

Auftraggeber: Stadtverwaltung Radolfzell
Marktplatz 2
78315 Radolfzell am Bodensee

Stadtklimaanalyse für die Stadt Radolfzell



Projekt-Nr.: 19-07-12-FR
Umfang: 96 Seiten
Datum: 05.10.2021

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

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

Tel.:
Fax:
E-Mail:



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	10
1.1	Gunstfaktoren	11
1.2	Belastungen	11
2	Einführung und Aufgabenstellung	12
3	Bestandsbeschreibung	15
3.1	Örtliche Verhältnisse	15
3.2	Klimatische Einordnung der Stadt Radolfzell	18
3.3	Strömungsverhältnisse	21
4	Auswirkungen des Klimawandels	25
4.1	Klimamodellierung	25
4.2	Lufttemperatur	27
4.3	Niederschlag	28
4.4	Klimatologische Kenntage	30
4.4.1	Heiße Tage, Sommertage und tropische Nächte	30
4.4.2	Frosttage	31
4.4.3	Hageltage	31
5	Auswirkungen des Klimawandels	35
6	Vorgehensweise	36
7	Datengrundlage und Methoden	38
7.1	Daten	38
7.1.1	Topographie	38
7.1.2	Nutzungsstruktur	38
7.1.3	Messdaten und Klimadaten	40
7.2	Methoden	40
7.2.1	Mesoskalige Simulation mit FITNAH	40
7.2.2	Mikroskalige Simulation mit PALM-4U	41
7.2.3	Human-Biometeorologie	42
8	Ergebnisse der Simulationen	44
8.1	Kaltluftströmung	44
8.1.1	Entstehung von Kaltluftabflüssen	44
8.1.2	Zeitlicher Verlauf von Kaltluftabflüssen	45
8.1.3	Häufigkeit von Kaltluftabflüssen	45
8.1.4	Land-/Seewind	45
8.1.5	Eindringtiefe	46
8.1.6	Ergebnisse der Modellierung	46
8.2	Thermische und Human-biometeorologische Verhältnisse	51
8.2.1	Lufttemperatur	51
8.2.2	Human-biometeorologische Verhältnisse	53
8.2.3	Urbane Wärmeinsel	56
8.3	Stadtgrün und Klimavielfalt	57
8.4	Sensitivität	61

8.5 Betroffenheit	63
9 Klimafunktionskarte	66
10 Planungshinweiskarte	67
11 Handlungsstrategien für die Stadtplanung	70
11.1 Maßnahmen zur Verbesserung und Erhaltung der Durchlüftung	70
11.2 Maßnahmen zur Reduktion der thermischen Belastung.....	71
12 Literatur	74
A1 Daten und Methodik	76
A1.1 Aufbereitung der Eingangsdaten für FITNAH.....	76
A1.2 Methodik.....	76
A1.2.1 Das prognostische Modell FITNAH	76
A1.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit.....	77
A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit.....	77
A1.2.4 Identifikation der belüftungsrelevanten Strömungssysteme	79
A2 Beschreibung der Klimatope	82

Glossar

Advektion	Horizontales Heranführen von Luftmassen.														
Aerotop	Aerotope bezeichnen räumliche Einheiten mit gleichartigen lufthygienischen Verhältnissen														
Atmosphärische Gegenstrahlung	Der Anteil der langwelligen Strahlung, der aus der Atmosphäre in Richtung der Erde gerichtet ist.														
Ausbreitungsklassen	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), welche die Ausprägung lokalklimatischer Besonderheiten im Mikro- und Mesoklima erlauben.														
Belastungsraum	→ Wirkungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet ist														
Bergwind	Talabwind nach VDI 3787 Blatt 1, 1997:39. 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.														
Bowen-Verhältnis	Verhältnis zwischen fühlbarer und latenter Wärme. Das Bowen-Verhältnis kann im innerstädtischen Bereich den Wert 2:1 annehmen, während es im Umland 1:2 beträgt (Häckel 2005).														
Eistage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur < 0 °C beträgt, 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.
Globalstrahlung	Summe der direkten und der diffusen Sonnenstrahlung, welche auf eine horizontale Fläche auf der Erde trifft.
Gunstraum	Ein Gunstraum ist ein Gebiet, das thermisch und lufthygienisch vergleichsweise unbelastet ist.
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.
Kaltluftbahn	→ Leitbahn der Luft, entlang welcher Luftmassen mit geringerer bzw. ohne Wärmebelastung relativ zur Luftmasse innerhalb der → urban canopy layer in die Stadt hineintransportiert werden. Die lufthygienische Qualität der hertransportierten Luft wird nicht berücksichtigt.
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 (Bibliographisches Institut Berlin ed. (1986)).
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter → Kaltluft. Dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt um die Kaltluft fließen zu lassen. Dies tritt insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen und Tallagen 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 3787 Blatt 5, 2003:22)
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 Angabe der Stärke der Kaltluftbildung erfolgt über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche. Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch eine Kälteproduktionsrate (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Watt pro Quadratmeter.
Klimatop	Fläche mit einer einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaft werden in der Landschaftsökologie sowie in der Stadtklimatologie als Klimatop bezeichnet (VDI 3787 Blatt 1).

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 dichter, hoher Vegetation (z.B. Wald).
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.
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich subregional bis lokal innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischert & Endlicher 2008).
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.
Planetare Grenzschicht	Als planetarische Grenzschicht wird die Schicht bezeichnet, die vom Erdboden bis zu einer Obergrenze von ca. 500 - 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 planetarischen Grenzschicht findet ein Großteil des turbulenten vertikalen Austauschs von Wärme (Energie) und Wasserdampf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre statt.
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	Physiological Equivalent Temperature. 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.
Sensibler Wärmefluss	Umsetzung der Einstrahlung in einen fühlbaren thermischen Wärmefluss, welcher sich in einer Änderung der Lufttemperatur äußert.

Sommertage	Klimatologische Kenngröße: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen das Maximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ °C}$ beträgt.
Strahlungsantrieb	Maß für die Energiebilanz der Erde durch die von außen einwirkende Sonnenstrahlung.
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.
Strahlungstemperatur	Die mittlere Strahlungstemperatur ist die Temperatur der auf den Wärmehaushalt des Menschen (bzw. den Messpunkt) einwirkenden Wärmestrahlung aller Umschließungsflächen in Abhängigkeit von deren Emissionsvermögen.
SRTM-Daten	Digitales Geländemodell, welches bei der STS-099 Shuttle Radar Topography Mission im Februar 2000 aufgezeichnet wurde.
Strömungssystem	Stabil ausgebildete Kaltluftabflüsse und Flurwinde in der zweiten Nachthälfte.
Synthetische Winddaten	Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken, welche auf Basis von Reanalyse-Daten mit einem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell berechnet wurden. Die Daten beziehen sich meist auf eine Anemometerhöhe von 10 m über Grund.
Urban boundary layer	Bezeichnung für den Teil der bodennahen Luftschicht, der durch städtisch bebaute Gebiete beeinflusst wird.
Urban canopy layer	Luftschicht zwischen dem Boden und der mittleren Höhe der Gebäude und Bäume, in welcher mikroskalige Prozesse, wie Mehrfachreflexion oder Turbulenz, dominieren.
Urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während \rightarrow autochthonen Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländl. Umgebung.
Ventilationsbahn	Luftleitbahn mit unterschiedlichem thermischem und lufthygienischem Niveau auf der bei Schwachwindlagen lufthygienisch belastete oder unbelastete Luftmassen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in die Stadt transportiert werden. Die Belastung der Luft durch erhöhte Temperatur oder Schadgase spielt hier keine Rolle. Die Funktion wird ausschließlich durch den geringen Strömungswiderstand erfüllt (Mayer & Matzarakis 1992).
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte ist ein Maß für die Menge der abfließenden \rightarrow Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit.
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.
Warme Hangzone	Geländebereich an Hängen, der sich zwischen kalter Hochfläche und Talsohle befindet und oberhalb eines ausstrahlungsbedingten

	Kaltluftsammlgebiets (in Mulden, Becken, Tälern) liegt. Die warme Hangzone ist bioklimatisch begünstigt.
Wirkungsraum	Raum, in den Kaltluft oder Frischluft eindringt. Ist der Wirkungsraum bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet wird er auch als → Belastungsraum oder belasteter Wirkungsraum bezeichnet.

1 Zusammenfassung

Die Stadt Radolfzell beabsichtigt die Erstellung einer Stadtklimaanalyse in Verbindung mit einem Konzept für die Grünraumplanung innerhalb der Stadt. Das Ziel der Stadtklimaanalyse ist die Herausarbeitung der stadtklimatischen Bedingungen in Radolfzell und der Teilorte sowie die Identifizierung der für das Stadtklima relevanten Grünflächen.

Die Stadt Radolfzell liegt in einer der wärmeren Regionen Deutschlands. Im Rahmen des Klimawandels werden Tage mit Hitzestress weiter zunehmen. Deshalb ist es zum einen wichtig, die lokalen Belastungsschwerpunkte zu kennen, zum anderen aber auch die Bereiche zu schützen, die für eine Entlastung sorgen.

Die Stadtklimaanalyse Radolfzell analysiert die räumlichen Wirkungszusammenhänge zwischen den thermisch belasteten Räumen (Wirkungsraum) und den ihnen zugeordneten Ausgleichsräumen. Dabei wird eine wolkenarme und windschwache Wetterlage betrachtet, bei der sich die lokal-typischen klimatischen Eigenheiten am stärksten ausprägen.

Für planerische Fragestellungen im Rahmen der Flächennutzungsplanung bis hin zur Ergreifung von Klimaanpassungsmaßnahmen ist die Kenntnis der räumlichen Struktur und Intensität sowohl der Belastungen wie auch der Entlastungen erforderlich. Um diese zu bewerten, wird die Betroffenheit der Bevölkerung herangezogen. Diese ergibt sich aus der Intensität der Belastung bzw. Entlastung und der Empfindlichkeit auf der betrachteten Fläche. Die Empfindlichkeit wird über die Bevölkerungsdichte und die klimasensiblen Nutzungen, wie Krankenhäuser, Pflegeheime oder Kindertagesstätten ermittelt.

Die Belastungssituation der Wirkungsräume setzt sich aus der thermischen und der lufthygienischen Belastung zusammen. Da zukünftig die Luftbelastung weiter rückläufig ist, liegt der Schwerpunkt auf der thermischen Belastung. Diese wird für die Tag- und die Nachtsituation untersucht. Zur Quantifizierung der Wirkung der thermischen Bedingungen auf den Menschen werden human-biometeorologische Methoden herangezogen.

Entlastende Momente stellen insbesondere Kaltluftabflüsse dar, die sich durch die örtlichen Gegebenheiten des Geländes und der verschiedenen Nutzungen ausprägen. In Radolfzell werden diese Kaltluftströmungen durch das Land-/Seewind-System unterstützt, das in den Nachtstunden einen Landabwind bewirkt. Die resultierenden Strömungen transportieren Frischluft heran, welche die tagsüber entstandenen thermischen Belastungen verringern.

Um diese landschaftsklimatischen Vorgänge wie auch die Aspekte des Stadtklimas für den Flächennutzungsplan zu erfassen und aufzuarbeiten, wurden mittels umfangreicher Modellsimulationen die Gunstfaktoren und die thermischen Belastungen ermittelt.

Auf der Basis dieser Informationen werden eine Klimafunktionskarte und eine Planungshinweiskarte erarbeitet, welche die Kaltluftentstehungsgebiete identifizieren und bewerten.

Die flächendeckenden Klimainformationen des vorliegenden Gutachtens stellen für die Stadt Radolfzell eine wesentliche Planungsgrundlage dar, um die Auswirkungen aktueller und künftiger Änderungen der Flächennutzung auf das lokale Klima abwägen zu können.

1.1 Gunstfaktoren

Die nächtliche Belüftung bei austauscharmen wolkenarmen Wetterlagen, sogenannten autochthonen Wetterlagen, erfolgt im Raum Radolfzell durch Kaltluftabflüsse aus den südlichen Rändern der Schwäbischen Alb, sowie den Kaltluftabflüssen an den Hängen des Bodanrückhügellands und der Bodanrück-Homburg-Höhen. Überlagert werden diese Strömungen durch das am Bodensee auftretende Land-/Seewind-System.

Die große vertikale Mächtigkeit dieser Strömungen sorgt dafür, dass im Überdach-Niveau das Stadtgebiet von Böhringen bis Mettnau mit Kalt- und Frischluft versorgt wird.

Weitere Siedlungsbereiche werden überwiegend durch lokale Hangabwinde während der Abend- und Nachtstunden belüftet. Die hindernisarmen landwirtschaftlichen Flächen zwischen Böhringen, Reute und der Kernstadt sorgen für eine gute Ausprägung der Strömungen.

Größere Park- und Grünflächen, aber auch Waldgebiete stellen für die Bevölkerung wichtige Freizeit- und Naherholungsbereiche dar. Im Stadtgebiet Radolfzells sind diese Flächen überwiegend gut erreichbar. Einschränkungen gibt es durch die Barrierewirkung der Bahnlinie die den Zugang zum Seeufer erschwert.

Darüber hinaus dienen innerstädtische Grünflächen 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 elementare Aspekte.

1.2 Belastungen

Die thermische Belastung ist durch die Lage in Deutschland und speziell in der Bodenseeregion geprägt. Neben der durch die großräumige Lage vorgegebenen Grundbelastung steigern verdichtete Siedlungsräume mit einem erhöhten Anteil versiegelter Flächen und reduzierter Durchlüftung die Wärmebelastung. Sichtbar wird dies z.B. an der urbanen Wärmeinsel, welche die Überwärmung des Siedlungsbereiches gegenüber dem Umland beschreibt. Sie ist in der Innenstadt, und in vereinzelten Bereichen der Kernstadt, insbesondere in den Gewerbegebieten deutlich ausgeprägt. Die zentralen Bereiche der kleineren Ortschaften weisen ebenfalls eine Überwärmung auf, insbesondere Böhringen.

Die Bewertung dieser thermischen Belastung für die Bevölkerung erfolgte auf der Basis der Betroffenheit, d.h. abhängig von der Einwohnerdichte und dem Vorhandensein klimasensibler Nutzungen, wie Pflegeheime, Krankenhäuser oder Kindertagesstätten. Hohe bis sehr hohe thermische Betroffenheit in Siedlungsgebieten findet man in weiten Teilen der Innenstadt Radolfzells und in den zentralen Bereichen der meisten Stadtteile. Die Stadtrandbereiche sind durch die geringere Bebauungsdichte, den höheren Grünanteil und die gute Durchlüftung in der Regel deutlich weniger betroffen.

Dies unterstreicht die Bedeutung der Gunstfaktoren für die Aufenthaltsqualität in den Wohnquartieren, die bei einer mit dem Klimawandel einhergehenden zunehmenden Erwärmung noch relevanter wird.

2 Einführung und Aufgabenstellung

Die Stadt Radolfzell beabsichtigt die Erstellung einer Stadtklimaanalyse in Verbindung mit einem Konzept für die Grünraumplanung innerhalb der Stadt. Hiermit sind die folgenden Fragestellungen für alle innerstädtischen (öffentliche und private) Flächen zu beantworten:

- Welche stadtklimatischen Bedingungen herrschen in Radolfzell und den Teilorten vor?
- Wo liegen stadtklimatische Belastungsräume?
- Wo müssen zukünftige Entlastungsräume infolge der Klimaanpassung geplant werden?
- Wo liegen unter Berücksichtigung öffentlicher und privater Flächen für das Stadtklima relevante Grünflächen?
- Welche stadtplanerischen Maßnahmen sind hinsichtlich eines Klimaanpassungskonzeptes für bestehende Grünflächen zu empfehlen?
- Welche Handlungsstrategien sind aus stadtklimatischer Sicht für die Konversion bzw. Überplanung von Flächen zu berücksichtigen?

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

Modelliert wurden die stadtkreisweiten Kaltluft-Strömungen, die thermischen Bedingungen und das Human-Bioklima sowie die verkehrsbedingten Immissionen. Daraus ergibt sich die Datengrundlage für Klimafunktions- 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.

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 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. Die Betroffenheit wird auf Grundlage der Bevölkerungsdichte analysiert.

Die Stadt Radolfzell liegt in einer der wärmeren Regionen Deutschlands¹. Zur Charakterisierung der Wärmebelastung kann die Zahl der Sommertage, d.h. Tage mit Tageshöchsttemperatur $\geq 25\text{ °C}$ herangezogen werden. Exemplarisch sind in Abbildung 2-1 die langjährigen Mittel² 1961 – 1990 und 1981 – 2010 der Sommertage in Baden-Württemberg dargestellt. Im am westlichen Bodenseeufer gelegenen Radolfzell traten maximal 40 (1961-1990) bzw. 48 (1981-2010) Sommertagen pro Jahr auf.

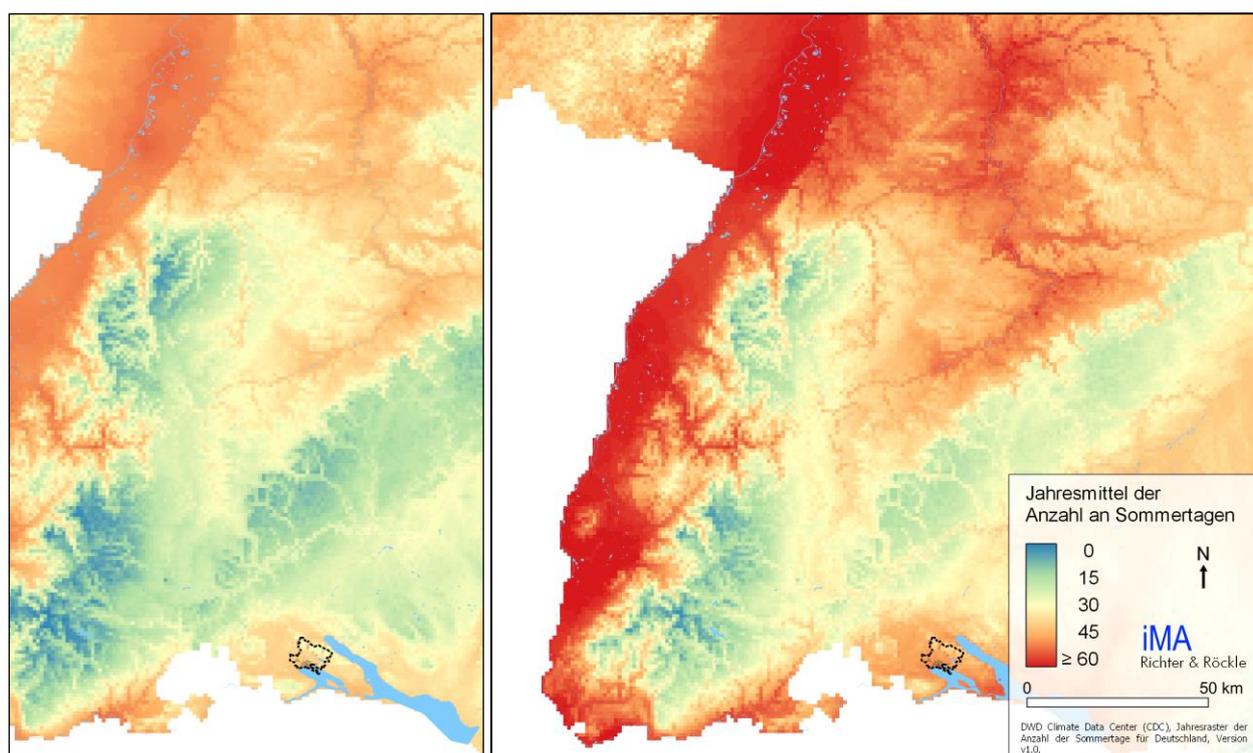


Abbildung 2-1: Langjähriges Mittel der Anzahl an Sommertagen. Klimazeitraum 1961-1990 (links) 1981-2010 (rechts). (Quelle: DWD Climate Center (CDC) 2020, Jahresraster der Anzahl an Heißen Tage für Deutschland, Version v1.0).

Das Stadtgebiet Radolfzell erstreckt sich vom Bodensee mit dem tiefsten Punkt von ca. 395 m ü. NHN und 681 m ü. NHN im Ortsteil Liggeringen. Der Stadtkern von Radolfzell liegt am nördlichen Ufer des Untersees.

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 et al. 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

¹ Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html, Stand Januar 2019)

² Die Weltorganisation für Meteorologie hat diese auf 30-jährige Zeiträume festgelegt.

mit niedrigerem 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 durchgrüntem 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 Situation, erforderlich.

3 Bestandsbeschreibung

3.1 Örtliche Verhältnisse

Die große Kreisstadt Radolfzell ist Kurort und sowohl die drittgrößte Stadt am Bodensee als auch die drittgrößte Stadt im Landkreis Konstanz. Sie erstreckt sich vom nordwestlichen Ufer des Untersees, einem Teilsee des Bodensees, etwa 20 km nordwestlich von Konstanz und zehn km östlich von Singen (Hohentwiel). Das Stadtgebiet liegt zwischen 395 m ü. NHN (Bodensee) und 681 m ü. NHN (Hohrütte, Ortsteil Liggeringen). Im östlichen Stadtgebiet befindet sich auf der Gemarkung Möggingen der etwa 2 km lange und 600 m breite Mindelsee. Auf dem 58,57 km² großen Stadtgebiet leben 31.496 Einwohner³.

Der Landschaftsraum gliedert sich in das Bodanrückhügelland, mit dem Stadtteil Möggingen und dem Mindelsee im Osten des Stadtgebietes, der großen Hegauniederung (Singener Niederung) mit dem Stadtteil Böhringen im Westen und Hohen Bodanrück-Homburg-Höhen mit der Stahinger Senke und den Stadtteilen Liggeringen, Güttingen und Stahringen im nördlichen Stadtgebiet.

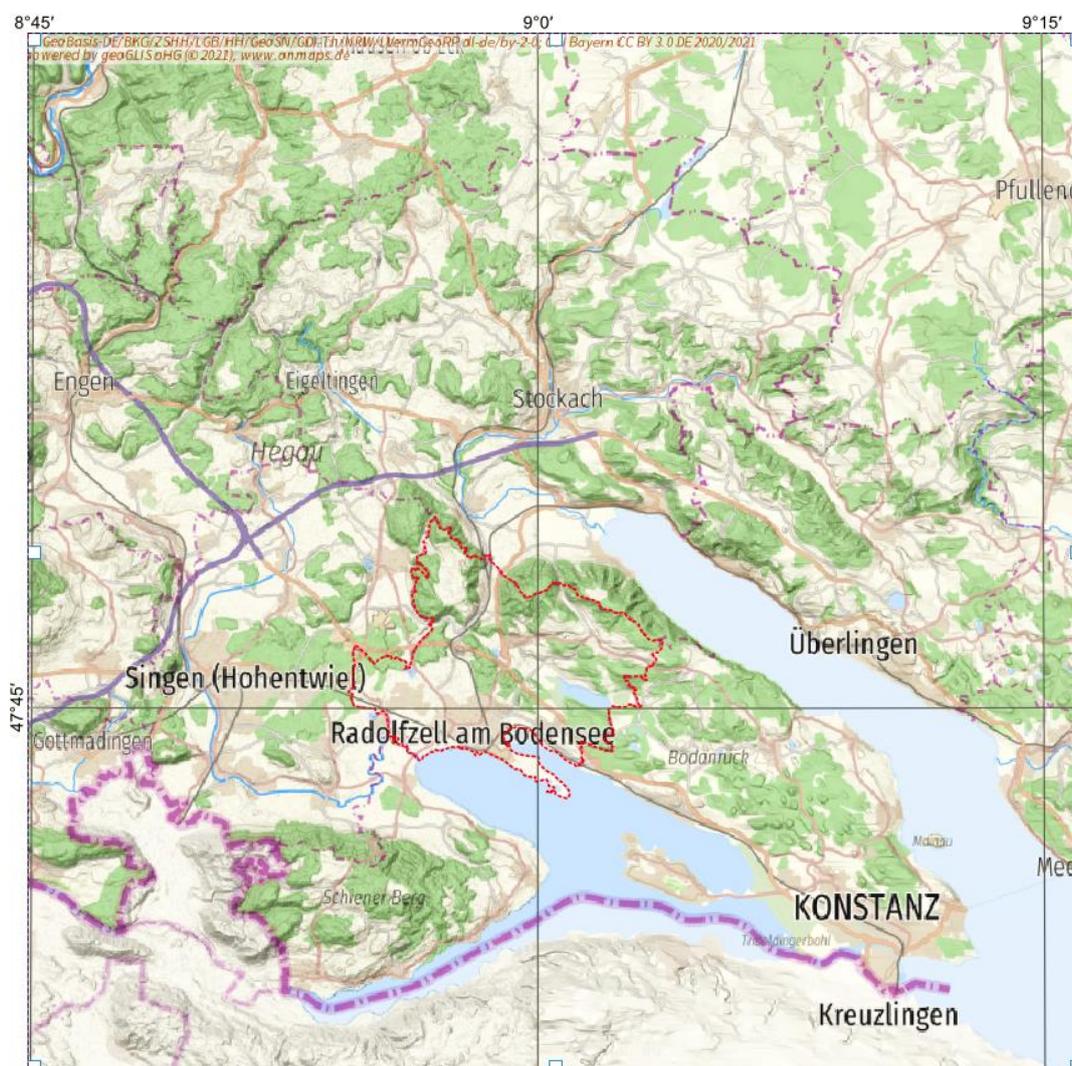


Abbildung 3-1: Räumliche Einordnung des Untersuchungsgebiets (Radolfzell, rot umrahmt) und der weiteren Umgebung (Kartengrundlage: onmaps.de © GeoBasis-DE/BKG/ZSHH 2020).

³ <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Bevoelkerung/01515020.tab?R=GS335063>, Einsicht am 19.04.2021

Im Bodanrückhügelland wird die Landschaft von Drumlins, den Toteislöchern der drei Buchenseen südwestlich von Güttingen und dem Mindelsee geprägt. An der östlichen Grenze der Gemarkung zwischen Markelfingen und Allensbach reichen die zusammenhängenden Waldgebiete (überwiegend Buchenbestände) des Bodanrücks bis in Ufernähe des Gnadensees. Ansonsten besteht die Vegetation aus Streuobstwiesen, Wiesen und Weiden, welche mit Hecken umgeben sind.

Die Singener Niederung wurde durch den Vorstoß des Radolfzeller Rheingletscherzweiges geformt, welcher eine fluvial überprägte, moorreiche Moränenlandschaft, hinterlassen hat.

Die Hohen Bodanrück-Homburg-Höhen bestehen aus Molasse⁴ und bilden einen bis zu 694 m hohen, stark bewaldeten Höhenrücken.

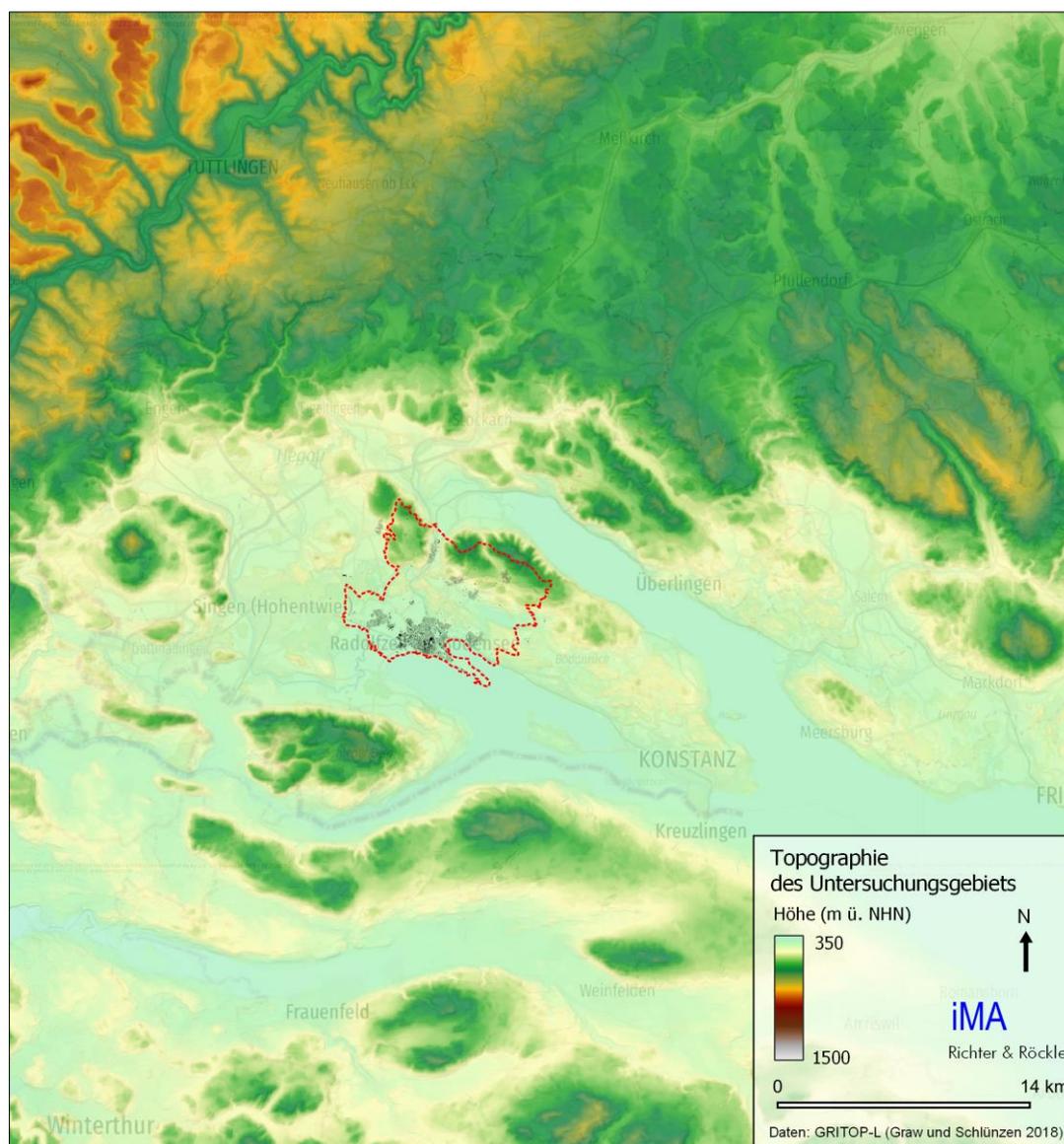


Abbildung 3-2: Topographie des Untersuchungsgebiets (Radolfzell, rot umrahmt).

