

Durchführung einer landesweiten Klimaanalyse

 Endbericht



Durchführung einer landesweiten Klimaanalyse

 Endbericht

The word 'Endbericht' is centered below the title. To its left is a small black silhouette of a lion, which is the logo of the Baden-Württemberg state government.

| | |
|---------------------------|---|
| HERAUSGEBER | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de |
| BEARBEITUNG | LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de Referat 23 - Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Kompetenzzentrum Klimawandel: Yannis Geiger, Dr. Sabrina Plegnière, Dr. Michael Stölzle Referat 31 - Luftreinhaltung, Regenerative Energien GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5A, 30161 Hannover, www.geo-net.de |
| REDAKTION | LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 23 - Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Kompetenzzentrum Klimawandel |
| BEZUG | www.lubw.de Publikationen im Bestellshop der LUBW > https://pd.lubw.de/10677 |
| STAND | August 2024 |
| AUFLAGE | 1. Auflage |
| TITELBILD | Ausschnitt Planungshinweiskarte um Karlsruhe (LUBW) |
| ABBILDUNGSNACHWEIS | siehe Abbildungsverzeichnis |
| ZITIERVORSCHLAG | LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2024): Durchführung einer landesweiten Klimaanalyse, Endbericht, 1. Auflage, Karlsruhe |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 8 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 8 |
| 1.2 | Klimakomfort und Schutzgut menschliche Gesundheit | 8 |
| 1.3 | Großräumige klimatische Verhältnisse in Baden-Württemberg | 11 |
| 1.4 | Wärmeineffekt, Kaltluftprozesse und Inversionswetterlagen | 16 |
| 1.5 | Skizze des Arbeitsprozesses | 18 |
| 2 | ANALYSEPHASE - MODELLIERUNGEN | 20 |
| 2.1 | Modell und Modellauflösung | 20 |
| 2.2 | Szenarien- und Methodenentwicklung | 21 |
| 2.3 | Verwendete Datengrundlagen | 23 |
| 2.3.1 | Orographie | 23 |
| 2.3.2 | Landnutzung | 25 |
| 2.3.3 | Strukturhöhen | 30 |
| 2.3.4 | Daten zur Luftqualität | 31 |
| 2.4 | Rahmen- und Randbedingungen | 32 |
| 2.4.1 | Wetterlage | 32 |
| 2.4.2 | Höhengradient | 33 |
| 2.4.3 | Starttemperatur | 36 |
| 2.4.4 | Gewässertemperaturen | 39 |
| 2.5 | Modellausgabegrößen | 41 |
| 2.6 | Evaluierung der Modellrechnung | 44 |
| 2.7 | Bestimmung ausgewählter meteorologischer Kenntage | 48 |
| 2.7.1 | Datengrundlage | 48 |
| 2.7.2 | Datenaufbereitung (Preprocessing) | 48 |
| 2.7.3 | Berechnung der Kenntage | 49 |
| 2.7.4 | Evaluierung der Kenntagsberechnung | 51 |
| 2.8 | Unsicherheiten und Herausforderungen | 52 |
| 3 | PRODUKTPHASE | 55 |
| 3.1 | Verwendung der Modellausgabegrößen | 55 |
| 3.2 | Klimaanalysekarten | 56 |
| 3.3 | Luftqualitätskarten | 61 |
| 3.4 | Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme | 62 |
| 3.5 | Planungshinweiskarte | 64 |
| 3.5.1 | Grundlagen und Prämissen | 64 |
| 3.5.2 | Geometrische Basis | 67 |
| 3.5.3 | Bewertung der humanbioklimatischen Belastungssituation im Wirkraum | 68 |
| 3.5.4 | Bewertung der kaltlufthaushaltlichen Bedeutung im Ausgleichsraum | 71 |
| 3.5.5 | Verdeutlichung des Kaltluftprozessgeschehens | 75 |
| 3.5.6 | Bewertung der Luftqualität | 77 |
| 4 | FAZIT | 78 |
| 5 | ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS | 84 |
| 5.1 | Abbildungen | 84 |
| 5.2 | Tabellen | 86 |
| 6 | LITERATUR UND QUELLEN | 87 |

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in Baden-Württemberg bereits heute nachweisbar und haben neben dem generellen Anstieg der Jahresmitteltemperatur gerade in den Sommermonaten eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeperioden zur Folge. Diese Hitzeperioden gehen mit einer erhöhten Belastung für die Bevölkerung einher. Gerade in städtischen Gebieten kommen diese Hitzeperioden durch die besonders hohe Wärmespeicherfähigkeit der baulichen Strukturen in Verbindung mit gleichzeitig hohen Bewohnerdichten zum Tragen. Hier ist die Hitzebelastung der Bevölkerung meist bereits heute besonders hoch.

Um klimatische Belastungs- und Ausgleichsräume zu identifizieren hat die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) die vorliegende Klimaanalyse beauftragt. So können anhand der Ergebnisse flächendeckende Informationen zu Hitzebelastungs-Hot Spots und schützenswerten Ausgleichsräumen gewonnen werden, die in der Landes-, Regional- und Stadtplanung als wichtige Hinweise für Handlungspotentiale oder zur Ausweisung von Flächen zur Siedlungs- bzw. Gewerbeentwicklung dienen. Auch Kommunen können von den Aussagen der Klimaanalyse profitieren.

In räumlich hoher Auflösung für den Beurteilungsraum des Landes Baden-Württemberg wird mit der vorliegenden Analyse eine dichte Datenbasis zur Beurteilung der thermischen Bedingungen geschaffen. Das betrachtete Schutzgut ist dabei die menschliche Gesundheit im Kontext der Themenkomplexe thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt (inklusive Luftqualität) unter Berücksichtigung des zukünftig zu erwartenden Klimawandels. Die zentralen Produkte werden Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten (nach VDI-Richtlinien 3787 Blatt 1 und 2) sein. Die Planungshinweiskarte wird dabei für die entscheidenden Raumeinheiten Hinweise zum Erhalt oder der Verbesserung der jeweiligen Situation vor Ort geben.

Es ist elementarer Bestandteil dieser Zielformulierung, dass insbesondere die Inhalte und Aussagetiefen der Planungshinweiskarte intensiv mit der Vertretung der Regional- sowie Landes- und Kommunalplanung im Erstellungsprozess diskutiert und abgestimmt werden. Eine frühzeitige Einbindung der jeweiligen Vertretung erscheint dabei geboten. Alle

zentralen kartographischen Projektergebnisse sollen den Bezirksregierungen und Regionsbeauftragten nach Projektende GIS-basiert zur weiteren Verwendung bereitgestellt werden. Die aus landesweiter bzw. regionaler Perspektive erarbeiteten Ergebnisse können gegebenenfalls auf örtlicher Ebene erforderliche großmaßstäbliche Detailuntersuchungen auf gesamt- und teilstädtischer Ebene nicht ersetzen, jedoch die überörtliche Perspektive stärken und somit raumrelevante Entwicklungen lenken und inhaltlich vorbereiten.

1.2 Klimakomfort und Schutzgut menschliche Gesundheit

Die bodennahe atmosphärische Umgebung hat vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsummieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1.1).

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrößen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen [HÖPPE & MAYER 1987]. International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Comfort Index“ UTCI [JENDRITZKY 2007]. In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz [FANGER 1972]. Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrö-

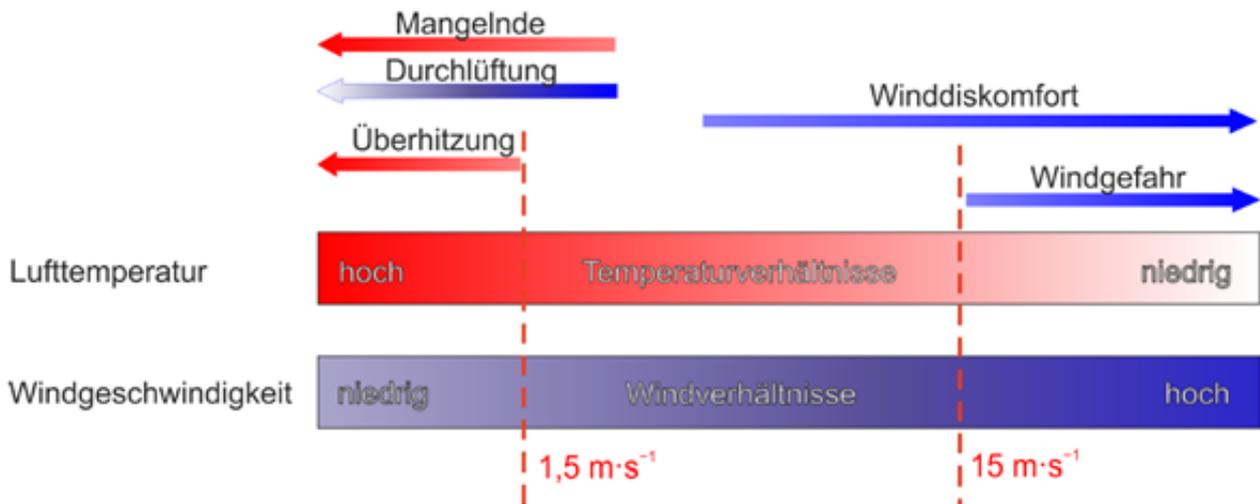


Abbildung 1.1: Klimakomfort und -diskomfort bei verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen [verändert nach VDI 2020]

ßen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen. Auf diese Weise können letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise beim PET-Wert von einer extremen Kältebelastung zu einer extremen Wärmebelastung reichen (Tabelle 1.1). Da die Indizes hohe Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerterroutinen wie die Auftretshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$) eine hohe Praxisrelevanz [DWD 2020] und [LUBW 2023]. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z. B. Staaten oder Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90% der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: „Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist“ [VDI 2008a, S. 24]. Die Arbeitsstättenverordnung [ARBSTÄTTV, BUNDESREGIERUNG 2004] fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal $+26^{\circ}\text{C}$ in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in § 4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitgebers, eine Gefährdung für Leben

und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder „Hitzefrei“ lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung aber nicht ableiten.

