öffentlichen Gebäuden, vor allem an Schulen und Kindergärten bzw. Kindertagesstätten, bieten über das gesamte Stadtgebiet verteilte Freiräume. Sie sind heute teilweise bereits wertvolle Grünflächen mit alten Baumbeständen und als solche stadtklimatisch und ökologisch von hoher Bedeutung.

Freibäder und Badeplätze

Beispiele:

- Ernst-Freyer-Bad



Freibäder und Badeplätze dienen der Erholung der städtischen Bevölkerung in der heißen Jahreszeit. Die zugehörigen Liegewiesen und Baumbestände übernehmen dabei eine wichtige erholungsrelevante Funktion ein und sind stadtklimatisch sowie ökologisch wertvolle Freiflächen. Da Hitzeperioden mit dem Klimawandel zunehmen, wird auch die Nachfrage nach Freibädern steigen.

Spielplätze

Beispiele:

- Spielplatz an der Gymnasiumstraße
- Spiel- und Sportplatz Neuberg
- Spielplatz an der Lautenbacher Straße
- Spielplatz an der Mühlstraße

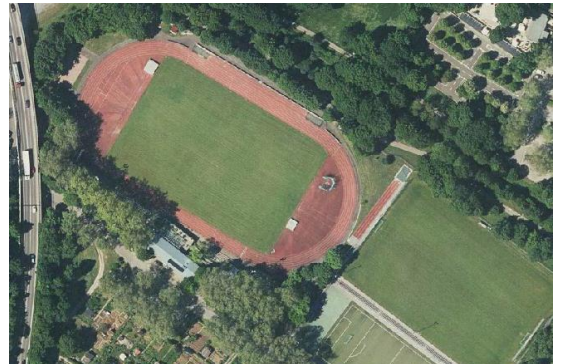
Für Familien sind Kinderspielplätze besonders wichtige städtische Freiflächen, welche klimatische, ökologische und erholungsrelevante Funktionen übernehmen können. Auf ausreichende Verschattung und Verfügbarkeit von Aufenthaltsbereichen und Spielzonen ist zu achten. Anmerkung: Spielplätze wurden nicht in ihrer Gesamtheit analysiert.



Sportflächen

Beispiele:

- Sportanlagen an der Pichterichstraße
- Sportplätze westlich des Dahenbachs



Sportplätze stellen zweckgebundene Grünflächen dar, welche sich tagsüber stark aufheizen können und nachts jedoch ausreichend abkühlen. Sie sind für die Erholung in Hitzeperioden nur eingeschränkt nutzbar.

Kleingartenanlagen

Beispiele:

- Kleingartenanlage nördlich des Bauhofs
- Kleingärten entlang des Hängelbachs



Gartenkleinanlagen können der Öffentlichkeit als Naherholungsgrünflächen dienen, auch indem z.B. Gemeinschaftsgärten ermöglicht werden.

Private Grün- und Freiflächen

Durch eine natur- und artenfreundliche Gestaltung privater Grünflächen kann jeder einen Beitrag zur Reduktion der thermischen Belastung des unmittelbaren Wohnumfeldes leisten und die natürliche Lebensgrundlage stärken. Insbesondere alte aber vitale Baumbestände sollten sowohl auf öffentlichen als auch auf privaten Grundstücken unter Schutz gestellt werden.

Schottergärten sind kontraproduktiv. Sie heizen sich wie versiegelte Flächen tagsüber stark auf und geben die Wärme abends wieder an die Umgebung ab, tragen somit zu einer höheren nächtlichen Lufttemperatur und einem stärkeren urbanen Wärmeinseleffekt bei.

Grünflächen sowie Naherholungsgebiete müssen für die Menschen erreichbar sein, um als Erholungsorte wirken zu können. Daher ist die Entfernung dieser Gebiete zu den Wohngebieten entscheidend für die Bewertung der Klimavielfalt. Für die Bewertung der Klimavielfalt wurde die Entfernung in Luftlinie zwischen den jeweiligen Wohngebieten und den nächstgelegenen multifunktionalen Parkanlagen und Naherholungsgebieten ermittelt. Dies ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Eine Entfernung vom Siedlungsbereich zu diesen Flächen von weniger als 250 m (das entspricht bis zu 5 min Fußweg) wird als „sehr gute Klimavielfalt“ und von weniger als 500 m (bis zu 10 min Fußweg) als „Klimavielfalt vorhanden“ gewertet (vgl. Mayer (1989); Richter, Grunewald & Meinel (2016); Schumacher, Lehmann & Behnisch (2016)).

Für die Erreichbarkeit spielen neben der Distanz auch Barrieren zwischen Wohngebiet und Grünfläche bzw. Naherholungsgebiet eine Rolle. Barrieren können beispielsweise Bahnlinien oder Autobahnen sein. Eine explizite Berücksichtigung der Barrieren gestaltet sich oft aufgrund der Datengrundlage schwierig (Fußgängerüberwege/-unterführungen sind häufig unzureichend in den Datenbeständen erfasst). Sie flossen daher in der vorliegenden Analyse nicht ein.

Grundstücke mit einem großen Gartenanteil (und Baumbestand) bieten ihren Bewohnern in der Regel eine gute Erholungsmöglichkeit, so dass in Stadtbezirken mit hohem privatem Grünanteil nur ein geringer Bedarf an zusätzlichem Stadtgrün anzunehmen ist. Dies wurde in der Bedarfsanalyse berücksichtigt. Die Ergebnisse liefern ein gutes Bild über die Versorgung mit Grünflächen auf gesamtstädtischer Ebene (Abbildung 6-9).

Neben den innerstädtischen Grünanlagen dienen auch die stadtnahen Wälder als Erholungsgebiete für die Stadtbevölkerung. Beispiele hierfür sind die Waldflächen am Scheuerberg sowie an den Hängen südlich und westlich von Dahenfeld.

Ebenfalls können öffentlich zugängliche Streuobstwiesen als Naherholungsgebiete dienen, sofern ausreichend Spazierwege und verschattete Sitzmöglichkeiten für die Bürgerinnen und Bürger bestehen. In Abstimmung mit der Stadt Neckarsulm wurden die in Frage kommenden Streuobstflächen identifiziert und in die Bewertung der Klimavielfalt mit einbezogen.

In der Stadt Neckarsulm erreichen 91 % der Einwohner innerhalb von 500 m Luftlinie und 68 % der Einwohner innerhalb von 250 m Luftlinie öffentlich zugängliche Parkanlagen und Waldgebiete. Die reale Weglänge kann gegebenenfalls – wie oben angemerkt – höher sein.

Die Bedarfsanalyse ergibt, dass lediglich 5 % der Einwohner einen erhöhten Bedarf an zusätzlichen Parkanlagen haben. Ein erhöhter Bedarf besteht insbesondere in der Südstadt südlich der Ganzhornstraße und zwischen Scheffelstraße und Friedenstraße sowie im Heilbronner Feld zwischen

Uhlandstraße und Heilbronner Straße. Aufgrund der Siedlungsstruktur und der Wärmebelastung sind dort Grünflächen mit guter Aufenthaltsqualität besonders wichtig.

Im übrigen Bereich der Stadtteile Südstadt und Heilbronner Feld erreicht ein großer Teil der Einwohner öffentliche Grünflächen erst in einer Entfernung von über 250 m. Gleiches gilt für das Zentrum von Neuberg und Viktorshöhe. Die Schaffung weiterer Grünflächen in diesen Bereichen sollte in Erwägung gezogen werden, insbesondere falls dort Nachverdichtungsmaßnahmen geplant werden.

Dahenfeld

Durch die direkte Nähe zu den Waldgebieten und den hohen Grünanteil in der Ortschaft liegt in Dahenfeld kein erhöhter Bedarf an öffentlichen Grünflächen vor.

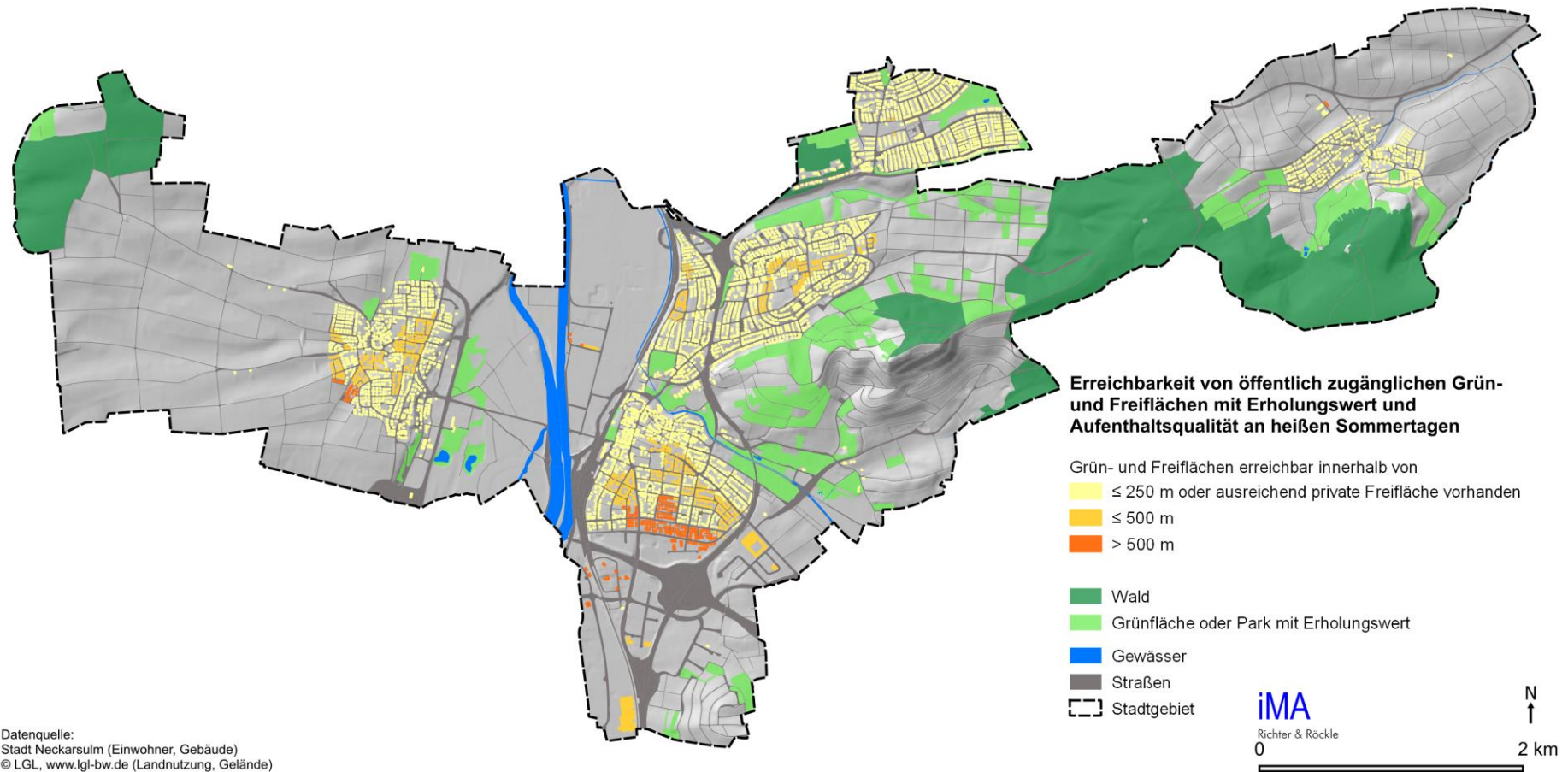
Obereisesheim

An der Mühlstraße und der Ringstraße im Südwesten von Obereisesheim besteht ein erhöhter Bedarf an Stadtgrün. Zwar befindet sich dieses Gebiet in direkter Nähe zu landwirtschaftlichen Freiflächen, allerdings bieten landwirtschaftliche Freiflächen durch die geringe Verfügbarkeit von Schattenplätzen nur bedingt eine Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen und führen so nicht zu einer Reduktion des Bedarfs an Klimavielfalt.

In der Ortsmitte Obereisesheims können öffentlichen Grünflächen teilweise erst in über 250 m Entfernung erreicht werden. Die Schaffung weiterer Grünflächen sollte daher in Erwägung gezogen werden, insbesondere falls dort Nachverdichtungsmaßnahmen geplant werden.

Amorbach

Amorbach weißt mit der Grünen Mitte und den übrigen öffentlichen Grünflächen eine gute Versorgung mit Stadtgrün auf. Es besteht daher zurzeit kein zusätzlicher Bedarf an öffentlichen Grünanlagen zur Steigerung der Klimavielfalt.



Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Einwohner, Gebäude)
© LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-9: Versorgung der Siedlungsräume mit öffentlich zugänglichen Grünflächen mit Erholungswert und Aufenthaltsqualität unter Berücksichtigung von privaten Gartenanlagen.