⁴mächtige Abfolge klastischer Sedimente (vor allem Ton-, Mergel- und Sandsteine, Konglomerate), die als Abtragungsschutt eines sich heraushebenden Gebirges in dessen Vorlandbecken unter flachmarinen, fluviatilen oder teils terrestrischen Bedingungen abgelagert werden. Der Name stammt aus der Schweiz und geht auf das franz. Wort „meule“ für weiche Sandsteine zurück, die zu Mühlrädern verarbeitet wurden (<https://lgrwissen.lgrb-bw.de/geologie/schichtenfolge/tertiaer/molasse>).

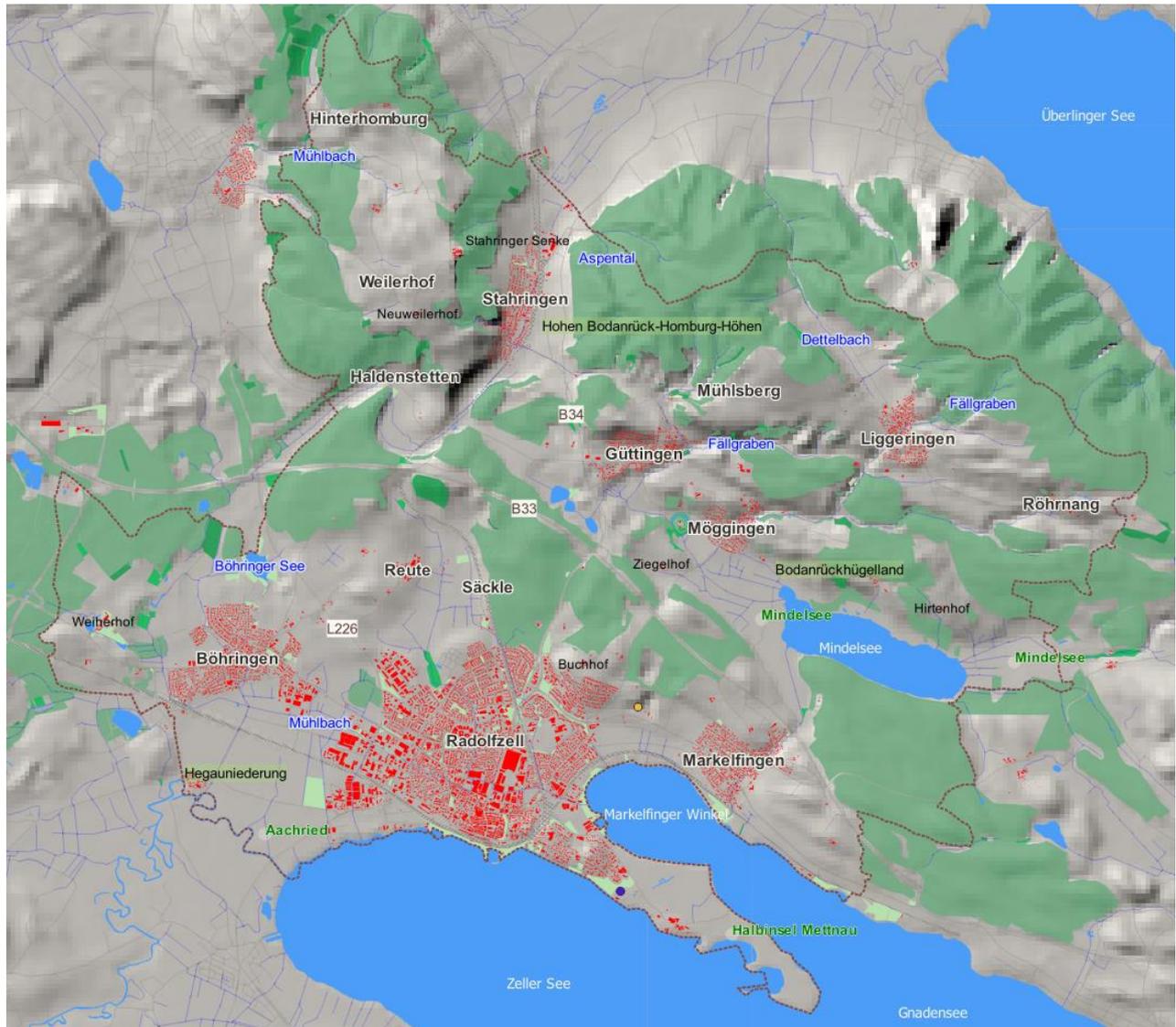


Abbildung 3-3: Stadtteile von Radolfzell, Gewässer und Waldgebiete.

3.2 Klimatische Einordnung der Stadt Radolfzell

Global gesehen lässt sich Radolfzell dem Klima der gemäßigten Breiten zuordnen, das ganzjährig Niederschläge und milde Temperaturen zur Folge hat. Die Lage am Rande der Oberrheinischen Tiefebene bedingt jedoch eher trockene Sommer mit konvektiven Niederschlägen, welche durch den starken Höhengradienten gefördert werden.

Das Klima eines Ortes wird durch die Angabe statistischer Kennzahlen der Klimaelemente beschrieben, welche üblicherweise über einen 30-jährigen Zeitraum (die sog. „Klimanormalperiode“) erfasst werden. Für eine klimatisch feinere Einordnung werden Indikatoren gewählt, wie sie in Tabelle 3-1 für die Klimanormalperiode 1961 – 1990 aufgeführt sind. Generell spielen die Höhenlage, die geografische Lage und lokale Nutzungsstrukturen eine große Rolle für die thermischen Indikatoren.

Die erhobenen Daten beruhen auf Stationsmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die nächstgelegene Messstation des DWD liegt in Konstanz auf 443 m ü. NHN. Die Daten von Konstanz können in erster Näherung auch für Radolfzell als repräsentativ angesehen werden.

In Tabelle 3-1 sind zudem die Indikatoren und klimatologischen Kenntage für die drei Klimanormalperioden 1961 - 1990, 1971 - 2000 und 1981 - 2010 für Konstanz und ausgewählte Orte in Deutschland dargestellt.

Tabelle 3-1: Indikatoren für Konstanz und ausgewählte Orte in Deutschland in den Jahren 1961 – 1990, 1971 – 2000 und 1981 – 2010. Datengrundlage: Messdaten des DWDs 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)	Frosttage (d)	Eistage (d)	Sommertage (d)	Heiße Tage (d)	Niederschlag (mm)	Lufttemperatur (°C)	Sonnenscheindauer (h)
1961 – 1990								
Konstanz	443					849	9,2	1.640
Feldberg	1.490	163	85	0	0	1.909	3,3	1.641
Frankfurt/Main	100	82	17	42	9	658	9,7	1.586
Freiburg	236	61	16	49	10	908	–	–
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	77	21	20	3	770	8,6	1.557
1971 – 2000								
Konstanz	443	70	19	46	7	852	9,5	1.643
Feldberg	1.490	157	78	0	0	1.753	3,6	1.643
Frankfurt/Main	100	72	13	46	11	621	10,2	1.614
Freiburg	236	51	12	54	13	930	11,1	1.748
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	70	16	23	4	–	9,0	1.585
1981 – 2010								
Konstanz	443	72	19	53	11	845	9,8	1.703
Feldberg	1.490	151	75	1	0	1.637	3,9	1.661
Frankfurt/Main	100	70	13	52	13	629	10,5	1.662
Freiburg	236	57	12	60	15	934	11,4	1.768
Hamburg-Fuhlsbüttel	11	70	16	27	5	793	9,4	1.580

An der Messstation Konstanz wurden 19 Eistage* und 70 Frosttage* im Bezugszeitraum (1971 – 2000) beobachtet. Einer Kältebelastung kann man durch geeignete Kleidung oder den Aufenthalt in beheizten Gebäuden ausweichen. Eine Anpassung bei Wärmebelastung ist jedoch nur bedingt möglich. Mit 46 Sommertagen* und 7 Heißen Tagen* in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 liegt Konstanz im mittleren Bereich der Wärmebelastung der aufgeführten Städte. Es ist weniger wärmebelastet als beispielsweise Freiburg mit 54 Sommertagen und 11 Heißen Tagen. Geringere Wärmebelastungen finden sich im Norden Deutschlands (z.B. Hamburg mit 23 Sommertagen und 4 Heißen Tagen) oder in den Höhenlagen des Schwarzwaldes (z.B. Feldberg ohne Sommertage und Heißen Tage).

In Radolfzell liegt die Sonnenscheindauer bei 1703 Stunden im Jahr (Bezugszeitraum 1981 – 2010). Die Sonnenscheindauer liegt damit niedriger als in Freiburg (1.768 h/a), aber höher als auf dem Feldberg (1.661 h/a).

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 849 mm/a in Konstanz im Zeitraum 1961 – 1990 liegt etwas über dem deutschlandweiten Mittelwert von 789 mm (Zeitraum 1961 – 1990). Der Jahresniederschlag blieb in Konstanz relativ konstant (Tabelle 3-1).

Zwischen 1961 – 1990 und 1981 – 2010 stieg die Jahresmitteltemperatur in Konstanz von 9,2 °C auf 9,8 °C und somit um 0,6 K an. Dementsprechend erhöhten sich im Zeitraum 1971 – 2000 z.B. die Anzahl an Sommertagen um 7 Tage.

Die Anzahl an Heißen Tagen stieg von 6 (Medianwert) in der Klimanormalperiode 1971 – 2000 auf 14 von 1991 – 2020 (Abbildung 3-4). Die bislang größte Anzahl an Tagen mit einer Lufttemperatur von über 30 °C wurde im Hitzesommer 2003 erreicht und betrug 39 Tage, während im Jahr 2015 32 heiße Tage gezählt wurden.

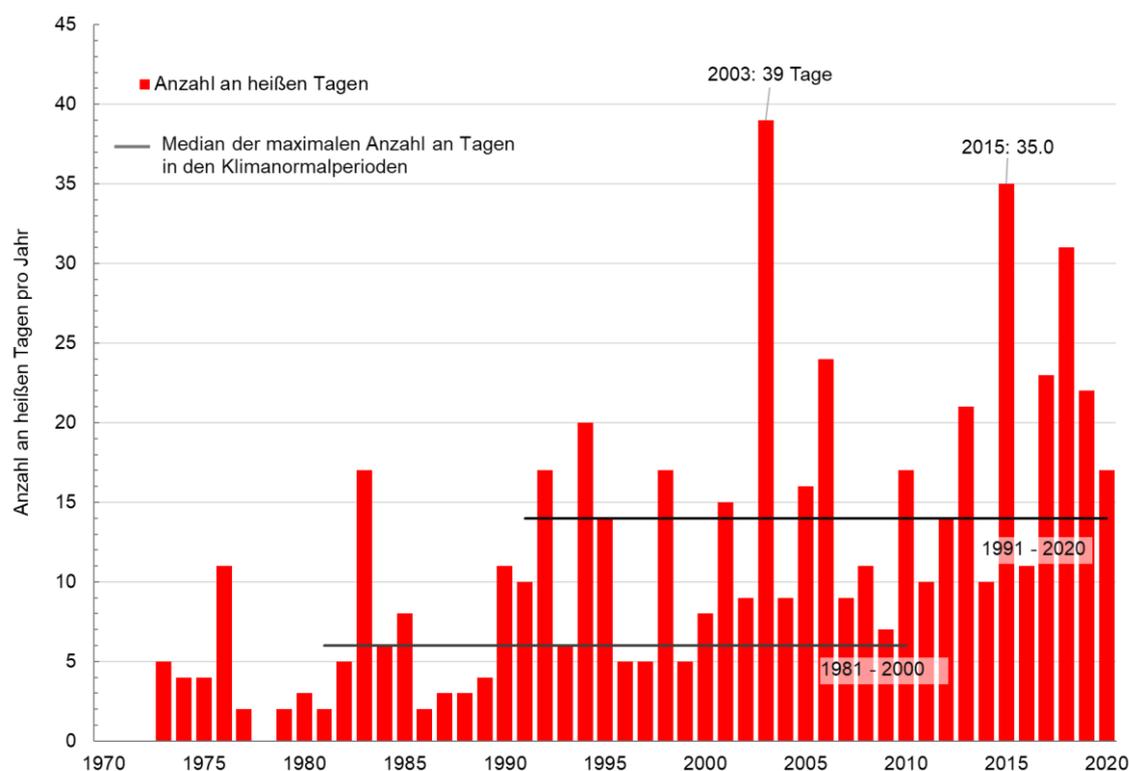


Abbildung 3-4: Anzahl der Heißen Tage im Zeitraum 1973 bis 2020 gemessen an der Messstation des DWDs in Konstanz (rote Säulen). Die Linien zeigen den Median der maximalen Anzahl der Heißen Tage für die jeweiligen 30-jährigen Zeiträume (Klimanormalperioden) an.

Betrachtet man den Jahresmittelwert der Lufttemperatur, so ist insbesondere in der letzten Klimaperiode ein Anstieg zu verzeichnen. In Abbildung 3-5 ist der Verlauf der mittleren Lufttemperatur in Konstanz sowie Mittelwerte einzelner Klimaperioden dargestellt. Die Differenz zwischen dem Mittel der Klimanormalperiode 1991 – 2020 und 1971 – 2000 beträgt knapp 0,7 K. Hohe Jahresmittelwerte sind nicht nur auf heiße Sommer zurückzuführen, sondern können sich auch durch warme Wintermonate ergeben. So sticht z.B. das Jahr 2003 bei den Jahresmittelwerten nicht hervor, da die mittlere Lufttemperatur zwar im Sommer zu warm war, aber durch einen zu kühlen Winter ausgeglichen wurde.

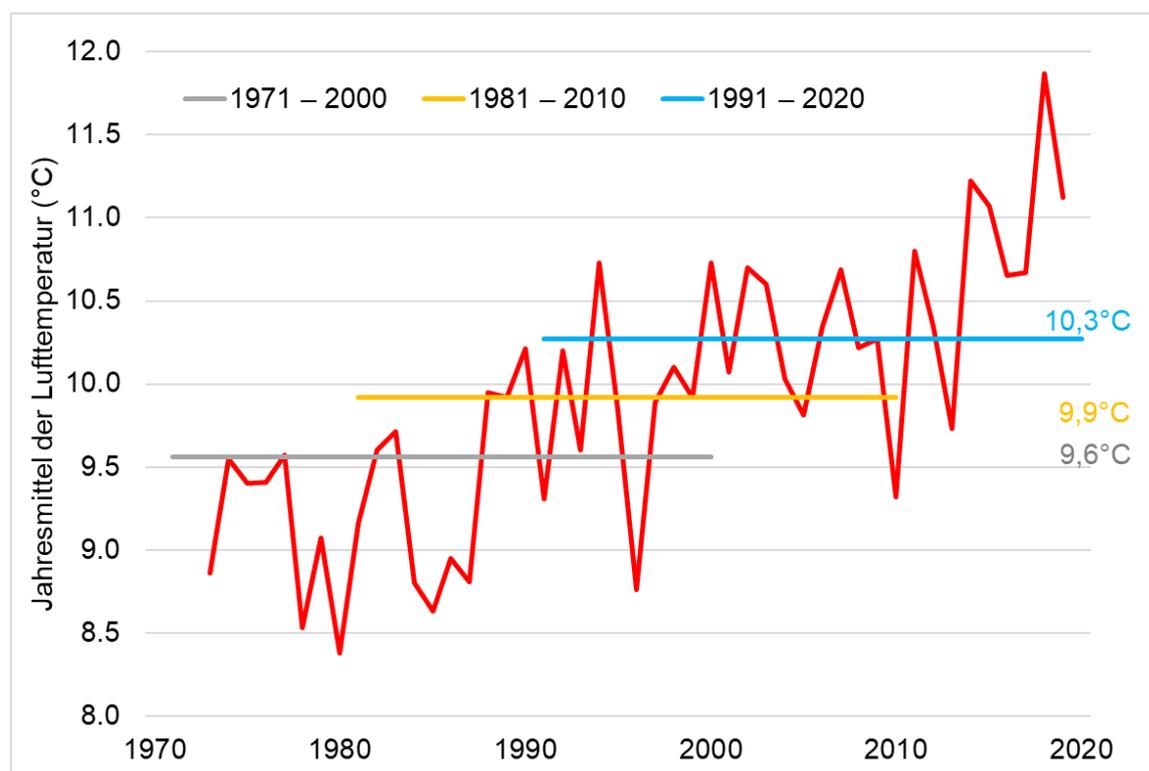


Abbildung 3-5: Verlauf der mittleren Lufttemperatur in Konstanz von 1973 bis 2020 in rot, gemittelt über die Klimaperioden 1971 – 2000, 1981 – 2010 und 1991 – 2020 (Datengrundlage: DWD Messung Radolfzell).

3.3 Strömungsverhältnisse

Eine Luftströmung wird gekennzeichnet durch die Windrichtung (Himmelsrichtung aus der der Wind weht) und durch die Windgeschwindigkeit. Den Antrieb für Luftströmungen stellen horizontale Druckunterschiede dar. In großer Höhe ist diese Strömung nahezu ungestört. Durch die Reibung wird die Strömung zum Boden hin abgebremst und durch das Geländere relief kanalisiert und/oder umgelenkt.

Abbildung 3-6 zeigt die von der LUBW berechneten Windrosen im Raum Radolfzell. Während am Zeller See eher Ost-West-Verteilungen vorzufinden sind, gibt es nördlich von Radolfzell tendenziell Südwest-Nordost-Verteilungen.

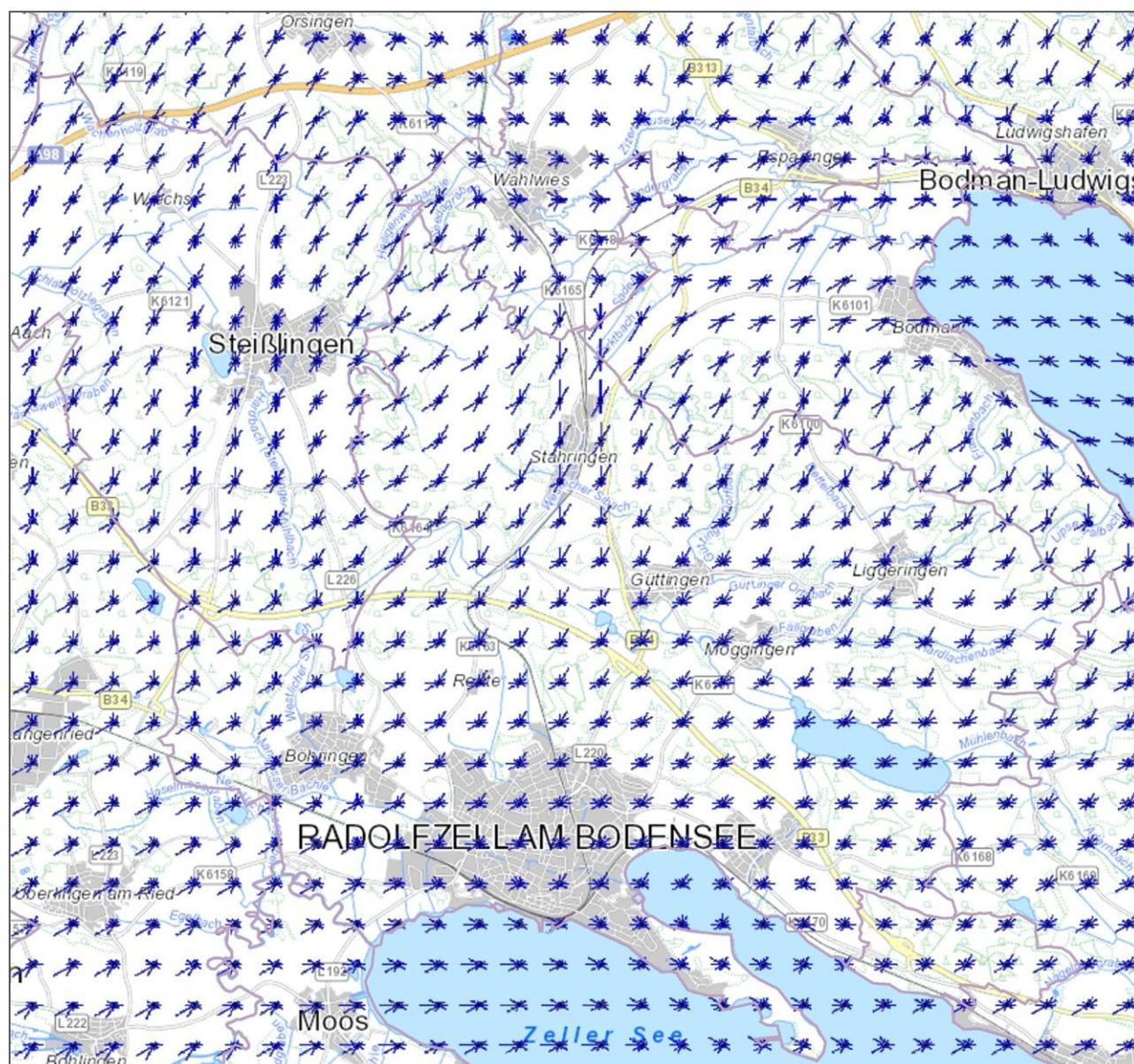


Abbildung 3-6: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen (Daten- und Kartendienst LUBW)

Im Yachthafen von Radolfzell befindet sich an der Hafeneinfahrt eine Windmessstation. Die Daten wurden von der windfinder.com GmbH & Co. KG beschafft. Zum Vergleich wurden die in Konstanz vom Deutschen Wetterdienst gemessenen Daten gegenübergestellt. Als repräsentativ wurde das Jahr 2019 ausgewählt. In Abbildung 3-7 sind die nach Windgeschwindigkeitsklassen differenzierten

Windrosen dargestellt. Die Länge der Strahlen gibt an, wie häufig der Wind aus der jeweiligen Richtung weht. Die Farbe der Strahlen stellt die Häufigkeit der jeweiligen Windgeschwindigkeitsklasse dar.

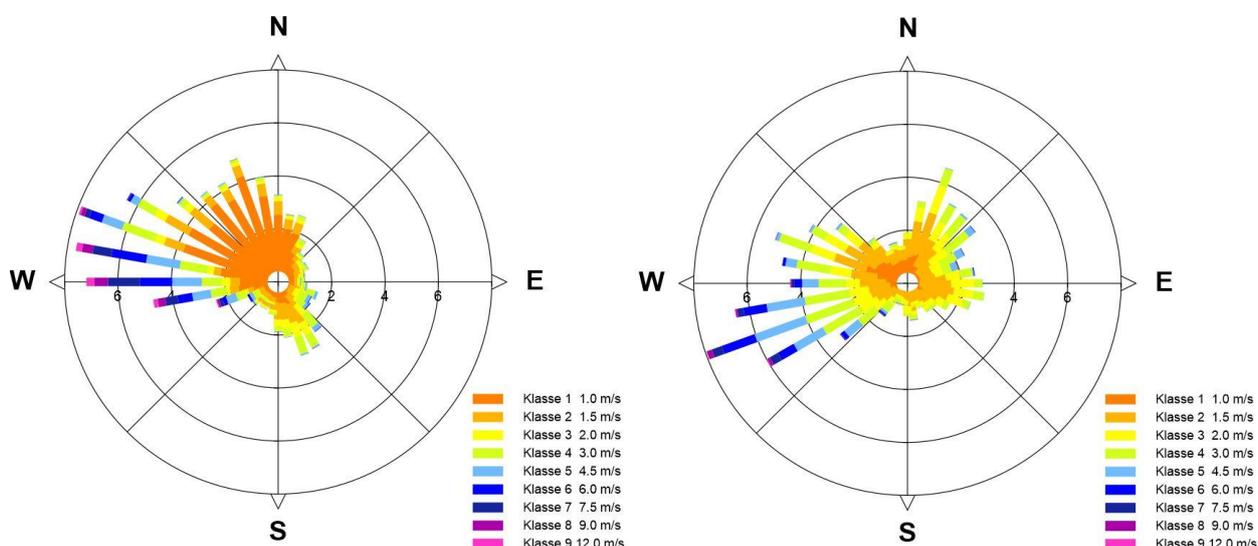


Abbildung 3-7: Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen im Yachthafen Radolfzell (links) und in Konstanz (rechts) für das repräsentative Jahr 2019

Die Windrichtungsverteilung in Radolfzell zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei westlichen Windrichtungen. Hohe Windgeschwindigkeiten treten vorzugsweise bei Westwinden auf. Daneben gibt es bei windschwachen Situationen ein breites Spektrum von Winden aus West bis Nord. Ein tertiäres Maximum findet sich bei Südostwinden.

In Konstanz ist das Maximum auf Westsüdwest verschoben. Ein zweites Maximum findet sich bei Nordnordost und ein schwach ausgeprägtes drittes Maximum bei Ost.

Die mittlere Windgeschwindigkeit im ausgewerteten Jahr betrug im Radolfzell 2,1 m/s in Konstanz 2,3 m/s.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen aufgeschlüsselt nach der Ausbreitungsklassen ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Ausbreitungsklassen I + II (stabile Schichtung, Inversion) treten hauptsächlich in den Nachtstunden auf. Die Ausbreitungsklassen III1 + III2 (neutrale Schichtung) treten vorzugsweise bei hohen Windgeschwindigkeiten und guter Durchmischung der Atmosphäre auf. Bei hoher Einstrahlung in den Tagstunden ist die Atmosphäre labil geschichtet (Ausbreitungsklassen IV + V).

Kaltluftabflüsse stellen sich bei Ausbreitungsklasse I ein. Diese tritt in Radolfzell und Konstanz in gut 15% der Jahresstunden auf. Sie ist in Radolfzell mit Winden aus dem Nordwestsektor verbunden. In Konstanz werden zudem noch gehäuft Nordnordostwinde beobachtet.

Neutrale Schichtung (AK III1) mit hohen Windgeschwindigkeiten ist in Radolfzell mit Westwinden verbunden, in Konstanz mit Winden aus Westsüdwest.

Bei stark labiler Schichtung (AK V) findet man auflandigen Wind, in Radolfzell aus Südsüdost, in Konstanz aus Ost.

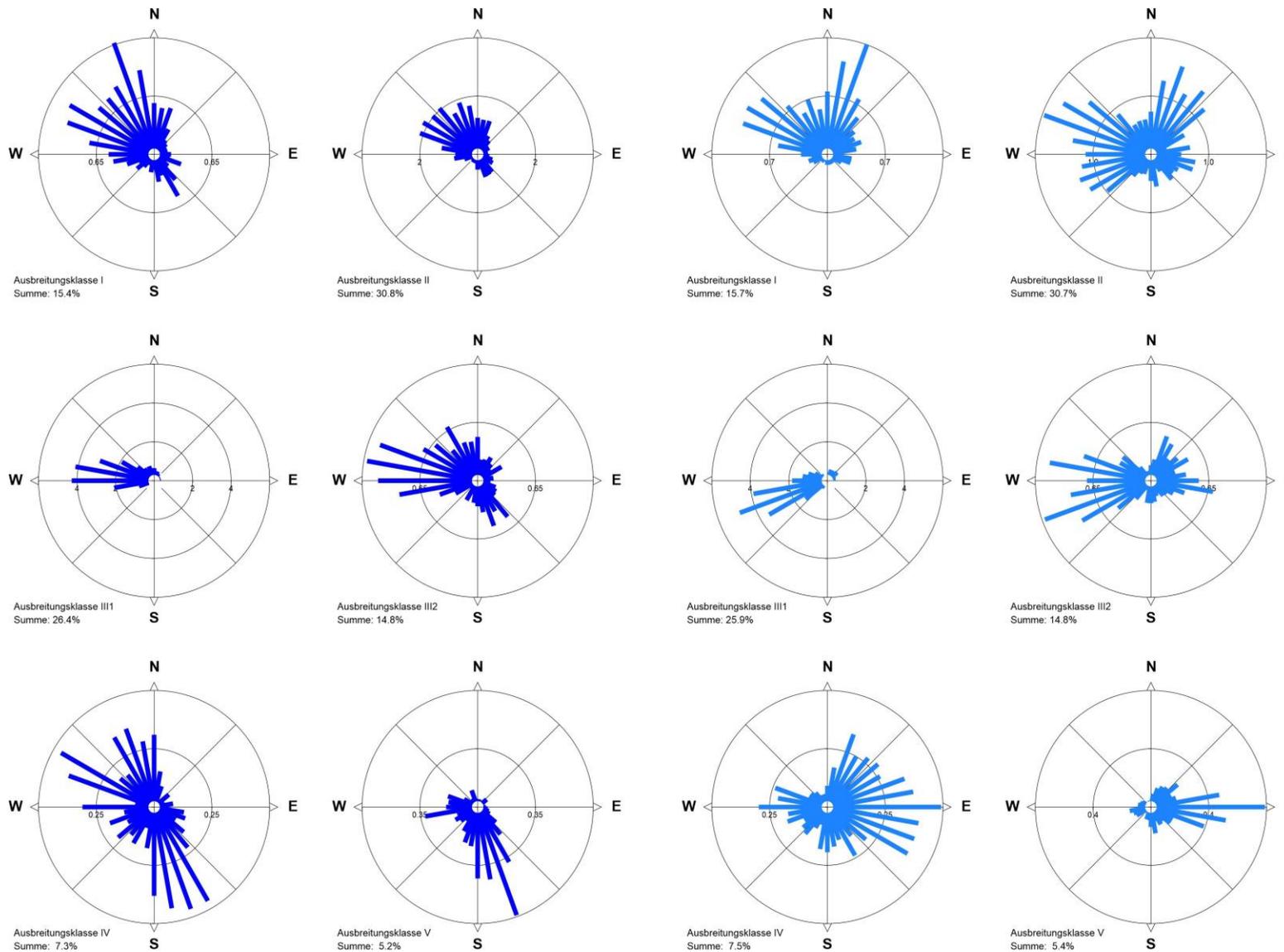


Abbildung 3-8: Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen im Yachthafen Radolfzell (dunkelblau) und in Konstanz (blau) nach Ausbreitungsklassen getrennt.