Tabelle 1.1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden [nach VDI 2022]

| PET in °C | Thermisches Empfinden | Physiologische Belastungsstufe |
|---------------------------|-----------------------|---|
| $\text{PET} \leq 4$ | Sehr kalt | extremer Kältestress |
| $4 < \text{PET} \leq 8$ | Kalt | starker Kältestress |
| $8 < \text{PET} \leq 13$ | Kühl | moderater Kältestress |
| $13 < \text{PET} \leq 18$ | Leicht kühl | leichter Kältestress |
| $18 < \text{PET} \leq 23$ | Behaglich | kein thermischer Stress |
| $23 < \text{PET} \leq 29$ | Leicht warm | leichte Wärmebelastung |
| $29 < \text{PET} \leq 35$ | Warm | moderate Wärmebelastung |
| $35 < \text{PET} \leq 41$ | Heiß | starke Wärmebelastung/ Hitze stress |
| $\text{PET} > 41$ | Sehr heiß | extrem starke Wärmebelastung/ Hitze stress |

Während in Arbeitsstätten eher hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: „Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.“ [VDI 2008a, S. 23]. Das Umweltbundesamt [UBA 2005] empfiehlt für einen entsprechend erhol-

samen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17 - 20 °C. Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrungen vieler Bundesbürger und Bundesbürgerinnen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine durchgeführte Messkampagne im bayerischen Augsburg. In der wissenschaftlichen Studie wurden während der Sommermonate 2019 Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern gemessen und ausgewertet (Abbildung 1.3). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet nur an einzelnen Standorten an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwanken die Mittelwerte auch nachts um 25 °C bei Maxima von vereinzelt nahe oder über 30 °C [BECK et al. 2020].

Außerhalb der thermischen Komfortbereiche in Arbeitsstätten und privaten Wohnräumen sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen (z.B. am Arbeitsplatz oder in Schule und Hochschule) ab. Wie stark diese Abnahme ist, ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nehme bei moderater körperlicher Arbeit die Leistungsfähigkeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. 30 °C in Kombination mit 50% Luftfeuchtigkeit, entspricht einer Wet Bulb Globe Temperature von 29 °C) pro Grad etwa um 15

Prozent ab [ISO 1989]. Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12% aus [URBAN & STEININGER 2015]. In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10 - 15% für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden [LAUREANT et al. 2018].

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst aber nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang gemeinhin zum einen Säuglinge und Kleinkinder (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie zum anderen Ältere und Hochaltrige (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). SANTHOLZ & SETT [2019] kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem differenzierten Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senioren und Seniorinnen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und

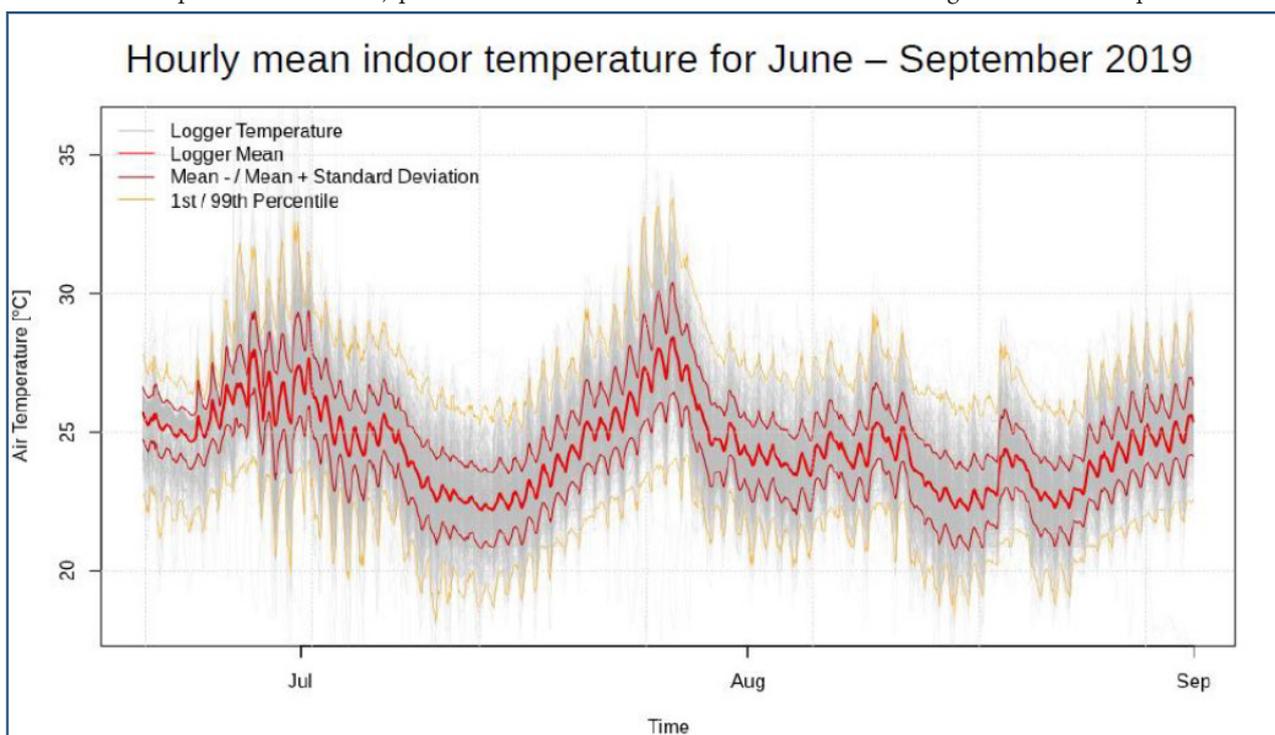


Abbildung 1.2: Stündliche Mittelwerte der Innenraumtemperaturen in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 [BECK et al. 2020]

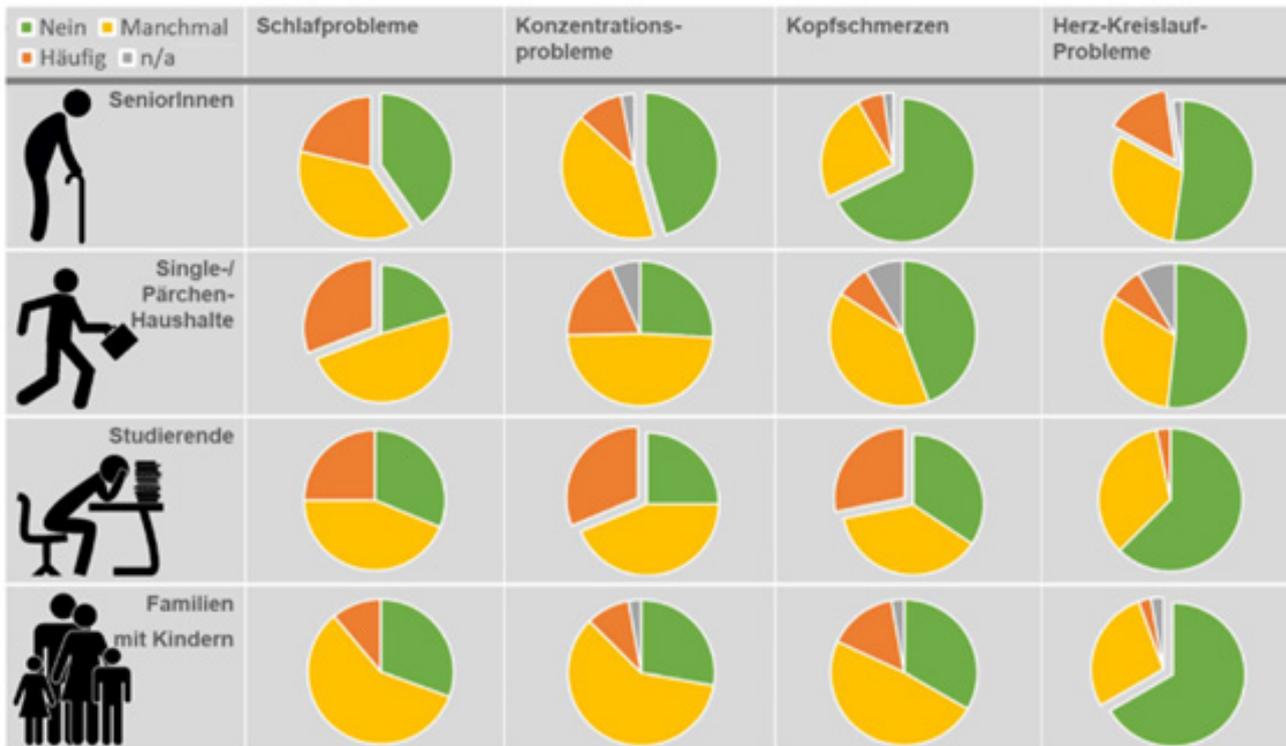


Abbildung 1.3: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) [UNU 2019]

Kopfschmerzen, und Single-/ Zweipersonenhaushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten vergleichsweise seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 1.3).

Ein systematischer Zusammenhang zwischen hohen Temperaturen und einem erhöhten Mortalitätsgeschehen konnte in zahlreichen Studien belegt werden. Das Robert Koch-Institut (RKI) schätzt, dass in den drei Jahren 2003, 2006 und 2015 insgesamt fast 20.000 Menschen in Deutschland an den Folgen von Hitze gestorben sind [AN DER HEIDEN et al., 2019]. Jüngere Schätzungen zeigen, dass die ungewöhnlich hohen Sommertemperaturen 2018 bis 2020 in allen drei Jahren zu einer statistisch signifikanten Anzahl von Sterbefällen geführt haben. Im Jahr 2018 gab es etwa 8.700 hitzebedingte

Sterbefälle, im Jahr 2019 etwa 6.900 und 2020 etwa 3.700 [WINKLMAYR et al., 2022]. Allein in Baden-Württemberg wurden nach Schätzungen des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg im Hitzesommer 2003 insgesamt 2.688 hitzebedingte Todesfälle und in den Sommermonaten 2018 und 2019 jeweils 1.972 und 1.673 Todesfälle durch Hitze mitverursacht (Abbildung 1.4).