6.4 Empfindlichkeit

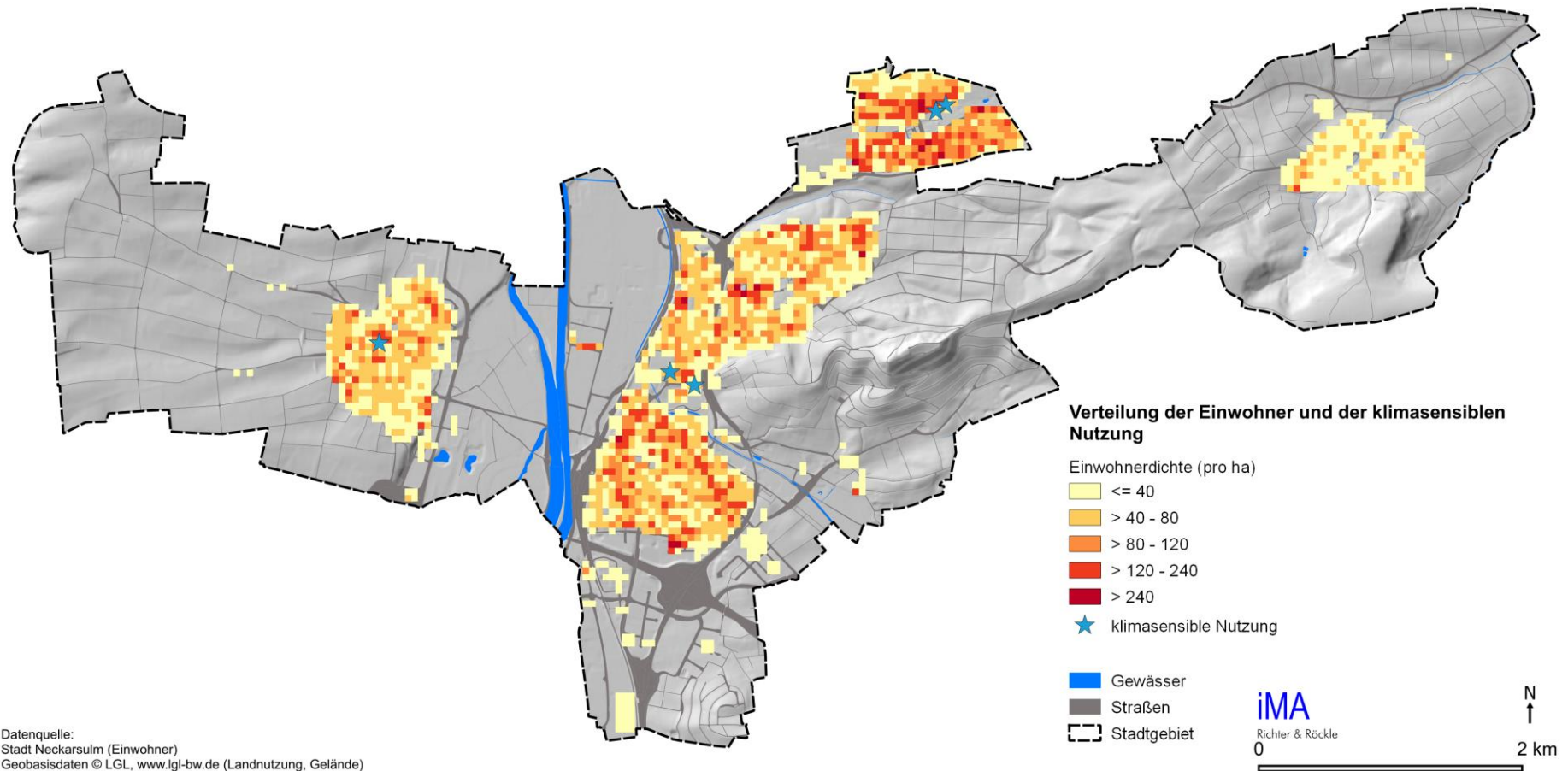
Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Siedlungsbereiche wird die Einwohnerdichte für die Flächen von 50 m x 50 m (Abbildung 6-10) berechnet. Bereiche mit hoher Einwohnerdichte sind empfindlicher gegenüber Nutzungsänderungen.

Neckarsulm weist nur vereinzelt eine hohe Einwohnerdichte auf. Im Bereich zwischen Stettiner Straße und Mergentheimer Straße und vereinzelt in der Kernstadt, Pichterich und Viktorshöhe wird eine hohe Einwohnerdichte erreicht.

In Amorbach liegt nahezu flächendeckend eine hohe Einwohnerdichte vor, während Obereisesheim nur eine mittlere bis geringe Einwohnerdichte aufweist. Dahenfeld ist vergleichsweise gering besiedelt.

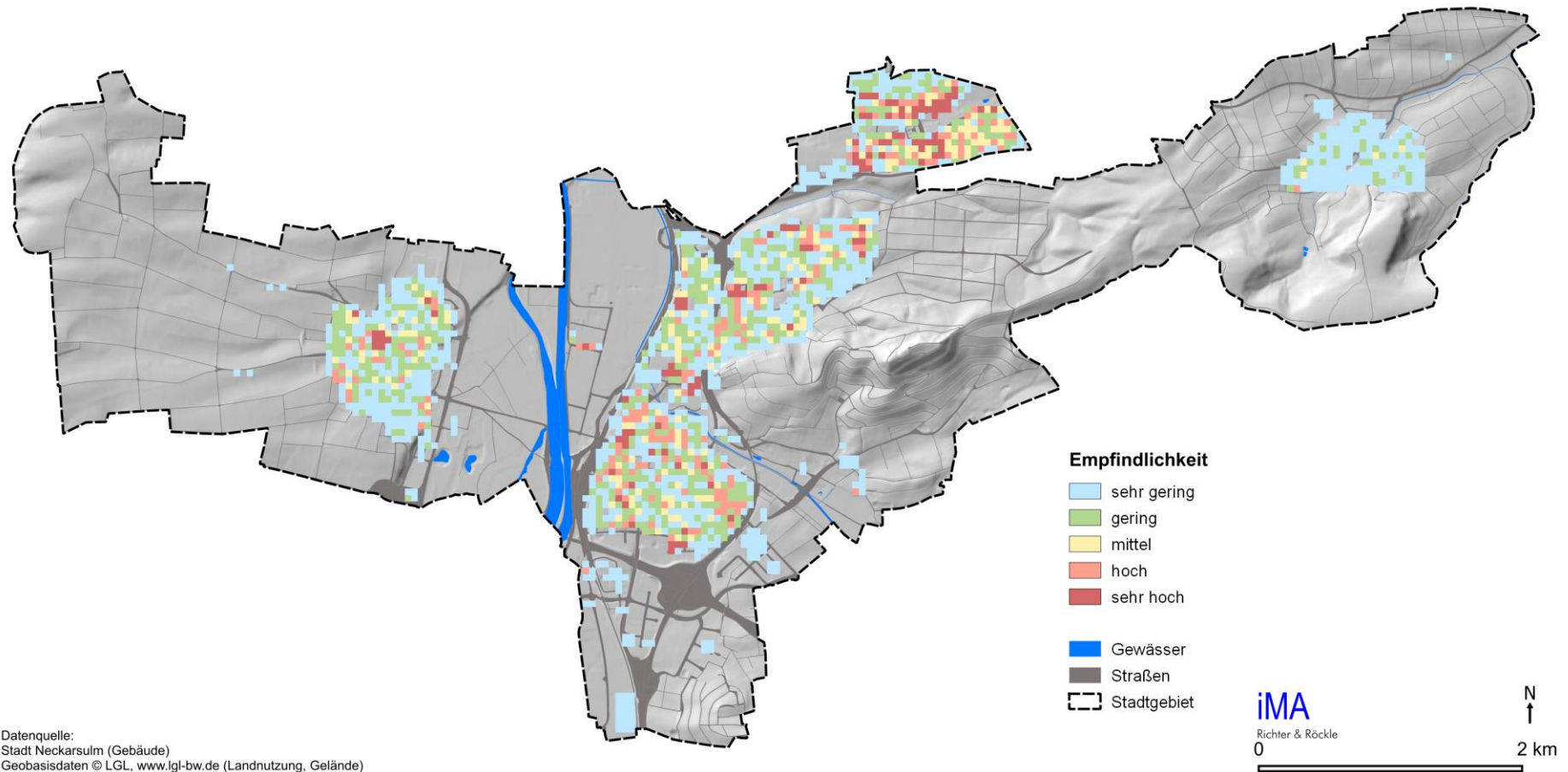
Besonders alte oder kranke Personen reagieren empfindlich auf Hitzestress und weisen dementsprechend hohe Mortalitäts- und Morbiditätsraten* während Hitzewellen auf (Grize et al. (2005); Robine et al. (2008)). In Abbildung 6-10 sind neben der Einwohnerdichte auch Einrichtungen eingetragen, welche in Bezug auf Hitzestress besonders vulnerabel sind. Dabei zeigt Abbildung 6-10 lediglich eine räumliche Auflistung solcher Einrichtungen noch ohne Bewertung, ob tatsächlich Hitzestress vorliegt.

Die bewertete Empfindlichkeit ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Die Methodik zur Bewertung der Empfindlichkeit wurde an die Bevölkerungsverteilung der Stadt Neckarsulm angepasst und ist in Anhang A1.2.2 (Seite 88) näher beschrieben.



Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Einwohner)
Geobasisdaten © LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-10: Verteilung der Einwohnerdichte und der klimasensiblen Nutzungen in Neckarsulm.



Datenquelle:
Stadt Neckarsulm (Gebäude)
Geobasisdaten © LGL, www.lgl-bw.de (Landnutzung, Gelände)

Abbildung 6-11: Aus der Einwohnerdichte und der klimasensiblen Nutzung abgeleitete Empfindlichkeit.

6.5 Betroffenheit

Aus der Überlagerung der Empfindlichkeit (Abbildung 6-11) mit der thermischen Belastung (Abbildung 6-12) ergibt sich die thermische Betroffenheit. Die Berechnung der thermischen Belastung und der thermischen Betroffenheit wird im Anhang A1.2.3 (Seite 89) detailliert beschrieben.

Die thermische Belastung (Abbildung 6-12) wird auf Grundlage der human-biometeorologischen Belastung tagsüber, der Stärke der nächtlichen urbanen Wärmeinsel und der Klimavielfalt sowie der Anzahl der jährlichen Sommertage bewertet.

Die thermische Belastung ist in den Gewerbegebieten Rötel, Klauenfuß und Süd am höchsten. Ebenfalls hohe Werte treten in den übrigen Gewerbegebieten Südstadt, Gottesacker, Trendpark Süd, dem Audi-Werk und im Bereich des Bahnhofs auf. Erhöhte Werte werden zudem entlang der Neuenstädter Straße und der Marktstraße erreicht. Durch die Nähe zum Gewerbegebiet Südstadt weist der südliche Teil der Südstadt eine zum Teil sehr hohe thermische Belastung auf. Auch der Stadtteil Viktorshöhe weist mit Ausnahme des Friedhofsgeländes überwiegend eine hohe thermische Belastung auf.

Die gute Durchgrünung und Durchlüftung mit Kaltluft bewirken eine im Mittel nur geringe thermische Belastung in den Stadtteilen Pichterich und Neuberg.

Amorbach weist größtenteils eine geringe bis mittlere thermische Belastung auf. In Amorbach-Alt südlich der Lautenbacher Straße und im Bereich des Katharinenwegs wird eine hohe thermische Belastung erreicht. Dies ist auch vereinzelt am Weserweg und Ruhrweg in Amorbach-Neu und in Hasenbuckel entlang der Oedenheimer Straße und teilweise südlich davon zu erkennen.

Obereisesheim weist überwiegend eine geringe thermische Belastung auf. Lediglich im Gewerbegebiet entlang der Silcherstraße und der Austraße wird eine hohe bis teilweise sehr hohe thermische Belastung ausgewiesen.

Dahenfeld ist überwiegend sehr gering bis gering thermisch belastet. Eine erhöhte Belastung tritt entlang der Industriestraße im Gewerbegebiet auf.

Eine hohe thermische Betroffenheit (Abbildung 6-13) liegt südlich der Ganzhornstraße in der Südstadt vor. Hier kommt die Nähe der Wohngebiete zu den thermisch belasteten Gewerbegebieten zu tragen. Die Kernstadt weist ebenfalls eine teilweise hohe thermische Betroffenheit auf. Durch die Verteilung der Einwohner im Stadtgebiet entstehen allerdings keine ausgeprägten Zentren mit erhöhter thermischer Betroffenheit. Es ist lediglich eine Tendenz zu höherer Betroffenheit im Inneren der Siedlungsgebiete und niedrigere Werte an den Siedlungsrändern zu erkennen.

Durch die hohe Bevölkerungsdichte in Amorbach wird trotz überwiegend geringer bis mittlerer thermischer Belastung teilweise eine hohe thermische Betroffenheit erreicht, insbesondere südlich der Oedheimer Straße und südlich der Lautenbacher Straße im Bereich der Bordighera Allee.

Obereisesheim zeigt überwiegend eine geringe thermische Betroffenheit und nur vereinzelt eine mittlere thermische Betroffenheit.

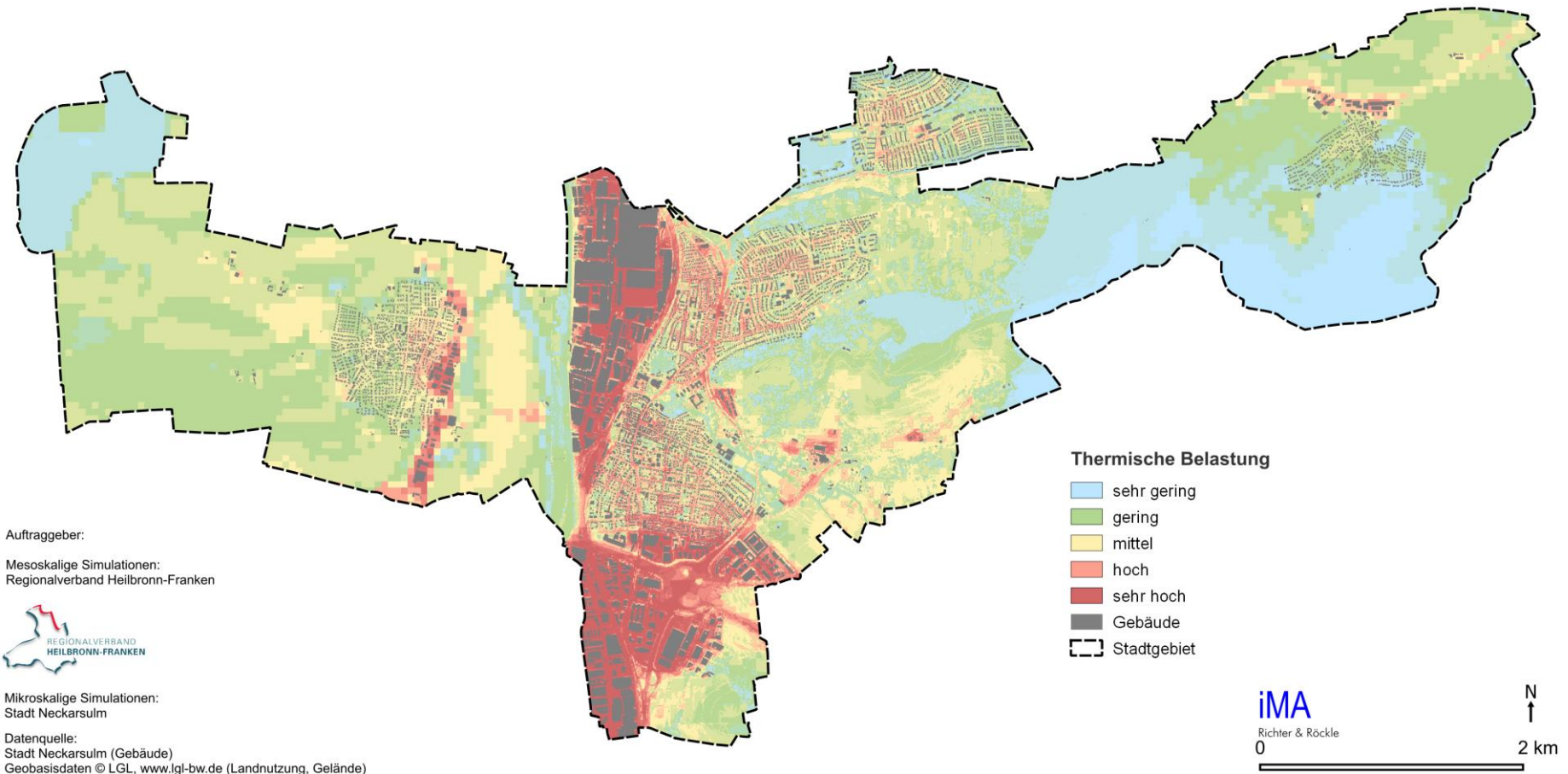


Abbildung 6-12: Thermische Belastung in Neckarsulm. Eingangsdaten für die thermische Belastung sind die PET, die UHI, die Anzahl an Sommertagen und die Klimavielfalt.