Am Bodensee treten Tagesperiodische Windsysteme auf. In den Tagstunden heizt sich bei wolkenarmen Wetterlagen das Land auf. Dadurch wird kühlere Seeluft angesaugt (Seewind). Nachts kühlt bei diesen Wetterlagen das Land stärker ab als die Seeoberfläche, es stellt sich eine seewärts gerichtete Strömung ein (Landwind). Der Landwind wird durch die, wenn auch eher moderaten Kaltluftabflüsse in den Nachtstunden überlagert.

In Abbildung 3-9 wurden nur Schwachwinde unter 1,5 m/s im Tagesgang ausgewertet. In den Tagstunden zwischen etwa 11 und 19 Uhr findet man den Seewind aus südlichen Richtungen. Gegen 20 Uhr kommt der Seewind zum Erliegen und es stellt sich der Landwind aus westlichen bis nördlichen Richtungen ein, der bis gegen 10 Uhr in den Vormittagsstunden anhält.

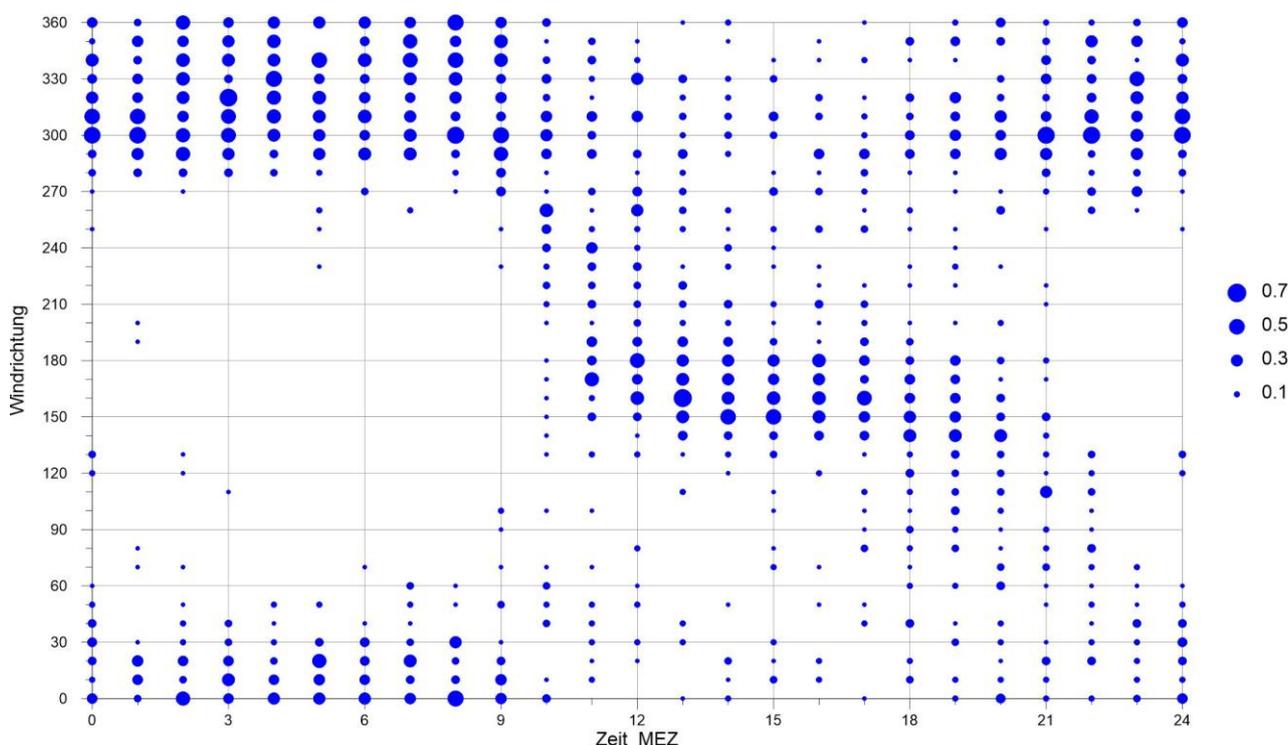


Abbildung 3-9: Häufigkeit der Windrichtungen zu jeder Stunde im Yachthafen Radolfzell.

Der Seewind in den Tagstunden stellt wie die Kaltluftabflüsse einen Gunstfaktor dar. Belüftet werden allerdings eher die ufernahen Zonen, was sich z.B. im Verlauf der Uferpromenade bemerkbar macht und dort auch an heißen Tagen noch vergleichsweise angenehme Verhältnisse produziert, weil Wind die gefühlte Temperatur herabsetzt (vgl. Kapitel 7.2.3).

4 Auswirkungen des Klimawandels

4.1 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 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 Konstanz hat die Lufttemperatur zugenommen (siehe Abbildung 3-5).

Eine wichtige Grundlage zur Projektion des Klimas spielt die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre, deren mögliche Entwicklung in so genannten Konzentrations-Pfaden (englisch „Representative Concentration Pathways“, RCPs aus dem 5. IPCC Bericht, 2013) klassifiziert werden. Bei den RCP-Szenarien bilden die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb den Ausgangspunkt.

In Abbildung 4-1 ist der Strahlungsantrieb für verschieden RCP-Szenarien dargestellt. Für den Zeitraum 1860 bis 2005 entspricht der Verlauf der Treibhausgas-Konzentrationen den beobachteten Werten. Für den Zeitraum 2006 bis 2100 entsprechen die RCPs verschiedenen *möglichen* Treibhausgas-Konzentrations-Pfaden in der Zukunft.

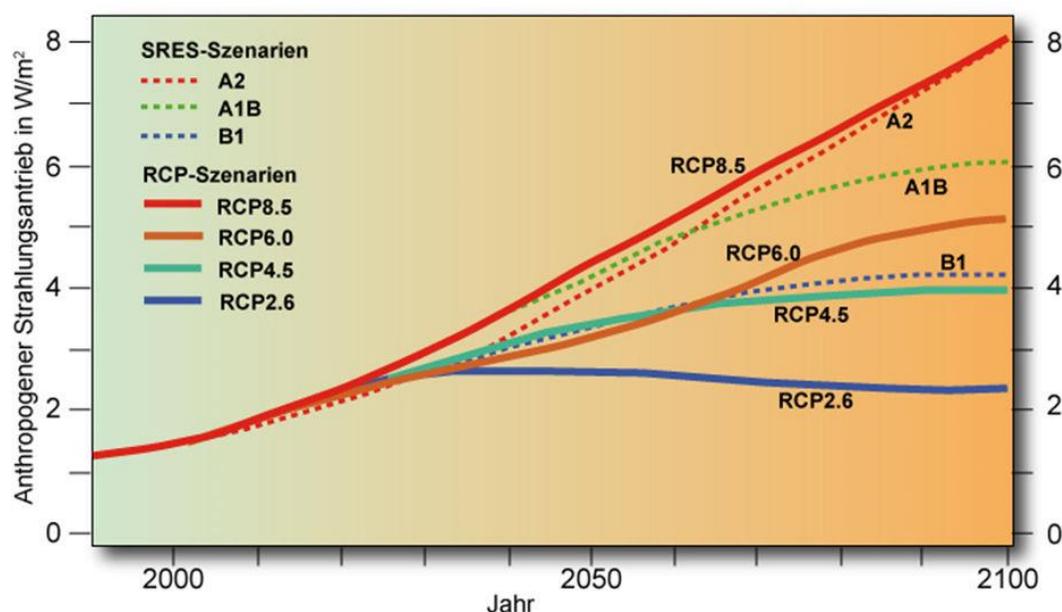


Abbildung 4-1: Vergleich des anthropogenen Strahlungsantriebs, welcher den verschiedenen SRES (4. IPCC Bericht 2007) und RCP-Szenarien (5. IPCC Bericht 2013) zugrunde liegt.

Vom IPCC wurden vier Konzentrationspfade für den 5. Sachstandsbericht ausgewählt: RCP 2.6 (RF⁵ relativ niedrig), RCP 4.5 (RF mittel), RCP 6.0 (RF hoch) und RCP 8.5 (RF sehr hoch). Mit RCP 8.5 wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben, der zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Strahlungsantrieb von 8,5 W/m² erreicht. Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Änderung der Energiebilanz der Erde durch Änderung der Wirkung der Strahlung aus dem

⁵ RF – Radiative Forcing = Strahlungsantrieb

Weltraum und wird in W/m^2 gemessen. RCP 2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Er führt zum Strahlungsantrieb von etwa $3 W/m^2$ um 2040 und geht zum Ende des 21. Jahrhunderts auf einen Wert von $2,6 W/m^2$ zurück. Die beiden anderen RCPs bewegen sich im mittleren, dazwischenliegenden Bereich. Für die Stadtklimaanalyse Radolfzell wurden RCP 8.5, RCP 4.5 sowie RCP 2.6 (Tabelle 4-1) gewählt, um eine große Spanne an möglichen zukünftigen Entwicklungen abzudecken.

Tabelle 4-1: Beschreibung der „Representative Concentration Pathways“, die in der Stadtklimaanalyse Radolfzell betrachtet werden.

Szenario	Beschreibung
RCP 8.5	Bis über das Jahr 2100 ansteigender Strahlungsantrieb. Dieser beträgt im Jahr 2100 $8,5 W/m^2$ oder $1370 ppm$ CO_2 -Äquivalent. Der Strahlungsantrieb bleibt bis 2300 auf hohem Niveau.
RCP 4.5	Moderate Entwicklung, ähnlich dem B1-Szenario. Anstieg des CO_2 -Äquivalents bis 2100 auf $650 ppm$; der Strahlungsantrieb bleibt bei abnehmenden Emissionskonzentrationen bis 2300 auf gleichem Niveau.
RCP 2.6	"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 $2^\circ C$ im Jahr 2100 sehr wahrscheinlich nicht überschritten. Das Szenario entspricht einem Ziel der Vereinbarungen von Paris.

Die Konzentrations-Pfade (RCPs) wurden repräsentativ für verschiedenste Kombinationen möglicher zukünftiger wirtschaftlicher, technologischer, demographischer, politischer und institutioneller Entwicklung gewählt. In Moss et al. (2008) und van Vuuren et al. (2011) werden die RCPs und ihre Entwicklung im Rahmen des 5. IPCC-Berichtes (2013) ausführlich beschrieben.

Diese Konzentrations-Pfade werden in globalen Klimamodellen berücksichtigt, welche die weltweite Änderung des Klimas berechnen. Die Ergebnisse werden für einzelne Regionen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen verfeinert, um genauere Aussagen über die Veränderung der mittleren Zustände, aber auch extremer Wetterereignisse zu treffen. Dazu werden regionale Klimamodelle mit globalen Zirkulationsmodellen angetrieben und über statistische oder dynamische Downscaling-Verfahren regionalisiert. In regionalen Klimamodellen wird komplexe Topographie, Landnutzungsarten sowie der Kontrast zwischen Ozean und Land besser repräsentiert (Wang et al. 2004). Statistische Regionalmodelle berechnen bestehende Zusammenhänge zwischen der Synoptik und dem lokalen Wetter und wenden diese auf die globale Simulation an. Dynamische Klimamodelle werden fortlaufend durch globale Klimamodelle angetrieben und simulieren die chemischen und physikalischen Prozesse.

Ensemblemodelle, wie die EURO-CORDEX-Daten bündeln die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle für jeweils ein Szenario und für eine Region (z.B. Europa) und ermöglichen somit eine Abschätzung der Unsicherheiten in den Klimamodellen und deren Parametrisierungen, den Emissionsszenarien und der natürlichen Klimavariabilität (Hewitt, 2004; Murphy et al. 2004).

Die Ergebnisse aus den EURO-CORDEX-Daten werden im Folgenden beschrieben. Dabei werden zunächst die Klimatelemente Lufttemperatur und Niederschlag und anschließend klimatologische Kenngrößen analysiert.

4.2 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 4-2 ist für die betrachteten Szenarien die berechnete Zunahme der Lufttemperatur für die Klimanormalperioden 2031 – 2060 und 2071 – 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 dargestellt.

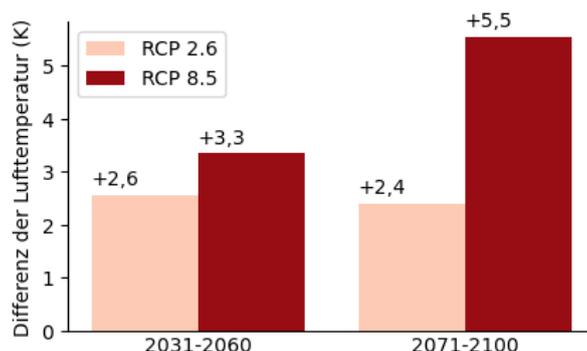


Abbildung 4-2: Änderung der Lufttemperatur (Median) bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000.

In beiden Szenarien tritt eine Temperaturerhöhung auf. Diese äußert sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts bei RCP 2.6 in einer Zunahme um 2,6 K, bei RCP 8.5 in einer Zunahme um 3,3 K. Zum Ende des 21. Jahrhunderts fällt die Spanne zwischen den Szenarien deutlich größer aus: Zunahmen von 2,4 K (RCP 2.6) und 5,5 K (RCP 8.5). Da bei Szenario RCP 2.6 davon ausgegangen wird, sofortige Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ergreifen, stagniert die Änderung der Lufttemperatur bei 2,4 K bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die grundsätzlich festgestellte Temperaturerhöhung wirkt sich außerdem auf die in den folgenden Kapiteln betrachteten Parameter maßgeblich aus.

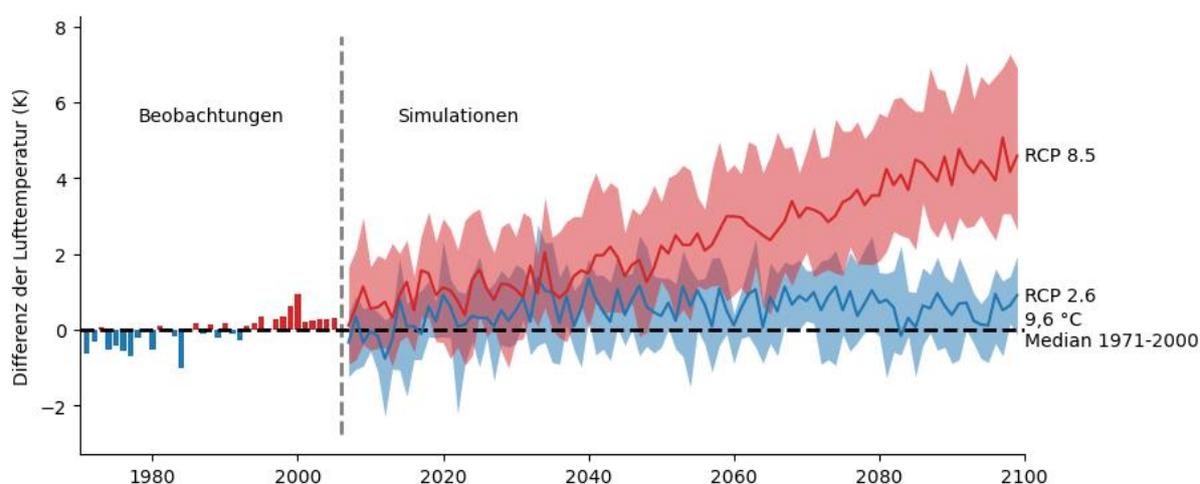


Abbildung 4-3: Lufttemperatur 1971 - 2100 für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 (Daten: Messstation DWD; EURO-CORDEX).

Die Zeitreihe des Medians der Lufttemperatur in Abbildung 4-3 verdeutlicht die Unterschiede der Szenarien nochmals. Der farblich hervorgehobene Unsicherheitsbereich, definiert als Wertebereich

zwischen dem 15. und 85. Perzentil, verdeutlicht, dass sowohl innerhalb eines Szenarios als auch zwischen den Szenarien eine Spanne von bis zu 7 K existiert.

4.3 Niederschlag

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

Im Frühjahr fallen in der Regel die geringsten Niederschlagsmengen an, wobei im Februar die geringsten Niederschlagsmengen auftreten. Das Maximum der Niederschlagsmenge tritt im Juli auf (Abbildung 4-4).

Für das 21. Jahrhundert wird eine geringe Zunahme des Jahresniederschlags erwartet, welche zur Mitte des Jahrhunderts höher ausfällt als zum Ende (Abbildung 4-5). Allerdings weist die Niederschlagsmenge eine sehr hohe Variabilität auf, wodurch die Prognose sehr unsicher ist. Auch wenn im Mittel eine Zunahme des Niederschlags prognostiziert wird, zeigen die Unsicherheiten auf, dass die Tendenz nicht eindeutig ist. Besonders deutlich wird dies für die Prognose für das Ende des 21. Jahrhunderts. Dort wird zwar im Mittel eine Zunahme von 6 % prognostiziert, die Unsicherheit reicht aber von über 14 % Zunahme bis hin zu einer Abnahme von 5 %.

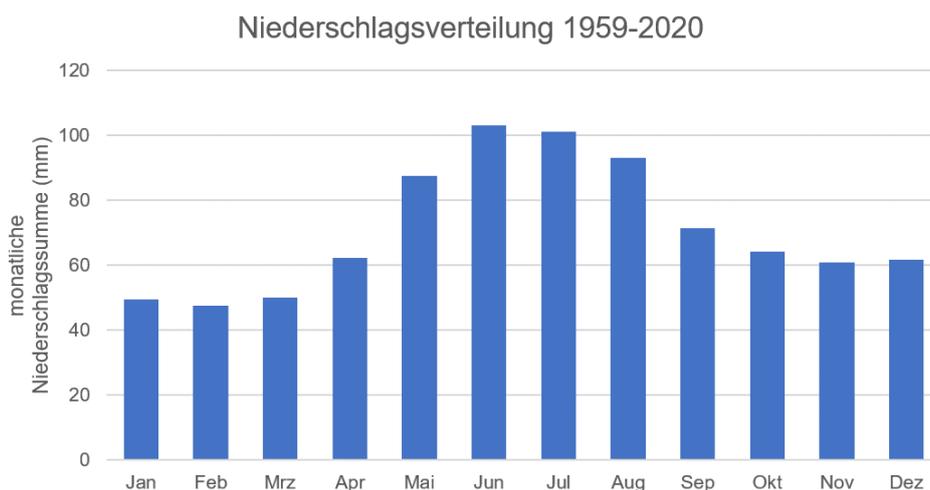


Abbildung 4-4: Mittlere monatliche Niederschlagsverteilung von 1959-2020 gemessen in Konstanz.

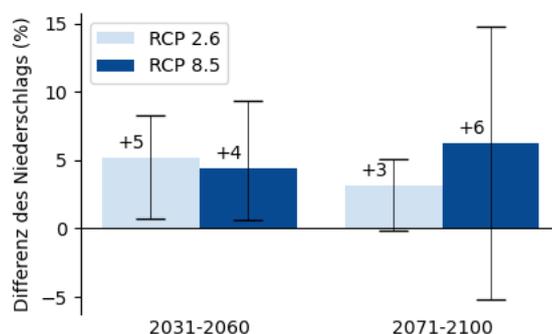


Abbildung 4-5: Niederschlagsänderung in % bis Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.

Diese Zunahme des Jahresniederschlags wird besonders in den Winter- und Frühjahrsmonaten erwartet (Abbildung 4-6). Hingegen zeigen die sommerlichen Niederschläge eine Abnahme um 3 %

zur Mitte des 21. Jahrhunderts und bis zu 11 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Auch für die einzelnen Jahreszeiten ist die Prognose sehr ungenau, so dass zum Teil sogar die Tendenz (Zu- oder Abnahme) nicht eindeutig vorhergesagt werden kann.

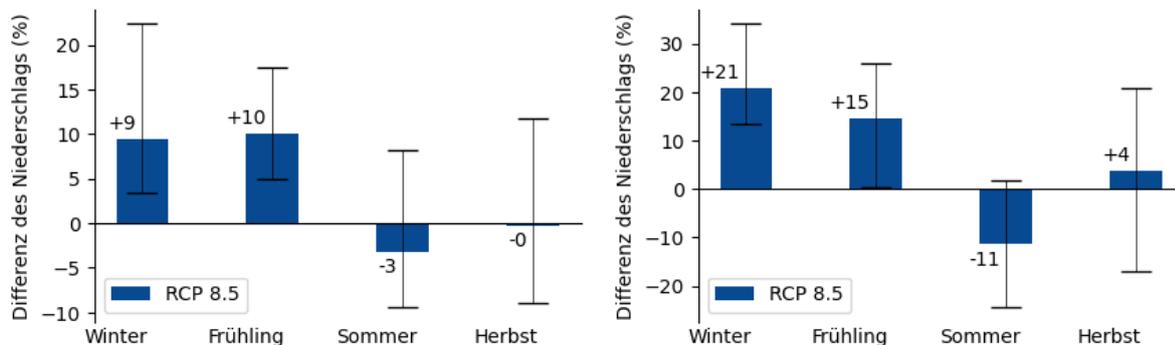


Abbildung 4-6: Saisonale Niederschlagsänderung für den Zeitraum 2031 – 2060 (links) und den Zeitraum 2071 – 2100 (rechts) gegenüber der Klimanormalperiode 1971 – 2000. Die Fehlerbalken stellen den Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil dar. Der Median (50. Perzentil) wird als Zahl angegeben.



Abbildung 4-7: 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 Regeneignisse (Quelle: Europäisches Umweltamt 2020¹).

Neben der Gesamtregenmenge ist auch die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen (z.B. kräftige Gewitter) von Bedeutung. Die Analyse zeigt eine Zunahme der Starkniederschläge von 5 % bis 15 % im Sommerhalbjahr. Im Winter wird eine Zunahme von 25 % bis 35 % für den Raum Radolfzell prognostiziert (Abbildung 4-7).

4.4 Klimatologische Kenntage

In Tabelle 4-2 sind die klimatologischen Kenntage aufgeführt, die sowohl für den Zeitraum 1971 – 2000 (siehe Kapitel 3.2), 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 Radolfzell. Hagelereignisse treten sehr lokal und selten auf und werden nur an wenigen Stationen gemessen (s. Kapitel 4.4.3). Die EURO-CORDEX Klimamodelltdaten weisen keine Daten zu Hagelereignissen aus, wodurch es nicht möglich ist belastbare Aussagen zu diesem Thema zu treffen.

Tabelle 4-2: Klimatologische Kenntage für verschiedene Klimanormalperioden. Kenntage für zukünftige Perioden basieren auf dem Szenarium RCP 8.5.

Klimatologischer Kenntag	1971 – 2000	2031 – 2060	2071 – 2100
Frosttage	72	44	22
Eistage	18	8	2
Sommertage	47	75	107
Heiße Tage	8	23	75

4.4.1 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 wird⁶.

Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird prognostiziert, dass die Anzahl der heißen Tage um etwa 15 Tage (RCP 8.5) ansteigt (Tabelle 4-2). Im Vergleich dazu stieg die jährliche Anzahl heißer Tage im Zeitraum 1981 – 2010 um etwa 4 Tage gegenüber der Periode 1971 – 2000 (Tabelle 4-2). Bis 2100 wird ein Anstieg um 67 Tage auf dann 75 Tage jährlich (RCP 8.5) erwartet. Zu beachten ist hier die große Unsicherheit, welche durch die Variabilität in der Temperaturzunahme bedingt ist (vgl. Abbildung 4-3).

Eine ähnliche Tendenz wie für die Anzahl an heißen Tagen lassen sich in Tabelle 4-2 auch für die Anzahl an Sommertagen erkennen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts könnte die Anzahl der Sommertage um etwa 28 Tage (RCP 8.5) ansteigen. Bis 2100 könnten es letztlich etwa 60 Tage (RCP 8.5) mehr sein als im Zeitraum 1971 – 2000.

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 wie die heißen Tage ebenfalls häufiger auftreten.

⁶www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html

4.4.2 Frosttage

Die Anzahl an Frosttagen wird tendenziell abnehmen. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird sich deren Anzahl um 28 Tage (RCP 8.5) verringern. Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt die Anzahl um bis zu 50 Tage (RCP 8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 auf dann lediglich 22 Frosttage jährlich.

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.

4.4.3 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 Hageltagen⁷ 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.⁸

Vom DWD wurden die Hagelbeobachtungen von 10 Stationen für eine Statistik der mittleren jährlichen Anzahl an Hageltagen in Tabelle 4-3 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 4-3: Häufigkeit der Tage mit Hagel für den Zeitraum: 1981 – 2010. Inseln: kursiv, Berggipfel: GROSSBUCHSTABEN. (https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html)

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	1.134	2,0
WASSERKUPPE	921	2,0
FELDBERG (Schwarzwald)	1.490	4,6
ZUGSPITZE	2.964	3,8

⁷ Tage, an denen Hagel unabhängig von der Größe auftritt

⁸ https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hagel/hagel_node.html

Für Radolfzell ist als Ort in Südwestdeutschland mit einer Hagelwahrscheinlichkeit von ca. 2 Hageltagen pro Jahr auszugehen, wobei eine jahreszeitliche Variabilität zu berücksichtigen ist (vgl. Abbildung 4-8). 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 0,75 bis 1 Tagen mit Hagel in der Region Radolfzell aus (Abbildung 4-9)⁹.

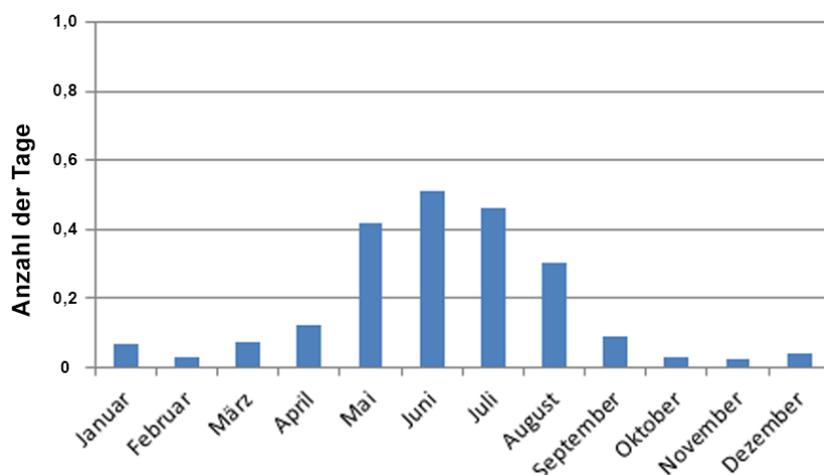


Abbildung 4-8: Mittlere Anzahl an Hageltagen pro Monat für die Klimanormalperiode 1981 – 2010. Als Datengrundlage wurden die oberen 10 Stationen ohne Inselstationen verwendet.¹⁰

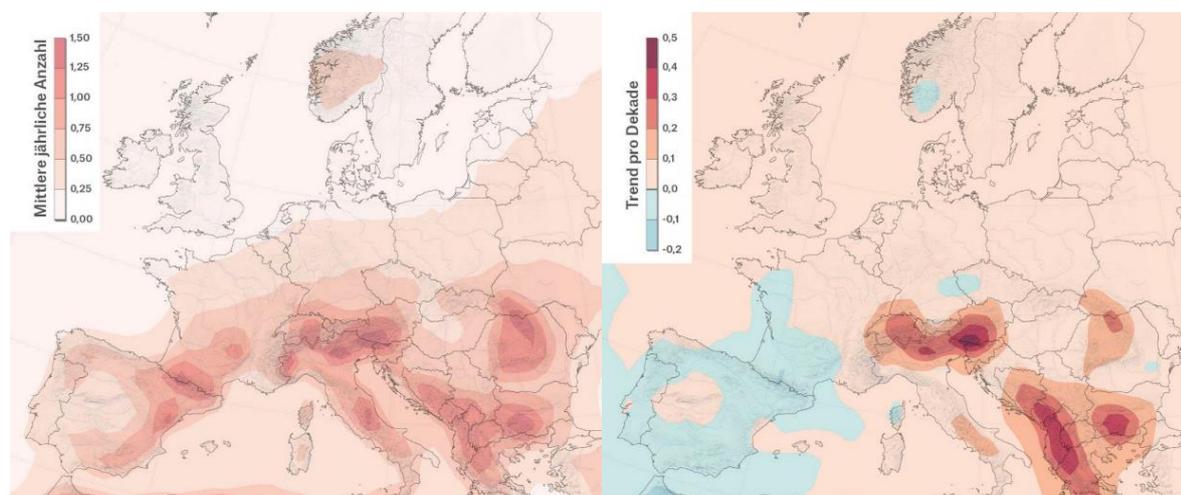


Abbildung 4-9: Mittlere jährliche Anzahl an Hagelereignissen (links) und der Trend pro Dekade in den 37 Jahren von 1979 – 2015 (rechts) (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019¹¹)

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 et al. (2009) fanden heraus, dass die jährliche Anzahl an Gewittern

⁹ Diese Zahlen basieren auf einer Studie von Räder 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.