1.3 Großräumige klimatische Verhältnisse in Baden-Württemberg

Die Ausführungen in 1.2 haben verdeutlicht, dass die thermische Umgebung vielfältige Auswirkungen auf verschiedene Komponenten und Facetten der menschlichen Gesundheit haben. Nicht zuletzt die 2019er Messkampagne zu Schlafzimmertemperaturen in Augsburg (Abbildung 1.2) [BECK

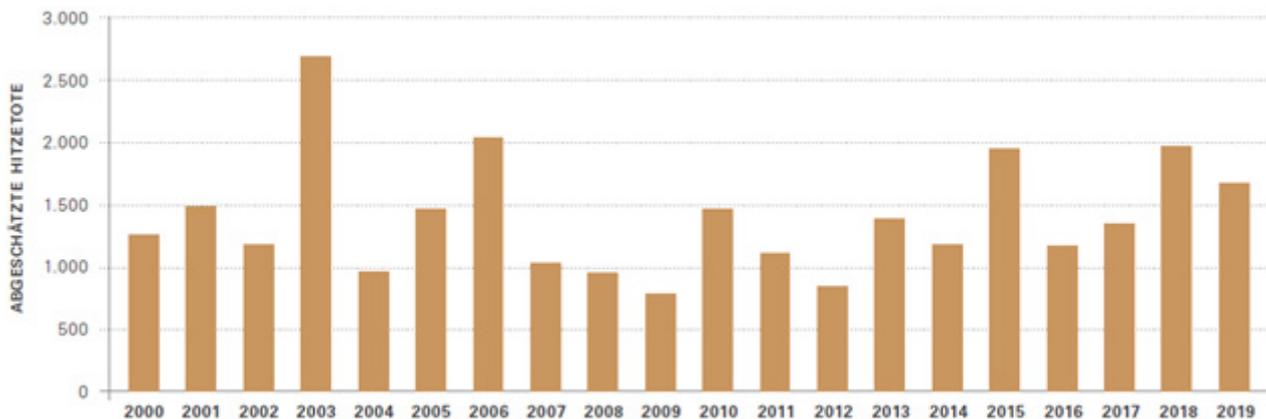


Abbildung 1.4: Jährlich abgeschätzte Hitzetote in Baden-Württemberg für die Jahre 2000 - 2019. Stand: Oktober 2021 Statistisches Landesamt Baden-Württemberg

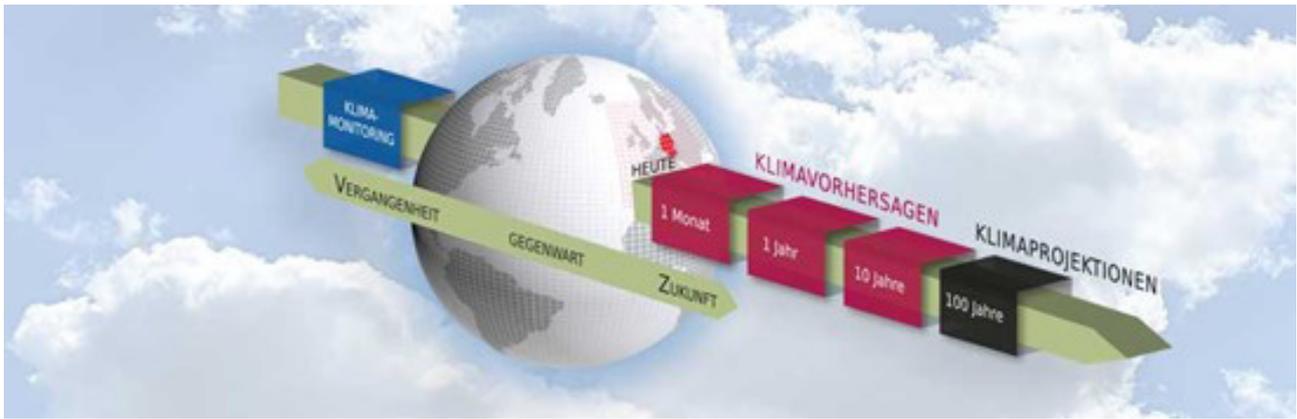


Abbildung 1.5: Grundkonzept der klimatologischen Zeitreihenanalyse [DWD 2024*]

et al. 2020] sowie insbesondere die im Süden Deutschlands erhöhten Mortalitätsraten während vergangener Hitzewellen (Abbildung 1.4) unterstreichen die Bedeutung des Themas für Baden-Württemberg.

Wie in den meisten anderen Teilen der Erde [IPCC 2013 bzw. IPCC 2021] hat sich das Klima auch in Baden-Württemberg in den letzten Jahrzehnten gewandelt. In Abhängigkeit des Erfolges der weltweiten Klimaschutzbemühungen werden sich regional der Klimawandel in Baden-Württemberg und die mit ihm verbundenen Auswirkungen auch in Zukunft fortsetzen und ggf. verschärfen. Umfassende Informationen speziell für Baden-Württemberg im bundesdeutschen Kontext können den einschlägigen Veröffentlichungen des Deutschen Wetterdienstes [DWD 2020, DWD 2020a] sowie der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg [LUBW 2022] entnommen werden. An dieser Stelle erfolgt eine Synthese der wichtigsten dort beschriebenen Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem thermischen Wirkungskomplex.

Der Synthese kommt dabei die Funktion einer allgemeinen Herleitung der Problemlage zu. Sie soll – ganz unabhängig von gesetzlichen Regelungen, politischen Beschlüssen und planerischen Paradigmen – einen klimafachlichen Begründungszusammenhang dafür liefern, warum es angeraten ist, sich in Baden-Württemberg auf den verschiedenen räumlichen Planungsebenen – insbesondere auf der Ebene der Regionalplanung – überhaupt mit den Themenfeldern thermischer Komfort und Kaltluft-/Frischlufthaushalt zu beschäftigen. Die Datenauswertungen haben dabei einen hohen Anspruch an die Zeitskala, aber einen geringen Anspruch an die räumliche Differenzierung der Aussagen. Es geht im Kern also zunächst um klimatologische Zeitreihenanalysen auf der Basis von punktuellen oder grob interpolierten Messdaten, um Aussagen für die Vergangenheit und Gegenwart zu erhalten sowie

um räumlich nicht all zu hoch aufgelöste Projektionsdaten für den (mit Unsicherheiten verbundenen) Blick in die Zukunft bis zum Jahr 2100 (Abbildung 1.5). Die daran anknüpfende räumlich differenzierte Analyse ist Kernbestandteil der im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten.

Für den Referenzzeitraum 1961-1990 betrug die mittlere Temperatur in Baden-Württemberg 8,1 °C, im Jahr 2022 lag der Wert bereits bei 10,6 °C und somit 2,5 °C über dem langjährigen Mittel des Referenzzeitraums [LUBW 2023]. Darüber hinaus wird deutlich, dass in Baden-Württemberg – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So zeigt der lineare Trend seit Aufzeichnungsbeginn eine Erwärmung von 1,6 °C bis ins Jahr 2022 an. Zudem zeigt sich, dass sich seit Beginn der 2000er-Jahre der Großteil der Jahresmitteltemperaturen über 9 °C befanden und somit eine Vielzahl der wärmsten Jahre in Baden-Württemberg innerhalb der letzten zwei Dekaden zu finden sind (Abbildung 1.6).

Noch stärker als der schrittweise Anstieg der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen und insbesondere der Heißen Tage kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In diesem Zusammenhang verdeutlichen Abbildung 1.7 und Abbildung 1.8, dass die Auftrittshäufigkeit von Sommertagen und Heißen Tagen seit Beginn der 2000er Jahre signifikant angestiegen sind. Zudem sind auch hier die 5 Jahre mit der höchsten Anzahl an Heißen Tagen zu finden. In den Hitzesommern 2003 und 2015 wurden im landesweiten Mittel ca. etwa 25 bis 27 Heiße Tage registriert, was dem fünf- bis sechsfachen des langjährigen Mittels (5 Tage) entspricht. Diese Werte verdeutlichen, dass sommerliche Wärmebelastungen in Baden-Württemberg in den letzten Jahrzehnten deutlich

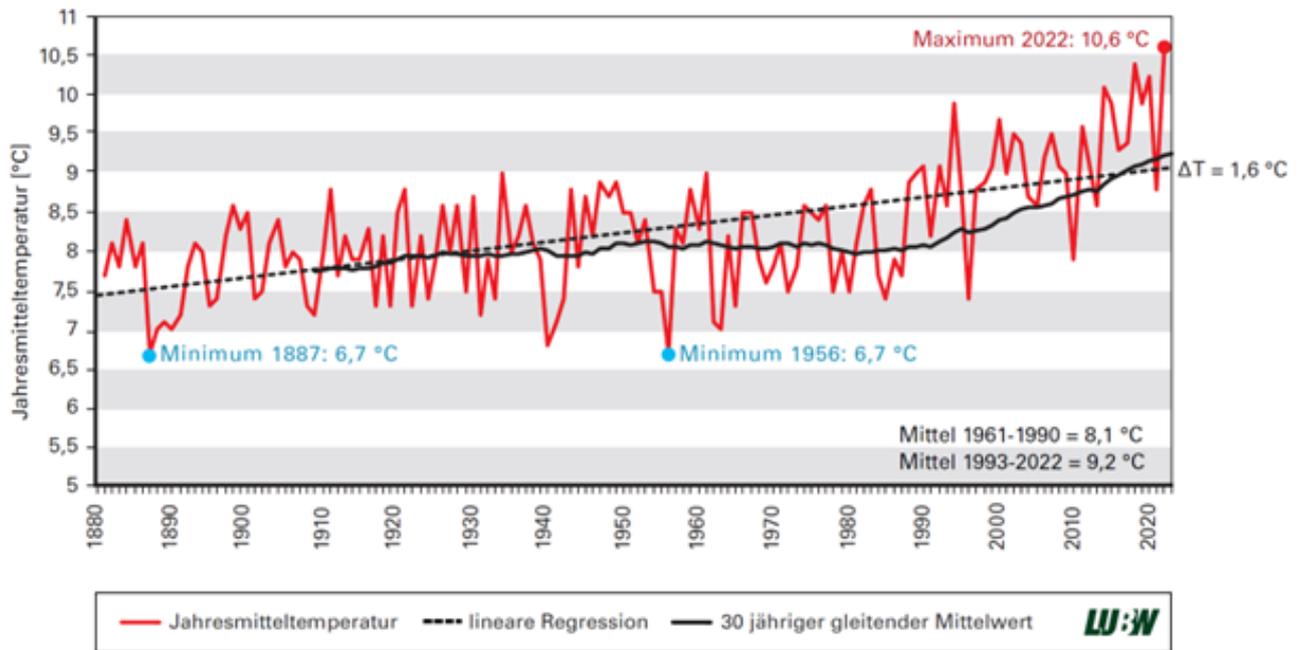


Abbildung 1.6: Jahresmitteltemperatur in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1881) [LUBW 2023]