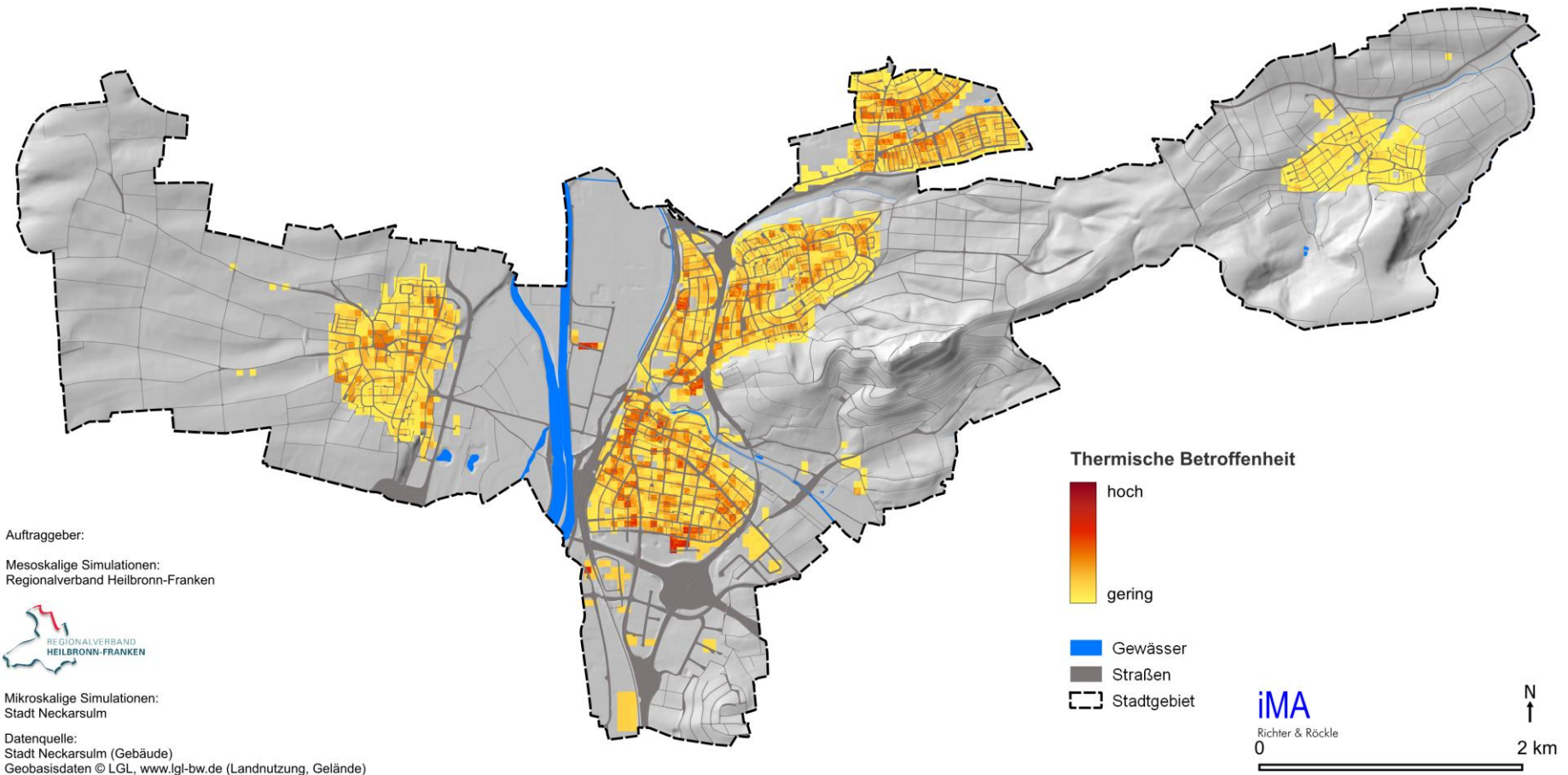


Abbildung 6-13: Thermische Betroffenheit (Vulnerabilität). Die thermische Betroffenheit ergibt sich aus der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit.

7 Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte (Abbildung 7-1), auch Klimatopkarte genannt, zeigt eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes. Dabei gibt sie in erster Linie die Verhältnisse während autochthoner Wetterlagen, also windschwacher, austauscharmer Hochdruckwetterlagen wieder. Die gezeigten Luftleitbahnen beziehen sich insbesondere auf die für Siedlungsräume belüftungsrelevante Kaltluftströmung während dieser Wetterlagen.

Die Kartenerstellung basiert auf der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015), in der vorgeschlagen wird, klimarelevante Flächen, sogenannte Klimatope, auszuweisen. Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten mit ähnlichen mikroklimatischen Verhältnissen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Modellierungen bilden neben der Realnutzung die Grundlage für die Klimaanalysekarte. Da Vorgänge in der unteren Atmosphäre betrachtet werden, sind die Übergänge zwischen den Klimatopen eigentlich fließend, d.h. die Abgrenzungen in der Klimaanalysekarte sind nicht als „scharfe“ Grenzen, sondern eher als „Grenzsäume“ zu sehen.

Die in Abbildung 7-1 dargestellte Strömung bezieht sich auf das Dachniveau in den Abendstunden. Die Beschreibung der Klimatope und ihrer klimatischen Eigenschaften ist in Anhang A2 aufgelistet.

Kaltluftstau (durch blaue Linien gekennzeichnet) kann an Siedlungsrändern oder riegelbildenden Vegetationsstrukturen auftreten. Durch den an Barrieren auftretenden Anstau von Kaltluft kann sich ein Kaltluftsee ausbilden, dessen vertikale Mächtigkeit in etwa durch die Hindernishöhe begrenzt wird. Das Frostrisiko ist in diesem Bereich erhöht, da sich die bodennahe Luft in Stagnationsbereichen stärker abkühlen kann als in Fließbereichen. Die Kaltluftstaubereiche wurden unter Berücksichtigung der bodennahen Strömung und Lufttemperatur ausgewiesen.

Die Siedlungsränder an den nördlichen Hängen des Scheuerbergs in Neuberg bilden Barrieren für die Hangabwinde. Hier kann Kaltluft lokal gestaut werden. Gleiches gilt für die Siedlungsränder im Sulmtal, an denen sich bodennah die Strömung stauen kann. Auch der Mühlweg, der im Bereich der Sulm auf einem Straßendamm verläuft, kann die Kaltluft aufstauen.

Die markanteste **Luftleitbahn** in Neckarsulm verläuft entlang des Sulmtals. Die Luftleitbahn wird durch die Gewerbegebiete Strassenäcker und Gottesäcker geteilt und folgt nördlich der Sulm und südlich der Autobahn 6 (vergleiche auch Kapitel 6.1.4). Der südliche Zweig wird durch die vorhandene Autobahn und die dort freigesetzten Abgase als lufthygienisch belastet bewertet. Der nördliche Zweig reicht bis an den Siedlungsrand östlich des Stadtparks und sorgt für den Frischlufttransport des Stadtzentrums. Weitere Luftleitbahnen verlaufen entlang des Neckartals und entlang des Hängelbachs zwischen Neuberg und Amorbach. Südlich des Scheuerbergs sammelt sich ebenfalls Kaltluft, die auf der Höhe des AQUAtoll am Wilfenseeweg mit der Strömung des Sulmtals zusammenfließt.

Klimaanalysekarte für die Stadt Neckarsulm

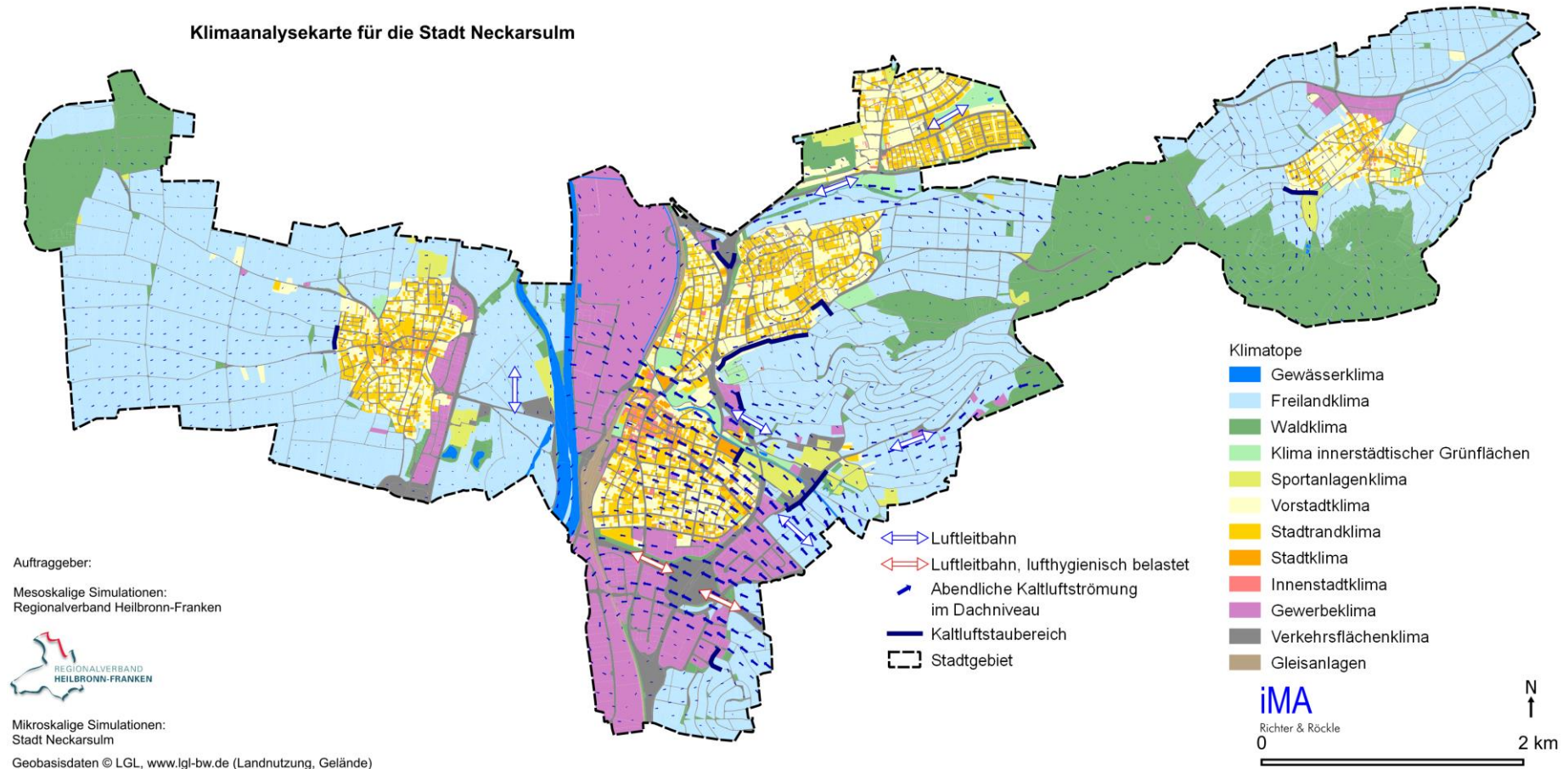


Abbildung 7-1: Klimaanalysekarte für Neckarsulm. Dargestellt sind die Klimatope, die abendliche Kaltluftströmung und die potentiellen Luftleitbahnen.

8 Planungshinweiskarte

Während die Klimaanalysekarte eine weitgehend wertfreie Darstellung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse repräsentiert, werden auf der Planungshinweiskarte zum einen die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und zum anderen die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung klassifiziert.

In Abbildung 8-2 werden die Siedlungsflächen im Hinblick auf die thermische Betroffenheit (Vulnerabilität) unter Berücksichtigung der thermischen Belastung und der Empfindlichkeit bewertet.

Die Siedlungsbereiche sind je nach thermischer Betroffenheit eingefärbt. Je dunkler die Farbe, desto höher ist dort die Betroffenheit. In den stark belasteten Bereichen ist anzustreben, die Wärmebelastung durch Bebauung und Versiegelung nicht weiter zu erhöhen und stattdessen Minderungsmaßnahmen in Betracht zu ziehen. Dies kann in Form von Ausgleichsflächen erfolgen, die stärker begrünt werden. Aber auch eine Verringerung des Anteils der versiegelten Fläche z.B. durch Fassaden- und Dachbegrünung, Bäume sowie Pocket-Parks verringern die Wärmebelastung. Nachverdichtungen in diesen Bereichen sind eher kritisch zu sehen. Es wird empfohlen, diese Bereiche durch Schaffung von Ausgleichsflächen zu entlasten.

Der Anpassungsbedarf zur Optimierung des Klimakomforts nimmt von den dunkelroten Bereichen zu den orangefarbenen Bereichen ab. In den gelben Bereichen ist der Anpassungsbedarf eher gering.

Die Grünflächen sind nach aufsteigender Relevanz für die nächtliche Durchlüftung von gelb über grün nach blau eingefärbt. Je blauer die Fläche, desto wichtiger ist diese für den Kaltluftzustrom. Um ihre Funktion zu erhalten, sollten diese Flächen von geschlossener Bebauung freigehalten werden. Dies wäre Aufgabe für die Flächennutzungsplanung. Zwar sind einzelne Bauwerke in diesen Bereichen möglich, sofern sie die Höhe der angrenzenden oder umliegenden Bebauung nicht übersteigen und diese keine Riegel quer zur Strömung darstellen. Planungen sind dort im Einzelfall abzuwägen.