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

¹¹ www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html

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 et al. 2017). Die Münchner Rückversicherung weist einen Trend von etwa +0,2 Hageltagen pro Jahr im Raum Radolfzell aus (Abbildung 4-9). Im 21. Jahrhundert könnte die Anzahl an Hageltagen im Raum Radolfzell weiter zunehmen (Brasseur et al. 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 4-9). 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 4-10 zeigt beispielhaft typische Schadensbilder in Abhängigkeit zur Hagelgröße.

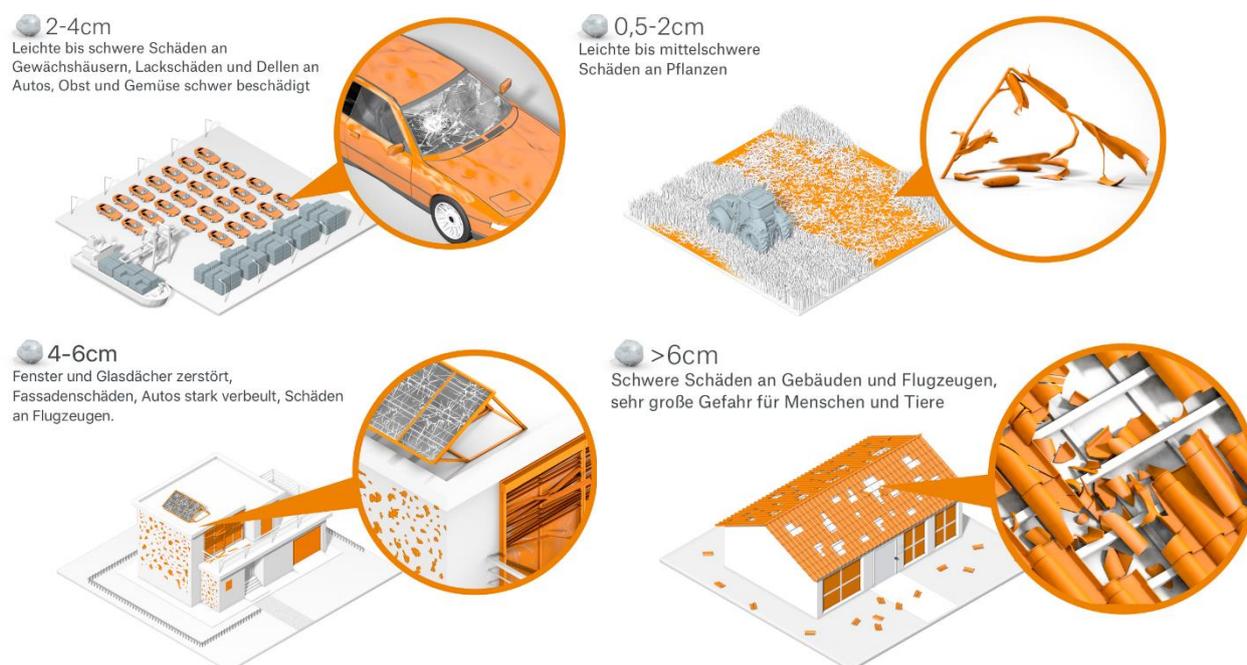
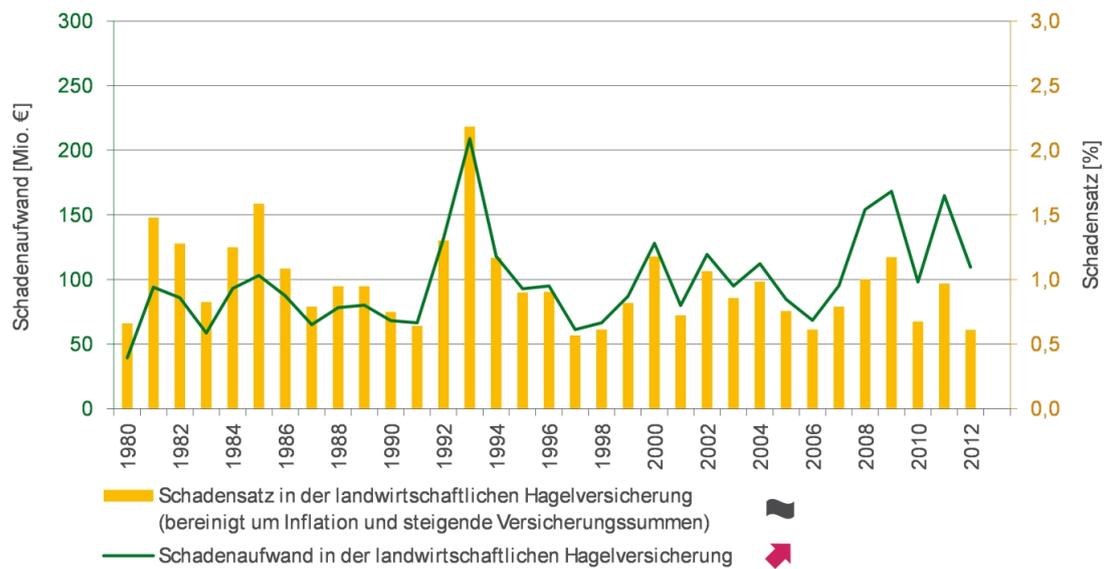


Abbildung 4-10: Verschiedene Hagelgrößen und Schadenbilder (Quelle: Münchner Rückversicherung 2019)

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 4-11 sind Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung abgebildet. Der Schadensatz erlaubt keine direkten Rückschlüsse auf die Anzahl und Schwere von Hagelereignissen. Es ist jedoch auch kein eindeutiger Trend zu erkennen.



Datenquelle: Institut für Agribusiness (Technische Ziffern Hagel)

Abbildung 4-11: Schadenaufwand und Schadensatz in der landwirtschaftlichen Hagelversicherung (Quelle: UBA <https://www.umweltbundesamt.de/lw-i-4-das-indikator#textpart-1>)

5 Auswirkungen des Klimawandels

Auf die Auswirkungen und Maßnahmen für unterschiedliche Akteure wird in der Klimaanpassungsstrategie näher eingegangen. Hier sollen als Übersicht die klimatologischen Aspekte beleuchtet werden. Eine Übersicht über die betroffenen Bereiche findet sich auf der Webseite des Umweltbundesamts¹².

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: +2,6 K bis +3,3 K (Mitte des Jhd.) +2,4 K bis +5,5 K (Ende des Jhd.)
Niederschlag	EURO-CORDEX-Daten: +4 % (Mitte des Jhd.) +6 % (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.) +21 % Winter (Ende des Jhd.) +10 % Frühling (Mitte des Jhd.) +15 % Frühling (Ende des Jhd.) -3 % Sommer (Mitte des Jhd.) -11 % Sommer (Ende des Jhd.) keine klare Tendenz im Herbst, eher steigend
Starkwind	Zunahme ¹³
Starkregen-Ereignisse	EURO-CORDEX-Daten: steigende Tendenz (Winter: 5 % – 15 %, Sommer: 25 % – 35 %)
Hagel	Münchener Rückversicherung: etwa +0,2 Hageltage (Mitte des Jhd.)
Trockenheit	Sommerlicher Rückgang von Niederschlägen

¹² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse/uebersicht-betroffenheiten>

¹³ 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>

6 Vorgehensweise

Für die Stadtklimaanalyse Radolfzell sind umfangreiche Modellierungen und Analysen durchgeführt worden. In Abbildung 6-1 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, ...) explizit aufgelöst werden, die wesentliche Rolle.

Um die Strömungsverhältnisse der Mesoskala – insbesondere Kaltluftabflüsse – zu modellieren, müssen großräumige Gelände- und Nutzungsstrukturen berücksichtigt werden, so dass die wesentlichen Kaltlufteinzugsbereiche erfasst werden. Das Relief ist für die Strömungslenkung und den Antrieb der Strömung wichtig. 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 bestimmt das bodennahe Fließverhalten.

Zur Bestimmung kleinräumiger stark variierender Größen der Mikroskala wie z.B. der Physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) bedarf es der Berücksichtigung der Einzelhindernisse. Nur dann kann berechnet werden, ob 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 durchgeführt. 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 Klimafunktions- und Planungshinweiskarte entsprechen einer Zusammenstellung sämtlicher Simulationsergebnisse und sind folglich das finale Resultat der Klimanalyse.

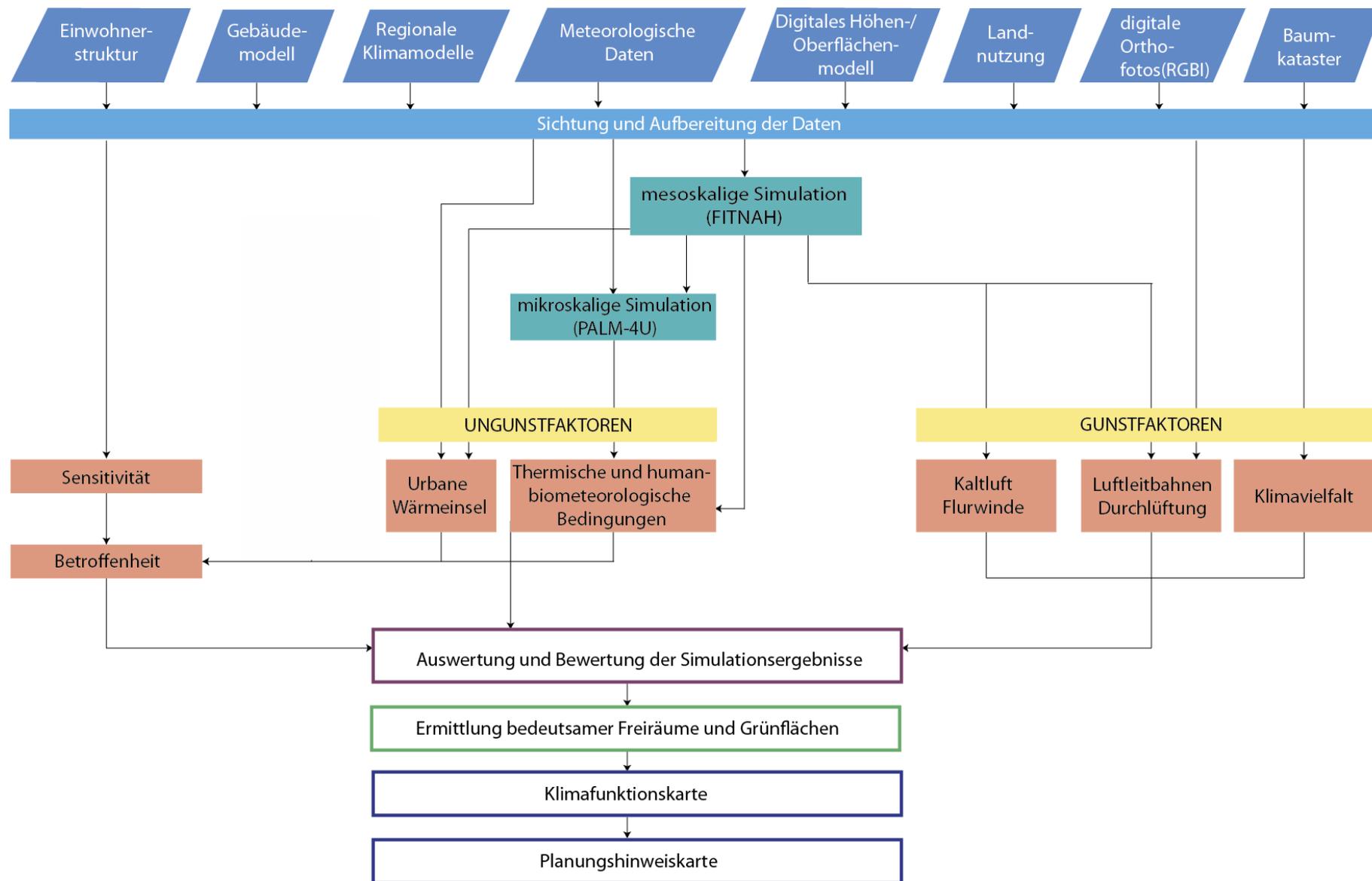


Abbildung 6-1: Vorgehensweise für die Stadtklimaanalyse Radolfzell.

7 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 Klimafunktions- und Planungshinweiskarten erfolgen kann.

Eine Übersicht der verwendeten Daten und Methoden ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik befindet sich im Anhang A1.

7.1 Daten

7.1.1 Topographie

Für die meso- und mikroskaligen Simulationen wird ein digitales Geländemodell (vgl. Abbildung 3-2) benötigt, welches auch die weiträumige Umgebung von Radolfzell beinhaltet.

Dazu wurde das Geländemodell der Stadt Radolfzell in das Höhenmodell GRITOP-L in einer Auflösung von etwa 30 m x 50 m integriert (siehe Tabelle 7-1). Das digitale Oberflächen- und Geländemodell (DOM bzw. DGM) wurde aus den Punktwolken der Laserscandaten berechnet.

Tabelle 7-1: Räumliche Daten für die Klimaanalyse Radolfzell.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Digitales Geländemodell (DGM) für Böhringen und die Kernstadt	1 m x 1 m	Stadt Radolfzell (Stand 2018)
Laserscan-Punktwolke	Laserscandaten	
GRITOP-L		Grawe, D. K., Schlünzen, H. 2018: Preparation of land-cover and orography data for GRITOP-L. METRAS Technical Report 12. Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg

7.1.2 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.

Zur Definition von Landnutzungsstrukturen aus klimatischer Sicht (siehe Tabelle A1-1) wurden die vorhandenen Landnutzungsdaten aus dem Flächennutzungsplan (Abbildung 7-1) und weiteren Landnutzungsdaten (siehe Tabelle 7-2) eingeordnet. Die der Stadtklimaanalyse zugrundeliegenden Datensätze wurden dem Auftragnehmer im Dezember 2020 übergeben. Änderungen der Flächennutzung und/oder Gebäude, die sich damals in Planung oder im Bau befanden, waren noch nicht vollständig in diesen Datensätzen integriert.

Tabelle 7-2: Räumliche Daten für die Stadtklimaanalyse Radolfzell.

Daten	Auflösung/ Datenformat	Bereitgestellt durch
DOP (Digitales Orthofoto (RGBI)) März 2019; Schrägbilder 2018	0,1 m x 0,1 m	Stadt Radolfzell (Stand: Dezember 2020)
ALKIS	shp	
Flächennutzungsplan 2015	shp	
Versiegelte Fläche	shp	
Stadtgrenze	shp	
Gebäudeumrisse	shp	
Baumkataster	shp	
Grünflächenkataster	shp	
Topografische Karte TK25	Raster	
CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover	100 m x 100 m	European Environment Agency (EEA) 2012

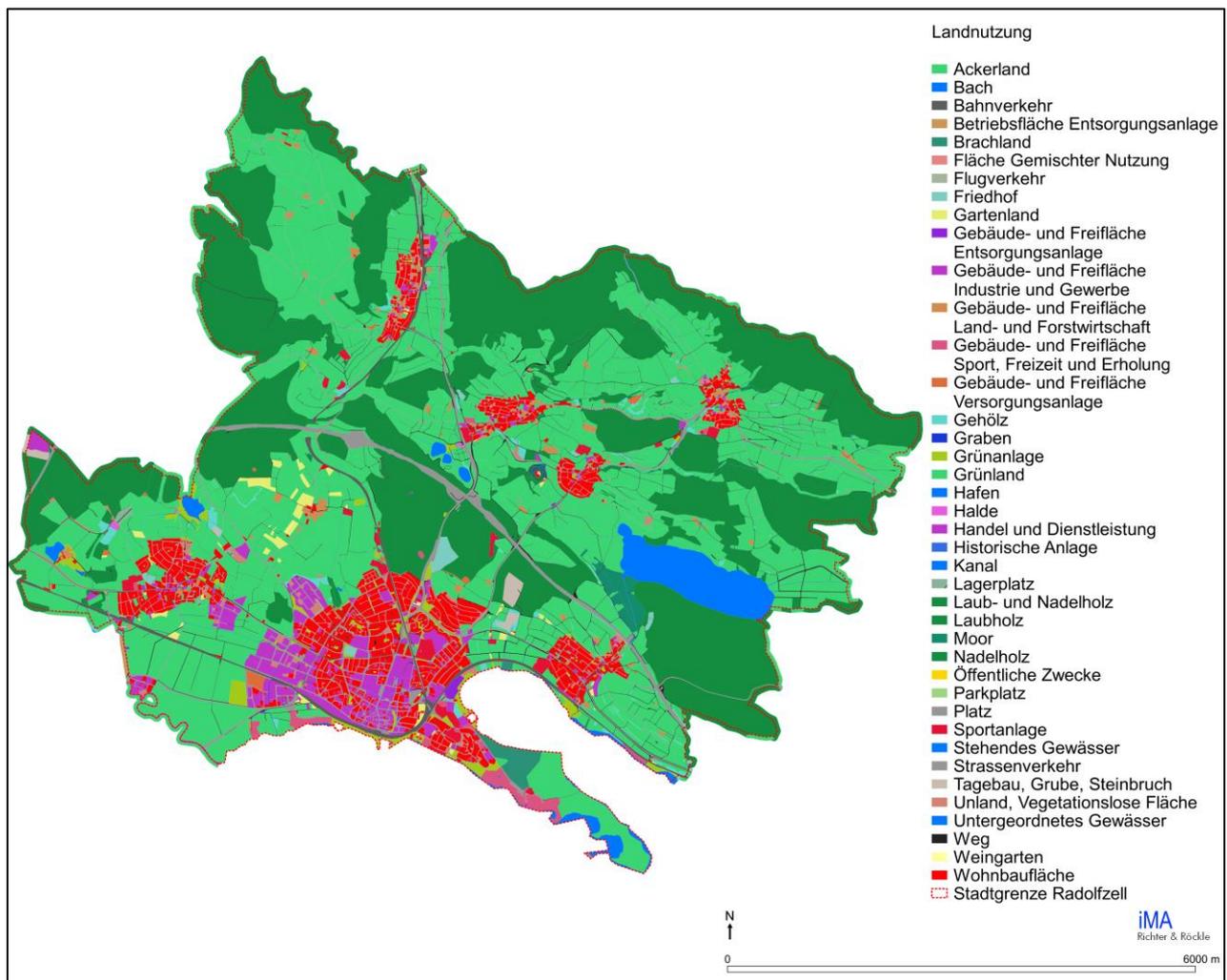


Abbildung 7-1: Aktuelle Landnutzung von Radolfzell.

Anschließend wurde der Anteil jeder Landnutzung pro Rechengitterzelle (50 m x 50 m) berechnet. Aus den anteiligen FITNAH-Landnutzungsklassen wurde jeder Rechengzelle der vorherrschende

Baumtyp, die Bewuchs- und Gebäudehöhe (Laserscandaten) und der prozentuale Anteil der übergeordneten Landnutzungskategorien „versiegelte Fläche“, „Feld/Acker“, „Wald/Büsche/Bäume“ und „Wasser“ zugeordnet.

7.1.3 Messdaten und Klimadaten

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

Table 7-3: Messdaten und weitere klimatologische Daten.

Daten	Auflösung	Bereitgestellt durch
Messdaten des DWD		https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
Windmessdaten		Windfinder
EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment - European Domain)	Tagesdaten	www.euro-cordex.net/

Zur Beurteilung der Klimawirkung und möglicher Anpassungsstrategien werden Daten eines Multi-Modell-Multi-Szenario-Ensembles von Regionalen Klimamodellen auch im Hinblick auf ihre Robustheit und dazugehörigen Unsicherheiten analysiert (siehe auch Kapitel 4).

Für die Klimaanalyse Radolfzell wurden die Ergebnisse der 16 Regionalen Klimamodelle aus dem EURO-CORDEX-Projekt (www.euro-cordex.net, Jacob et al. 2014) mit dem Stand Januar 2020 ausgewertet. Diese stehen für den europäischen Raum in einer Auflösung von u.a. 12,5 km x 12,5 km zur Verfügung.

Um die Spannweite möglicher klimawandelbedingter Auswirkungen aufzeigen zu können, werden die Emissionsszenarien RCP 8.5 und RCP 4.5 (vgl. Kapitel 4 auf Seite 25) für die Zeiträume 2031 – 2060 (Mitte des 21. Jhd.) und 2071 – 2100 (Ende des 21. Jhd.) analysiert. Mit RCP 8.5 wurde das „Worst-Case-Szenario“ abgedeckt und mit RCP 4.5 das niedrigere der beiden mittleren Szenarien. Das Szenario RCP 2.6 dient als Grundlage für die Modellrechnungen, welche eine Erwärmung der Mitteltemperatur von unter 2 K projizieren. Dem Szenario entsprechend müssten die Treibhausgasemissionen bereits ab 2020 abnehmen, was angesichts der bisherigen klimapolitischen Entscheidungen als wenig realistisch einzuschätzen ist.

7.2 Methoden

7.2.1 Mesoskalige Simulation mit FITNAH

Die mesoskaligen Simulationen der meteorologischen Größen (z.B. Lufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit) wurden mit dem Modell FITNAH angefertigt. Die räumliche Auflösung des FITNAH-Rechengebietes für die Stadtklimaanalyse Radolfzell 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.

Um Einflüsse von Höhenzügen und kaltauftreulanten Geländeformationen zu berücksichtigen, wurde zuerst ein Simulationsgebiet mit einer Größe von 144 km x 144 km gerechnet und darin ein weiteres mit ca. 25,6 km x 25,6 km mit einer Auflösung von 50 m x 50 m eingebettet.

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

- Beginn der Kaltluftabflüsse in den Abendstunden. Hier dominieren die lokalen, hangfolgenden Kaltluftabflüsse (2 Stunden nach Sonnenuntergang, 22:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Voll ausgebildete, quasistationäre, Kaltluftströmungssysteme im weiteren Verlauf der Nacht (8 Stunden nach Sonnenuntergang, 4:00 Uhr wahre Ortszeit)
- Thermische Bedingungen (Wärmebelastung) tagsüber (12:00 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.

7.2.2 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. 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 3 m ist neben der guten Wiedergabe der baulichen Strukturen im Untersuchungsgebiet auch die detaillierte 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 erwärmte Luft im Modellgebiet weitertransportiert und sorgt für eine realistische Temperaturverteilung.

Die Vegetation wird mit Hilfe eines Vegetationsmodells detailgetreu 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 makroskaligen 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 angesetzt, wird auch für die PALM-4U Simulation eine wolkenarme windschwache Situation berücksichtigt. Da die gesamte Stadtfläche von ca. 12 km x 11 km durch technische Begrenzungen nicht in einer einzigen mikroskaligen Simulation betrachtet werden kann, wird das Stadtgebiet von Radolfzell in zwei einzelnen mikroskaligen Simulationen mit jeweils einem Modellgebiet von 2,9 km x 2,4 km und 1,6 km x 1,3 km betrachtet. Dabei wird der Fokus auf die Innenstadt und den Ortsteil Böhringen gelegt. Die räumliche Auflösung beträgt jeweils 3 m in alle Raumrichtungen.

7.2.3 Human-Biometeorologie

Thermische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Mayer und Höppe 1987), berücksichtigen den integralen Effekt der meteorologischen Größen Lufttemperatur (T_a), Luft- feuchte (VP), Windgeschwindigkeit (v) sowie der Strahlungsflüsse (T_{mrt}) auf die menschliche Ener- giebilanz (siehe Abbildung 7-2). Die physiologischen Parameter Aktivität, Kleidung sowie weitere physische Faktoren werden dabei konstant gehalten.

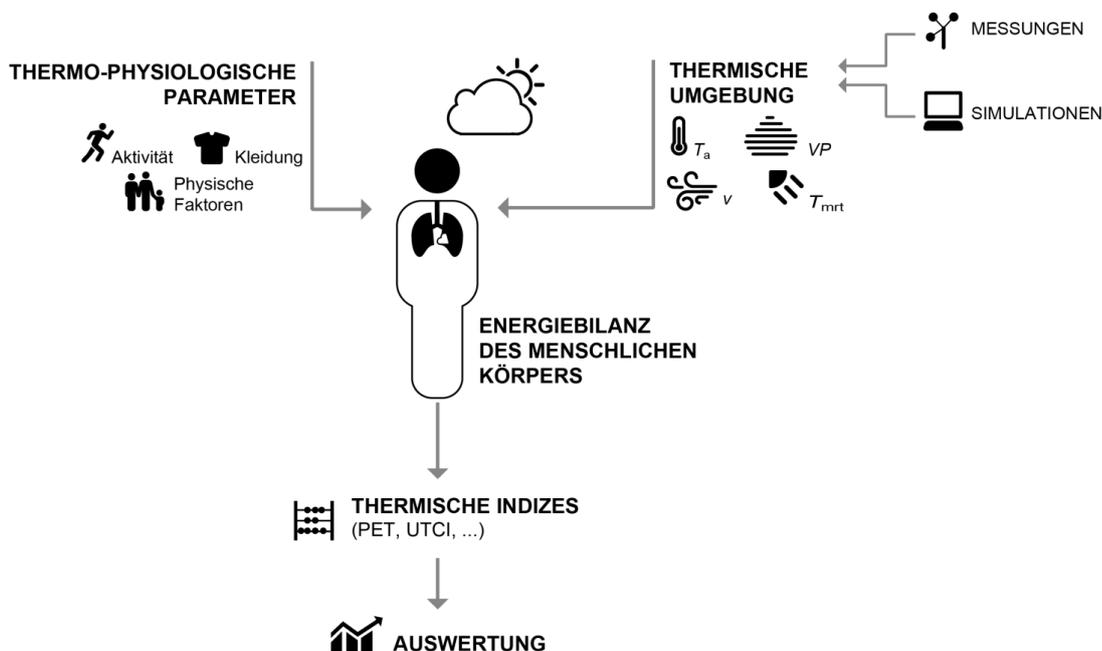


Abbildung 7-2: Fließdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung thermischer Indizes.

Zur Klassifizierung von Hitze- und Kältestress sowie zur Differenzierung des thermischen Komforts für den mitteleuropäischen Raum wurde in der vorliegenden Arbeit die PET-Bewertungsskala nach Matzarakis und Mayer (1997) verwendet (Tabelle 7-4).

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

Tabelle 7-4: Bewertungsskala von PET zur Quantifizierung der thermischen Verhältnisse und des Physiologischen Stresses bei Kälte- und Hitzebelastung (Matzarakis und Mayer, 1997).

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

8 Ergebnisse der Simulationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Faktoren diskutiert. Diese sind im Flussdiagramm (Abbildung 6-1) durch rote Kästen markiert.

8.1 Kaltluftströmung

Bei Tiefdruckwetterlagen (bewölkt, windig, regnerisch) herrschen in der Regel gute Austauschbedingungen. Die lokalen Strömungsverhältnisse werden im Wesentlichen durch die Orographie 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. 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 Strömungen vorhanden. Deshalb zählen Kaltluftabflüsse in gegliedertem Gelände zu den klimatischen Gunstfaktoren einer Region.

Durch die verschiedenen Erhebungen des Stadtgebiets und der weiteren Umgebung treten Kaltluftabflüsse auch im Bereich Radolfzell auf. Sie sind für die Belüftung von Siedlungsgebieten von hoher Bedeutung. Kaltluftabflüsse transportieren in den Abend- und Nachtstunden kühlere und meist frischere Luft in die Siedungsbereiche, wodurch thermische und lufthygienische Belastungen spürbar reduziert werden. Überlagert ist ein Land-/Seewind-System, das durch die Wärmeunterschiede zwischen Land und der großen Wasseroberfläche des Bodensees angetrieben wird.

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

8.1.1 Entstehung von Kaltluftabflüssen

In klaren windschwachen Nächten ist die Energieabgabe der Boden- und Pflanzenoberflächen aufgrund der Wärmeabstrahlung 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 „pulssierenden“ 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.

8.1.2 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.

8.1.3 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 Radolfzell in gut 15 % der Jahresstunden vorkommt. Auch bei Ausbreitungsklasse II, die in ca. 30 % 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 auftreten. 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.

8.1.4 Land-/Seewind

Am Bodensee kommt aufgrund der Größe des Gewässers ein weiteres Lokalwindsystem hinzu, das den Charakter eines Land-/Seewind-Systems aufweist.

Eine Land-Seewind-Zirkulation entsteht durch die unterschiedliche Erwärmung bzw. Abkühlung von Land und Wasser. Die Landoberfläche erwärmt sich zwei- bis dreimal schneller als eine Wasseroberfläche und kühlt ebenso auch schneller ab. Die aus den Wärmeunterschieden resultierenden Druckunterschiede bedingen thermische Ausgleichsströmungen.

Bei Schönwetterperioden werden dadurch die nächtlichen Kaltluftabflüsse aus dem Radolfzeller Umland von einem Landwind überlagert, der die Kaltluftabflüsse unterstützt. Bei wolkenarmen Wetterlagen in den Tagstunden führt der auflandige Seewind zu einer Durchlüftung, insbesondere der ufernahen Regionen.

8.1.5 Eindringtiefe

Trifft die Kaltluft (oder auch der Seewind) auf Bebauung, dringt diese bodennah in die Bebauungsschicht ein (vgl. Abbildung 8-1, links). Der größere Teil der Kaltluft überströmt die Bebauung und wird durch die gebäudeinduzierte Turbulenz in die Bebauung herabgemischt (vgl. Abbildung 8-1, rechts). Für die innerstädtische Belüftung ist deshalb die Überdachströmung die relevante Größe.