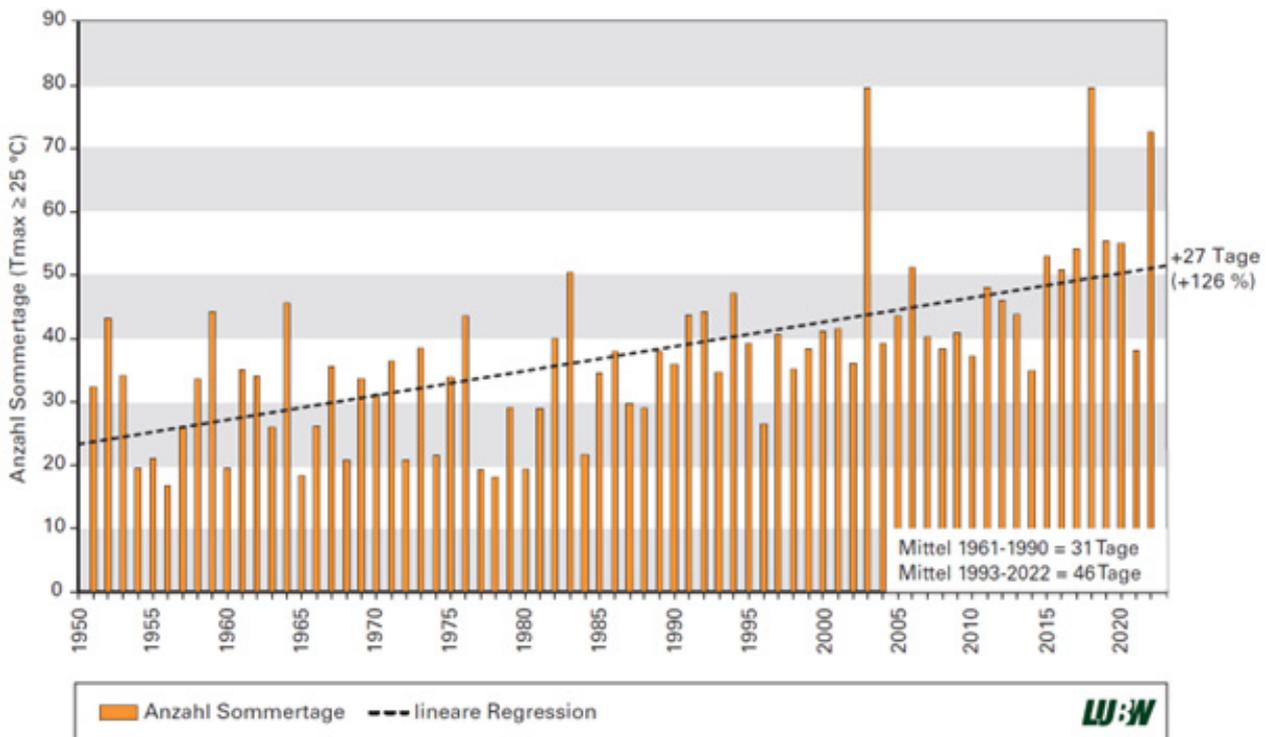


Abbildung 1.7: Anzahl Sommertage in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1951). [LUBW 2023]

zugenommen haben. Die LUBW hat für die Vergangenheit einen Trend von +27 Sommertagen und von +10 Heißen Tagen im landesweiten Durchschnitt des Beobachtungszeitraums 1951 – 2022 ermittelt [LUBW 2023].

Das Pendant zu den Sommertagen und Heißen Tagen als Indikator für thermische Belastungen am Tage sind Tropennächte als Indikatoren für die nächtlichen Wärmebelastungen. Allerdings müssen bei Auswertungen zu Tropennächten einige klimatische Effekte zusätzlich berücksichtigt wer-

den. So ist das Auftreten und die räumliche Verteilung von Tropennächten – anders als bei den Heißen Tagen – nicht nur bzw. nicht vor allem auf die meteorologische „Hintergrundbelastung“ (also die Großwetterlage) zurückzuführen, sondern auch von regional- und lokalklimatischen Phänomenen abhängig. Hier sind insbesondere der städtische Wärmeinseleffekt sowie Kaltluftströmungssysteme zu nennen (vgl. Kapitel 1.4). Vereinfacht ausgedrückt erhöht der Wärmeinseleffekt die Auftrittshäufigkeit und -wahrscheinlichkeit von Tropennächten, während (insbesondere stärker ausge-

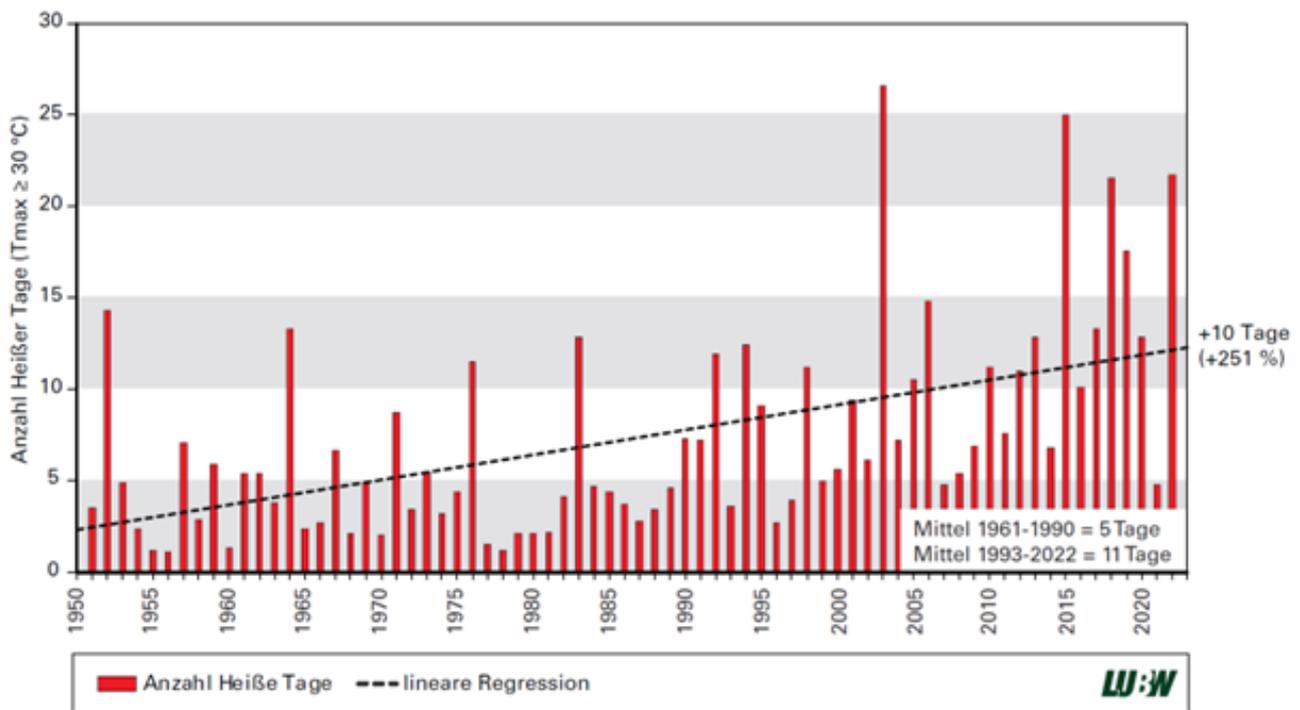


Abbildung 1.8: Anzahl Heiße Tage in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1951) [LUBW 2023]

prägte) Kaltluftströmungssysteme zu einer entsprechenden Reduzierung beitragen. Da sich diese Phänomene insbesondere während bestimmter Wetterlagen sowie im urbanen Kontext auf vergleichsweise kleinen Raumskalen entwickeln und es Bestandteil der WMO-Messnormen ist, dass sich Messstationen in einem von der Umgebung möglichst unabhängigen Bereich befinden sollen, besitzen die zur Verfügung stehenden Stationsdaten für Mittel- und Großstädte nur eine eingeschränkte Aussagekraft. Daher kann es im Einzelfall geboten sein, weitere, ergänzende Studien für einzelne Planungsregionen durchzuführen.

In Erkenntnis dieser Sachlage auf der einen Seite und der Bedeutung des Themas auf der anderen Seite befindet sich beim Deutschen Wetterdienst seit 2015 ein Stadtklimamessnetz im (Wieder-)Aufbau [DWD 2020b]. Aktuell existieren Stadtklimastationspaare (jeweils eine innerstädtische Station und eine im Außenbereich) in den Städten Hamburg, Hannover, Berlin, Dresden, Frankfurt, München und Freiburg. Für diese Städte können die entsprechenden Stationsdaten als hinreichend repräsentativ gelten – wobei es sich weiterhin um punktuelle Messungen handelt und es aufgrund der Kleinräumigkeit des Wärmeineffektes auch innerhalb dieser Städte Bereiche geben wird, in denen die Auftrittshäufigkeiten über und unter den gemessenen Werten liegen. Für alle anderen Städte kann davon ausgegangen werden, dass die Auftrittshäufigkeit von Tropennächten zumindest für die stark verdichteten Teilräume unterschätzt wird. Externe Quellen ge-

hen auf der Basis von Stationsdaten in Basel von einem Faktor drei bis sieben für die in Stadtlagen gegenüber dem Umland erhöhte Auftrittshäufigkeit von Tropennächten aus [KRAUSER et al. 2018].

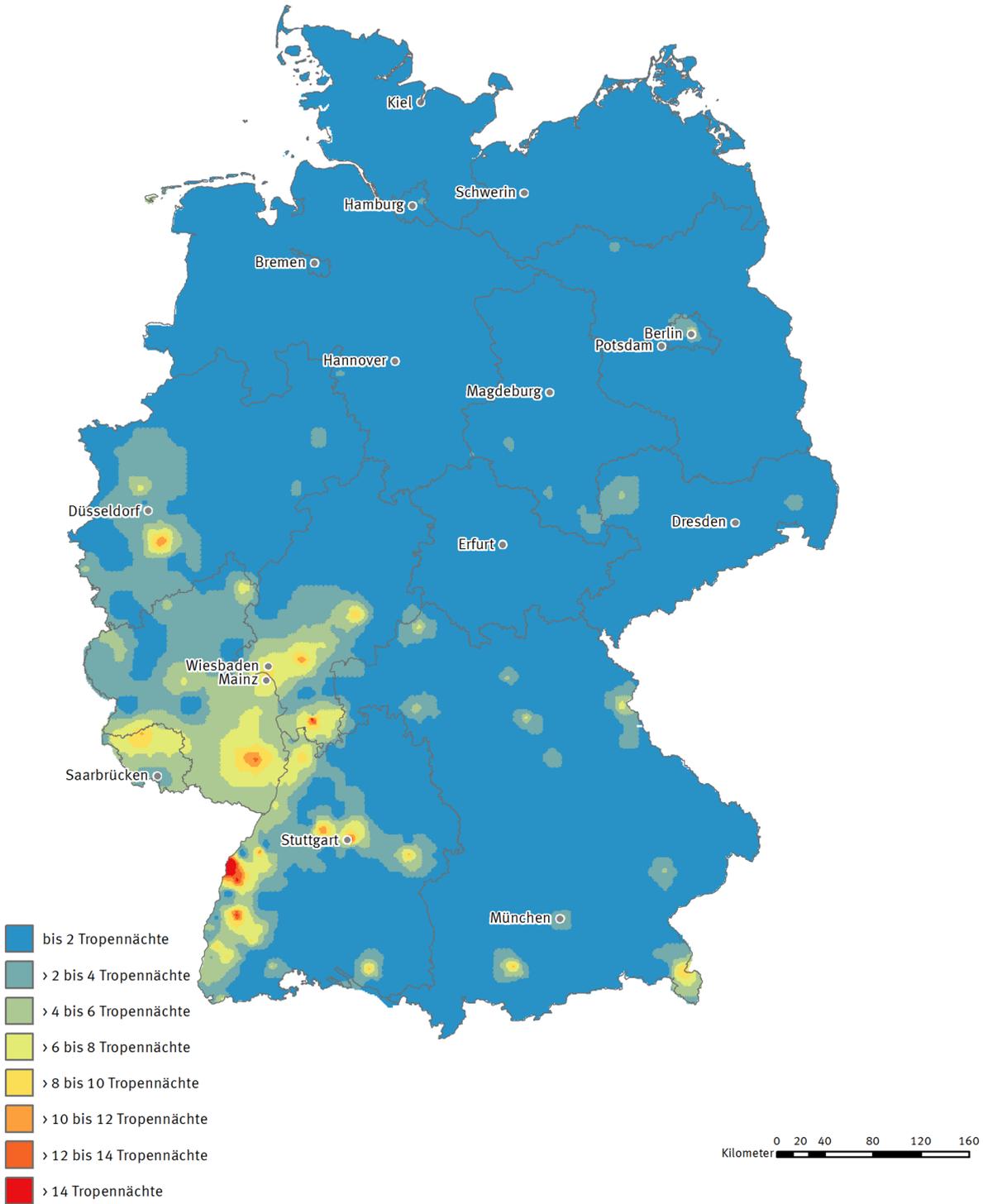
Dargestellt ist die Auftrittshäufigkeit von Tropennächten des Hitzejahrs 2003 in Abbildung 1.9. Besonders im Gebiet des Rheintals, aber auch in Stuttgart traten derzeit maximal mehr als 14 Tropennächte auf. Grundlegend sticht Baden-Württemberg im deutschlandweiten Vergleich als Bundesland mit einer Häufung von Tropennächten in den Metropolregionen heraus.