In Bereichen mit geringer Rauigkeit (z.B. Wiesen, Ackerland) sind die möglichen bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten höher als in rauem Gelände (z.B. Siedlung, Wald). Hindernisse machen die Strömung turbulenter und schwächen damit den mittleren Luftstrom. Potenziell sind folglich Wasserflächen und Acker- und Grünflächen mit niedriger Vegetation und damit geringer Rauigkeit gute Luftleitbahnen. Aber auch breite langgestreckte Gleisanlagen oder breitere geradlinige Ausfallstraßen können Luftleitbahnen darstellen.

Wenn eine Luftleitbahn dazu dient, thermisch oder lufthygienisch belastete Gebiete bodennah zu belüften, wird von einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn gesprochen. Nach Mayer & Matzarakis (1992) sollen stadtklimarelevante Luftleitbahnen mindestens 1 km lang und 50 m breit und weitgehend hindernisfrei sein. Die Bedeutung der Luftleitbahnen hängt von den vorherrschenden Windrichtungen und der Durchlüftungsfunktion in thermisch belasteten Siedlungsbereichen ab. Luftleitbahnen beschreiben Flächen, über die Kaltluftströmungen bodennah entlastend wirksam werden. Aber auch Kaltluftströmungen, die sich im Überdachniveau fortsetzen und in weiter stadteinwärts liegende Bereiche reichen, tragen zur Entlastung bei. Die Wiesen, Frei- und Sportflächen sowie die Autobahn stellen eine funktionelle Luftleitbahn für die Kaltluftströmung aus dem Weinsberger Tal dar.

Für die Durchlüftung von Amorbach während autochthoner Wetterlagen stellt die Grüne Mitte eine wichtige Luftleitbahn für die Wohnsiedlungen südlich und westlich davon dar. Die grundsätzliche Oberflächenrauigkeit durch die Vegetation und die Grundschule schwächt diese Strömung bereits bodennah, vor allem aber die anschließende Zeilenbebauung reduziert diese Strömung signifikant.

Auch das Hängelbachtal stellt eine Luftleitbahn dar und versorgt die Stadtteile Neuberg und Viktorshöhe sowie den südlichen Bereich der Ortschaft Amorbach mit Frischluft.

Planungshinweiskarte für die Stadt Neckarsulm

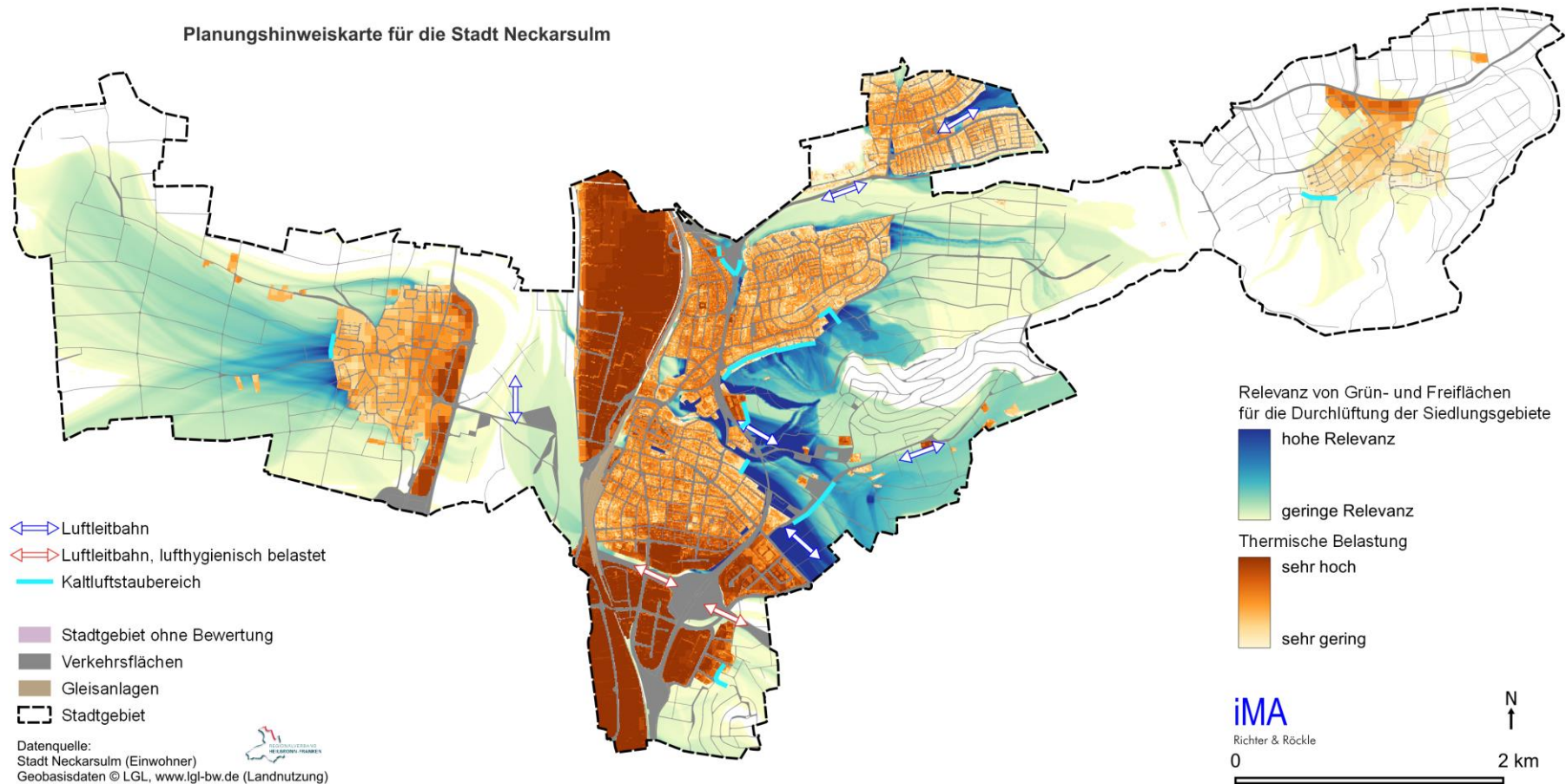


Abbildung 8-1: Planungshinweiskarte für Neckarsulm. Darstellung mit der thermischen Belastung im Siedlungsgebiet.

Planungshinweiskarte für die Stadt Neckarsulm

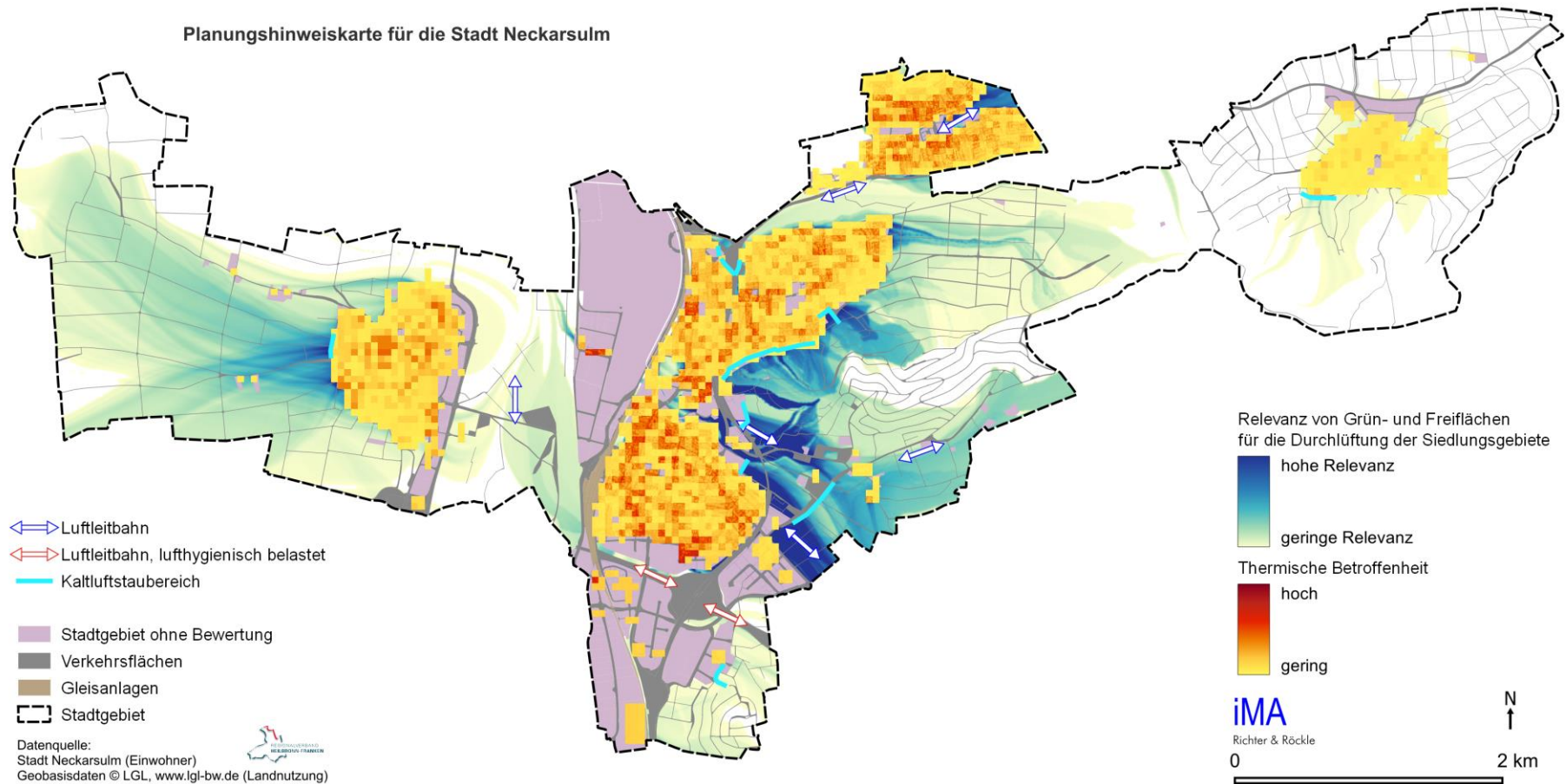


Abbildung 8-2: Planungshinweiskarte für Neckarsulm. Darstellung mit der thermischen Betroffenheit im Siedlungsgebiet.

9 Handlungsstrategien für die Stadtplanung

Die Stadtklimaanalyse ist nur ein Baustein in einem anzustrebenden Gesamtkonzept, wie mit den Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler Ebene umzugehen ist.

Hilfreich ist hierfür die Erarbeitung von Leitbildern. Diese sollen die Ziele des Klimaschutzes und der Klimaanpassung mit den Anforderungen der Menschen an ihren Wohn-, Arbeits- und Erholungsraum verknüpfen¹⁷.

Dieses Kapitel stellt Handlungsstrategien für die klimarelevanten Aspekte der Durchlüftung, der thermischen und der lufthygienischen Belastung zusammen. Die Strategien bzw. Empfehlungen beruhen auf den Modellergebnissen, der wissenschaftlichen Literatur, aber auch auf den Inhalten der Städtebaulichen Klimafibel (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart (2012)) oder der Regionalen Klimaanalyse der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO, Schwab & Zachenbacher (2009)).

Da es für lokalklimatische Größen keine Grenzwerte gibt und auch die Ziele (z.B. Wahrung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse, BauGB §34 Absatz 1 oder §136 Absatz 2 Punkt 1) nicht konkret formuliert sind, können Maßnahmen nicht zwingend gefordert werden. Vielmehr gilt ein Minimierungsgebot, d.h. unerwünschte Auswirkungen sind unter Beachtung anderer Anforderungen weitgehend zu reduzieren.

Bei den Handlungsstrategien handelt es sich um voneinander unabhängige Optionen. Diese können für unterschiedliche Zielsetzungen zueinander in Konflikt stehen. Zum Beispiel kann eine Begrünung des Straßenraumes mit Bäumen human-bioklimatisch positiv sein, da Wege im Schatten zurückgelegt werden können. Jedoch reduzieren Bäume den Luftaustausch im Straßenraum wodurch die Luftbelastung erhöht wird. Im Einzelfall ist daher die Wahl der Maßnahmen zu prüfen und abzuwägen, welche Ziele die größere Priorität haben.

9.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung

Eine ausreichende Durchlüftung vermeidet oder reduziert die Akkumulation von thermischen und lufthygienischen Belastungen. Dies ist insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen (z.B. autochthonen Wetterlagen) relevant. Zum einen sind hier Kaltluftproduktionsflächen und Geländeneigungen, zum anderen möglichst hindernisarme Fließwege zu belasteten Bereichen erforderlich. Um das bodennahe Eindringen von Kaltluft in Siedlungsbereiche zu ermöglichen, sind Luftleitbahnen in Fließrichtung der Kaltluft hilfreich.

Folgende Punkte tragen zum Erhalt des Luftaustauschs bei oder verbessern diesen (vgl. hierzu auch Abbildung 9-1):

- Freihalten von relevanten Kaltluftproduktionsflächen und Luftleitbahnen von geschlossener Bebauung oder riegelbildenden Hindernissen,
- Schaffung oder Erhalt von Grünzügen innerhalb der Siedlungskörper als Belüftungsschneisen und Luftleitbahnen,
- Begrenzung von Gebäudehöhen, um das Überdachniveau niedrig zu halten,

¹⁷ https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Klimaanpassung/LUBW_Leitfaden_Landschaftsplan_Klimaanpassung_2018.pdf

- Bau von strömungsdurchlässigen Siedlungsbereichen mit Luftleitbahnen,
- offene Gestaltung von Siedlungsrändern für eine möglichst hohe bodennahe Eindringtiefe,
- Ausrichtung von Straßenzügen längs zur vorherrschenden, für den Luftaustausch relevanten Windrichtung.