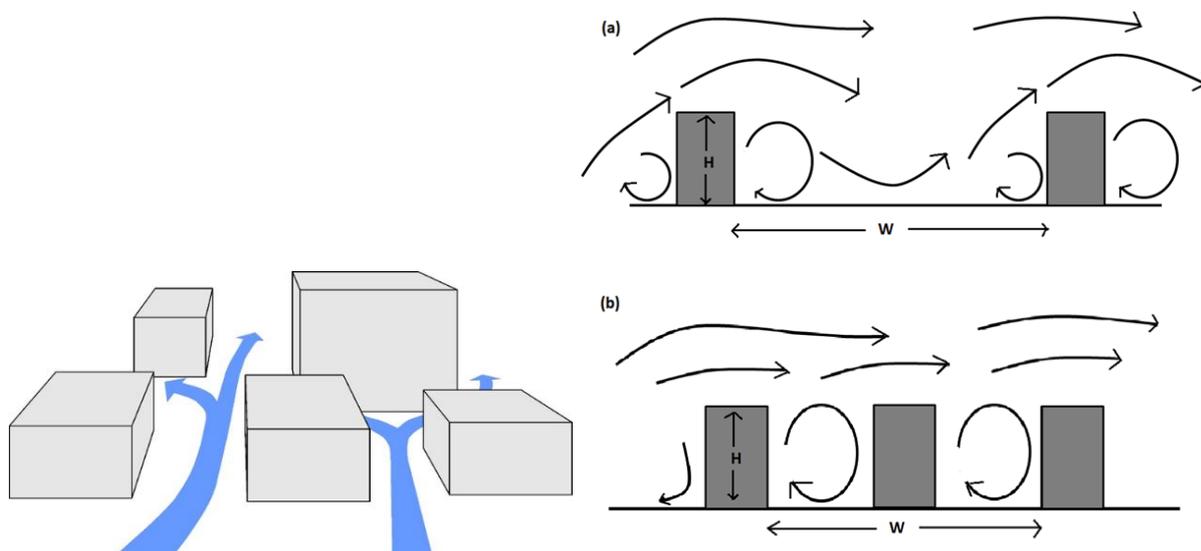


Abbildung 8-1: Bodennahe Belüftung in den peripheren Bereichen (links) und Herabmischen der Luft aus dem Überdachniveau in den Straßenraum (rechts).

8.1.6 Ergebnisse der Modellierung

Die abendlichen und nächtlichen Strömungsverhältnisse, die sich aus Hangabwinden, Kaltluftströmen und dem Landwind zusammensetzen, sind in Abbildung 8-2 bis Abbildung 8-5 für das bodennahe Niveau und das Überdachniveau dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind sowohl farblich differenziert (je blauer, desto intensiver) als auch über die Pfeillänge charakterisiert. Die Richtung der Pfeile gibt die Strömungsrichtung an. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind vorrangig Pfeile bei hoher Volumenstromdichte dargestellt (Algorithmus zur Ausdünnung der Pfeildarstellung siehe REKLIBO, 2009).

Das Stadtzentrum von Radolfzell sowie der Ortsteil Böhringen und zum Teil der Ortsteil Reute werden in den Abendstunden von einer nordwestlichen Kaltluftströmung durchlüftet, welche ihren Ursprung an den Höhenzügen zwischen Steißlingen und Singen hat. Die Strömung ist in Bodennähe durch die geringen Höhenunterschiede im westlichen Bereich des Stadtgebiets von Radolfzell nur schwach ausgeprägt. In der zweiten Nachthälfte wird Böhringen von einer nördlichen Strömung

aus Richtung Steißlingen belüftet. Durch die Änderung der Windrichtung wird das Stadtzentrum in der zweiten Nachthälfte nur im Westen von dieser Strömung erreicht. Für das Stadtzentrum sind Hangabwinde aus Richtung des Mindelsees bedeutend sowie die Ausläufer der Strömung entlang der Stahinger Senke. Letztere erreichen in der zweiten Nachthälfte auch den Ortsteil Reute.

Stahringen profitiert von einem Kaltluftstrom, welcher die Stahinger Senke von Nord nach Süd durchströmt. Dieser Kaltluftstrom erreicht ebenfalls den Ortsteil Säckle und vereint sich im Bereich der Nordstadt mit der nordwestlichen Strömung und trägt insbesondere in der zweiten Nachthälfte zur Belüftung des Stadtzentrums bei.

Die Ortsteile Hinterhomburg und Weilerhofen werden durch ausgeprägte Hangabwinde belüftet, welche an den Hängen des Rossbergs und dessen Ausläufer entstehen. Im Verlauf der Nacht werden die Hangabwinde durch Kaltluftströmungen aus dem nördlichen Krebsbachtal verstärkt.

Liggeringen profitiert von einer Strömung entlang des Dettelbachtals sowie Hangabwinden im Osten entlang des Fällgraben. Diese erreichen in Verlängerung ebenfalls den Ortsteil Möggingen. In der zweiten Nachthälfte verstärken sich die Hangabwinde, während die Strömung entlang des Dettelbachs versiegt. Die Hangabwinde aus den Homburg-Höhen erreichen insbesondere in der zweiten Nachthälfte auch den Ortsteil Gütlingen.

Im Bereich Markelfingen entstehen Hangabwinde von den umliegenden Hängen, welche teilweise von Kaltluftflüssen aus den Bodanrückhügelland verstärkt werden. Die Hangabwinde verstärken sich in der zweiten Nachthälfte.

Generell gilt, dass große Volumenströme ausschließlich über landwirtschaftlichen Flächen entstehen, nicht aber in bewaldeten Gebieten. Zudem sind die höheren Windgeschwindigkeiten im Dachniveau auf die weniger durch Hindernisse gestörte Strömung zurückzuführen. Bodennah bewirken die Rauigkeiten der Baukörper und der Vegetation zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit. Dieser Effekt ist z. B. im Bereich Böhringen und zwischen Reute und den Buchenseen sichtbar.

Bis in die Morgenstunden (4:00 Uhr) schwächen sich die Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten ab, da sich die Temperaturunterschiede im Verlauf der Nacht angeglichen haben. Durch die fortlaufende Abkühlung in der Nacht vergrößert sich die Mächtigkeit der Kaltluftschicht. Dies wiederum ermöglicht, dass kleinere Geländeerhebungen überströmt werden können und sich dadurch die Strömungsverhältnisse während der Nacht verändern können. Dies ist zum Beispiel im Bereich Böhringen erkennbar, wo die Windrichtung in der zweiten Nachthälfte von Nordwest auf Nord dreht.

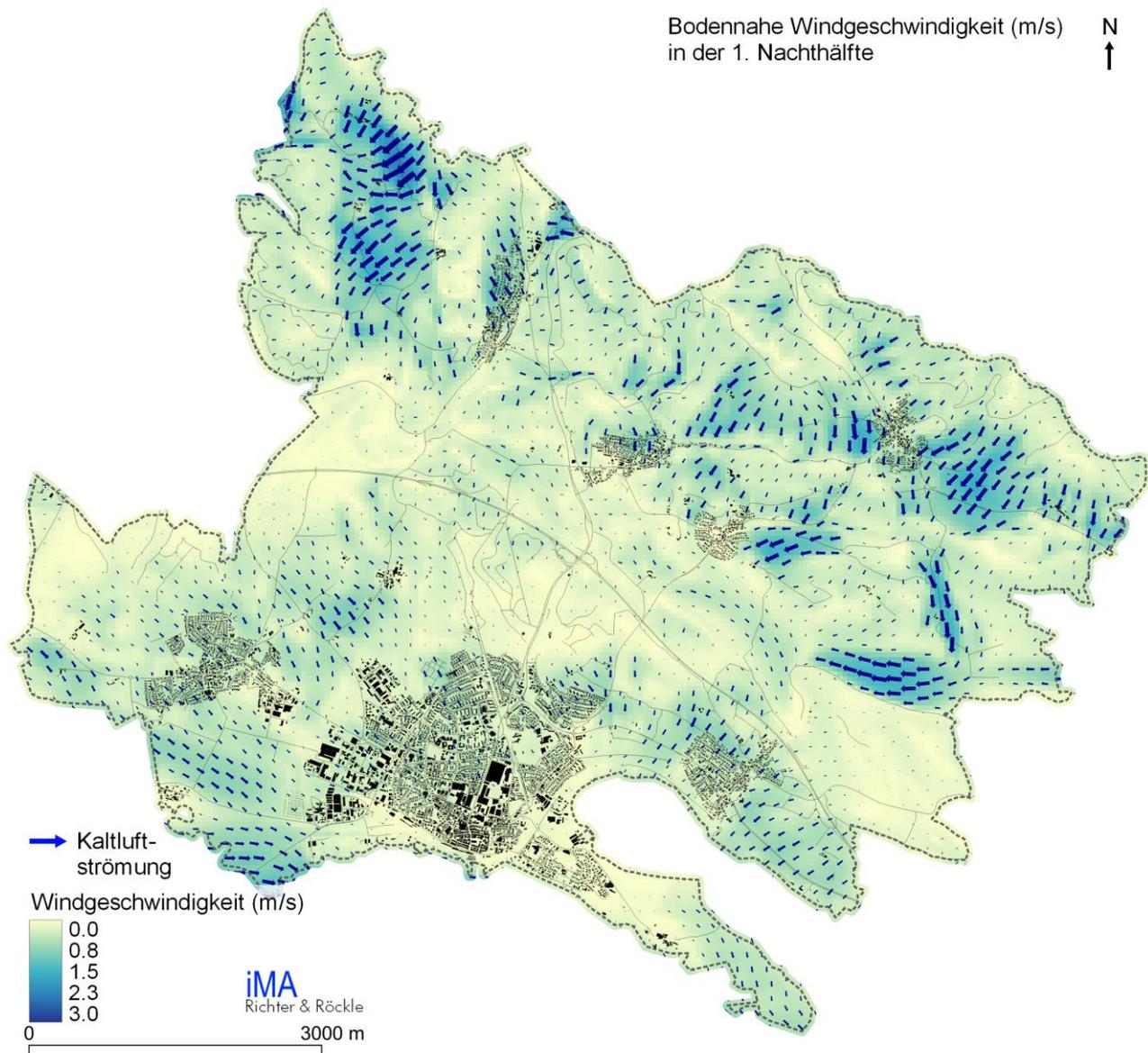


Abbildung 8-2: Bodennahe Durchlüftung (5 m ü. Grund) in Radolfzell durch abendliche Kaltluftabflüsse. (22 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

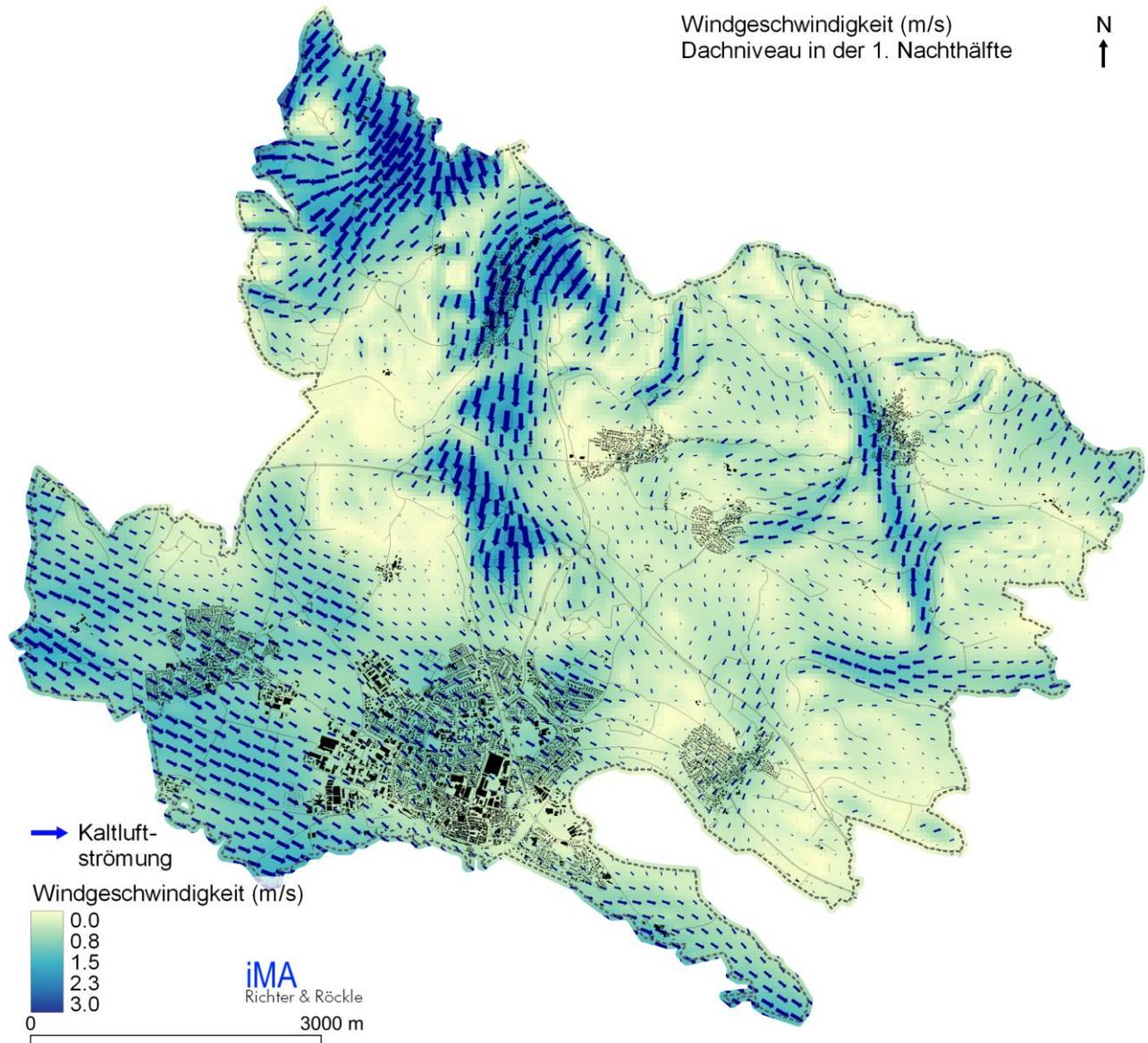


Abbildung 8-3: Durchlüftung im Überdachniveau (28 m ü. Grund). Abendsituation (22 Uhr).

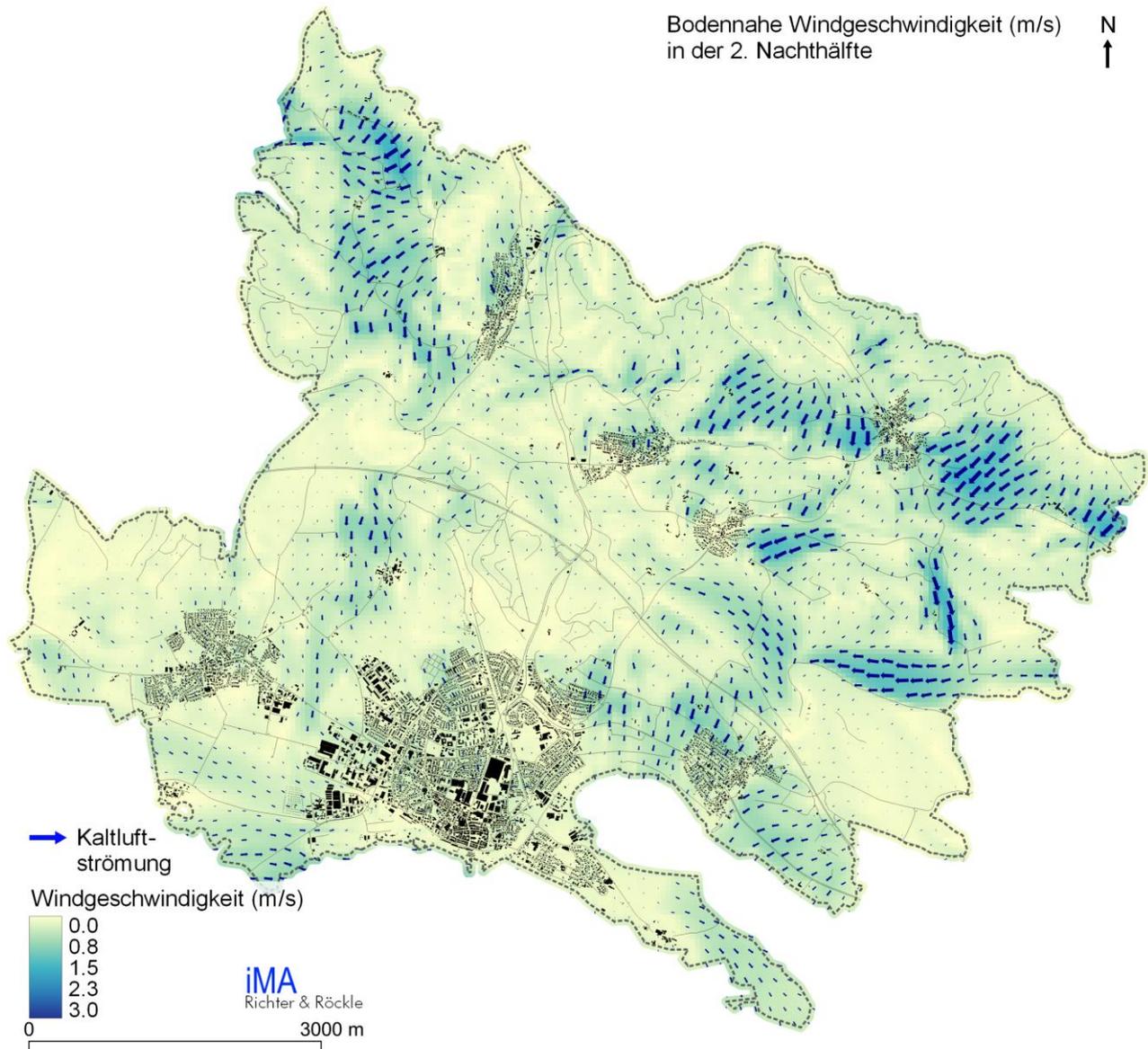


Abbildung 8-4: Bodennahe Durchlüftung (5 m ü. Grund) in Radolfzell durch Kaltluftabflüsse in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr). Die Pfeile zeigen an, in welche Richtung der Wind weht.

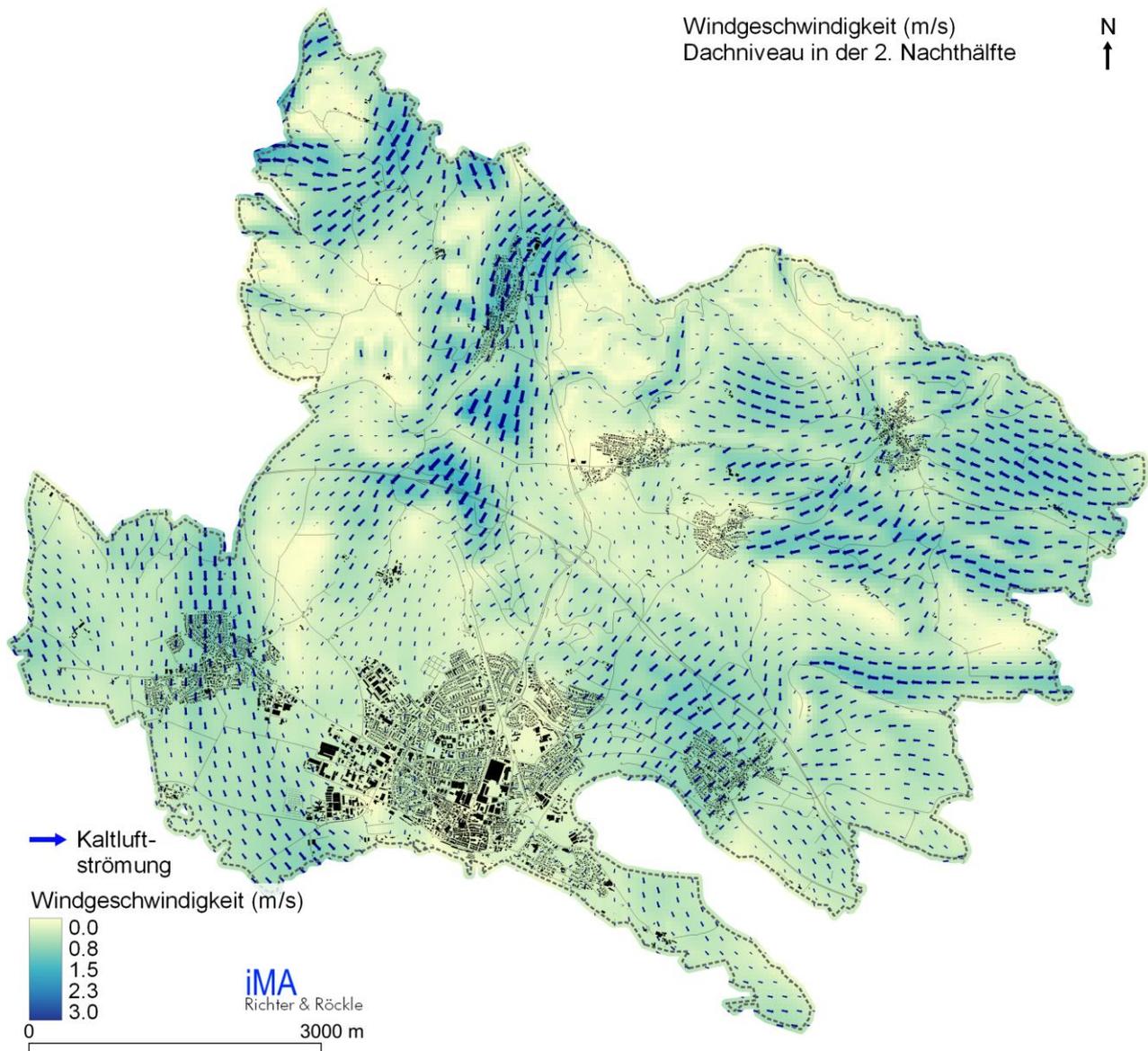


Abbildung 8-5: Durchlüftung im Überdachniveau (28 m ü. Grund) in der zweiten Nachthälfte (4 Uhr).

8.2 Thermische und Human-biometeorologische Verhältnisse

8.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist die Temperatur der bodennahen Atmosphäre, die in der Regel in 2 m über Grund strahlungsgeschützt (in einer Wetterhütte) gemessen wird. Die Lufttemperatur variiert im Lauf des Tages und der Jahreszeiten. Sie setzt sich aus advektiven Anteilen (Wärme der eingeflossenen Luftmasse) und der lokalen Erwärmung infolge des nutzungsabhängigen Strahlungshaushaltes zusammen.

In Abbildung 8-6 sind die Lufttemperaturverhältnisse in den Abend- und Nachtstunden eines Strahlungstages dargestellt. Während die Luft in höheren Lagen und Siedlungsbereichen noch recht warm ist, findet man tiefere Lufttemperaturen in Bereichen, in den sich Kaltluft sammelt oder fließt. Im Laufe der Nacht kühlt die Luft generell ab. Erhöhte Lufttemperaturen findet man noch in der Kernstadt und den Gewerbegebieten in Radolfzell.

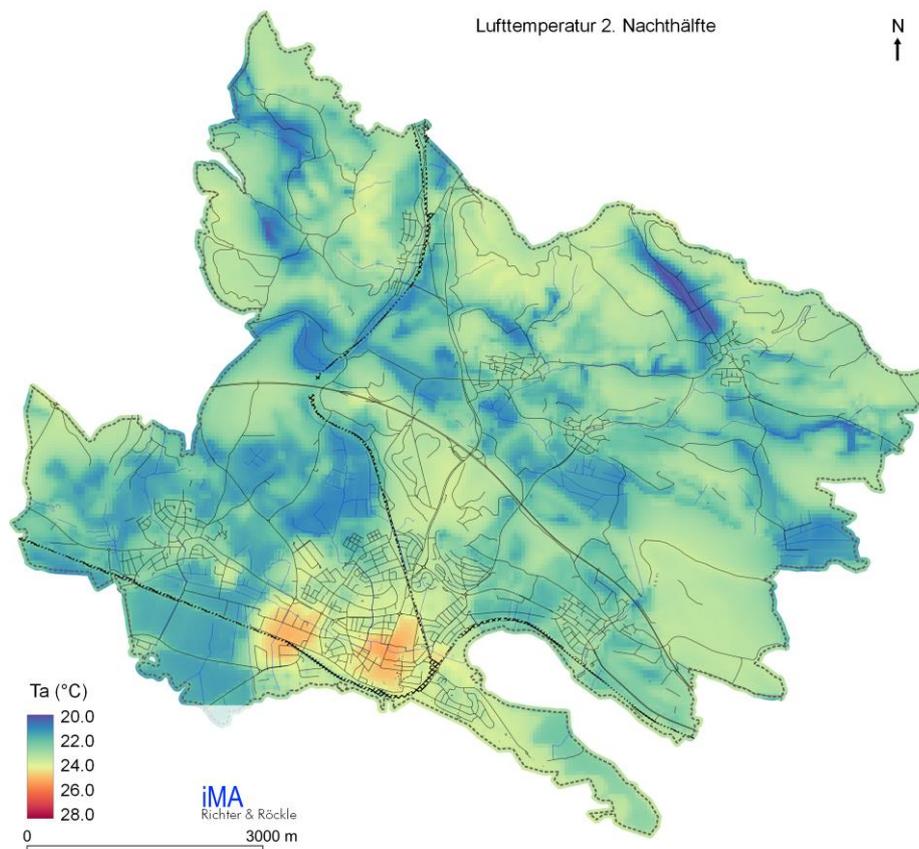
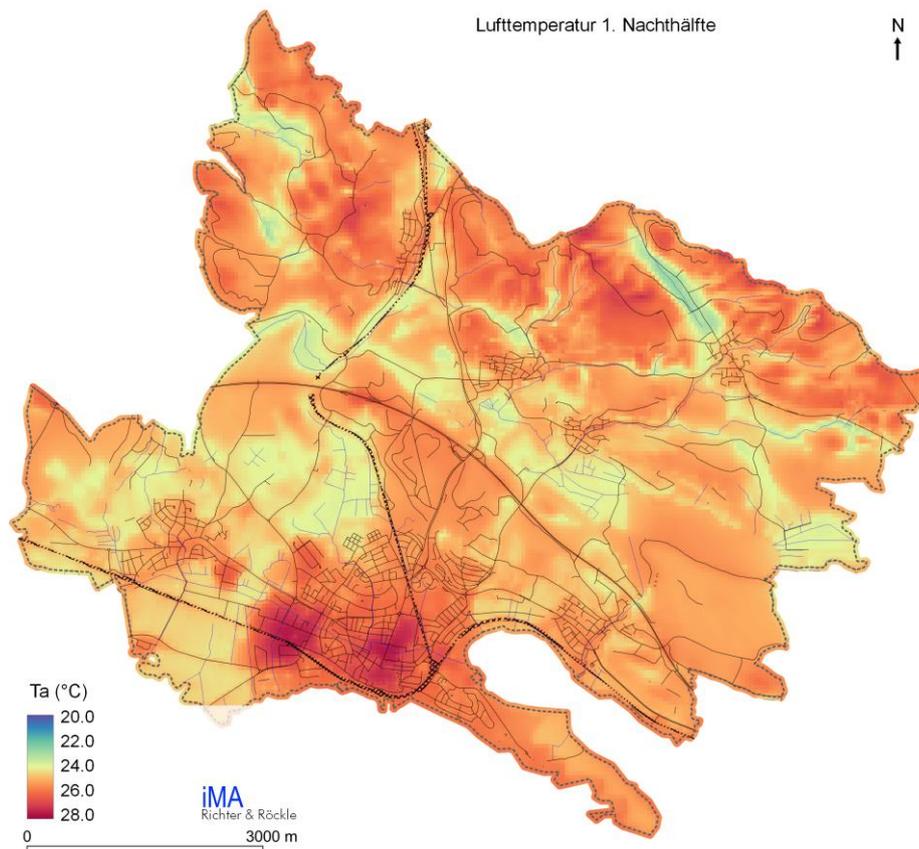


Abbildung 8-6: Lufttemperatur (°C) in der ersten (oben) und zweiten Nachthälfte (unten) in Radolfzell.

8.2.2 Human-biometeorologische Verhältnisse

Für die Bewertung der human-biometeorologischen Verhältnisse ist die Betrachtung der Lufttemperatur nur bedingt geeignet, da neben der Temperatur auch die Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf das Befinden haben. Als Indikator für die thermische Belastung wird daher die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) betrachtet (siehe Kapitel 7.2.3). In Abbildung 8-7 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 nordwestlich des Stadtzentrums und um Böhringen herum weisen eine deutlich höhere thermische Belastung auf als die verschatteten Waldgebiete südlich der Buchenseen oder der Homburg-Höhen. Daher spielen schattenspendende Hindernisse wie Gebäude und Bäume eine wesentliche Rolle.