Heiße Tage und Tropennächte – und damit auch die mit ihnen verbundenen gesundheitlichen Folgen – treten also in Baden-Württemberg und insbesondere in den urbanen Gebieten bereits heute schon regelmäßig sowie in den letzten Jahren vermehrt auf.

Wie in der Vergangenheit, hängt auch in der Zukunft die Entwicklung der Auftrittshäufigkeiten der Heißen Tage eng mit dem Ausmaß der Erhöhung der Jahresmitteltemperatur zusammen. Tabelle 1.2 zeigt die entsprechenden Entwicklungsperspektiven für die beiden Kennziffern Heiße Tage und Tropennächte sowie zum Vergleich für die Jahresmitteltemperatur. Demnach werden Heiße Tage in der nahen Zukunft (2021–2050) um bis zu 11,7 Tage und in der fernen Zukunft (2071–2100) um bis zu 32,5 Tage pro Jahr zunehmen. Tro-

Tropennächte

Anzahl der Tropennächte (18 bis 06 UTC) im Jahr 2003 (1km*1km-Raster), in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ beträgt



* Maximaler Wert 2003: 21 Tropennächte.

Tropennächte: Nächte in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ beträgt

Quelle:

Geobasisdaten: GeoBasis-DE / BKG 2018

Fachdaten: Tropennächte/ Deutscher Wetterdienst, 2018

Bearbeitung: Umweltbundesamt, FG I 1.5, 2018

Abbildung 1.9: Anzahl der Tropennächte (18 bis 06 UTC, Universal Time Coordinated in Deutschland im Hitzejahr 2003 im 1 km x1 km-Raster, in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ beträgt [UBA 2020]

Tabelle 1.2: Zukünftige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in °C und von weiteren Klimakennwerten (Flächenmittel) für Baden-Württemberg aus Modellrechnungen für das Ensemble des Szenarios RCP 8.5 [LUBW 2020]

| Klima-Kennwert | Referenzzeitraum 1971 -2000 | Nahe Zukunft (2021–2050) | | | Ferne Zukunft (2071–2100) | | |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|---------|---------------------------|------------|---------|
| | | Minimum | Mittelwert | Maximum | Minimum | Mittelwert | Maximum |
| Jahresmitteltemperatur (°C) | 8,4 | +0,8 | +1,4 | +1,8 | +3,0 | +3,8 | +4,5 |
| Heiße Tage (Tmax > 30 °C) | 5,3 | +3,2 | +5,3 | +11,7 | +11,7 | +24,4 | +32,5 |
| Tropennächte* (Tmin ≥ 20 °C) | 0,1 | +0,2 | +0,9 | +5,2 | +5,2 | +9,9 | +17,5 |

*eine Zunahme von 0,2 Tropennächten bedeutet alle 5 Jahre eine zusätzliche Tropennacht (+0,3 = alle 3 Jahre)

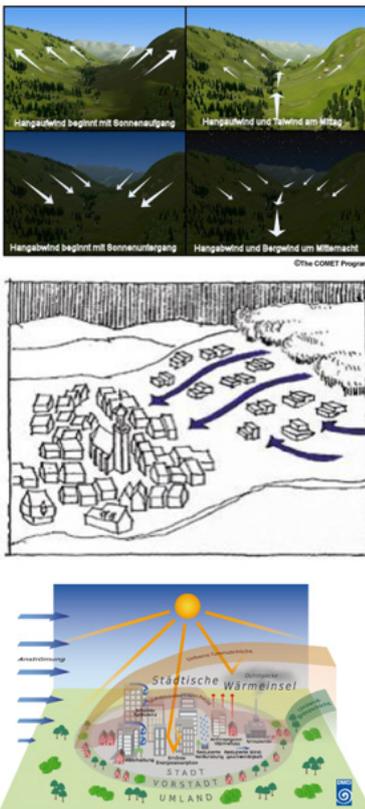
pennächte werden in der nahen Zukunft (2021–2050) um bis zu 2,1 Tage und in der fernen Zukunft (2071–2100) um bis zu 17,5 Tage pro Jahr zunehmen. Unter der Annahme des Klimaschutzszenarios RCP 2.6 lassen sich die Zunahmen entsprechend reduzieren, es wird aber dennoch zu gegenüber der Referenzperiode erhöhten Auftretshäufigkeiten kommen, was noch einmal die Relevanz des Themas unterstreicht. Für die Tropennächte gelten auch in der Zukunftsperspektive die weiter oben beschriebenen Einschränkungen bzgl. ihrer Aussagekraft. Auch in den Projektionsdaten wird der Wärmeinseleffekt unterschätzt. Aufgrund der fortschreitenden Stadtentwicklung und Nachverdichtung in vielen Regionen und Städten in Baden-Württemberg kann hier die begründete Hypothese aufgestellt werden, dass sich der Unterschied, zwischen den im Außenbereich gemessenen und den im innerstädtischen Bereich real auftretenden Tropennächten noch einmal vergrößern könnte.

Die hier diskutierten Klima-Kennwerte stellen die zentralen Indikatoren zur Ersteinschätzung der zukünftigen Entwicklung von thermischen Belastungen dar. Insbesondere im Zusammenhang mit einer temperaturbedingt erhöhten Verdunstung sowie einer sich – zumindest langfristig im „ohne Klimaschutz-Szenario“ – abzeichnenden saisonalen Niederschlagsverschiebung vom Sommer in den Winter erlangen aber auch niederschlagsabhängige Parameter eine Relevanz für das Thema. So kommt der Monitoringbericht 2020 zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel in Baden-Württemberg zu dem Schluss, dass Sommertrockenheiten zunehmen dürften [LUBW 2020]. Für den thermischen Wirkungskomplex bedeutet dies vor allem eine (ggf. temporär) zunehmende Gefahr fehlender oder reduzierter Verdunstungskühlung von Pflanzen (z.B. Stadtgrün) und einer entsprechend negativen Auswirkung auf kleinklimatische Kühlungseffekte.

1.4 Wärmeinseleffekt, Kaltluftprozesse und Inversionswetterlagen

Kapitel 1.3 hat insbesondere im Zusammenhang mit den Tropennächten gezeigt, wie wichtig vergleichsweise kleinräumige klimatische Prozesse für das (Nicht-)Auftreten von nächtlichen Wärmebelastungen insbesondere im urbanen Kontext sind. Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die vorliegende Analyse sollen die relevanten Prozesse und Zusammenhänge im Folgenden noch einmal überblicksartig mit dem Ziel der Schaffung einer gemeinsamen fachlichen Ausgangsbasis beleuchtet werden. Wie Abbildung 1.10 zeigt, sind hier insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen.

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind [OKE 2017]. Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend geringer überbauten bzw. un bebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsgebieten, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und



Berg-/Talwindsystem (sehr hohe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)

Flächenhafter Kaltluftabfluss am Hang (hohe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)

Wärmeinseleffekt mit Flurwinden (geringe Kaltluftdynamik/-mächtigkeiten)

gleichzeitiges Auftreten und räumliche Überlagerung

Abbildung 1.10: Zentrale Elemente des Kaltluftprozessgeschehens [oben: The COMET program 2017, mitte: LUBW 2024, unten: DWD 2024b]

eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse strömen kann (insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen).

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit relativ geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (Deka) Metern verbunden sind, können Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-/Talwindssysteme in Abhängigkeit der Reliefenergie tal-/hangabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/s sowie Kaltluftpakete von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata. Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkere Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindsystem kann

zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, so dass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

In einem Flächenland wie Baden-Württemberg existieren in der Realität alle denkbaren Kombinationen der skizzierten Prozesse in Raum und Zeit. So können sich in Abhängigkeit der individuellen räumlichen Gegebenheiten alle Effekte zeitlich und räumlich überlagern und dabei verstärken oder abbremsern oder aber nur einer der Effekte relevant sein. Letzteres ist beispielweise im ebenen Gelände außerhalb von orographischen Einflüssen (Einfluss des Geländes auf das Wetter) und regionalen Strömungssystemen der Fall. Hier wirkt dann ausschließlich der Wärmeinseleffekt und kann entsprechende Flurwinde hervorrufen. Diese komplexen Prozesse können ausschließlich mit numerischen Modellen hinreichend gut abgebildet werden (vgl. Kapitel 2.1). Dies ist auch vor dem Hintergrund entscheidend, dass alle Prozesse bzw. Klimafunktionen durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden können.

Die beschriebenen Prozesse und mit ihnen die thermischen Belastungseffekte bzw. Entlastungsfunktionen treten vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit

Inversionsneigung auf. Eine Inversion ist die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs in einer mehr oder weniger mächtigen Schicht. Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft oder durch Absinkvorgänge in der entsprechenden Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert. Inversionen wirken in der Atmosphäre somit stabilisierend.

Eine Form der vorkommenden Inversionen ist die sogenannte Bodeninversion oder auch Strahlungsinversion. Diese tritt auf, wenn sich, meist unter Hochdruckeinfluss, der Boden durch Ausstrahlung stark abkühlt und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht. Diese bodennahe Schicht ist somit kälter als die darüber liegende Luftschicht. Je schwächer der Wind und je intensiver die Ausstrahlung, desto stärker wird die hieraus resultierende Strahlungsinversion sein. Bestimmte Tal- und Beckenlagen haben daher eine besonders hohe Inversionsneigung. Bei geringer Bewölkung bildet sich häufig in den Nachtstunden eine solche Inversion heraus. Bodeninversionen – und damit Kaltluftschichten – können eine Mächtigkeit von einigen Metern bis Dekametern haben, in seltenen Fällen auch von wenigen hundert Metern. Besonders in Ballungsräumen kann sich die Luft innerhalb der Inversionsschicht mit Schadstoffen anreichern, da der Austausch zwischen den Luftschichten verhindert ist und sich diese nicht durchmischen.