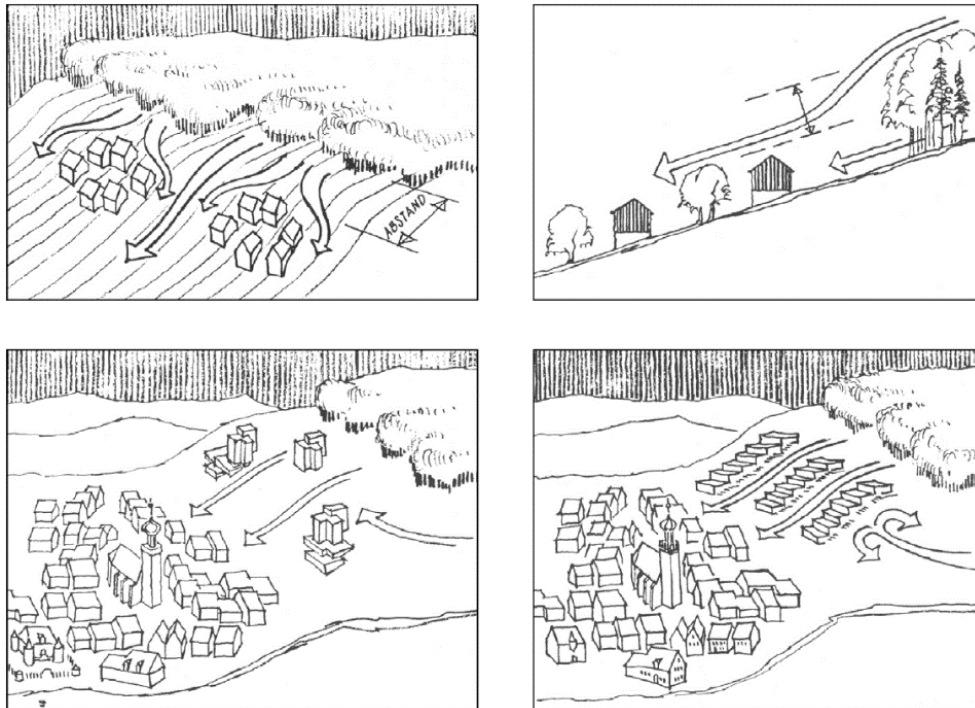


Abbildung 9-1: Empfehlungen zur Bebauung von Hanglagen aus der Städtebaulichen Klimafibel: Einhaltung eines möglichst großen Abstands von Waldrändern (oben links), Unterschreitung der Gebäudehöhe bezüglich der Höhe bestehender Hindernisse (oben rechts), bevorzugt punktförmige Bebauung (unten links) und Ausrichtung der Gebäude längs der Richtung von Hangabwinden unter Berücksichtigung anderer dominierender Windrichtungen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart (2012)).

9.2 Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung

Für die Reduktion von thermischen Belastungen sollte vorrangig die Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen betrachtet werden. Die in Kapitel 9.1 aufgeführten Handlungsstrategien zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Durchlüftung können sich darüber hinaus ebenso positiv auswirken (z.B. durch Kalt- und Frischluftzufuhr und Abtransport der Wärme). Eine höhere Windgeschwindigkeit hingegen kann die thermische Belastung des Menschen sowohl reduzieren (erhöhte Schweißverdunstung bei Hitzestress) als auch erhöhen (Auskühlung bei Kältestress).

Die hier betrachteten Handlungsstrategien beziehen sich hauptsächlich auf sommerliche Wärmebelastung. Hinsichtlich winterlicher Kältestresssituationen können Maßnahmen der REKLISO-Untersuchung (Parlow, Scherer & Fehrenbach (2006)) entnommen werden.

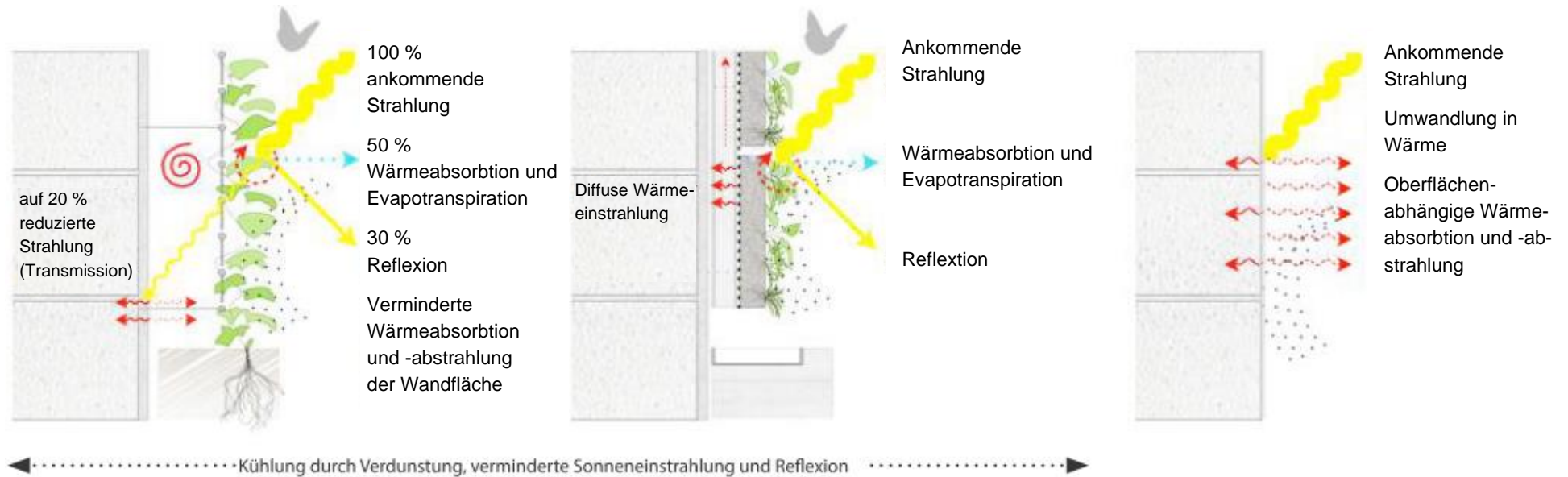
Generell sind Maßnahmen, die das innerstädtische Grünvolumen erhöhen und Schattenplätze schaffen, zielführend. Auch Entsiegelung, Wasserrückhaltung und Wasserspiele sind geeignete Maßnahmen, die Aufenthaltsqualität zu verbessern. Eine Erhöhung der Albedo kann die Aufhei-

zung der Baumaterialien verringern und dadurch die urbane Wärmeinsel in den Abend- und Nachtstunden verringern. Für Mensch und Tier kann eine geringe Albedo in den Tagstunden durch die höhere Reflexion von kurzweiliger Strahlung zu einer erhöhten Wärmebelastung führen.

Je nach Durchlüftungssituation des Siedlungsgebiets sollten folgende Handlungsstrategien zum Erhalt oder der Verbesserung der Wärmebelastung berücksichtigt werden:

- Vermeidung oder Minimierung von versiegelten Flächen (z.B. Grünflächen, permeabler Asphalt, Grasgittersteine, Kfz-Stellflächen unter die Erde verlegen oder in Parkhäusern bündeln, Brunnen),
- Verschattung versiegelter Bereiche (insbesondere von Kfz-Stellflächen),
- Vermeidung von Stein- und Schotterflächen in den Vorgärten und sonstigen privaten Grünflächen,
- Dachbegrünung und Dächer mit heller Farbe, die die Sonnenstrahlung reflektieren („cool Roofs“) zur Reduktion der Temperatur im Dachniveau; konkurrieren evtl. mit Klimaschutzmaßnahmen, wie z.B. Solarzellen, wobei eine bessere Dämmung auch durch Dachbegrünung ebenfalls zum Klimaschutz beiträgt,
- Kombination von extensiver Dachbegrünung und Solarzellen,
- Förderung kleiner auch privater Grünflächen,
- Innenhofbegrünung,
- ausreichend innerstädtische Grünflächen mit Baumbestand größer 0,5 ha, um die Klimavielfalt zu erhalten oder zu fördern,
- Straßenraumbepflanzungen oder andere schattenspendenden Maßnahmen um beispielsweise Wege in verschatteten Bereichen zurücklegen zu können (früher waren, insbesondere in südlichen Ländern, Arkadengänge verbreitet),
- Fassadenbegrünungen (Verschattung der Wand, Kühlung durch Verdunstungsfähigkeit der Pflanzen, Retention von Niederschlagswasser, geringere Reflektion der Sonnenstrahlung, geringere Schallreflexion (siehe Abbildung 9-2),
- Neubauten nach aktuellen GEG¹⁸-Standards (GEG (2023)) oder besser (Reduktion der Abwärme, besseres Abkühlverhalten in den Nachtstunden als Bestand),
- Erhaltung von Kaltluftproduktions- und Kaltlufttransportgebieten,
- Vermeidung der Ansiedlung von Abwärmeproduzenten (insbesondere entlang von Luftleitbahnen).

¹⁸ Gebäudeenergieeinsparungsgesetz. Hat die EnEV im November 2020 abgelöst.



① Bodengebundene Begrünung (Gerüstkletterpflanzen)

② Wandgebundene Begrünung, modularer Aufbau

③ Unbegrünte Massivwand

Abbildung 9-2 Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima. Erhöhte Lebensdauer der Fassade durch reduzierte Sonneneinstrahlung/UV- Belastung und Schlagregenschutz der Außenwand (© Nicole Pfoser, Dettmar, Pfoser & Sieber (2016)).

Die Wirkung einer einzelnen Anpassungsmaßnahme führt primär lokal zu einer Verbesserung des Klimas. Erst das Zusammenwirken von mehreren Maßnahmen bewirkt einen Rückgang der städtischen Wärmeinsel. Besonders effizient sind Verschattungsmaßnahmen sowie unversiegelte Flächen, die eine Umsetzung der eingehenden Sonnenenergie in Verdunstungswärme (latenter Wärmefluss*) anstatt einer Erhöhung der Temperatur (fühlbarer Wärmestrom) bewirken.

Nicht zu unterschätzen sind die psychologischen Wirkungen innerstädtischer Grünbereiche, die evtl. lokalklimatisch kaum Bedeutung haben, aber die Aufenthaltsqualität positiv beeinflussen.

Klimaschutz- und Adaptationsmaßnahmen können einerseits konkurrieren (Solaranlage vs. Dachbegrünung) und sich andererseits auch ergänzen. In Tabelle 9-1 wird diese sich ergänzende Wirkung am Beispiel von städtischen Begrünungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 9-1: Wirkungskatalog von Begrünungsmaßnahmen hinsichtlich des Klimaschutzes und der Klimaanpassung.

Wirkungen bezüglich Klimaschutz	Wirkungen bezüglich Klimaanpassung	Sonstige Wirkungen
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sauerstoffproduktion 2. Kohlenstoffspeicherung 3. Verbesserung der CO₂-Bilanz <ul style="list-style-type: none"> - durch Photosynthese - durch Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs - durch Lebensdauererweiterung von Materialien durch Abschattung materialschädigender UV-Strahlung 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stadtbegrünung 2. Grünflächen mit geringer Rauigkeit dienen als Luftleitbahnen und tragen zur besseren Durchlüftung bei 3. Reduktion des Energiebedarfs (Klimaanlage und Heizbedarf) 4. Erhöhte Verdunstung = verringerte Aufheizung der künstlichen Materialien sowie geringer Anstieg der Lufttemperatur 5. Kühlung durch Verschattung 6. Verringerung der urbanen Wärmeinsel 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verringerte Schallreflexion 2. Attraktiverer Lebensraum 3. Verringerung der Luftbelastung durch verbesserte Durchlüftung und Reduktion des Energiebedarfs

Der Maßnahmenkatalog hat noch keinen Raumbezug. Der Bedarf aus klimatischer Sicht kann zwar den hier dargestellten Karten entnommen werden, die Konkretisierung der Maßnahmen erfordert jedoch die Zusammenarbeit verschiedener Akteure, insbesondere aus dem Bereich der Grün- und Stadtplanung.

Weiterführende Informationen und Hilfestellungen für Kommunen sind auf den Seiten des Klimascout¹⁹ nachzulesen.

Zudem ist es wichtig und wird zudem vom Land gefördert, die Bürgerschaft bei den anstehenden Anpassungsstrategien mitzunehmen.

¹⁹ http://www.klimascout.de/kommunen/index.php?title=Ma%C3%9Fnahmen_zur_Anpassung_an_den_Klimawandel

Freiburg, den 27.04.2023



Dr. Rainer Röckle
Geschäftsleitung
Diplom-Meteorologe



Dr. Christine Ketterer
Fachlich Verantwortliche Klima
M.Sc. in Climate Sciences



Dr. Markus Hasel
Stellv. fachlich Verantwortlicher Klima
Diplom-Meteorologe



Dr. Tobias Gronemeier
Modellentwickler PALM, Sachverständiger
M.Sc. in Meteorologie

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt. Der Bericht oder Teile daraus dürfen nur für das vorliegende Projekt vervielfältigt oder weitergegeben werden.

10 Literatur

- Basu, R.** (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health* (8)1: 40.
- BMUB** (2015): Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 100S.
- Brasseur, G., D. Jacob & S. Schuck-Zöller eds.** (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Spektrum, Berlin.
- Christidis, N., G.S. Jones & P.A. Stott** (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change* (5)1: 46–50.
- Dettmar, J., N. Pfoser & S. Sieber** (2016): Gutachten Fassadenbegrünung. TU Darmstadt, 100S.
- Früh, B., P. Becker, T. Deutschländer, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau & U. Wienert** (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (50)1: 167–184.
- Fuss, S., J.G. Canadell, G.P. Peters, M. Tavoni, R.M. Andrew, P. Ciais, R.B. Jackson, C.D. Jones, F. Kraxner, N. Nakicenovic, C. Le Quéré, M.R. Raupach, A. Sharifi, P. Smith & Y. Yamagata** (2014): Betting on negative emissions. *Nature Climate Change* (4)10: 850–853.
- GEG** (2023): Gesetz zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor vom 20. Juli 2022. *Bundgesetzblatt Jahrgang 2022 Teil I Nr. 28*, ausgegeben am 28. Juli 2022.
- Grize, L., A. Huss, O. Thommen, C. Schindler & C. Braun-Fahrländer** (2005): Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly* (135)13–14: 200–205.
- Hewitt, C.D.** (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Transactions American Geophysical Union* (85)52: 566.
- iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG** (2023): Erstellung einer Klimaanalyse für den Regionalverband Heilbronn-Franken.
- IPCC ed.** (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC ed.** (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kadasch, E., M. Sühling, T. Gronemeier & S. Raasch** (2021): Mesoscale nesting interface of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* (14): 5435–5465.
- Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN (Hrsg.)** (1988): *Stadtklima und Luftreinhaltung - Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung*.
- Köppen, W.** (1936): Das geographische System der Klimate. In: W. Köppen and R. Geiger (Eds), *Handbuch der Klimatologie*. Gebrüder Bornstraeger, Berlin, S. C1–C44.