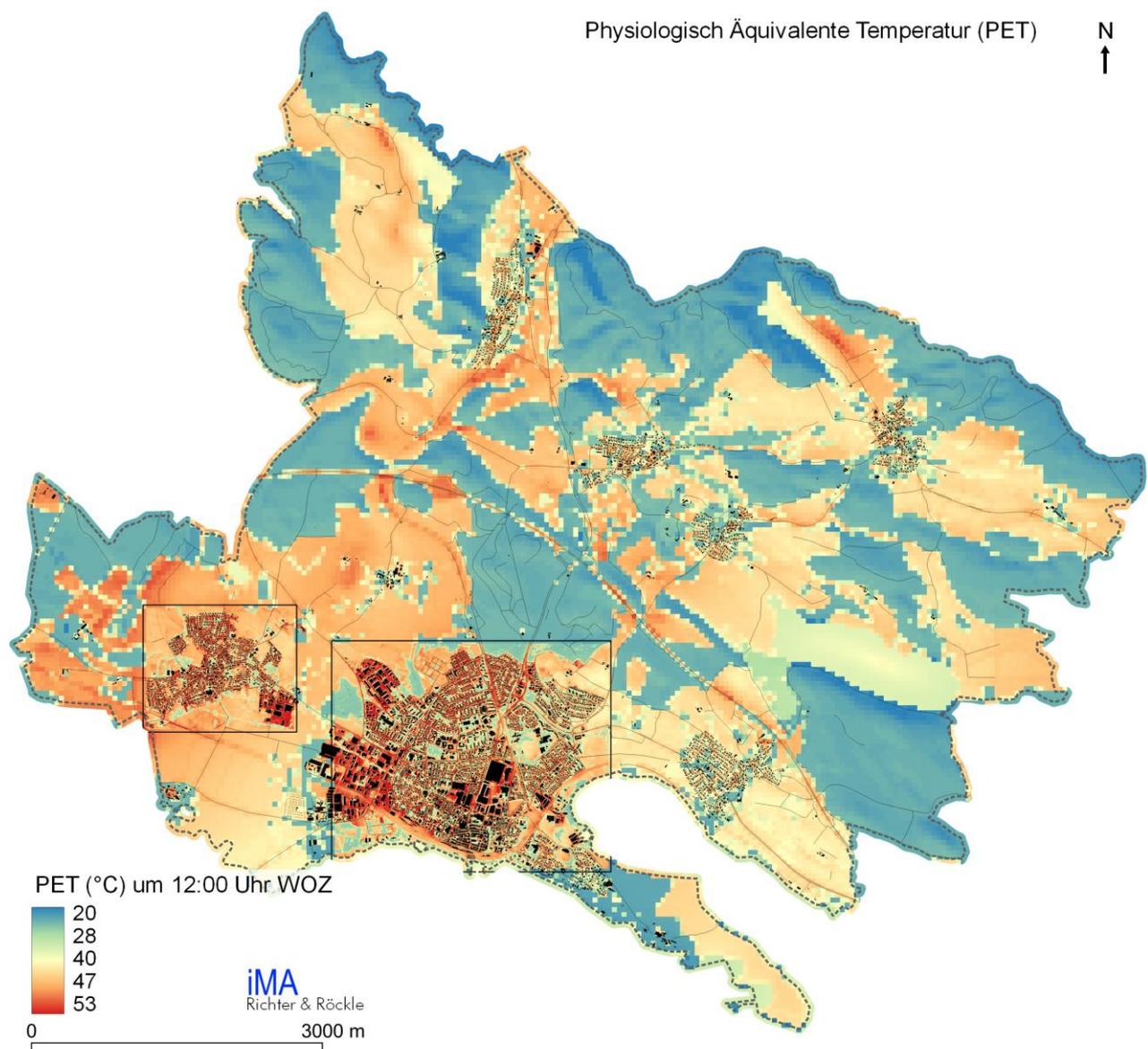


Abbildung 8-7: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund).

In durch Bäumen abgeschatteten Gebieten beträgt die PET weniger als 30 °C, so dass hier zwar „warme“ Bedingungen jedoch ohne starken Hitzestress vorzufinden sind (Bewertungsmaßstab siehe Tabelle 7-4). Ebenso sind Gebiete mit hohem Grünflächen- oder Gewässeranteil weniger

stark Hitze-belastet. Hier wird die Einstrahlung der Sonne in Verdunstungsenergie umgewandelt und die Oberflächen heizen sich im Vergleich zu versiegelten Flächen weniger stark auf.

In Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9 sind die thermischen Verhältnisse für das Stadtzentrum und Böhringen nochmals detaillierter dargestellt.

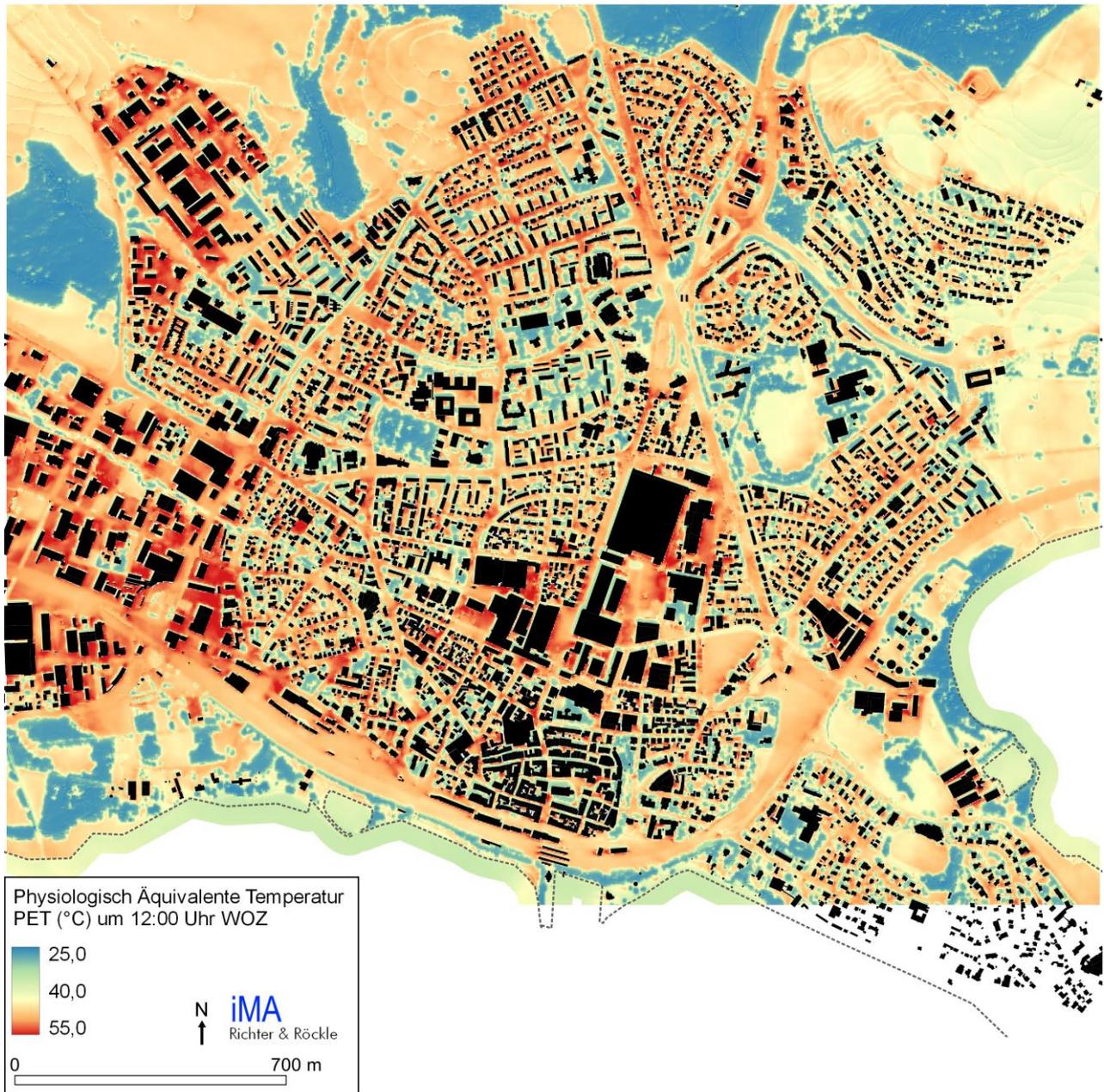


Abbildung 8-8 Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund) in der Innenstadt.

Besonders hohe Werte der PET treten in den Industrie- und Gewerbegebieten auf. Dabei treten besonders die Gewerbegebiete Lippenwiesen, Hundert Jauchert, Nord und Brühlwiesen-Kabisländer hervor, sowie die großen versiegelten Bereiche entlang der Schützenstraße. Auch Neubaugebiete weisen häufig hohe PET-Werte auf durch den Mangel an alten Baumbeständen und dadurch fehlender effektiver Abschattung. Hier ist beispielsweise das Neubaugebiet nördlich der Lindenallee zu nennen. Mangelnde Verschattung durch fehlende Straßenbäume und breite

Straßenzüge führen auch in älteren Wohnquartieren zu hoher Wärmebelastung. Als Beispiel sei hier der Norden Böhringens entlang des Blumenweges, Widerholdstraße und den angrenzenden Straßen erwähnt. Hingegen relativ geringe PET und somit nur warme Verhältnisse weisen Bereiche mit guter Durchgrünung auf. Hier sind besonders der alte Friedhof und die Wohngegend entlang der Ekkehardstraße als auch der Stadtgarten östlich der Innenstadt zu erwähnen.

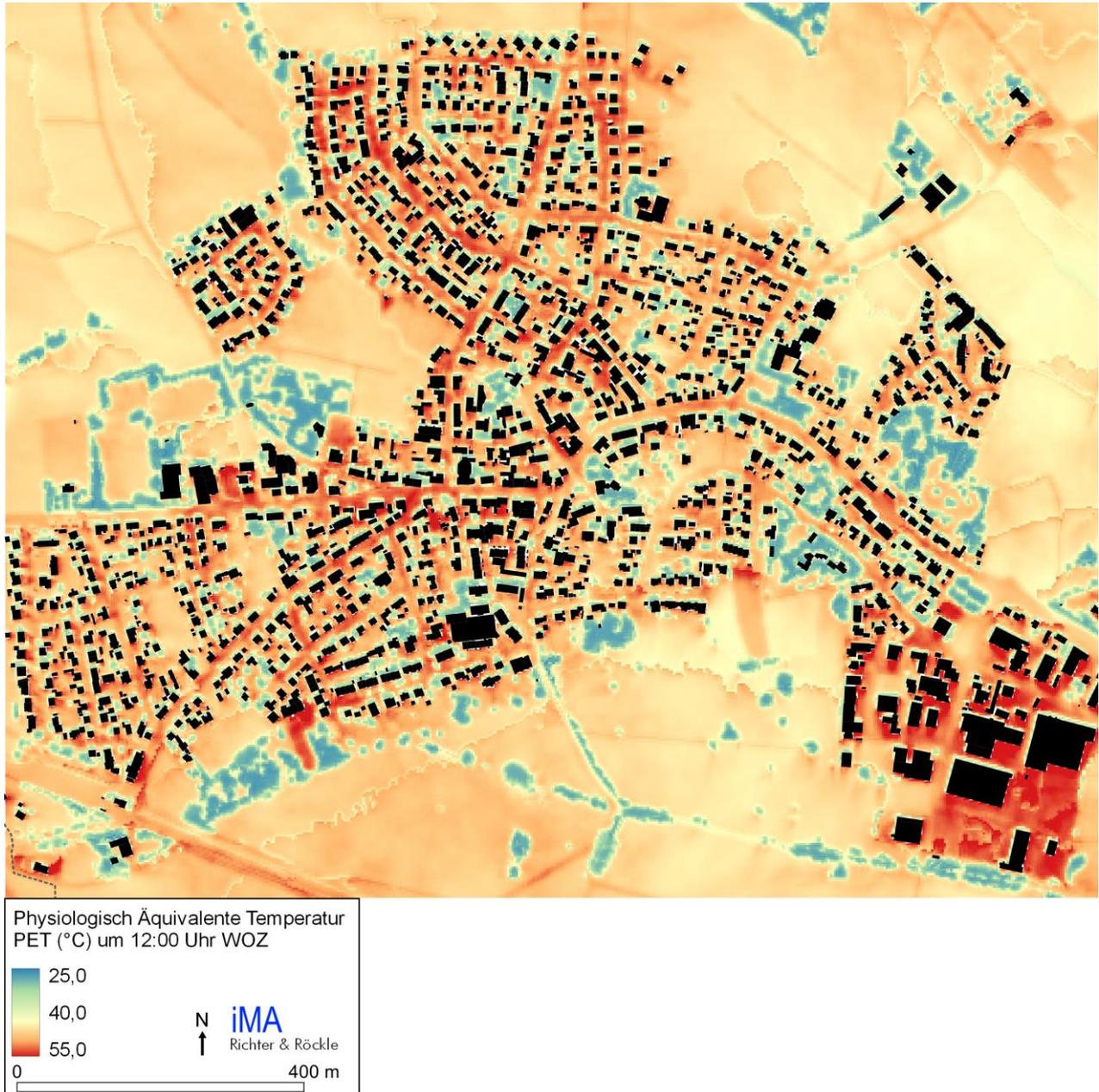


Abbildung 8-9 Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, in °C) zur Mittagszeit (2 m ü. Grund) in Böhringen.

8.2.3 Urbane Wärmeinsel

Als urbane Wärmeinsel (UHI) wird die Überwärmung des Siedlungsbereiches gegenüber dem Umland bezeichnet. Sie ist nachts stärker ausgeprägt als am Tag. Ursachen sind u.a. die unterschiedliche Strahlungsumsetzung zwischen Umland und Stadt, die Wärmespeicherung und die anthropogene Abwärme (Heizung, Kühlung, Kfz-Verkehr, Produktionsverfahren, ...).

Zur Berechnung der urbanen Wärmeinsel wurde eine Simulation angefertigt, in welcher die versiegelten und bebauten Flächen im Stadtgebiet zu 50% in Wald und Feld umwandelt wurden. Die Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen dem Bestand und dieser Simulation wird als urbane Wärmeinsel ausgewiesen.

Abbildung 8-10 zeigt die räumliche Ausdehnung der urbanen Wärmeinsel in Radolfzell und den angrenzenden Stadtteilen.

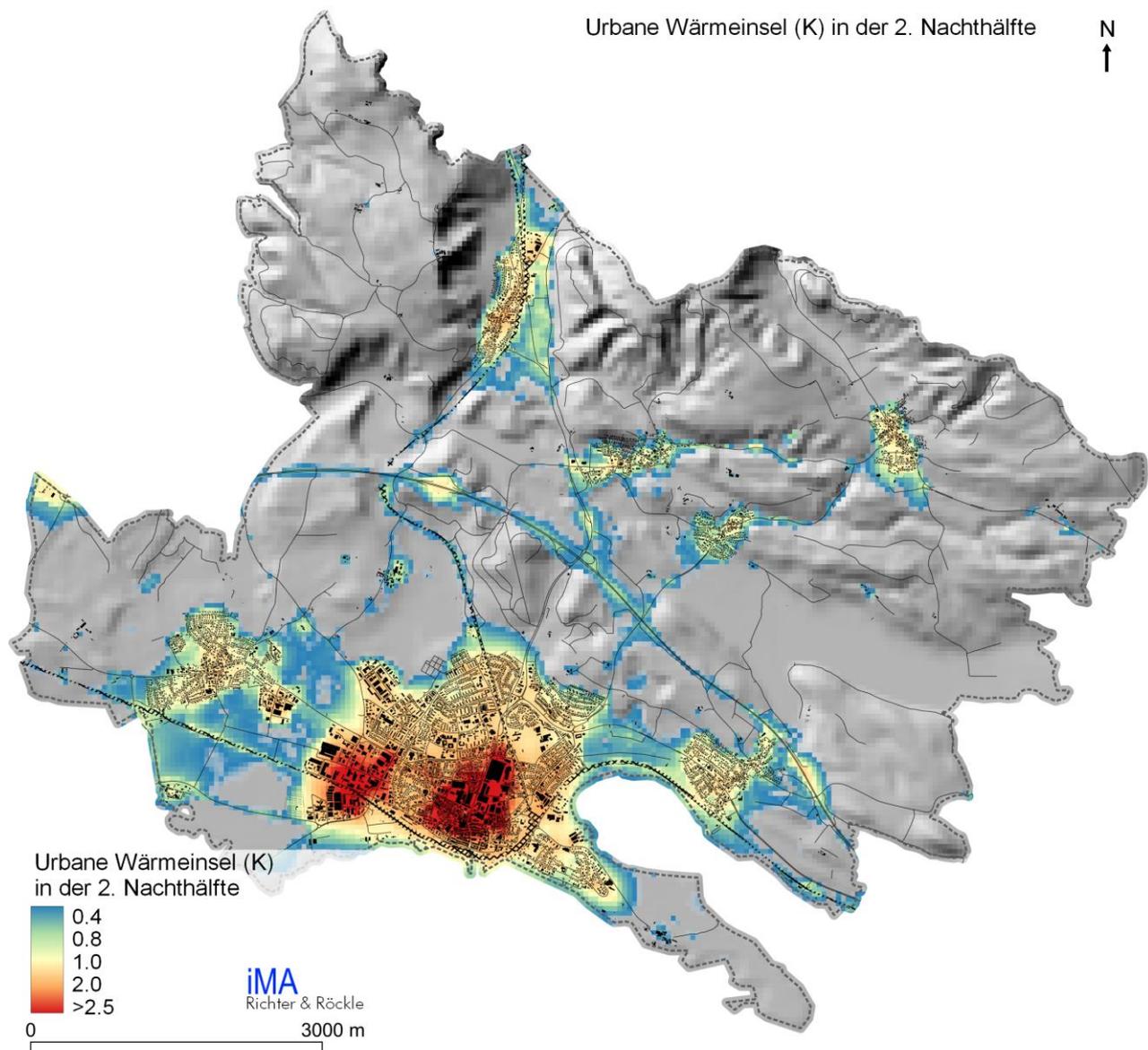


Abbildung 8-10: Urbane Wärmeinsel (K) in der zweiten Nachthälfte in Radolfzell.

Die urbane Wärmeinsel in Radolfzell ist am stärksten im dicht bebauten Stadtzentrum und im Bereich der Gewerbegebiete Lippenwiesen und Hundert Jauchert ausgeprägt. Weitere Bereiche mit einem deutlichen Wärmeinseleffekt sind das Gewerbegebiet Brühlwiesen-Kabisländer, das Ortszentrum von Böhringen, sowie der Bereich entlang der Hauptstraße in Stahringen. Markelfingen, Liggeringen, Möggingen und Güttingen weisen nur einen schwach ausgeprägten Wärmeinseleffekt im Zentrum der jeweiligen Ortschaften auf.

8.3 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. 50). 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 und
- 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 vorerst erhöhtem Spätfrostisiko. Dadurch entstehen zunehmende Schäden durch 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, können die Stadtbewohner tagsüber beschattete und begrünte Plätze aufsuchen. Auf Grünflächen ab einer Größe von mehr als 0,5 ha kann sich ein eigenes Kleinklima an heißen Sommertagen ausbilden. Ihr Erholungswert und ihre Aufenthaltsqualität können einen Beitrag zur Entlastung an heißen Sommertagen liefern. In Abbildung 8-11 ist der Bestand an größeren öffentlich zugänglichen Grün- und Freiflächen mit Erholungswert und Aufenthaltsqualität an heißen Sommertagen abgebildet.

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

Multifunktionale Parkanlagen

Beispiele:

- Stadtgarten
- Alter Friedhof
- Mettnaupark

Die großen multifunktionalen Parkanlagen in Radolfzell ab einer Fläche von ca. 5.000 m² bieten große innerstädtische Erholungsräume für Touristen und Familien. Sie sind von stadtweiter Bedeutung und für die Erholung und Regeneration in Hitzeperioden besonders wichtig. In Abhängigkeit zur Gestaltung und Beschaffenheit der Flächen wirken sie aufgrund ihrer Größe klimatisch günstig auf die angrenzenden Siedlungsbereiche. Als offene Grünflächen übernehmen sie die Funktion von Kaltluftentstehungsgebieten.

Kleine Park- und Grünanlagen, Spazierwege

Beispiele:

- Parkanlage an der Otto-Blesch-Straße
- Strandpromenade

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:

- Höristraße
- Ekkehardstraße

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 reduzieren die durch die Verkehrswege verursachte thermische Belastung, dienen der Filterung und Versickerung von Oberflächenwasser und stellen als linienhafte Grünstrukturen oft wichtige Elemente im Grünverbund dar.

Friedhöfe

Beispiele:

- Waldfriedhof
- Friedhof an der Friedenstraße, Böhringen

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:

- Amt für Kinder, Jugend und Familie
- Staatliches Hochbauamt

Grün- und Freiflächen an öffentlichen Gebäuden, vor allem an Schulen und Kindergärten bzw. Kindertagesstätten stellen in Radolfzell große innerstädtische Freiräume dar. Sie sind heute teilweise bereits wertvolle Grünflächen mit alten Baumbeständen und als solche stadtklimatisch und ökologisch von hoher Bedeutung. Eine stadtklimatische Wirksamkeit dieser Flächen ist gegeben.

Freibäder und Badeplätze

Beispiele:

- Herzenbad
- Seebad Mettnau

Die Nachfrage nach Freibädern wird mit dem fortschreitenden Klimawandel zunehmen.

Spielplätze

Beispiele:

- Spielplatz Lindenallee
- Wasserspielplatz an der Karl-Wolf-Straße

Für Familien sind Kinderspielplätze besonders wichtige städtische Freiflächen, welche klimatische, ökologische und erholungsrelevante Funktionen übernehmen können. Spielplätze wurden nicht in ihrer Gesamtheit analysiert.

Sportflächen

Beispiele:

- Unterseestadion
- Mettnaustadion

Sportplätze stellen zweckgebundene Grünflächen dar, welche sich tagsüber stark aufheizen und nachts aber auch ausreichend abkühlen. Deshalb sind sie für die Erholung in Hitzeperioden nur eingeschränkt nutzbar.

Kleingartenanlagen

Beispiele:

- Kleingartenanlage am Wiesenbächle

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. Besonders alte Baumbestände sind sowohl auf öffentlichen als auch auf privaten Grundstücken unter Schutz zu stellen. Schottergärten heizen sich wie vollversiegelte Flächen tagsüber stark auf und geben die Wärme abends wieder an die Umgebung ab und tragen somit zu einer höheren nächtlichen Lufttemperatur bei.

Grünflächen sowie Naherholungsgebiete sollen für die Menschen gut erreichbar sein. Dies hängt nicht nur von der Distanz zum Wohnort, sondern auch von dazwischen liegenden Barrieren ab. Strukturen mit Barrierewirkung sowie die Versorgung von Parkanlagen und Naherholungsgebiete, die in einem Umkreis von 250 m und 500 m um die jeweiligen Flächen liegen, sind in der grafischen Darstellung der Analyse in Abbildung 8-11 dargestellt.

Für die vorab beschriebenen multifunktionalen Parkanlagen und Naherholungsgebiete wurden daher die Abstände in Luftlinie berechnet. Eine Entfernung von der Bebauung zu diesen Flächen bis 250 m (bis 5 min Fußweg) wird als „sehr gute Klimavielfalt“ und bis 500 m (bis 10 min Fußweg) „Klimavielfalt vorhanden“ gewertet (vgl. Schumacher et al. 2016, Richter et al. 2016, Mayer 1989). Grundstücke mit einem großen Gartenanteil bieten ihren Bewohnern bereits eine gute Erholungsmöglichkeit und weisen nur einen geringen Bedarf zusätzlichem Stadtgrün auf. Daher wurden in der Bedarfsanalyse lediglich solche Grundstücke berücksichtigt, welche von mehr fünf Einwohnern bewohnt werden und weniger als 60 m² unversiegelte Fläche pro Einwohner aufweisen. Spazierwege, zum Beispiel rund um Reute oder im Aachried, weisen aufgrund fehlender Verschattung nur eine geringe Aufenthaltsqualität im Hochsommer auf. Daher wurden diese bei der Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse liefern ein gutes Bild über die Versorgung mit Grünflächen auf gesamtstädtischer Ebene. Etwa 93 % der Einwohner der Stadt Radolfzell mit Bedarf an öffentlichen Grünanlagen können innerhalb von 500 m Luftlinie öffentliche Parkanlagen oder Waldgebiete aufsuchen. Für einen Anteil von 82 % der Einwohner befinden sich Parkanlagen und Waldgebiete bereits innerhalb von 250 m Luftlinie.

Die Innenstadt liegt im Bereich mit kurzer bis mittlerer Erreichbarkeit von Grünflächen, der jedoch aufgrund der Barrierewirkung der Bahngleise zum Seeufer hin eingeschränkt ist. Aufgrund der im Stadtkern besonders ausgeprägten Wärmebelastung sind die positiven Beiträge von Grünflächen besonders wichtig. In Böhringen östlich der Fritz-von-Engelberg-Straße und des Föhrenwegs liegen öffentliche Grünanlagen außerhalb der fußläufigen Erreichbarkeit der Einwohner (Entfernung größer 500 m).

Neben den Parkflächen und Wäldern können auch Streuobstwiesen sowie Wander- und Radwege durch landwirtschaftliche Flächen Naherholungsgebiete für die Bürger darstellen, sofern Verschattung und Sitzmöglichkeiten gegeben sind. Diese können zur Minderung des tatsächlichen Bedarfs an öffentlichen Grünanlagen führen. Die sich überwiegend in privater Hand befindlichen Streuobstwiesen werden jedoch bei der Klimavielfaltsanalyse nicht berücksichtigt.

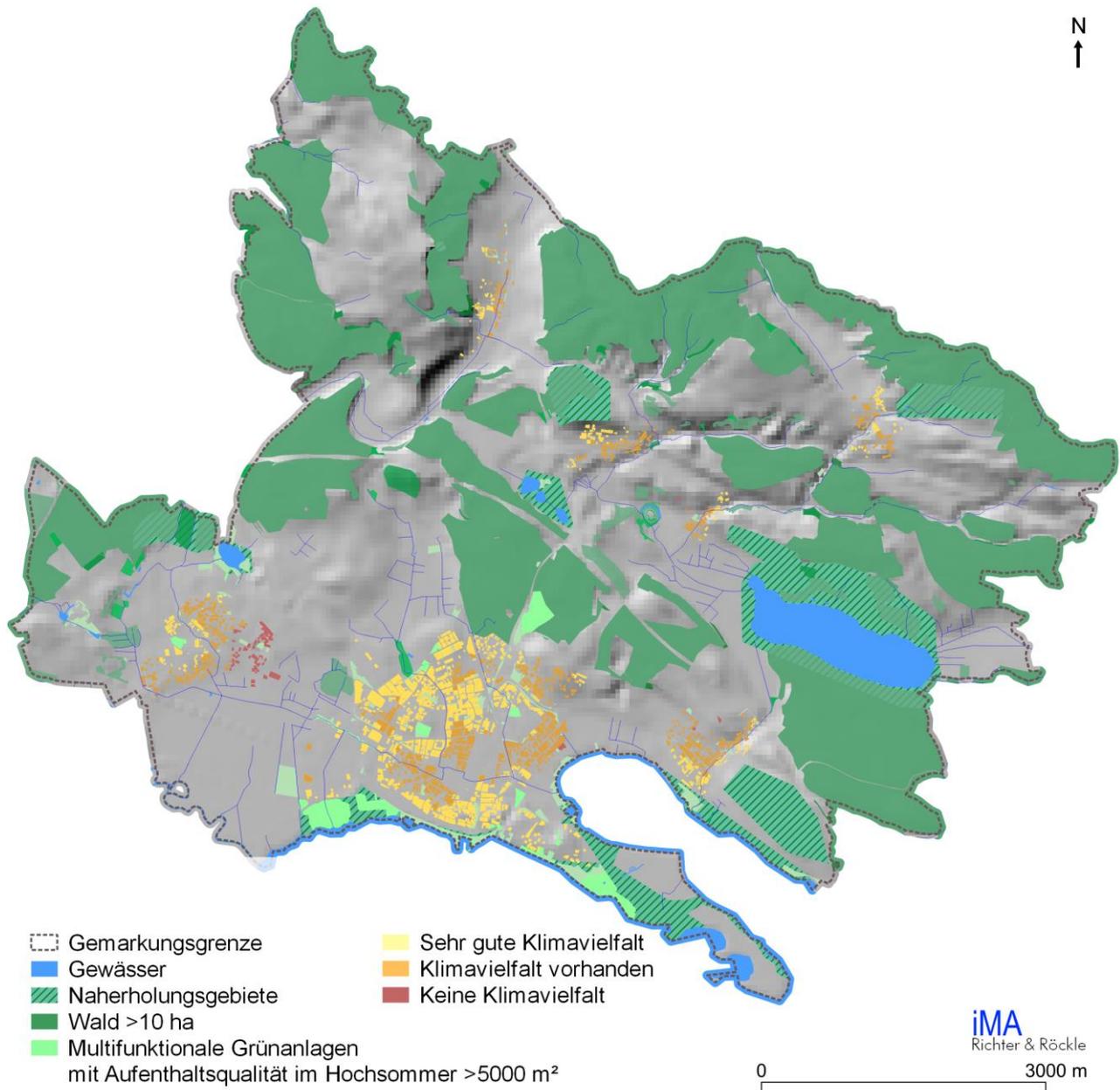


Abbildung 8-11: Versorgung der Siedlungsräume mit multifunktionalen Parkanlagen und Naherholungs-, sowie Waldgebieten hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit.

8.4 Sensitivität

Zur Ermittlung der Sensitivität (Empfindlichkeit) der Siedlungsbereiche wird die Einwohnerdichte für die Flächen von 50 m x 50 m berechnet. Bereiche mit hoher Einwohnerdichte sind empfindlicher gegenüber Nutzungsänderungen; sie weisen somit eine hohe Sensitivität auf.