1.5 Skizze des Arbeitsprozesses

Die Erstellung der landesweiten Klimaanalyse für den Klimaatlas gliederte sich in einen zweiphasigen Bearbeitungsprozess mit insgesamt fünf Arbeitsschritten (Abbildung 1.11). Die Bearbeitungszeit lag zwischen August 2022 und August 2024. Bei den Arbeitsschritten in der Analysephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Auftretende methodische Herausforderungen (z. B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber LUBW, insbesondere der dortigen Projektleitung sowie zu speziellen Einzelthemen (vor allem Luftqualität, Klimaszenarien, Modellantrieb) zusätzlich mit weiteren Fachstellen gelöst.

Auf die analytische Phase folgte die „Produktphase“, in der neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch dis-

kursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung rückten. Dieses ist dem Umstand geschuldet, dass es in Ermangelung einer normativen Regelung zu klimatischen

Ziel-/Grenzwerten eines im Diskurs zwischen Gutachterteam und Anwenderinnen und Anwendern zu entwickelnden Wertmaßstabs bedarf. Hier wurden seitens des Gutachterteams inhaltliche, gestalterische, bewertungstheoretische und methodische Vorschläge erarbeitet, die dann im Diskurs mit zukünftigen Anwenderinnen und Anwendern modifiziert wurden. Die Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungsprozesses aller am Projekt beteiligten Akteure und Akteurinnen, der die fehlenden normativen Regelungen in diesem konkreten Fall weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt.

Alle Arbeitsschritte wurden durch eine temporäre projektbegleitende Arbeitsgruppe (PAG) und einen fachlichen Begleitkreis zur Beratung der Projektergebnisse flankiert. Neben der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg als federführende Institution sowie der Auftragnehmerin (GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover) waren folgende Institutionen regelmäßiges Mitglied der PAG:

- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM)
- Regionalverbände (Rhein-Neckar, Neckar-Alb, Heilbronn-Franken, Rhein-Neckar, Ostwürttemberg, Hochrhein-Bodensee, Südlicher Oberrhein, Donau-Iller, RV Bodensee-Oberschwaben, RVMO)
- Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen (MLW)

Insgesamt fanden drei Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- 1. Begleitkreis (Vor-Ort-Termin) am 26.09.2022 als Startmeeting zur Entwicklung eines gemeinsamen Projektverständnisses sowie zur Abstimmung der Szenarien und der Datenverfügbarkeit und -übergabe
- Begleitkreis der Regionalverbände (Online-Termin) am 14.06.2023 mit Vorstellung der Ergebnisse zur Bestandssituation und der Planung für die Zukunftsszenarien
-

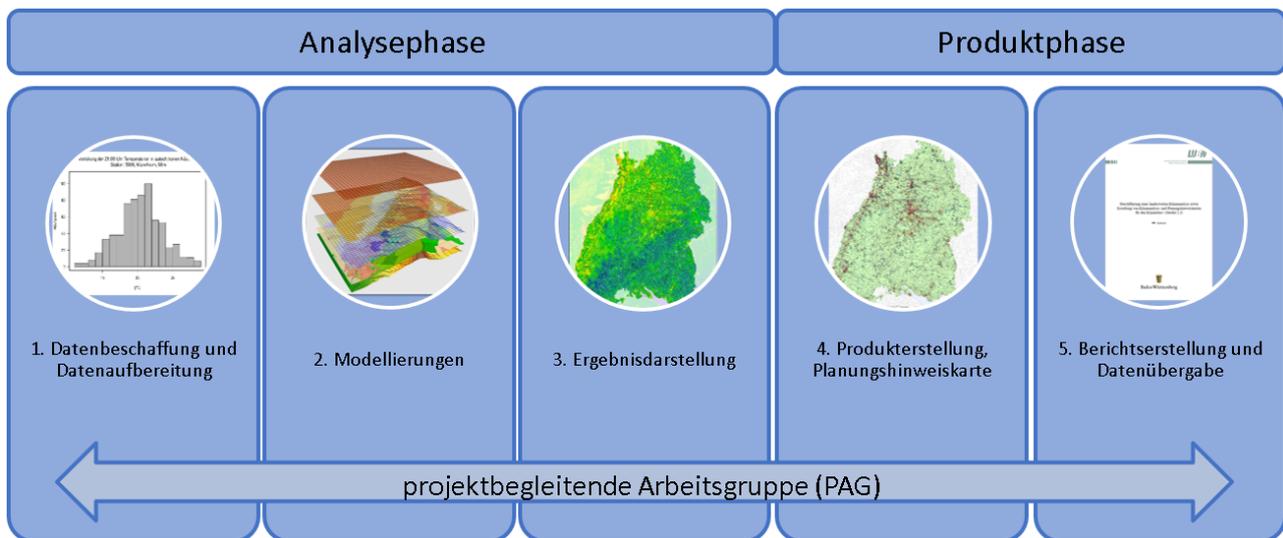


Abbildung 1.11: Projektphasen und Arbeitsschritte [GEO-NET 2024]

- 3. Begleitkreis (Vor-Ort-Termin) am 11.10.2023 mit Vorstellung des aktuellen Projektstandes inklusive Ergebnissen der Zukunftsszenarien und dem Entwurf der Planungshinweiskarte

Ergänzend zur PAG fanden zwei (Online-)Sitzungen eines fachlichen Begleitkreises statt in dem neben Auftraggeber und Auftragnehmer der Deutsche Wetterdienst und das Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart beteiligt waren:

- 10.11.2022 zur Methodik der landesweiten Klimaanalyse
- 12.05.2023 zur Sichtung erster Zwischenergebnisse und der Evaluierung (Ergebnis: gemeinsame Akzeptanz der Modellergebnisse durch den fachlichen Begleitkreis am 13.06.2023)

In Arbeitsschritt 1 wurden zunächst Umfang und Inhalte der durchzuführenden Modellrechnungen konkretisiert. Insgesamt wurden folgende Modellanwendungen durchgeführt:

- Themenkomplex Kaltlufthaushalt und nächtliche Wärmebelastung:
- Bestandssituation (Bezug 1990 - 2021)
- 4 Zukunftsszenarien (unterschiedliche Bezüge je nach Warming Level)
- Themenkomplex Luftqualität
- Ausbreitung von Emissionen aus dem Straßenverkehr für die Bestandssituation

Anschließend wurden die für die Zielerreichung des Vorhabens relevanten Daten aus dem Bestand des Landes Baden-Württemberg sowie weiterer valider Quellen (insbesondere

des Deutschen Wetterdienstes DWD) übernommen und passgenau für das Modell aufbereitet. Hierzu zählten vor allem Sach- und Geodaten als Grundlagen für die räumlichen Eingangsdaten der numerischen Modellrechnungen sowie für die Definition deren meteorologischen Randbedingungen. Unter Verwendung dieser Daten wurden in Arbeitsschritt 2 die Modellrechnungen durchgeführt. Die Qualitätssicherung der Modellergebnisse sowie deren Visualisierung und geostatistische Auswertung erfolgte dann zunächst auf der Ebene von Einzelkarten in Arbeitsschritt 3.

Sämtliche Informationen wurden auf dieser Basis im Arbeitsschritt 4 in den zentralen (Zwischen-)Produkten des Projektes aktueursgerecht und zielgruppenorientiert verdichtet. Dies sind im Einzelnen:

- Klimaanalysekarten für die Bestandssituation und die vier Szenarien (Kap. 3.2)
- Luftqualitätskarte (Kap. 3.3)
- Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme (Kap. 3.4)
- Planungshinweiskarte (Kap. 3.5)

Weiterhin wurde während dieses Arbeitsschrittes ein interner Zwischenbericht angefertigt. Nach Fertigstellung aller Produkte erfolgte in Arbeitsschritt 5 zum einen die Erstellung des vorliegenden Berichtes, in dem die Vorgehensweise dokumentiert ist. Zum anderen wurden sämtliche im Rahmen des Projektes erzeugten kartographischen Abbildungen als vollumfängliche GIS-Projekte (also inklusive aller Geodaten, Sachattribute und Metadaten) aufbereitet und übergeben.

2 Analysephase - Modellierungen

2.1 Modell und Modellauflösung

Numerische Modellanwendungen weisen gegenüber anderen Analysenverfahren (Messungen, reine GIS-Analysen) den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse ermitteln können. Diese Felder können im sog. Postprocessing verwendet werden, um weitere relevante Kenngrößen (z. B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes) abzuleiten. Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Maßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz quantitativ analysiert werden und auf diese Art und Weise einen wissenschaftlich fundierten Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von raumplanerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Maßstabsebenen leisten können.

Die Modellrechnungen für das vorliegende Projekt wurden mit dem etablierten mesoskaligen Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt. Die Grundgleichungen von FITNAH-3D sind in der Literatur beschrieben [GROSS, 1992]. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 [VDI 2017] definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern. Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH-3D in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEONET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerterroutinen weiterentwickelt (u.a. [GROSS 2017], [GROSS 2013], [GROSS 2012], [GROSS 2012a], [GROSS 2002], [GROSS et al. 2002]).

Die Anwendungsbereiche von FITNAH-3D reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale/kantonale Klimaanalysen (z.B. München, Nürnberg, Region Hannover, Kanton Zürich) bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten (z.B. NordrheinWestfalen, Luxemburg, Schweiz). Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten

Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

Modellanwendungen mit FITNAH-3D benötigen meteorologische Rand- und Startbedingungen sowie spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebietes sind. Die Rand- und Startbedingungen umfassen die zugrundeliegende Wetterlage, die Abhängigkeit der Temperatur von der Höhe (Höhengradient), die Initialisierungstemperatur der Luft sowie die Gewässertemperaturen. Darüber hinaus müssen für jede Rasterzelle folgende landschaftsbezogenen Eingangsdaten in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände/ Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe.