- Koßmann, M., H. Noppel & B. Früh** (2014): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse in Offenbach am Main als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 70S.
- Kunz, M., J. Sander & Ch. Kottmeier** (2009): Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climatology* (29)15: 2283–2297.
- Maronga, B., S. Banzhaf, C. Burmeister, T. Esch, R. Forkel, D. Fröhlich, V. Fuka, K.F. Gehrke, J. Geletič, S. Giersch, T. Gronemeier, G. Groß, W. Heldens, A. Hellsten, F. Hoffmann, A. Inagaki, E. Kadasch, F. Kanani-Sühring, K. Ketelsen, B.A. Khan, C. Knigge, H. Knoop, P. Krč, M. Kurppa, H. Maamari, A. Matzarakis, M. Mauder, M. Pallasch, D. Pavlik, J. Pfafferott, J. Resler, S. Rissmann, E. Russo, M. Salim, M. Schrempf, J. Schwenkel, G. Seckmeyer, S. Schubert, M. Sühring, R. von Tils, L. Vollmer, S. Ward, B. Witha, H. Wurps, J. Zeidler & S. Raasch** (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* (13)3: 1335–1372.
- Matzarakis, A. & H. Mayer** (1997): Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology* (41)1: 34–39.
- Mayer, H.** (1989): Workshop “Ideales Stadtklima” am 26. Oktober 1988 in München. *DMG Mitteilungen* 3: 52–54.
- Mayer, H., W. Beckröge & A. Matzarakis** (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-report* (5): 265–268.
- Mayer, H. & P.R. Höppe** (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* (38)1: 43–49.
- Mayer, H. & A. Matzarakis** (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet: (Forschungsvorhaben STADTLUFT) Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München (Ed).
- Moss, R.H., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J.A. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, E. Lin, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J.F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O’Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P.J. Runci, R. Stouffer, D. VanVuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J.P. van Ypersele & M. Zurek** (2008): *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins & D.A. Stainforth** (2004): Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* (430)7001: 768–772.
- Parlow, E., D. Scherer & U. Fehrenbach** (2006): Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (REKLISO): Wissenschaftlicher Abschlussbericht.
- Rädler, A.T., P. Groenemeijer, E. Faust & R. Sausen** (2018): Detecting Severe Weather Trends Using an Additive Regressive Convective Hazard Model (AR-CHaMo). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (57)3: 569–587.

- Richter, B., K. Grunewald & G. Meinel** (2016): Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators „Erreichbarkeit städtischer Grünflächen“. In: AGIT 2-2016, Journal für Angewandte Geoinformatik. Wichmann Verlag.
- Robine, J.-M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel & F.R. Herrmann** (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* (331)2: 171–178.
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger & C. Appenzeller** (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* (427)6972: 332–336.
- Schumacher, U., I. Lehmann & M. Behnisch** (2016): Modellansatz zur geotopographischen Analyse von Wohngebieten und urbaner grüner Infrastruktur. In: AGIT 2-2016, Journal für Angewandte Geoinformatik. Wichmann Verlag.
- Schwab, A. & D. Zachenbacher** (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO): Wissenschaftlicher Abschlussbericht.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1** (2015): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1:2015-09.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2** (2022): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2:2022-06.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5** (2003): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5:2003-12.
- VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10** (2010): Umweltmeteorologie - Human- biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 10:2010-03.
- van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith & S.K. Rose** (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* (109)1: 5.
- Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGREGOR, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding & F. Kimura** (2004): Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* (82)6: 1599–1628.
- Weischet, W. & W. Endlicher** (2018): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin Stuttgart.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg & Amt für Umweltschutz Stuttgart** (2012): Städtbauliche Klimafibel. URL: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>.
- Zander, K.K., W.J.W. Botzen, E. Oppermann, T. Kjellström & S.T. Garnett** (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change* (5)7: 647–651.

A1 Daten und Methodik

A1.1 Aufbereitung der Eingangsdaten für FITNAH

Die im Flächennutzungsplan und in den ATKIS-Daten vorhandene Landnutzung wurde in folgende „klimatologische Nutzungskategorien“ überführt:

Tabelle A1-1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung.

Bezeichnung	Beschreibung
Wasser	Still- und Fließgewässer
Freiland	Äcker, Wiesen, Weiden, Gärten, Grünflächen
Wald/Bäume	Nadelbäume und Nadelwald, Laubbäume und Laubwald sowie Mischwald werden unterschieden
Streuobstwiese	Streuobstwiesen, Obstplantagen und Baumschulen
Weinanbau	Weinanbauflächen
Gehölz	Buschartige Gehölzflächen von geringer Höhe
Moor, Sumpf	Moor, Sümpfe, feuchte Grünflächen
Hafenanlage/Schleuse	Hafenanlage/Schleuse
naturnahe Flächen	Teilversiegelte Flächen mit Grün-/Baumanteil, z.B. Campingplätze, Parks
versiegelte Flächen	Parkplätze, Verkehrsflächen etc.
baulich geprägte Grünfläche (< 25 % Bebauung)	Grünfläche mit weniger als 25 % Bebauung
lockere Bebauung (> 25 % Bebauung)	25 – 50 % Bebauung
mittlere Bebauung (> 50 % Bebauung)	50 – 75 % Bebauung
dichte Bebauung (> 75 % Bebauung)	75 – 85 % Bebauung
Zentrum (> 85 % Bebauung)	> 85 % Bebauung
Mischgebiete	Gebiete mit Gewerbe- und Wohnnutzungen
Gewerbe und Industrie	stark versiegelte Flächen mit Gebäuden; Wärmeemission von z.B. Kraftwerken wird berücksichtigt
Deponien, Halden, Tagebau/Bergbau	verdichtete Böden mit geringem Vegetationsbestand.

A1.2 Methodik

A1.2.1 Das prognostische Modell FITNAH

FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources) ist ein mathematisch-physikalisches Strömungsmodell. Das Modell FITNAH löst die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Strömung. Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur werden bodenspezifische Parameter (Bodenart, Feuchte usw.) durch ein implementiertes Bodenmodell berücksichtigt. Des Weiteren werden auch Turbulenzparameter, Lufttemperatur und Luftfeuchte berechnet. Das Modell simuliert abhängig vom Sonnenstand die Erwärmung bzw. die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft.

Als so genanntes „nicht-hydrostatisches, prognostisches“ Modell beruht es auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windkomponenten (Navier-Stokes-Gleichungen für die Komponenten des Windvektors im 3D-Raum, x-, y- und z-Richtung) sowie auf

den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese (miteinander gekoppelten) Gleichungen werden auf einem numerischen dreidimensionalen Gitter in kleinen Zeitschritten gelöst, so dass sich die vielfältigen nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Topographiebereichen, vergleichbar der Natur, sukzessive einstellen und der von der Natur erzielte Gleichgewichtszustand zwischen den unterschiedlichen strömungsbeeinflussenden Effekten realistisch berechnet wird.

Ein großer Vorteil des Modells FITNAH ist die Berücksichtigung der Landnutzung. Die Daten gehen, differenziert nach Bestands- bzw. Bebauungshöhen und ihren jeweiligen Flächenanteilen an jeder Rechenzelle ein.

Das Modell FITNAH ist vielfach validiert und von zahlreichen Fachbehörden als eines der leistungsfähigsten Instrumente zur Simulation meteorologischer Phänomene im Bereich der Umweltmeteorologie anerkannt.

A1.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit der Bevölkerung wird aus der Einwohnerdichte pro Hektar und dem Vorhandensein klimasensibler Nutzung (Seniorenheime) berechnet. Die Bewertung der Einwohnerdichte erfolgt relativ durch Berechnung der Perzentile bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Stadtgebiet Neckarsulm (Tabelle A1-2). Die Tabelle zeigt beispielsweise, dass 50 % der Bevölkerung auf Flächen wohnen, deren Einwohnerdichte maximal 46 Einwohner je Hektar beträgt.

Tabelle A1-2: Bewertung A1 und A2 der Empfindlichkeit auf Basis der Einwohnerdichte je Hektar und klimasensibler Nutzung.

Perzentil	Einwohner pro ha	Bewertung
≤ 50.	≤ 46	sehr geringe Empfindlichkeit
> 50. – 75.	> 46 – 79	geringe Empfindlichkeit
> 75. – 85.	> 79 – 103	mittlere Empfindlichkeit
> 85. – 95.	> 103 – 152	hohe Empfindlichkeit
> 95.	> 152	sehr hohe Empfindlichkeit
Klimasensible Nutzung		sehr hohe Empfindlichkeit

A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit

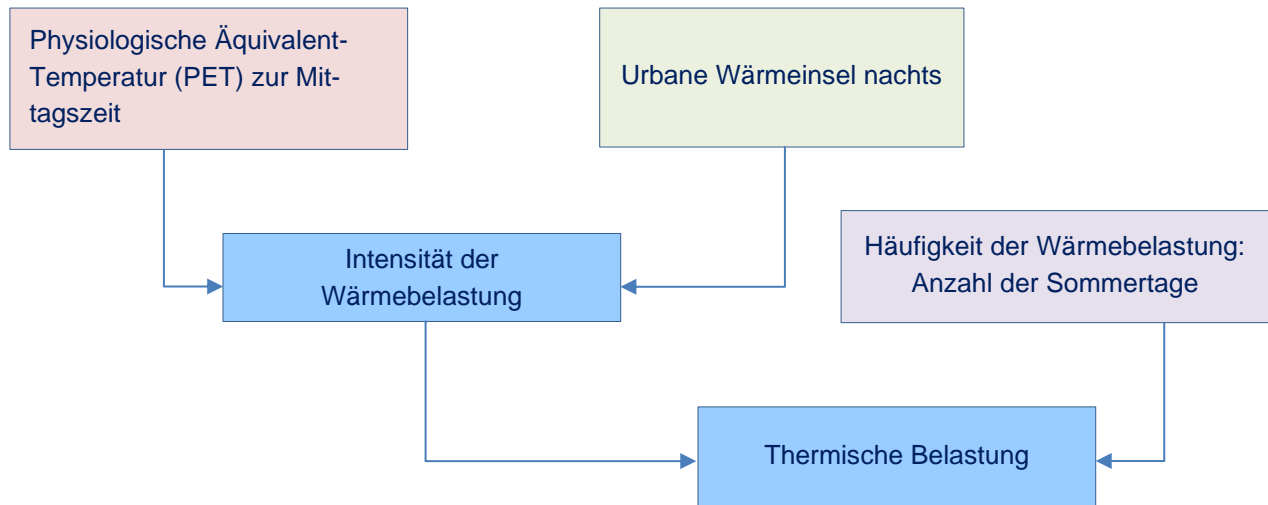


Abbildung 10-1: Ermittlung der thermischen Belastung.

Tabelle A1-3: Bewertung B1 der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis & Mayer (1997). Zur besseren Differenzierung der Hitzebelastung in der Stadt Neckarsulm wurden die letzten zwei Klassen ergänzt.

PET (°C)	Thermische Sensitivität
≤ 35,0	warm
> 35,0 – 41,0	heiß
> 41,0 – 47,0	sehr heiß
> 47,0 – 54,0	extrem
> 54,0	sehr extrem

Tabelle A1-4: Bewertung B2 der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI in °C).

Perzentile	UHI (K)	Bewertung (B2)
≤ 80.	≤ 1,4	keine bis sehr geringe Überwärmung
> 80. – 90.	> 1,4 – 1,9	geringe Überwärmung
> 90. – 95.	> 1,9 – 2,5	mäßige Überwärmung
> 95. – 99.	> 2,5 – 3,2	mittlere Überwärmung
> 99.	> 3,2	starke Überwärmung

Tabelle A1-5: Bewertung B3 der Anzahl an Sommertagen (Tage pro Jahr im Zeitraum 1971 – 2000).

Perzentile	Anzahl an Sommertagen	Bewertung (B3)
≤ 50.	≤ 52,4	unterdurchschnittliche Anzahl an Sommertagen
> 50. – 80.	> 52,4 – 56,1	überdurchschnittliche Anzahl an Sommertagen
> 80. – 90.	> 56,1 – 59,4	hohe Anzahl an Sommertagen
> 90. – 97.5	> 59,4 – 63,6	sehr hohe Anzahl an Sommertagen
> 95.	> 63,6	extreme Anzahl an Sommertagen

Tabelle A1-6: Bewertung B4 der Klimavielfalt (Erreichbarkeit von städtischen Grünflächen).

Entfernung zu Stadtgrün	Bewertung (B4)
≤ 250 m	sehr gute Klimavielfalt
> 250 m – 500 m	Klimavielfalt vorhanden
> 500 m	keine Klimavielfalt vorhanden

Die Betroffenheit der Bevölkerung kann aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit mit der thermischen Belastung ermittelt werden und ergibt sich somit aus folgenden Parametern und meteorologischen Größen:

Empfindlichkeit A

A1 – Einwohnerdichte pro Hektar (Tabelle A1-2)

A2 – klimasensible Nutzungen (Tabelle A1-2)

Bewertung thermische Belastung B

B1 – Wärmebelastung tagsüber (PET, Tabelle A1-3)

B2 – Wärmebelastung nachts (Urbane Wärmeinsel, Tabelle A1-4)

B3 – Häufigkeit der Wärmebelastung (Anzahl an Sommertagen, Tabelle A1-5)

B4 – Vorhandene Klimavielfalt (Entfernung zu öffentlichen Grünanlagen, Tabelle A1-6)

Während sich die Physiologisch Äquivalente Temperatur tagsüber – bedingt durch den großen Einfluss der solaren Strahlungsflüsse – stark von der Lufttemperatur unterscheidet, korreliert sie nachts signifikant mit der Lufttemperatur. Die nächtliche Wärmebelastung wurde anhand der Lufttemperatur in Form der urbanen Wärmeinsel bewertet.

Mitunter werden die Größen (hier beispielsweise die Belastungszahlen) standardisiert und verschnitten. Mit einer z-Standardisierung (oder auch z-Transformation) können in der Statistik Werte unterschiedlicher Maßeinheiten und Stichproben in eine gemeinsame Einheit überführt werden, um diese vergleichbar zu machen. Dazu wird die Abweichung vom Mittelwert durch die Standardabweichung dividiert. Da dieses Verfahren für schiefe Verteilungen, wie sie bei meteorologischen Größen vorliegt, zu einer Verschiebung der standardisierten Werte führen kann, wird hier auf eine andere Form der Bewertung gesetzt.

Die Bewertungszahl Z ergibt sich aus der Summe der jeweils gewichteten thermischen Bedingungen B . Diese Summe wird normiert multipliziert mit der normierten Empfindlichkeit A , die sich aus der Einwohnerdichte und ggf. den klimasensiblen Nutzungen ergibt.

$$Z = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}{\max(B_1 + B_2 + B_3 + B_4)} \cdot A$$

Die thermische Betroffenheit entspricht der Bewertungszahl Z .