In Abbildung 8-12 ist die Empfindlichkeit von Radolfzell zu sehen. Die höchste Empfindlichkeit tritt innerhalb der Altstadt und entlang der Moengalstraße auf sowie vereinzelt an mehreren Stellen innerhalb der Kernstadt. Böhringen, Stahringen und Markelfingen weisen ebenfalls Bereiche mit einer sehr hohen Empfindlichkeit auf. Die Ortschaften Güttingen, Möggingen und Liggeringen weisen nur eine geringe und zu einem kleinen Anteil eine mittlere Empfindlichkeit auf.

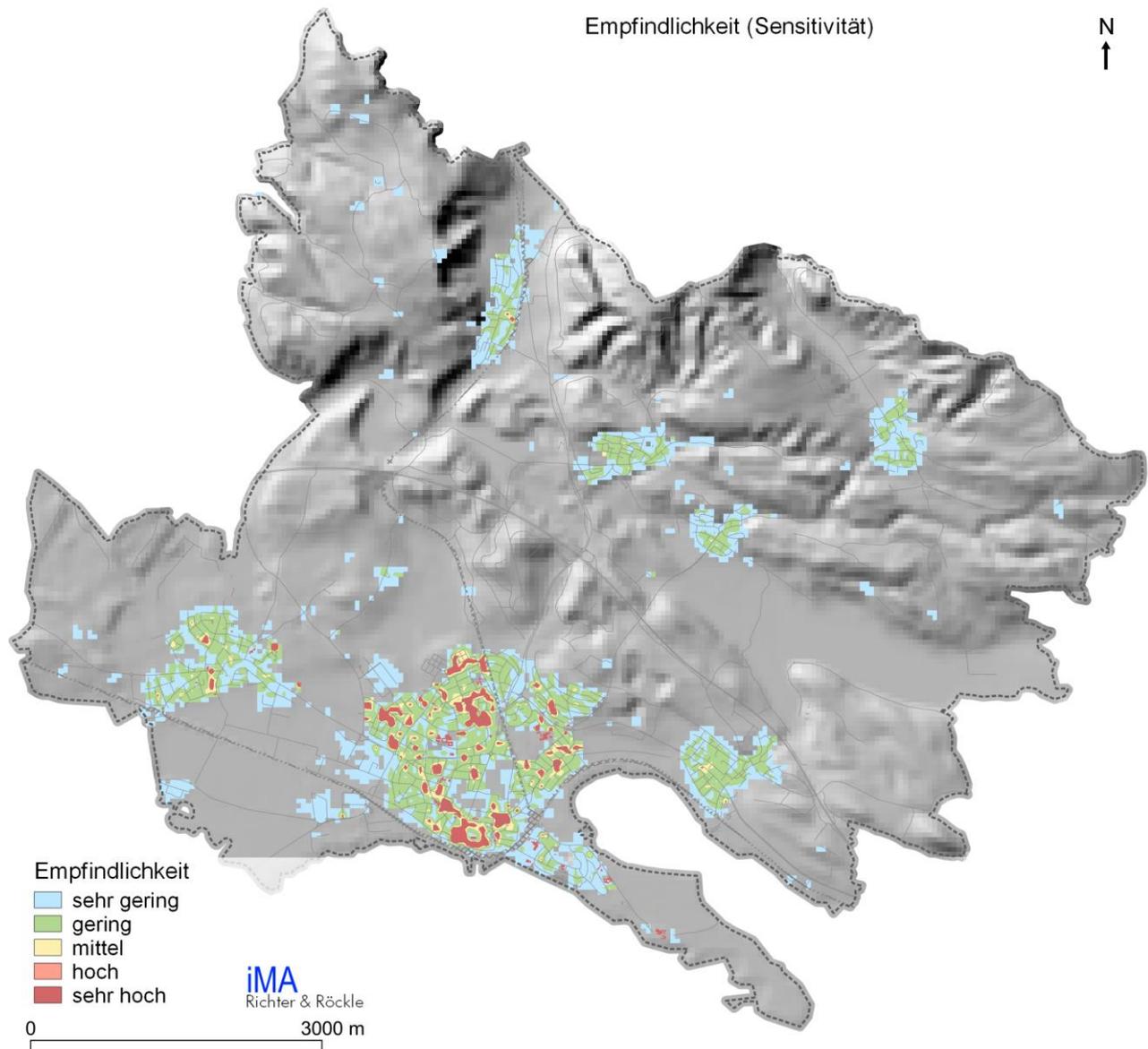


Abbildung 8-12: Empfindlichkeit pro 50 m x 50 m-Fläche (entspricht der Einwohnerdichte).

Besonders junge, alte und kranke Personen reagieren empfindlich auf Hitzestress und weisen dementsprechend hohe Mortalitäts- und Morbiditätsraten während Hitzewellen auf (Grize et al. 2003, Robine et al. 2008). In Abbildung 8-13 sind Einrichtungen dargestellt, welche besonders schützenswert in Bezug auf Hitzestress sind. Während Seniorenheime bereits über die Empfindlichkeit (über die Einwohnerdichte) berücksichtigt werden, müssen Krankenhäuser, Sanatorien und Kindertagesstätten gesondert berücksichtigt werden.

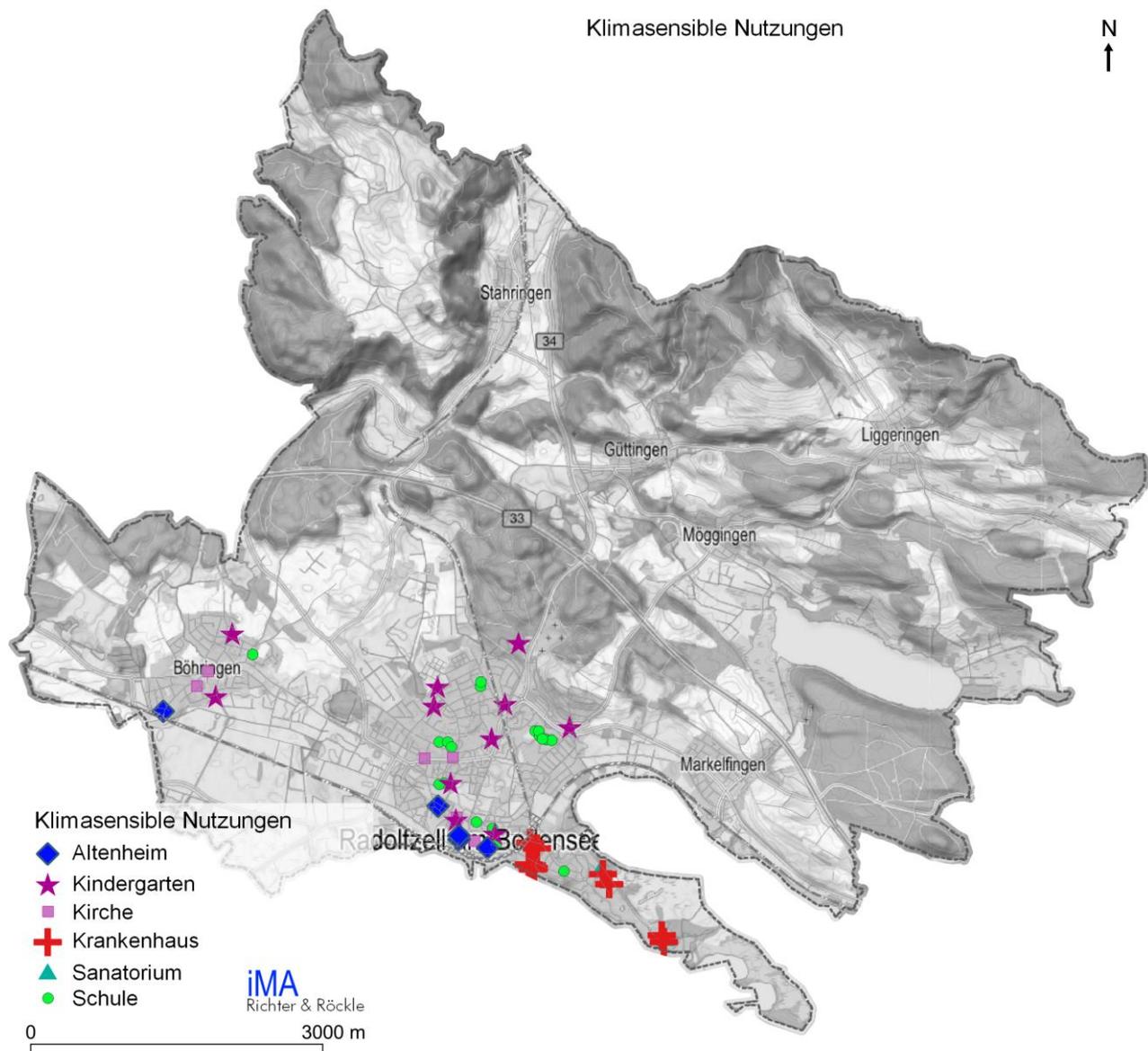


Abbildung 8-13: Vor Hitzestress schützenswerte Einrichtungen, wie z.B. Seniorenheime, Krankenhäuser, Kindertagesstätten.

8.5 Betroffenheit

Die Betroffenheit ergibt sich aus der Überlagerung der Empfindlichkeit (Abbildung 8-12) mit der thermischen Belastung (Abbildung 8-14). Sie ist in Abbildung 8-15 dargestellt. Die Berechnung der thermischen Betroffenheit wird im Anhang A1.2.3 (Seite 77) detailliert beschrieben.

Die thermische Belastung (Abbildung 8-14) wird auf Grundlage der human-biometeorologischen Belastung tagsüber, der Intensität der nächtlichen urbanen Wärmeinsel und der Klimavielfalt bewertet. Die thermische Belastung ist innerhalb der gesamte Kernstadt deutlich ausgeprägt. Weitere Bereiche mit sehr hoher thermischer Belastung finden sich im Zentrum von Böhringen und im östlich von Böhringen liegenden Gewerbegebiet. Stahringen weist entlang der Hauptstraße ebenfalls eine sehr hohe thermische Belastung auf. Gleiches gilt für die Dettelbachstraße in Liggeringen, dem Bereich westlich des Kreisels an der Badener Straße in Güttingen, der Bereich um die Torkelgasse in Möggingen, sowie in Markelfingen zwischen der Oberdorfstraße und Fichtenstraße und entlang der

Straße „An der Kindswiese“. Die Waldflächen und landwirtschaftlichen Flächen in Radolfzell weisen größtenteils nur eine geringe, teilweise eine mittlere thermische Belastung auf.

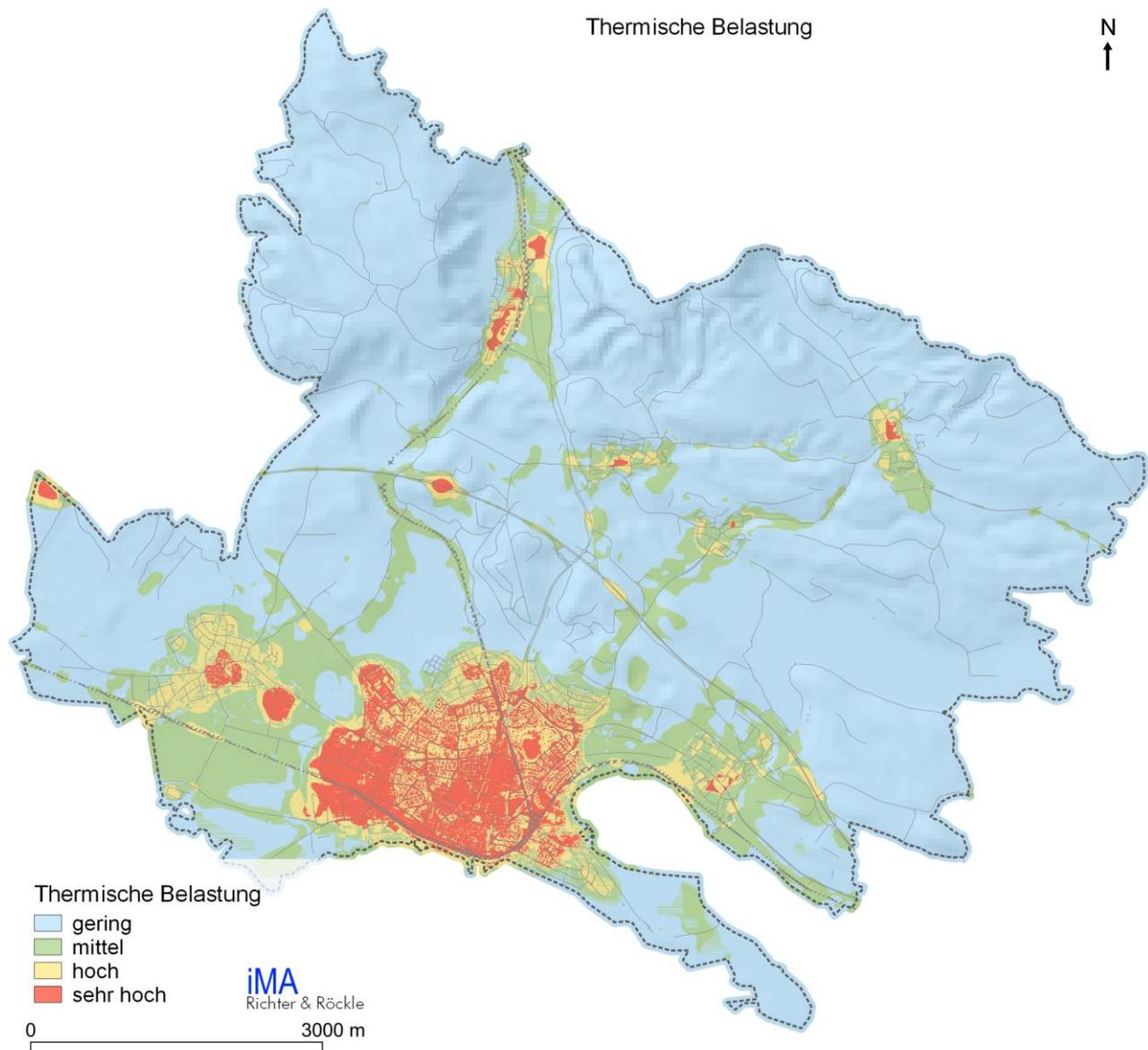


Abbildung 8-14: Thermische Belastung auf den Siedlungsflächen. Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Betroffenheit sind die urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt. Außerhalb der Modellgebiete der mikroskaligen Simulationen wurde auf die mesoskaligen Simulationsergebnisse zurückgegriffen.

Durch die Überlagerung der sehr hohen thermischen Belastung und der sehr hohen Empfindlichkeit an vielen Stellen in der Kernstadt ergibt sich eine sehr hohe thermische Betroffenheit an mehreren Stellen (siehe Abbildung 8-15), z.B. im Bereich der Altstadt, entlang der Bismarckstraße, der Franz-Schmal-Straße, des Reutesteigs und der Ostlandstraße. Weitere Bereiche sind der Abbildung 8-15 zu entnehmen. In Böhringen tritt eine sehr hohe thermische Betroffenheit im Bereich des Achwegs und der Singener Straße auf, sowie nordwestlich der Sankt-Nikolaus-Straße. In Stahringen treten Bereiche mit hoher thermischer Betroffenheit entlang der Hauptstraße auf. Kleinere Gebiete mit hoher thermischer Betroffenheit weisen auch die Ortschaften Liggeringen, Güttingen, Möggingen

und Markelfingen auf. Die generelle thermische Betroffenheit ist in diesen Ortschaften allerdings größtenteils als gering einzustufen.

In den meisten Ortsteilen treten Bereiche mit mittlerer bis hoher Betroffenheit im jeweiligen Kerngebiet auf. Hier kommen hohe Einwohnerdichte und geringe Durchlüftung zusammen. Stadtrandbereiche sind durch die geringere Bebauungsdichte und oft bessere Frischluftversorgung durch das Umland in der Regel deutlich weniger betroffen.

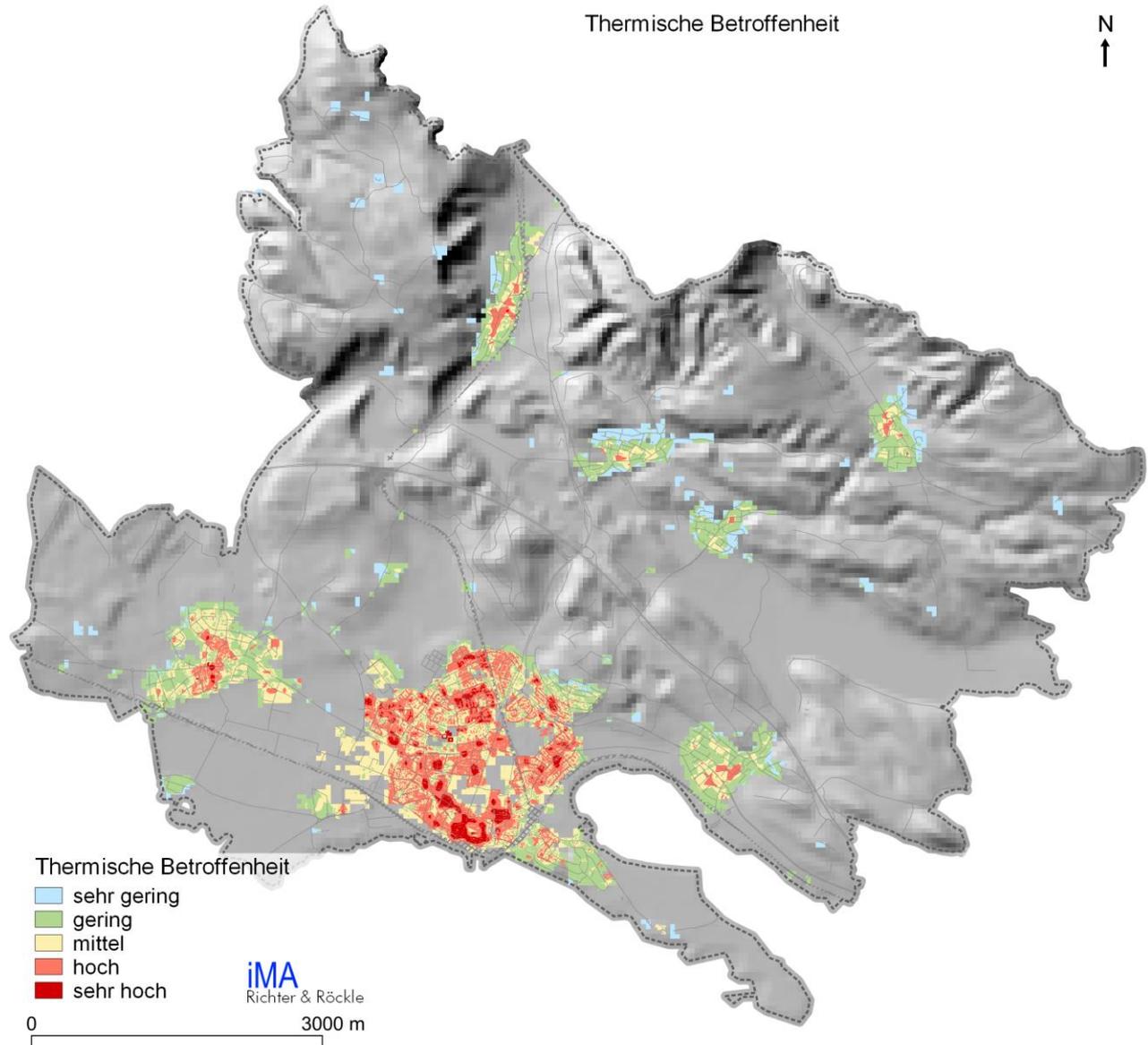


Abbildung 8-15: Thermische Betroffenheit (Vulnerabilität). Eingangsgrößen für die Berechnung der thermischen Betroffenheit sind die Empfindlichkeit, urbane Wärmeinsel, PET und die Klimavielfalt.

9 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte (Abbildung 9-1), 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, bei denen sich die lokalen Klimate ausprägen können. Die gezeigten Luftleitbahnen wurden auf Grundlage der langjährigen Windverhältnisse ermittelt und beziehen somit alle auftretenden Wetterlagen mit ein.

Die Kartenerstellung basiert auf der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1:2015-09. Die Richtlinie empfiehlt, klimarelevante Flächen, sogenannte Klimatope, auszuweisen. **Klimatope** bezeichnen räumliche Einheiten mit ähnlichen mikroklimatischen Strukturen. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Modellierungen bilden neben der Realnutzung die Grundlage für die Klimafunktionskarte. Durch den permanenten Luft- und Temperatúraustausch in der Atmosphäre sind die Übergänge zwischen den Klimatopen fließend. Die „scharfen“ Abgrenzungen zwischen den Klimatopen, wie sie in der Klimafunktionskarte dargestellt werden, sind daher mehr als „Grenzsäume“ zu sehen.

Die in Abbildung 9-1 gezeigte Strömung bezieht sich auf das Überdachniveau in der zweiten Nachthälfte. Die Beschreibung der Klimatope und ihrer klimatischen Eigenschaften ist in Anhang A2 aufgelistet.

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

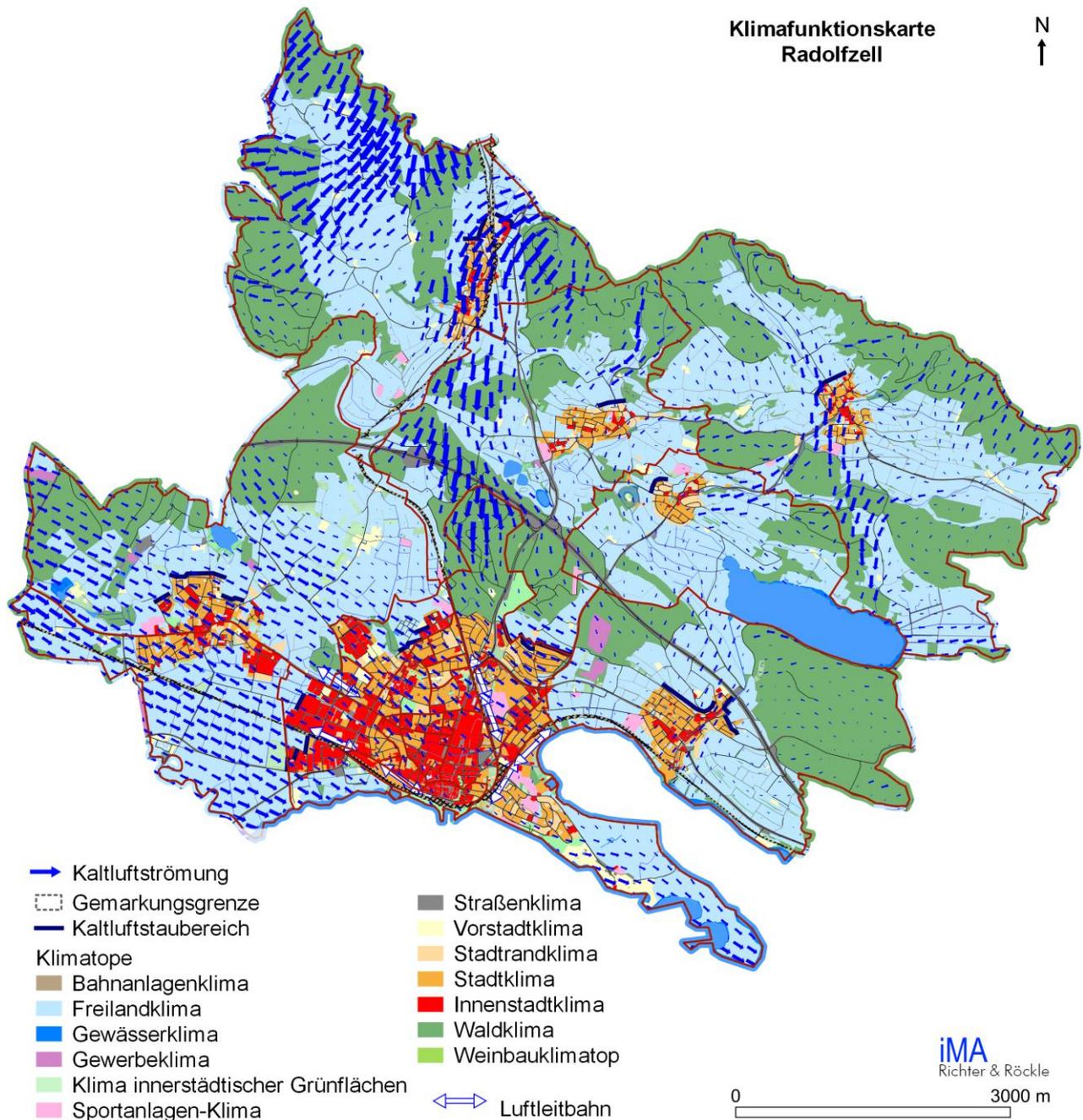


Abbildung 9-1: Klimafunktionskarte zeigt die Klimatope, die Kaltluftströmung im bodennahen Bereich um 22 Uhr und die potentiellen Luftleitbahnen.

10 Planungshinweiskarte

Während die Klimafunktionskarte eine weitgehend wertfreie Darstellung der klimatischen und luft-hygienischen 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 10-1 werden die Siedlungsflächen im Hinblick auf die thermische Betroffenheit (Vulnerabilität) unter Berücksichtigung der thermischen Belastung und der Sensitivität (Einwohnerdichte) bewertet. Die Siedlungsbereiche sind je nach **thermischer Betroffenheit** eingefärbt. Je dunkler die Farbe, desto höher ist dort die Belastung. In den stark belasteten Bereichen ist es von Vorteil, die Wärmebelastung nicht weiter zu erhöhen und stattdessen Minderungsmaßnahmen anzustreben. Dies kann in Form von Ausgleichsflächen erfolgen, die stärker begrünt werden. 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 zwar möglich, es empfiehlt sich aber, sie durch Schaffung von Ausgleichsflächen zu kompensieren.

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. Einzelne Gebäude führen meist zu keinen wesentlichen Veränderungen der Strömungsverhältnisse, wenn sie die Höhe der angrenzenden oder umliegenden Bebauung nicht übersteigen.

Die **innerörtlichen klimarelevanten Grünflächen** sind grün eingefärbt. Sie haben eine hohe Bedeutung als Erholungsflächen (Klimavielfalt) bzw. Ausgleichsflächen für die Nachbarschaft.

In Bereichen mit geringer Rauigkeit (z.B. Wiesen, Ackerland) sind die möglichen bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten höher als in rauem Gelände (z.B. Siedlung, Wald). Hindernisse erzeugen Turbulenz 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.

Luftleitbahnen beschreiben Flächen, über denen potentielle Kaltluftströmungen eine bodennahe Entlastung bewirken können. 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, 50 m breit und hindernisfrei sein.

Die Bedeutung der Luftleitbahnen hängt von deren Ausrichtung in Bezug auf die vorherrschenden Windrichtungen ab und ob am Ende der Luftleitbahn thermisch belastete Siedlungsbereiche liegen. So stellt z.B. die Bahnlinie im südlichen Stadtgebiet eine Luftleitbahn für die nordwestliche Strömung dar. Hier kann in den Abend- und Nachtstunden der Kaltluftstrom aus westlicher bis nordwestlicher Richtung die südliche Peripherie der Kernstadt bodennah belüften.

Aber auch Kaltluftströmungen, welche sich im Überdachniveau fortsetzen und in weiter stadteinwärts liegende Bereiche reichen, tragen zur Entlastung bei.

Für die Durchlüftung von Radolfzell, insbesondere für die Kernstadt sowie für Böhringen und Reute, während autochthoner Wetterlagen sind die Strömungen aus nordwestlicher Richtung von großer Bedeutung. Ebenfalls tritt eine markante Nordströmung entlang der Stahringer Senke auf, die besonders für Stahringen von Bedeutung ist und in der Nacht bis zur Kernstadt reicht. Die in Nord-Süd Richtung verlaufende Bahntrasse dient für diese Strömung allerdings aufgrund der geringen Breite nur bedingt als Luftleitbahn. Daher ist die Nordostströmung im Überdachniveau am ausgeprägtesten.

Für die Durchlüftung von Güttingen, Möggingen, Liggeringen und Markelfingen sind die Kaltluftabflüsse von den umliegenden Hügeln des Bodanrückhügelland und der Bodanrück-Homburg-Höhen von Bedeutung. Die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen dienen als wichtige Kaltluftproduktionsgebiete. Die Flächen auf der dem Wind zugewandten Seite von den Siedlungsgebieten tragen besonders zur Belüftung bei, da sie aufgrund der relativ geringen Rauigkeit zu einer Intensivierung der belüftungsrelevanten Strömung führen.