Grundsätzlich gilt dabei, je höher die horizontale räumliche Auflösung, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind auch die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Größe des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die landesweite Klimaanalyse Baden-Württemberg wurde eine horizontale Modellauflösung von 50 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet rd. 24,7 Mio. Rasterzellen. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für die Regional-/Landschaftsrahmenplanung relevanten Aussagen ableiten. Darüber hinaus sind die Ergebnisse auch für den Einsatz im Rahmen der vorbereitenden Bauleitplanung hinreichend valide. Für die verbindliche Bauleitplanung sowie Fragestellungen mit einem vergleichbaren Detaillierungsanspruch sind

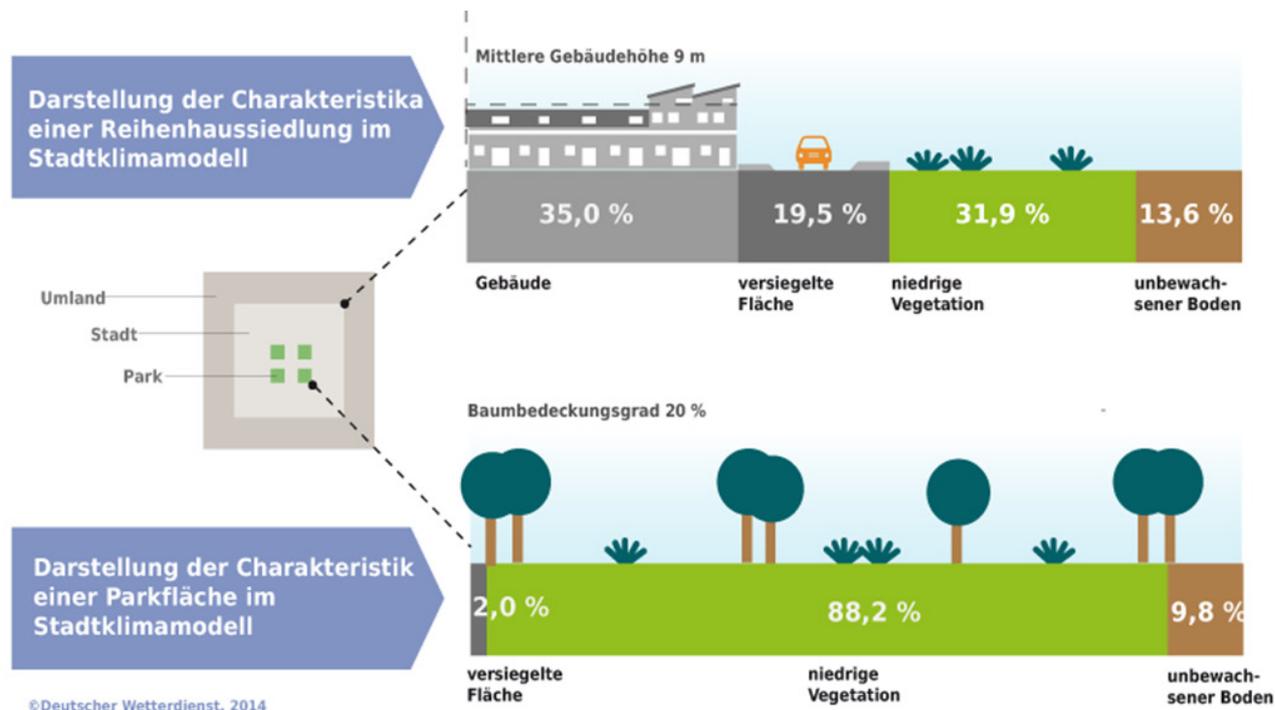


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung von idealisierten Landnutzungsklassen in mesoskaligen Stadt-/Regionalklimamodellen [DWD 2014]

jedoch ergänzende Analysen mit höheren Modellauflösungen und ggf. auch mikroskalige Ansätze notwendig. Dieses liegt vor allem darin begründet, dass bei der gewählten Modellauflösung einzelne Gebäude- oder Grünstrukturen nicht explizit aufgelöst (bedeutet: berücksichtigt) werden, sondern über ein Set an vordefinierten, idealisierten Landnutzungsklassen repräsentiert werden (Abbildung 2.1).

Zur Modellierung der Luftqualität sind weitere Eingangsgrößen notwendig, die die Immissionsbelastung durch den Straßenverkehr sowie durch industrielle Quellen und Kleinf Feuerungsanlagen abbilden. Dazu gehören Verkehrsdaten (u. a. Straßennetz und Verkehrsmengen, Verkehrssituation, Verkehrszustand, Geschwindigkeit, Freisetzungshöhe und Flottenzusammensetzung) ebenso wie Standorte und Emissionsdichten genehmigungsbedürftiger Anlagen. Die Datengrundlage der meteorologischen Randbedingungen sowie die Eingangsdaten zu Landnutzung und Emissionsquellen werden im Folgenden erläutert.

2.2 Szenarien- und Methodenentwicklung

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEONET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit den numerischen Modellen FITNAH-3D und ASMUS_green. In der Regel wird dabei ein Vergleich zwi-

schon einem Referenzzeitraum und einem oder mehreren Zukunftsszenarien hergestellt. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge / urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z. B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte [vgl. LFU BAYERN 2020A] erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen – Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik [vgl. FÜRST UND SCHOLLES 2008] ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z. B. die Z-Transformation, vgl. Kap. 3.5.3), die in verschiedenen um-

weltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind [z. B. VDI 2008, VDI 2015].

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarientwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft abzuschätzen, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Gegenwart und Zukunft aufmerksam zu machen. Neben der Darstellung, wie eine hypothetische Situation in der Zukunft zustande kommen kann, werden Varianten und Alternativen dargestellt [WILMS 2006]. Der Szenariotrichter für das baden-württembergische Klima der Zukunft spannt sich dabei, nach Abstimmung im Begleitkreis, für dieses Projekt ausschließlich über den großen Faktor Klimawandel auf, da dieser die zentrale Stellschraube aus der landesweiten Perspektive darstellt. Andere Faktoren wie Flächennutzungsänderungen und Anpassungsmaßnahmen, die ebenfalls mit FITNAH-3D und ASMUS_green untersucht werden können, waren nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes. Sie können bspw. in auf die landesweite Analyse aufbauenden Stadtklimaanalysen einzelner Kommunen Berücksichtigung finden.

Im vorliegenden Fall fiel die Wahl auf die Analyse von vier Zukunftsszenarien. Verglichen werden sollten die Ergebnisse der Szenarien mit einer Referenzsituation, als Repräsentation einer gegenwärtigen Situation. Die für dieses Referenzszenario (Synonym: Ist-Situation, Bestandsituation) abgeleiteten Rahmen- und Randbedingungen werden in Kapitel 2.4 erläutert.

Warming Levels als Grundlage der Szenarien

Grundlage der Zukunftsbetrachtung sind die Regionalen Klimamodelle für Baden-Württemberg [LUBW 2021]. Üblicherweise wurden in der Vergangenheit bei ähnlichen Fragestellungen bestimmte RCP-Szenarien herangezogen und ein Teil der Bandbreite für die weitere Betrachtung ausgewählt (z. B. „RCP 4.5 2031 - 2060 Min“ oder „RCP 8.5 2071 - 2100 Max“). Die Bandbreite zeigt zwischen einer oberen (Max) und unteren Grenze (Min) einen wahrscheinlichen Pfad der Temperaturentwicklung (Abbildung 2.2). Statt die Temperaturänderungssignale direkt von den RCP-Szenarien abzuleiten, wurden jedoch bestimmte Temperaturwerte vorgegeben,

die dann nachträglich den Szenarien und Zeiträumen zugeordnet werden können. Die auf regionaler Ebene verfügbaren Modellergebnisse aus den RCP-Szenarien wurden als sogenannte Warming Levels dargestellt. Hierbei wird also gefragt, in welchem Zeitraum bezogen auf eine Referenz eine Erwärmung von +1 °C oder mehr zu erwarten ist.

So können zeitunabhängige Aussagen zu einem um 2, 3, 4 und 5 °C wärmeren Baden-Württemberg getroffen werden. Die gewählten Warming Levels basieren auf den Sommertemperaturen (JJA) bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zum Zeitraum 1971 - 2000. Die Werte der Warming Levels decken die Bandbreite der Erwärmungen der Sommertemperatur ab, die bis 2100 nach den RCP-Szenarien 2.6, 4.5 sowie 8.5 erreicht werden könnten.

Abbildung 2.2 zeigt eine Zuordnung der Warming Levels zu den verschiedenen RCP-Klimaszenarien und Zeiträumen. Die angezeigten Warming Levels (+2, +3, +4, +5 °C) beziehen sich dabei auf die Erwärmung der Sommertemperatur im Vergleich zum Zeitraum 1971 - 2000.

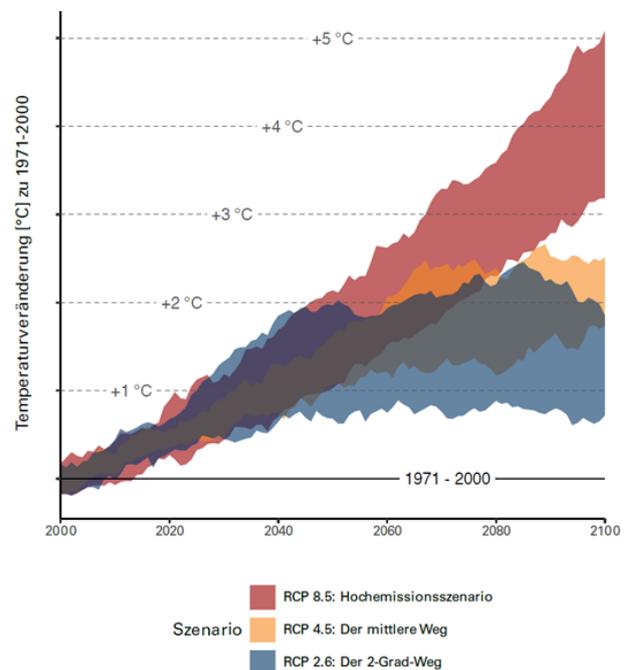


Abbildung 2.2: Zuordnung der RCP-Szenarien zu den Warming Levels, Darstellung der Veränderung der Sommertemperaturen bezogen auf 1971 – 2000 [Modelldaten ReKliEs-De, LfU 2020b; Auswertung und Darstellung LUBW]

Für die weitere Berechnung im Fitnah-Modell mussten diese Werte entsprechend angepasst werden, da die Modellierung der Bestandssituation bereits eine Temperaturänderung im Vergleich zum Referenzzeitraum der RCP-Szenarien (Klimaleitplanken) abbildet. Ein Blick in die Beobachtungsdaten zeigt, dass sich die Sommermitteltemperatur von der Re-

ferenzperiode 1971 - 2000 (16,6 °C) bis zum Zeitraum der Bestands-Simulation 1991 - 2020 (17,6 °C) bereits um ca. 1 °C erhöht hat.