A1.2.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme

Kalt- und Frischluftströmungen, die relevanten Kaltluftproduktionsgebiete und die Luftleitbahnen sind im planerischen Sinne dann von Bedeutung, wenn sie die Belüftung von Siedlungsgebieten

(Wirkräume) bewirken. Je größer die Betroffenheit in diesen Siedlungsgebieten ist, desto wichtiger ist diese ausgleichende Funktion.

In Abbildung A1-10-3 ist eine idealisierte Situation skizziert. Die Grafik zeigt unterschiedlich belastete Wirkräume (hier charakterisiert durch die Bebauungsdichte) und einen Kaltluftstrom, der die Tallage von Westen her belüftet. In dieser idealisierten Darstellung ist ersichtlich, dass der Kaltluftstrom, der auf den belasteten Siedlungsraum trifft, eine höhere Ausgleichsrelevanz besitzt, als der identische Kaltluftstrom, der nur die mäßig belasteten Siedlungsgebiete oder das Umland belüftet.

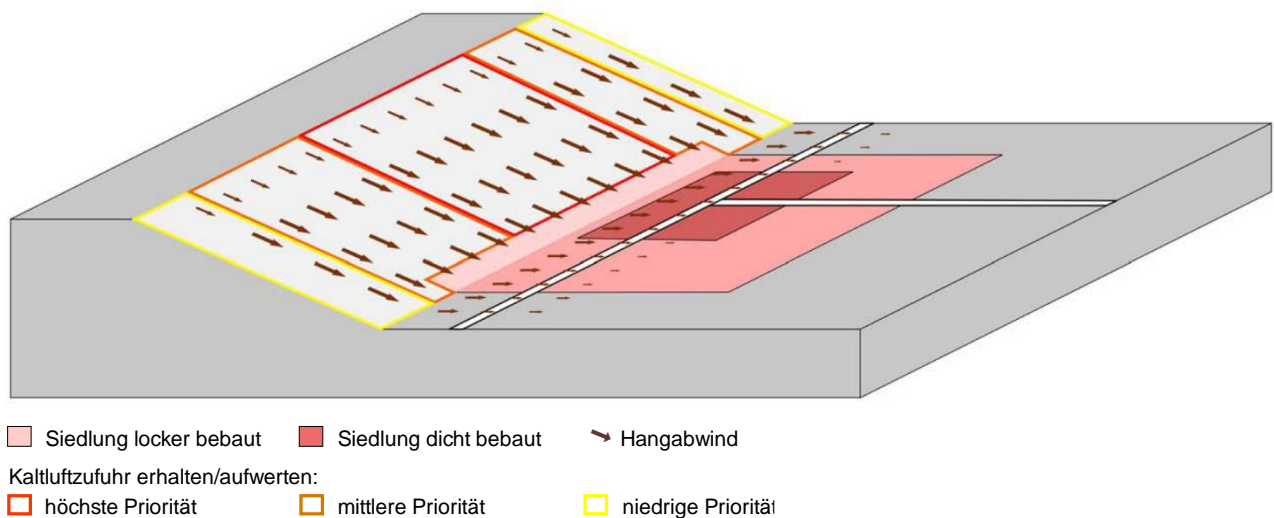


Abbildung A1-10-2: Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (Schwab & Zachenbacher (2009)).

In der Realität sind sowohl die Kaltluftabflussverhältnisse wie auch die Belastungssituation deutlich heterogener. Die Kaltluft kann aus unterschiedlichen Bereichen dem Siedlungsgebiet zuströmen, sie kann unterschiedliche Intensitäten aufweisen und unterschiedlich belastete Siedlungsbereiche treffen. Die lokal sehr differenzierten Kaltluftabflüsse werden aus den FITNAH- und PALM-4U Simulationen entnommen.

Die Bewertung der Siedlungsbereiche geschieht anhand der thermischen Betroffenheit.

Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in den Wirkräumen zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, wurde im Rahmen der Stadtklimaanalyse ein automatisierter, allgemein gültiger, objektiver Algorithmus entwickelt.

In einem ersten Schritt wird ein numerisch-physikalisches Analysemodell auf die simulierten Kaltluftabflüsse angewandt. Mit diesem Modell kann die Identifikation und Abgrenzung der komplexen Kaltluftströmungssysteme unter Berücksichtigung der Distanz zum Zielort durchgeführt werden. Mit diesem Werkzeug ist eine erste Eingrenzung der für einen Wirkungsraum zu betrachtenden Bereiche möglich.

Im zweiten Schritt werden Vorwärtstrajektorien auf Basis der Kaltluftströmungsfelder berechnet. Den Windfeldern werden mit dem Verlauf der Vorwärtstrajektorien die thermische Betroffenheit derer Flächen zugeordnet, die sie überstreichen. Mithilfe dieser Methode wird auch die Eindringtiefe in Zusammenhang mit der vorherrschenden Betroffenheit analysiert. Entlang der Trajektorie wird

die thermische Betroffenheit addiert, die die Strömung vom jeweiligen Punkt erreicht (siehe Abbildung A1-10-3).

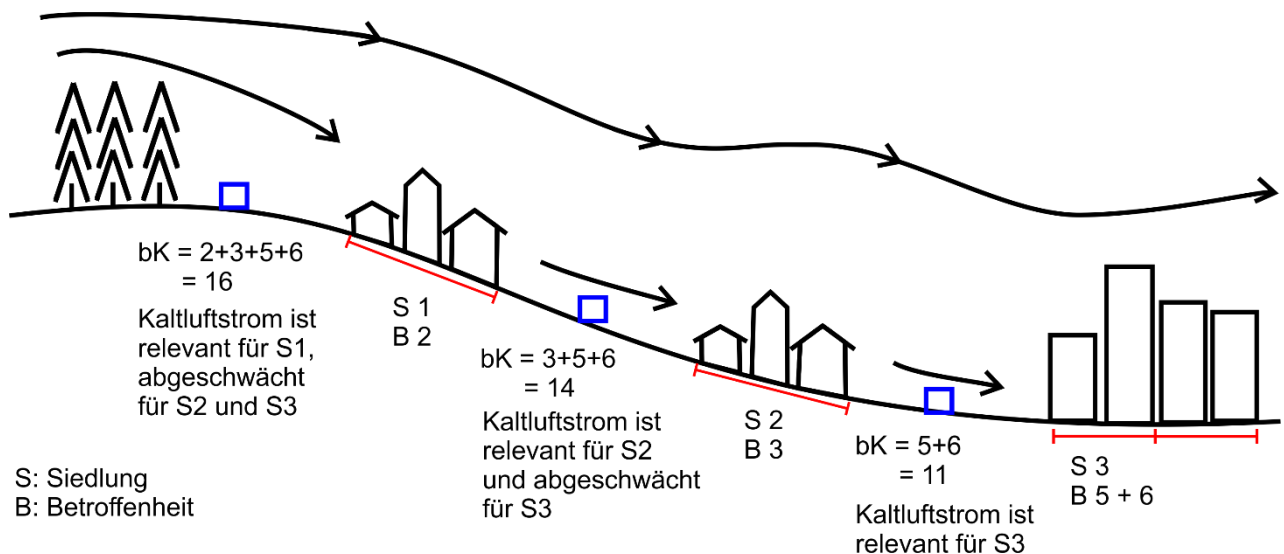


Abbildung A1-10-3: Bewertung der Kaltluftströmung (bK) durch Vorwärtstrajektorien.

Die Berechnung von Vorwärtstrajektorien zur Ermittlung der Bedeutung der Kaltluftströmung bK wird in Abbildung A1-10-3 dargestellt. Die blauen Kästchen markieren die Position eines Windpfeils, der bewertet werden soll. Die Betroffenheit der Siedlungen (S1 bis S3) wurde in der Stadtklimaanalyse Neckarsulm in 50 m x 50 m Rasterzellen ermittelt (rote Begrenzungen unterhalb der Siedlungen, z.B. Betroffenheitswert 2 in Siedlung S1). Die Bewertung richtet sich nach der möglichen Belüftungswirkung der Strömung. Eine Strömung, die mehrere oder stärker betroffene (empfindlichere) Siedlungsbereiche belüftet, erhält eine höhere Bewertungszahl. Die im oberen Hangbereich produzierte Kaltluft trägt dann zur Belüftung der nachfolgenden Siedlungsbereiche bei. Die Bewertungszahl ergibt sich als Summe der Betroffenheit der überstrichenen Siedlungen (hier $2 + 3 + 5 + 6$).

A2 Beschreibung der Klimatope

Die folgende Auflistung gibt für die einzelnen Klimatope die Kriterien an, die der Flächennutzungsanalyse zugrunde liegen; zusätzlich werden Angaben zu jeweils relevanten Immissionen gemacht. Außerdem werden Modifikationen einzelner Teilflächen angegeben, die sich aus Variationen der Nutzungen und Strukturen bzw. der lufthygienischen Situation ergeben.

Die Abbildungsbeispiele wurden Luftbildern des Daten- und Kartendienstes des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL B-W) entnommen.

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015) zur Erstellung der Klimatop- bzw. Klimaanalysekarte werden zur Differenzierung der Siedlungsflächen in Vorstadt-, Stadtrand-, Stadt- und Innenstadtklimatop Versiegelungsdaten zur Rate gezogen. Da Informationen über die Versiegelung auf einzelnen Grundstücken für die Stadt Neckarsulm nicht vorlagen, aber die Bebauung bekannt war, wurde die Bebauungsrate der Häuserblöcke berechnet und zur Klassifizierung genutzt. Um ein differenziertes Stadtbild zu erzielen und da die zur Berechnung verwendeten Wohnblöcke private Straßen und Parkplätze nicht einschlossen, wurde die Bebauungsrate niedriger angesetzt als die gegebenen Verdichtungsdaten der VDI-Richtlinie. In den vier relevanten Klimatopen ist unter dem Punkt „Bebauung“ angegeben, welche Bebauungsarten für das jeweilige Klimatop angewendet wurde.

A2.1 Gewässerklima



Wasserflächen wirken ausgleichend auf das lokale Klima. Da Gewässer nur einen geringen Tagesgang der Temperatur aufweisen, sind sie tagsüber kühler als die Umgebung und nachts eher wärmer. Die Wirksamkeit hängt von der Größe des Gewässers ab. So reicht z.B. der Einfluss von Flüssen und Seen weiter in die Nachbarschaft hinein als ein Brunnen auf einem Platz. Trotzdem kann ein Brunnen, wenn auch sehr lokal, die Aufenthaltsqualität an heißen Tagen verbessern.

Beispiel: Neckar.

A2.2 Freilandklima



In der Klimaanalysekarte mit „Freilandklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: $\leq 10 \%$

Flächennutzung: Landwirtschaftliche Nutzfläche, Weide- oder Wiesengelände, Brachen.

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: flächendeckende landwirtschaftliche Nutzung bzw. Brachen mit niedriger oder jahreszeitlich bedingt fehlender Vegetation; nur einzelne Baumpflanzungen

Lufthygiene: relativ unbelastet; Quellen: Flächenbehandlung; Luftschadstoffe: Spritzmittel, Staub

b) Anmerkungen

Die meisten Freilandflächen sind nächtliche Kaltluftproduzenten. Die Kaltluft entsteht aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung, wodurch eine starke Abkühlung der bodennahen Luftschichten erzielt wird. Je nach der Beschaffenheit des Entstehungsgebietes (Neigung, Lage, Bewuchs) bleibt die kühle Luft auf der Fläche liegen oder fließt – da sie dichter und damit spezifisch schwerer ist als warme Luft – der Schwerkraft folgend ab.

Die Bedeutung der Kaltluft in ihrer Wirkung für den Menschen muss differenziert betrachtet werden. Fließt lufthygienisch unbelastete Kaltluft in ein überwärmtes Stadtgebiet ein, so bringt sie Abkühlung und ersetzt die belastete städtische Luft; sie ist also thermisch und lufthygienisch als günstig zu beurteilen. Sammelt sich die kalte Luft in Mulden, Talauen oder Kaltluftstaubereichen, so ist sie sowohl thermisch als auch lufthygienisch für den Kaltluftstaubereich als ungünstig zu bewerten: es kommt zu erhöhter Frost- und Nebelbildung und durch die stabile Schichtung zur Anreicherung von Luftschadstoffen, sofern Emittenten im Sammelgebiet liegen.

Freiland weist eine geringe Bodenreibung auf, so dass die Windgeschwindigkeiten über diesen Flächen vergleichsweise hoch sind. Dies kann sich positiv auf die Durchlüftung angrenzender Wohngebiete auswirken. Die Flächen können sich allerdings tagsüber auch stark aufheizen und sind an heißen Tagen nicht für den längeren Aufenthalt geeignet. In den Nachtstunden kühlen sie sich hingegen gut ab und bilden in der Regel Kaltluftentstehungsflächen.

Beispiel: landwirtschaftliche Flächen westlich von Obereisesheim.

A2.3 Waldklima



In der Klimaanalysekarte mit „Waldklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Flächennutzung: überwiegend durch Laub- oder Nadelwald bestimmt (90 %).

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: überwiegend hohe, geschlossene Struktur. Das Kronendach der Bäume ist die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse

Lufthygiene: im Allgemeinen unbelastet; Filterwirkung für Stäube. Freisetzung von Pollen, Sporen

b) Anmerkungen

Das Waldklima zeichnet sich durch stark gedämpfte Tagesgänge der Lufttemperatur und Feuchte aus. Verschattung und Verdunstung sorgen tagsüber für niedrige Oberflächentemperaturen, nachts ist im Bestand die Ausstrahlung reduziert, so dass sich der Stammraum weniger abkühlt als z.B. Freiland. Zudem kommt dem Wald eine Filterwirkung für Luftschadstoffe zu.

Abhängig von der Bestandsdichte ist die Luft im Stammraum wenig mobil. Die Durchlüftung ist deshalb reduziert.

Auch die Kaltluftproduktion eines Waldes hängt von der Bestandsdichte ab. Die Hauptenergieumsatzfläche ist beim Wald nicht der Erdboden, sondern das Kronendach. Die dort durch nächtliche Ausstrahlung abgekühlten Luftmassen sinken in den Stammraum und fließen dort je nach Dichte des Waldes und insbesondere des Unterholzes mehr oder weniger gut ab.

Im Vergleich zu Freiland sind bewaldete Flächen aufgrund ihrer großen Oberfläche zwar gute Kaltluftproduzenten, der Abfluss ist aber deutlich reduziert. Waldflächen am Hang sind aufgrund ihrer Kaltluftproduktion eher positiv zu sehen, Waldflächen im Tal können dagegen als Strömungshindernis wirken.