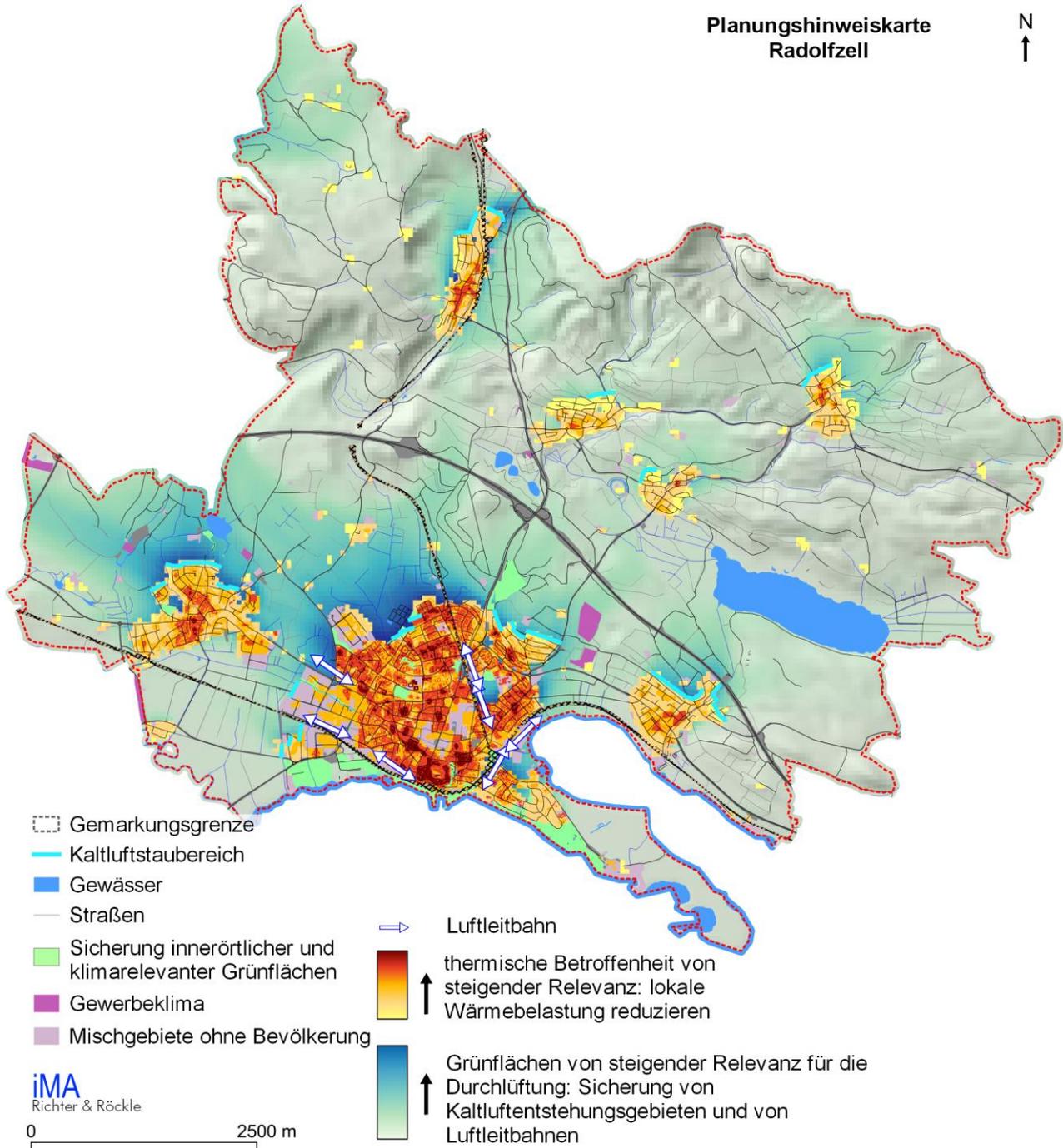


Abbildung 10-1: Planungshinweiskarte für die Radolfzell.

11 Handlungsstrategien für die Stadtplanung

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 oder der Regionalen Klimaanalyse der Region Bodensee-Oberschwaben (REKLIBO).

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.

11.1 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. autochthone Wetterlage) 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 oder zur Verbesserung des Luftaustauschs bei (vgl. hierzu auch Abbildung 11-1):

- Freihalten von Kaltluftproduktionsflächen und Luftleitbahnen von geschlossener Bebauung oder riegelbildenden Hindernissen,
- Schaffung von Grünzügen innerhalb der Siedlungskörper als Belüftungsschneisen und Luftleitbahnen,
- Begrenzung von Gebäudehöhen, um das Überdachniveau niedrig zu halten,
- Bau von strömungsdurchlässigen Siedlungsbereichen mit Luftleitbahnen,
- Offene Gestaltung von Siedlungsrändern für eine möglichst hohe Eindringtiefe,
- Ausrichtung von Straßenzügen längs zur vorherrschenden, für den Luftaustausch relevanten Windrichtung.

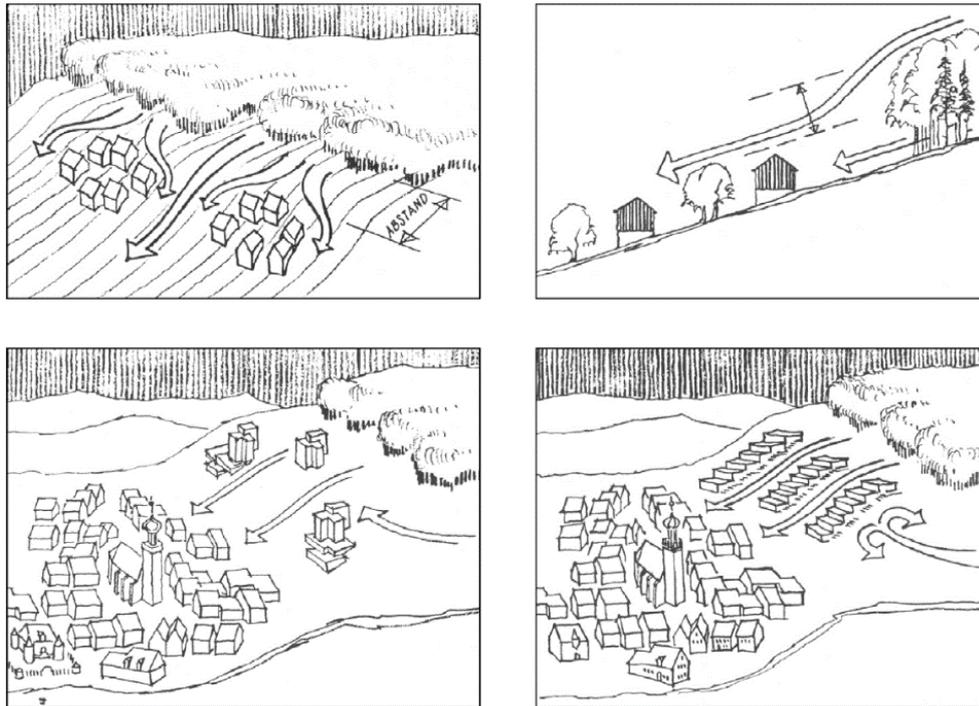


Abbildung 11-1: Empfehlungen zur Bebauung von Hanglagen aus der Städtebaulichen Klimafibel: Einhaltung eines möglichst großen Abstands von Waldrändern (oben links), Unterschreitung der Gebäudehöhe bezüglich der Höhe bestehender Hindernisse (oben rechts), bevorzugt punktförmige Bebauung (unten links) und Ausrichtung der Gebäude längs der Richtung von Hangabwinden unter Berücksichtigung anderer dominierender Windrichtungen (unten rechts; Baumüller, Hoffmann und Reuter, 1990).

11.2 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 11.1 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 winterlichen Kältestresses sind weitere Maßnahmen der REKLISO-Untersuchung zu entnehmen.

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. mittels Grünflächen, permeabler Asphalt, Graspittersteine, Kfz-Stellflächen unter die Erde verlegen, Brunnen),
- Vermeidung von Stein- und Schotterflächen in den Vorgärten und sonstigen privaten Grünflächen,
- Verschattung versiegelter Bereiche (insbesondere von Kfz-Stellflächen),
- Förderung kleiner auch privater Grünflächen,

- Ausreichend innerstädtische Grünflächen mit Baumbestand größer 0,5 ha, um die Klimavielfalt zu erhalten oder zu fördern,
- Innenhof- oder Straßenbaumbepflanzungen,
- 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 durch Dachbegrünung ebenfalls zum Klimaschutz beiträgt,
- Kombination von extensiver Dachbegrünung und Solarzellen,
- Fassadenbegrünungen (Verschattung der Wand, geringere Reflektion der Sonnenstrahlung, geringere Schallreflexion (siehe Abbildung 11-2),
- Neubauten nach aktuellen EnEV Standards 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).

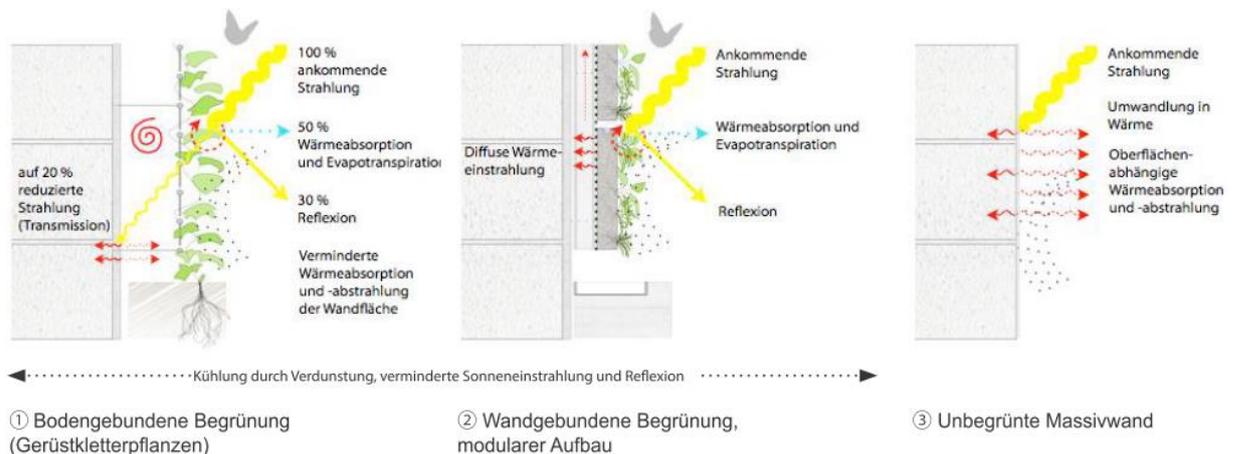


Abbildung 11-2: Einfluss der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima. Erhöhte Lebensdauer der Fassade durch reduzierte Sonneneinstrahlung/UV-Belastung und Schlagregenschutz der Außenwand (© Nicole Pfoser, Dettmar et al. 2016).

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

Klimaschutz- und Adaptationsmaßnahmen können sowohl konkurrieren (Solaranlage vs. Dachbegrünung) als sich auch ergänzen. In Tabelle 11-1 wird diese sich ergänzende Wirkung am Beispiel von städtischen Begrünungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 11-1: 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

Freiburg, den 05.10.2021



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



Tobias Gronemeier
Modellentwickler Palm, Sachverständiger
M. Sc. Meteorologie

Dieser Bericht wurde nach den Anforderungen unseres Qualitätsmanagementsystems nach DIN 17025 erstellt. Er darf ohne die Genehmigung der iMA Richter & Röckle GmbH und Co. KG weder ganz noch in Teilen weitergegeben oder vervielfältigt werden.

12 Literatur

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ed.** (2015): Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün. Berlin.
- Bibliographisches Institut Berlin ed.** (1986): Meyers kleines Lexikon der Geographie. Bibliogr. Inst, Mannheim.
- Basu, R.** (2009): High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ Health*. 8:40. Environmental health a global access science source 8. doi:10.1186/1476-069X-8-40.
- Christidis, N., Jones, G. S., & Stott, P. A.** (2015): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change*, 5, 46–50.
- Deutscher Wetterdienst** (2020): Climate Data Services. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
- EEA** (2018): Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1. URL: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>.
- GEO-NET Umweltconsulting GmbH**, Regionalverband Nordschwarzwald, Regionalverband Mittlerer Oberrhein, Stadt Radolfzell (Hrsg. 2011): Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald.
- Grize L, Huss A, Thommen O, Schindler C, Braun-Fahrländer C.** (2005): Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Med Wkly*.135(13-14):200-5. PMID: 15909237.
- Häckel, H.** (2016): Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Hewitt, C.D.** (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Transactions American Geophysical Union* (85)52: 566.
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara** (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT) (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Lohmeyer** (2009): Stadtklimaanalyse Radolfzell, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe. Dezember 2009. Gutachten im Auftrag der Stadt Radolfzell. Louis, Walter 1994 & 2001: Kommentar zum BNatSchG.
- LUBW** (2020): Windstatistiken - Synthetische Daten. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/windstatistiken>, abgerufen am 19.08.2020.
- Matzarakis, A. und H. Mayer** (1997): Heat stress in Greece. *International Journal of Biometeorology* 41 (1), 34-39. doi : 10.1007/s004840050051.
- Mayer, H., W. Beckröge & A. Matzarakis** (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report (5): 265–268.
- Mayer, H. & A. Matzarakis** (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet: (Forschungsvorhaben STADTLUFT) Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München (Ed).
- Mayer, H.** (1989): Workshop „Ideales Stadtklima“ am 26. Oktober 1988 in München. DMG-Mitteilungen 3/89, 52-54.
- Mayer, H. und P. R. Höppe** (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* 38 (1), 43-49. doi : 10.1007/BF00866252.
- REKLIBO** (2009): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben: Wissenschaftlicher Abschlussbericht Band 3.
- 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.

- Richter**, Grunewald, Meinel (2016): Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators „Erreichbarkeit städtischer Grünflächen“ AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 2-2016, 472 – 48
- Schär**, C. et al. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature, 427, 332–336.
- Schumacher**, Lehmann, Behnisch (2016): 2016: Modellansatz zur geotopographischen Analyse von Wohngebieten und urbaner grüner Infrastruktur. AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 2-2016, 540-545
- Städtebauliche Klimafibel** (2012): Hinweise für die Bauleitplanung.
- VDI 3782 Blatt 1**: Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gaußsches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen. VDI Düsseldorf, Januar 2016, Beuth Verlag, Berlin
- VDI 3782 Blatt 7**: Umweltmeteorologie – Kfz-Emissionsbestimmung – Luftbeimengungen. VDI Düsseldorf, November 2003, Beuth Verlag, Berlin
- VDI 3785 Blatt 1** (2007): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. 2007.
- VDI 3787 Blatt 1** (2015): Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI 3787 Blatt 2** (2008): Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.
- VDI 3787 Blatt 5** (2003): Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft.
- VDI 3787 Blatt 10** (2010): Umweltmeteorologie – Human-biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation.
- Weischet, W. & W. Endlicher** (2018): Einführung in die allgemeine Klimatologie: mit 117 Figuren und 14 Tabellen. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin Stuttgart.
- Zander**, K. K. et al. (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia Nature Climate Change, 5, 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:

Table 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 50 m x 50 m unter Berücksichtigung klimasensibler Nutzung (z.B. Krankenhäuser, Sanatorien, Pflegeheime und Kindertagesstätten) berechnet. Die Bewertung der Einwohnerdichte erfolgt relativ durch Berechnung der Perzentile bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Stadtgebiet Radolfzell (Tabelle A1-2). Die Tabelle zeigt beispielsweise, dass 50 % der Bevölkerung auf Flächen wohnen, deren Einwohnerdichte bis 8,5 Einwohner je 50 m x 50 m beträgt.

Tabelle A1-2: Bewertung der Einwohnerdichte je 50 m x 50 m (Bewertung A1, siehe Abschnitt A1.2.4).

Perzentil	Einwohner / ha	Bewertung
< 50.	≤ 8,5	sehr geringe Empfindlichkeit
50. - 75.	> 8,5 – 14	geringe Empfindlichkeit
75. - 85.	> 14 – 20	mittlere Empfindlichkeit
85. - 95.	> 20 – 26	hohe Empfindlichkeit
≥95.	> 26	sehr hohe Empfindlichkeit
Klimasensible Nutzung		sehr hohe Empfindlichkeit

A1.2.3 Berechnung der Betroffenheit

A1.2.3.1 Thermische Betroffenheit

Die Betroffenheit der Bevölkerung kann aus der Zusammenschau der Empfindlichkeit mit der thermischen Belastung ermittelt werden.

Die Betroffenheit wird aus der Summe der Bewertung folgender Parameter und meteorologischen Größen berechnet

Empfindlichkeit

A1 – Einwohnerdichte pro Hektar

Bewertung thermische Bedingungen

B1 – Physiologisch Äquivalente Temperatur (Wärmebelastung tagsüber, Tabelle A1-3),

B2 – Klimavielfalt (Berücksichtigung der Entfernung zu thermisch geringer belasteten, öffentlich zugänglichen, klimatisch relevanten Grün- und Wasserflächen innerhalb Ortslagen, Tabelle A1-4),

B3 – Urbane Wärmeinsel (Wärmebelastung nachts, Tabelle A1-6)

Tabelle A1-3: Bewertung B1 der Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) angelehnt an Matzarakis und Mayer (1997).

PET (°C)	Thermische Sensitivität
< 35	warm
> 35 – 41	heiß
> 41	sehr heiß

Tabelle A1-4: Bewertung der Klimavielfalt B2 – Entfernung zu einer Grünfläche mit mindestens 5.000 m². Die Klassen wurden nach den gängigen Literaturwerten eingeteilt (z.B. Mayer 1989; Schumacher, Lehmann, Behnisch 2016; Richter, Grunewald, Meindel 2016).

Distanz zu einer klimarelevanten Grünfläche	Beschreibung
keine Grünflächen vorhanden	Keine Klimavielfalt
< 250 m	Sehr gute Klimavielfalt vorhanden
250 m – 500 m	Klimavielfalt vorhanden

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.

Tabelle A1-5: Wärmebelastung tagsüber, ermittelt aus PET und der Klimavielfalt.

Wärmebelastung tagsüber					
		PET (°C) um 14:00 Uhr (Parameter B1)			
		<29°C	>29°C - 35°C	>35°C - 41°C	>41°C
Klimavielfalt (Parameter B 2)	sehr gute Klimavielfalt vorhanden	gering	gering	mittel	hoch
	Klimavielfalt vorhanden	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	keine Klimavielfalt vorhanden	gering	hoch	sehr hoch	sehr hoch

Tabelle A1-6: Bewertung B3 der nächtlichen urbanen Wärmeinsel (UHI - abendliche Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland in K).

Perzentil	UHI (K)	Bewertung (B3)
95.	≤ 0,4	keine Überwärmung
>95. – 98.	> 0,4 – 0,8	geringe Überwärmung
>98. – 99.	0,8 – 1,2	mäßige Überwärmung
>99. – 99,75.	1,2 – 1,7	mittlere Überwärmung
> 99,75.	>1,7	starke Überwärmung

Tabelle A1-7: Ermittlung der thermischen Belastung ermittelt aus der Wärmebelastung tagsüber und nachts.

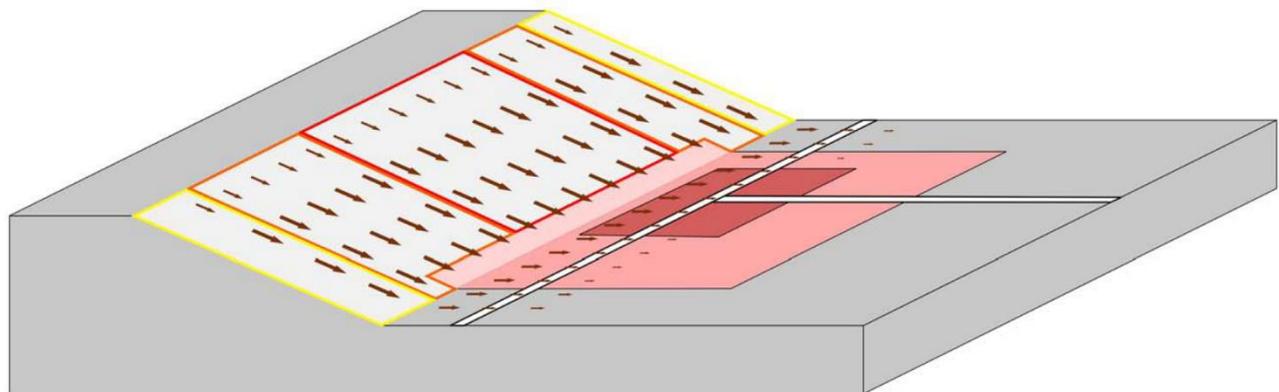
Thermische Belastung					
		Wärmebelastung tagsüber (ermittelt aus PET 14:00 Uhr)			
		gering	mittel	hoch	sehr hoch
UHI	Lufttemperatur nachts 4:00 Uhr (Parameter B3)				
	keine Überwärmung	gering	gering	gering	gering
	geringe Überwärmung	gering	gering	mittel	mittel
	mäßige Überwärmung	mittel	mittel	hoch	hoch
	mittlere Überwärmung	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
starke Überwärmung	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	

Tabelle A1-8: Ermittlung der Betroffenheit ermittelt aus den Wertstufen der Tabelle „Empfindlichkeit der Bevölkerung“ und der Tabelle „Thermische Belastung“.

Betroffenheit (bioklimatische Belastung) der Bevölkerung / Siedlungsgebiete						
		Thermische Belastung				
		Wärmebelastung: Tag (PET: 12:00 / Anzahl Sommertage) + Nachttemperatur 04:00				
		gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem
Empfindlichkeit der Bevölkerung	gering	gering	mittel	mittel	hoch	sehr hoch
	mittel	mittel	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch
	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch	extrem
	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	extrem	extrem

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 bewirken. Je größer die Betroffenheit in diesen Siedlungsgebieten ist, desto wichtiger ist diese ausgleichende Funktion (vgl. Abbildung A1-1).



- Siedlung locker bebaut
 Siedlung dicht bebaut
 Hangabwind
 Kaltluftzufuhr erhalten/aufwerten:
 höchste Priorität
 mittlere Priorität
 niedrige Priorität

Abbildung A1-1: Skizze zur Veranschaulichung der Abgrenzung der relevanten Strömungssysteme (REKLIBO 2010).

Oftmals resultieren Ausgleichsströmungen aus mehreren Kaltluftströmungen, die auf ihrem Weg zum Wirkungsraum zusammenfließen oder sich überlagern. Um die Kaltluftströmungen zu detektieren, welche in belasteten Gebieten zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen, bedarf es eines allgemein gültigen, objektiven Algorithmus, der für das ganze Untersuchungsgebiet angewandt werden kann. Zusätzlich soll der Algorithmus der Tatsache Rechnung tragen, dass i.A. die Bedeutung mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Dazu sind zunächst die Strömungssysteme zu ermitteln. Dies erfolgt durch numerische Simulationen mit dem Mesoskalenmodell FITNAH. Auf die FITNAH-Kaltluft-Ergebnisse wird dann ein numerisch-physikalisches Analysemodell angewandt. Mit diesem Modell kann den o.g. Anforderungen entsprochen werden: Die Identifikation und Abgrenzung der komplexen Kaltluftströmungssysteme unter Berücksichtigung der Distanz zum Zielort. Mit diesem Werkzeug ist eine erste Eingrenzung der für einen Wirkungsraum zu betrachtenden Bereiche möglich.

Im zweiten Schritt werden aus jeder Rasterzelle, die sich in den ermittelten Bereichen befinden, Vorwärtstrajektorien in den Kaltluftströmungsfeldern von FITNAH gestartet. Den Windfeldern aus den FITNAH-Simulationen werden mit dem Verlauf der Vorwärtstrajektorien Attribute (wie z.B. die Betroffenheit) zugeordnet. Damit kann auch die thermische und lufthygienische Eigenschaft der Strömung im Vergleich zum Wirkungsraum eingeordnet werden. 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 A1-2).

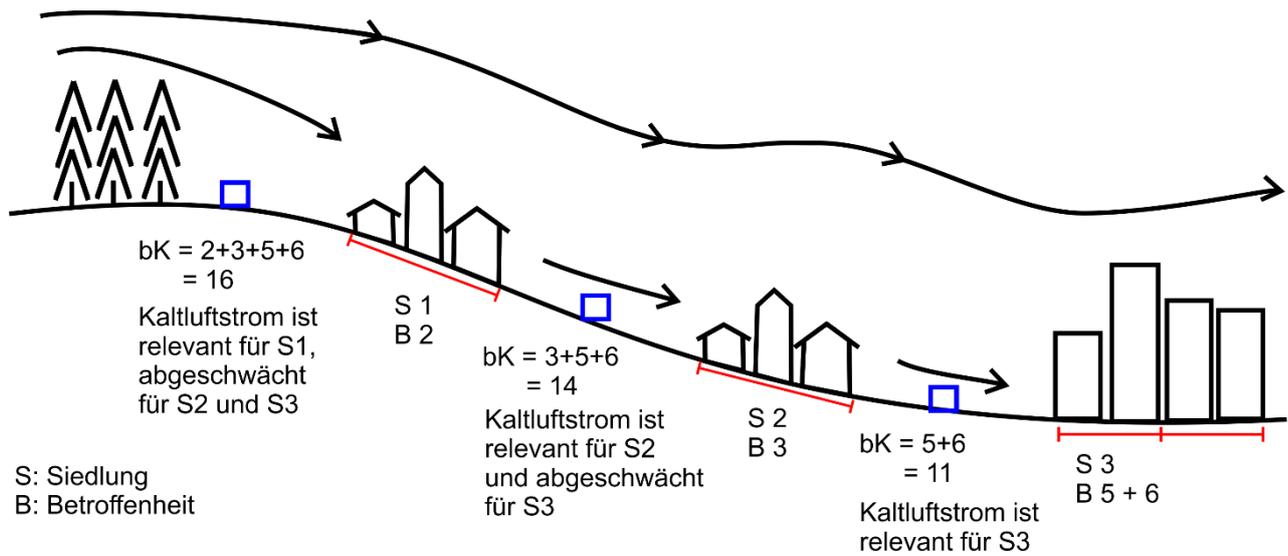


Abbildung A1-2: Bewertung der Kaltluftströmung (bK) durch Vorwärtstrajektorien.

Die Berechnung von Vorwärtstrajektorien zur Ermittlung der Bedeutung der Kaltluftströmung bK wird in Abbildung A1-2 dargestellt. Die blauen Kästchen markieren die Position eines Windpfeils, der bewertet werden soll. Die Betroffenheit der Siedlungen (S1 bis S3) wurde in der Stadtklimaanalyse Radolfzell 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 der LUBW im Gebiet der Stadt Radolfzell entnommen.

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (VDI, September 2015) zur Erstellung der Klimatop- bzw. Klimafunktionskarte 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 Radolfzell 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.

Durch den Seewind, der sich an sonnigen Tagen einstellt, werden insbesondere die Uferregionen belüftet. Der Wind macht an heißen Tagen den Aufenthalt am See deutlich angenehmer.

Beispiel: Bodensee (Untersee).

A2.2 Freilandklimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Freilandklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 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, die zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschichten führt. 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.

Beispiele: Die landwirtschaftlichen Freiflächen der Stadt Radolfzell.

A2.3 Waldklima



In der Klimafunktionskarte 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 Wald-Klimatop 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.

Beispiele: Ausgedehnte Waldflächen befinden sich nordöstlich der Stadt.

A2.4 Klima innerstädtischer Grünanlagen



In der Klimafunktionskarte mit „Klima innerstädtischer Grünanlagen“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 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 NO₂, 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 oder andere Barrieren 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.

Beispiele: Mettnaupark, südöstlich der Stadt auf der Halbinsel Mettnau.

A2.5 Vorstadt-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Vorstadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: < 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 NO₂, Feinstäube.

b) Anmerkungen

Das Vorstadtklimatop liegt im Übergangsbereich zwischen den Klimatopen der bebauten Flächen und den Klimatopen des Freilandes. Charakteristisch sind lockere Bebauungsstrukturen 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.

Beispiele: Reute.

A2.6 Stadtrand-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Stadtrandklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: 30% bis 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 NO₂, 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 Klimatelemente 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: Siedlung am Kapellenweg.

A2.7 Stadt-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Stadtklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: 50% bis 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 NO₂, 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.

Beispiele: Das Altbohl-Quartier im Norden der Stadt

A2.8 Innenstadt-Klimatop



In der Klimafunktionskarte 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: Innenstadtkern von Radolfzell.

A2.9 Tagebau-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Tagebauklima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: gering

Flächennutzung: Abbauflächen

Bebauung: vereinzelte Betriebsgebäude

Vegetation: nicht vorhanden

Lufthygiene: während der Betriebszeiten vor allem durch Staubemissionen belastet.

b) Anmerkungen

Aufgrund der fehlenden Vegetation und geringen Wasserverfügbarkeit können sich Tagebau während des Tages bei entsprechender Sonneneinstrahlung stark aufheizen.

Beispiele: Kiesgrube Radolfzell.

A2.10 Sportanlagen-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Sportanlagen-Klima“ 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.

Beispiele: Unterseestadion Radolfzell

A2.11 Gewerbeklima



In der Klimafunktionskarte mit „Industrie-/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 NO_2 , Feinstäube. Je nach Produktionsprozessen auch weitere Luftschadstoffe und Gerüche.

b) Anmerkungen

Dieses Klimatop ist mit dem Innenstadt-Klimatop 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.

Beispiele: Gewebegebiet Nord.

A2.12 Bahnanlagen-Klimatop



In der Klimafunktionskarte mit „Bahnanlagen-Klima“ gekennzeichnet.

a) allgemeine Merkmale

Versiegelung: geringer Versiegelungsgrad

Flächennutzung: Geschotterte Gleisanlagen.

Bebauung: Einzelgebäude.

Vegetation: vereinzelt Strauchwerk.

Lufthygiene: Lärmemissionen.
Luftschadstoffe hauptsächlich Feinstäube und NO₂ 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 und hygrisch extremen Verhältnissen. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiele: Bahnhof in Radolfzell.

A2.13 Verkehrsflächen-Klimatop



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 und hygrisch extremen Verhältnissen. Er erwärmt sich tagsüber stark, kühlt nachts aber auch wieder gut ab, so dass große Tag-/Nachtunterschiede bei der Oberflächentemperatur auftreten.

Beispiele: Schützenstraße.

A2.14 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 im VDI und DIN (KRdL) 1988) eine Mindestbreite von der 10fachen Höhe der Randbebauung genannt, andere Quellen fordern eine Mindestbreite von 50 m und eine Mindestlänge in einer Richtung von 1000 m (Mayer, Beckröge u. 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).