Beispiel: Waldflächen im Osten des Stadtgebiets.

A2.4 Klima innerstädtischer Grünflächen



In der Klimaanalysekarte mit „Klima innerstädtischer Grünflächen“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: $\leq 20 \%$

Flächennutzung: Wiesenflächen und Parks

Bebauung: nur einzelne Gebäude bzw. Straßen

Vegetation: überwiegend hohe, geschlossene Struktur. Das Kronendach der Bäume ist die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse

Lufthygiene: durch städtische Emissionen belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO_2 , Feinstäube.

b) Anmerkungen

Diese Flächen sind im Allgemeinen kleiner als Freiland- oder Waldflächen, verhalten sich (abhängig von der Stärke des Bewuchses) aber ähnlich wie diese. Der wesentliche positive Effekt dieser Klimatope ist die Schaffung einer lokalen Klimavielfalt, d.h. die Schaffung öffentlich zugänglicher Freiräume mit angenehmen klimatischen Bedingungen.

Stadtklimatische Ausgleichsfunktionen sind:

- Erhöhung der Klimavielfalt,
- Kaltluftproduktion in der Nacht,
- Schattenspende durch Vegetation tagsüber,
- Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen,
- Temperatenausgleich im Sommer,
- bei geringem aerodynamischem Widerstand (also kein dichter Baumbestand) auch Wirkung als Luftleitbahn möglich.

Weitere positive Funktionen können sein:

- Rückhaltung und Versickerung von Regenwasser,
- Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten,
- Auflockerung des Stadtbildes,

- Erholungsfunktion,
- Entlastung der Erholungsgebiete im Umfeld der Stadt,
- Soziale Funktion (Kommunikation, Nachbarschaft, ...).

Die Nutzung dieser Flächen kann durch Verkehrswege (Lärm, Luftschadstoffe) oder Barrieren (Zugänglichkeit) beeinträchtigt sein. Die klimatische Wirksamkeit von Freiflächen ist im Wesentlichen von ihrer Größe, den Reliefbedingungen und der Vegetationsstruktur aber auch von der Dichte und Durchlässigkeit der Randbebauung abhängig. Intensität und Reichweite der kühlenden Wirkung von Grünflächen steigen im Allgemeinen mit zunehmender Größe an. Bei Flächengrößen unter 5 ha sind jedoch nur geringe Lufttemperaturdifferenzen zur bebauten Umgebung festzustellen, insbesondere, wenn der Bodenwassergehalt aufgrund geringer Niederschlagsmengen gering und die Verdunstung damit eingeschränkt ist.

Beispiel: Stadtpark.

A2.5 Vorstadtklima



In der Klimaanalysekarte mit „Vorstadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: $\leq 30\%$

Flächennutzung: Wohnbebauung, Garten- und Freilandnutzung.

Bebauung: Einzel- und Doppelhäuser geringer Bauhöhe (1- bis 3-geschossig). (< 30%)

Vegetation: Garten- und Freilandnutzung; Einzelbäume oder Baumgruppen, Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: gering bis mäßig belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr, Landwirtschaft. Luftschadstoffe hauptsächlich NO_2 , Feinstäube.

b) Anmerkungen

Das Vorstadtklima liegt im Übergangsbereich zwischen den Klimatopen der bebauten Flächen und den Klimatopen des Freilandes. Charakteristisch sind lockere Bauungsstrukturen mit Einzel- und Doppelhäusern von geringer Bauhöhe (ein- bis dreigeschossig) und eine Durchgrünung

mit Wiesen, Baum- und Strauchvegetation. Zusammen mit der Lage im Einflussbereich des Umlands mit der Nähe zu kalt- bzw. frischluftliefernden Bereichen herrschen günstige bioklimatische Bedingungen. Die Klimaelemente wie die Temperatur werden leicht gedämpft, die Windgeschwindigkeit ist z.B. ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Stadt.

Beispiel: Steppachweg.

A2.6 Stadtrandklima



In der Klimaanalysekarte mit „Stadtrandklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: ≤ 50 %

Flächennutzung: Wohnbebauung, teilweise mit Garten- und Freilandnutzung.

Bebauung: Einzelhäuser, Wohnblocks und Blockbebauung geringer Bauhöhe (3- bis 5-geschossig), z.T. Straßenschluchten. (30 % bis 45 %)

Vegetation: Garten- und Freilandnutzung; Einzelbäume oder Baumgruppen, Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: schwach bis mäßig belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO_2 , Feinstäube. Bei Holzfeuerungen auch Gerüche.

b) Anmerkungen

Das Klimatop ist ebenfalls dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen. Es weist bereits eine deutliche Veränderung der Klimaelemente im Vergleich zum Freiland auf. Die lockere Bebauung mit Einzelhäusern und kleineren Wohnblocks (meist nicht höher als 3 Geschosse), der mäßige Versiegelungsgrad und die gute Durchgrünung wirken jedoch einer stärkeren Überwärmung entgegen und unterstützen die bodennahe Durchlüftung.

Die schwache bis mäßige lufthygienische Belastung stammt in erster Linie vom Kfz-Verkehr und vom Hausbrand. Insgesamt besitzt das Siedlungsklima für den Menschen günstige Eigenschaften.

Beispiele: Thüringer Straße.

A2.7 Stadtklima



In der Klimaanalysekarte mit „Stadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: ≤ 70 %

Flächennutzung: Wohnbebauung, Garten- und Freilandnutzung gering.

Bebauung: Wohnbebauung, Wohnblocks und Blockbebauung ca. 2- bis 5-geschossig, z.T. stärkere Bauhöhendifferenzen, Straßenschluchten (45 % bis 55 %).

Vegetation: Einzelbäume oder Baumgruppen (vor allem im Straßenraum, z.T. in Innenhöfen), Strauchvegetation, Wiesen- und Rasenflächen.

Lufthygiene: belastet. Quellen: Hausbrand, Kfz-Verkehr. Luftschadstoffe hauptsächlich NO_2 , Feinstäube.

b) Anmerkungen

Die Eigenschaften dieses Klimatops liegen zwischen den intensiven innerstädtischen Überwärmungsbereichen und den nur geringfügig überwärmten, locker bebauten Stadtrandbereichen. Die deutlich geringere nächtliche Abkühlung im Vergleich zum Freilandklima findet ihre Ursachen in dem relativ hohen Versiegelungsgrad, den eingeschränkten Be- und Entlüftungsmöglichkeiten und der eher geringen Durchgrünung. Die Bebauung ist meist blockförmig und mehrgeschossig, die Bauhöhe variiert zum Teil stärker und es gibt bereits Straßenschluchten.

Die lufthygienische Situation in diesen Gebieten ist räumlich stark variabel. Hauptemittent ist der Kfz-Verkehr, hinzukommen im Winter Hausbrandemissionen. Insgesamt müssen dem Klimaraum lufthygienisch und klimatisch mäßig bis erheblich (in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen) belastende Eigenschaften zugeschrieben werden.

Beispiel: Rosenstraße.

A2.8 Innenstadtklima



In der Klimaanalysekarte mit „Innenstadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: > 70 %

Flächennutzung: Gewerbe mit Wohnnutzung.

Bebauung: Verwaltungs-, Geschäfts- und Wohnbebauung, drei- und mehrgeschossige Baublöcke, z.T. extreme Bauhöhendifferenzen, Straßenschluchten (> 55 %).

Vegetation: Straßenbäume und Straßenbegleitgrün.

Lufthygiene: belastet, an Hauptverkehrsstraßen stark belastet. Quellen: Kfz-Verkehr, Hausbrand. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube.

b) Anmerkungen

Das Innenstadtklima zeigt die stärksten Veränderungen der Klimaelemente gegenüber dem Freiland: stark erhöhte Temperaturen, sehr geringe nächtliche Abkühlung, geringe relative Feuchte und starke Einschränkung der Durchlüftung bei gleichzeitiger Böigkeit des Windes. Ursachen dafür sind die hochverdichtete Bebauung und der geringe Grünflächenanteil sowie die zentrale Lage innerhalb des Stadtkörpers. Die Bebauung ist überwiegend höhergeschossig (> 3 Geschosse), zum Teil treten extreme Bauhöhenunterschiede auf und es finden sich zahlreiche Straßenschluchten. Hinzu kommt eine erhöhte lufthygienische Belastung, wobei die Hauptemissionsquelle der Kfz-Verkehr ist. Das Innenstadtklima ist insgesamt als belastend für den Menschen einzustufen.

Beispiele: Marktplatz.

A2.9 Sportanlagenklima



In der Klimaanalysekarte mit „Sportanlagenklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: gering

Flächennutzung: Sportanlagen

Bebauung: vereinzelte Gebäude, z.B. Sporthallen

Vegetation: vorwiegend Einzelbäume und Rasenflächen

Lufthygiene: kaum Quellen auf dem Gebiet selbst

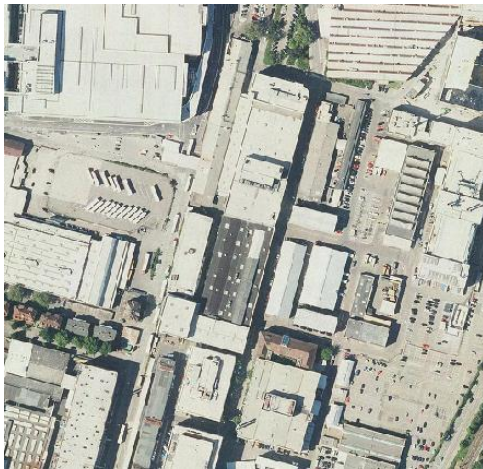
b) Anmerkungen

Freie Bereiche wie Trainingsplätze und Stadien behindern die Strömung nur wenig, bei entsprechender Lage können Sportanlagen daher zu Belüftung beitragen.

Kunstrasenflächen heizen sich deutlich stärker auf als Naturrasen, da keine Verdunstung stattfinden kann. Dadurch sind Kunstrasenflächen als versiegelte Flächen zu bewerten.

Beispiel: Sportzentrum an der Pichterichstraße.

A2.10 Gewerbeklima



In der Klimaanalysekarte mit „Gewerbeklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: unterschiedlich, im Allgemeinen > 70 %

Flächennutzung: Industrie und Gewerbe, Halden, Industrie- und Gewerbebrachen, Gleisanlagen.

Bebauung: vor allem Hallen, Verwaltungsbauten und Produktionsanlagen, größere Lagerflächen.

Vegetation: besonders in den Randbereichen (z.B. als Immissionsschutzpflanzungen) auch dichte Baum- und Heckenstrukturen, Wiesen- und Rasenflächen, Einzelbäume, z.T. auch Baum- und Strauchanpflanzungen.

Lufthygiene: Belastung stark von der Nutzung und deren Emissionen abhängig, im Allgemeinen deutliche Belastung. Luftschadstoffe hauptsächlich NO₂, Feinstäube. Je nach Produktionsprozessen auch weitere Luftschadstoffe und Gerüche.

b) Anmerkungen

Dieses Klimatop ist mit dem Innenstadtklima vergleichbar. Dichte, zum Teil hohe Bebauung und die weitgehende Versiegelung begünstigen den städtischen Wärmeineffekt. Anlagenbedingte Emissionen sowie Lieferverkehre können zudem für eine hohe Luftbelastung sorgen. In diesen Gebieten ist jedoch eine höhere Toleranz für thermische und lufthygienische Belastungen vorhanden.

Beispiel: Audi-Werk.

A2.11 Gleisanlagenklima



In der Klimaanalysekarte mit „Gleisanlagen“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: geringer Versiegelungsgrad

Flächennutzung: Geschotterte Gleisanlagen.

Bebauung: Einzelgebäude.

Vegetation: vereinzelt Strauchwerk.

Lufthygiene: Lärmemissionen.

Luftschadstoffe hauptsächlich Feinstäube und NO_2 insb. bei Dieselantrieb.

b) Anmerkungen

Größere Gleisanlagen können innerorts freiland-ähnliche Eigenschaften aufweisen, wobei sie insbesondere örtlich bedeutsame Belüftungsfunktionen (Luftleitbahn) übernehmen können. Der Schotterbelag führt zu thermisch extremen Verhältnissen und weist eine extreme Trockenheit auf. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiele: Bahnhof Neckarsulm.

A2.12 Verkehrsflächenklima



a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: hoher Versiegelungsgrad

Flächennutzung: Asphaltierte / betonierte Straßen.

Bebauung: keine

Vegetation: keine

Lufthygiene: Luftschadstoffe und Lärmemissionen durch den Verkehr

b) Anmerkungen

Größere Verkehrsflächen können innerorts freiland-ähnliche Eigenschaften aufweisen, wobei sie insbesondere örtlich bedeutsame Belüftungsfunktionen (Luftleitbahn) übernehmen können. Der Belag führt zu thermisch extremen Verhältnissen und weist eine extreme Trockenheit auf. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiele: Autobahn 6.

A2.13 Lokale Luftleitbahnen

Hier handelt es sich um kleinräumige Strukturen, die den Luftaustausch innerhalb der Stadt begünstigen. Voraussetzungen sind geringe Bodenrauigkeit, ausreichende Länge und Breite sowie ein möglichst geradliniger Verlauf der Strömungsbahnen. Als Faustregel für die Breite der Luftleitbahn wird im Handbuch „Stadtklima und Luftreinhaltung“ (Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN (Hrsg.) (1988)) eine Mindestbreite von der 10-fachen Höhe der Randbebauung genannt. Andere Quellen fordern eine Mindestbreite von 50 m und eine Mindestlänge in einer Richtung von 1000 m (Mayer, Beckröge & Matzarakis (1994)). Wichtige Merkmale sind außerdem ihre Ausrichtung durch vorhandene Strukturen und der Zusammenhang mit der Windrichtungsverteilung. Als Beispiele wären Grünflächen mit niedrigem Bewuchs, Wasserflächen, mehrgleisige Bahnanlagen und größere Straßenzüge zu nennen.

Die Kanalisierung der Luftströmungen ist in starkem Maße von den jeweiligen Strömungsrichtungen der Wetterlagen abhängig. Während windschwacher Hochdruckwetterlagen dienen die Luftleitbahnen als potenzielle Einströmschneisen für Flurwinde. Die Luftgüte wird dabei nicht unterschieden, d.h. die transportierten Luftmassen können sowohl belastet (z.B. bei Straßen) als auch unbelastet sein (z.B. bei Grünanlagen).