Daher müssen für eine im Vergleich zum Zeitraum 1971 - 2000 um 2 °C wärmere Modellwelt eine 1 °C wärmere Starttemperatur angenommen werden. Es wurden also folgende Deltas für die jeweilige Starttemperatur der Fitnah-Modellierungen verwendet:

Tabelle 2.1: Übersicht der Modellläufe, des Deltas der Initialtemperatur sowie der zugrundeliegenden Warming Levels

| Modelllauf | Bestands-situation (1991-2020) | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 4 |
|-----------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Delta zu Bestands-situation | - | +1 °C | +2 °C | +3 °C | +4 °C |
| Erwärmung seit 1971 - 2000 | +1 °C | +2 °C | +3 °C | +4 °C | +5 °C |

Vor- und Nachteile der Verwendung von Warming Levels

Die Vorteile:

- Die Einordnung der Szenarien zu den entsprechenden RCPs und Zeiträumen ist individuell möglich (siehe Schnittpunkte Abbildung 2.2).
- Die Kommunikation von konkreten, ganzzahligen Temperaturänderungen ist leichter als die Vermittlung von Szenarien, Pfaden, Zeitscheiben und Bandbreiten.
- Auch wenn in den kommenden Jahren die RCP-Szenarien durch SSP-Szenarien ersetzt/ergänzt werden, ist eine nachträgliche Einordnung möglich und keine neue Modellrechnung nötig.
- Durch die Nutzung eines konkreten Temperaturwertes, ist keine einschränkende Annahme von Minimum-/Median-/Maximum-Werten aus den RCP-Bandbreiten notwendig. Im Gegenteil: Die Bandbreite ist in Abbildung 2.2 vollständig abgebildet und kann entsprechend zugeordnet werden.

Die Nachteile:

- Die Ergebnisse haben eine geringere Vergleichbarkeit mit anderen Vorhaben, die ein konkretes Szenario und einen konkreten Zukunftszeitraum betrachten.
- Da die Warming Levels nichts darüber aussagen, wie schnell bzw. auf welchem Pfad eine Erwärmung stattgefunden hat, ist die Aussagekraft für Wirkanalysen bspw. zu Ökosystemen, Meeresspiegelanstieg oder Gletscherrückgang begrenzt. Dies ist bei diesem Projekt jedoch nicht gegeben.

Da sich die oben beschriebenen Warming Levels auf eine feste Temperaturzunahme beziehen wurde anhand dieser Signale die Starttemperatur (vgl. Kap. 2.4.3) der Zukunftsmodellierungen angepasst (Tabelle 2.1). Die Gewässertemperaturen (vgl. Kap. 2.4.4) wurden je Szenario um die Hälfte des Klimadeltas für die Starttemperatur angehoben. Es handelt sich dabei um eine empirische Festlegung, da Wasser eine höhere Wärmekapazität als Luft hat und sich langsamer erwärmt (siehe auch CAISSIE 2006). Die übrigen Eingangsdaten, wie z. B. zur Bodenfeuchte, wurden gegenüber dem Ist-Zustand nicht verändert.

2.3 Verwendete Datengrundlagen

2.3.1 Orographie

FITNAH-3D ist für die Modellierungen unter den in Kapitel 0 definierten Rahmen- und Randbedingungen auf spezielle Eingangsdaten angewiesen. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, auf Basis der mit vertretbarem Aufwand zu akquirierenden Roh-/Primärgeodaten für jeden der ca. 24,7 Mio. und jeweils 0,25 ha umfassenden Rasterpunkte individuelle Informationen zu der Orographie, der Landnutzung sowie die Strukturhöhe zu ermitteln. Je besser die Eingangsdaten die real vor Ort existierende Situation widerspiegeln, desto valider fallen auch die Modellergebnisse aus.

Für die Simulationen muss ein gleichmäßig gerastertes vier-eckiges Rechengebiet aufgespannt werden. Das Rechengebiet umfasst 5.251 Zeilen mal 4.705 Spalten, was einer Summe von ca. 24,7 Mio. Gitterpunkten entspricht.

Zur Ermittlung der Höheninformation für jeden Gitterpunkt wurde das vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) zur Verfügung gestellte Digitale Geländemo-

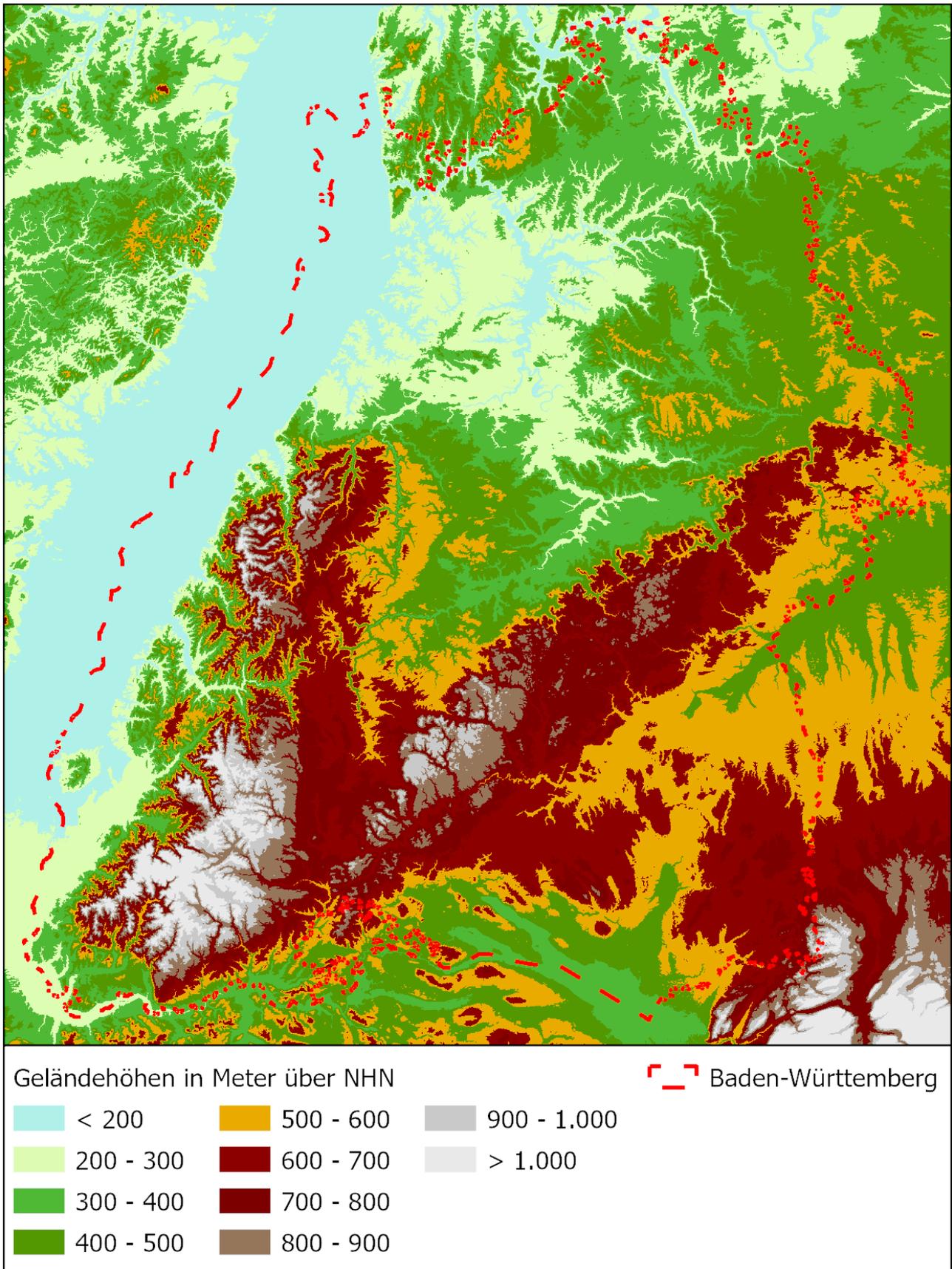


Abbildung 2.3: Geländehöhen Baden-Württemberg und Umland

dell in einer Auflösung von 5 m (DGM5) verwendet [LGL, 2022]. Für die im Modellgebiet liegenden bzw. angrenzenden Bundesländer / Länder wurde das frei verfügbare EU-DEM mit einer Auflösung von 25 m verwendet [BASHFIELD &

KEIN, 2011]. Die beiden Geländemodelldaten wurden homogenisiert und in eine Auflösung von 50 m gebracht, auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten und miteinander verschmolzen (Abbildung 2.3).

2.3.2 Landnutzung

Für mesoskalige Anwendungen ist FITNAH-3D in der Lage, insgesamt 18 verschiedene Landnutzungsklassen zu berücksichtigen. Wenn für die Ableitung einzelner Nutzungstypen die notwendigen Geodaten nicht verfügbar sind, kann eine entsprechende Differenzierung unterbleiben. Das Modell ist also bis zu einem gewissen Grad in der Lage, auch unter nicht optimalen Eingangsdatenbedingungen valide Ergebnisse zu erzeugen – wenn auch unter Inkaufnahme von Verlusten beim Detaillierungsgrad der Modellergebnisse. Im Optimalfall können die in Tabelle 2.2 aufgeführten Landnutzungsklassen in drei Clustern berücksichtigt werden.

Tabelle 2.2: Mesoskalige FITNAH-Nutzungsklassen

| FITNAH - Code | Nutzungsklasse | Cluster |
|---------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1 | Zentrumsbebauung | Urbane Strukturen |
| 2 | Block- und Blockrandbebauungen | |
| 3 | Industrie- und Gewerbeflächen | |
| 4 | Zeilen- und Hochhausbebauungen | |
| 5 | Einzel- und Reihenhausbauung | |
| 6 | ebenerdig versiegelt | Verkehrsinfrastrukturen |
| 7 | Gleisfläche | |
| 8 | baulich beeinflusste Grünfläche | Freiraumstrukturen |
| 9 | Freiland, Rasen | |
| 10 | Gehölz | |
| 11 | Laubwald | |
| 12 | Mischwald | |
| 13 | Nadelwald | |
| 14 | Gewässer | |
| 15 | Rebflächen | |
| 16 | Fels | |
| 17 | Gletscher | |
| 28 | Sand | |

Tabelle 2.3 zeigt, welche Geodatensätze für die Klassifizierung zu den in Tabelle 2.2 aufgeführten Nutzungsklassen verwendet wurden.

Tabelle 2.3: Datengrundlage Landnutzung

| Datensatz | Aktualität | Format | Quelle |
|----------------------------|------------|-------------------------|---|
| ALKIS Landnutzung | 2022 | Vektor-Polygon | LGL |
| ALKIS Gebäudeumrisse | 2022 | Vektor-Polygon | LGL |
| Imperviousness Density Map | 2018 | GeoTIFF, 10 m Auflösung | Copernicus Imperviousness (https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness) |
| Corine Landcover | 2018 | Vektor-Polygon | Copernicus CLC 2018 (https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018) |

Die ALKIS Landnutzung und die ALKIS Gebäudeumrisse standen als valide und flächendeckende Datensätze für Baden-Württemberg zur Verfügung. Die Copernicus Imperviousness Density Map unterscheidet Versiegelungsgrade von 0 % bis - 100 % und bildet ganz Europa ab. Der Datensatz Corine Landcover lag als Polygone mit Landnutzungsattributen vor und wurde ausschließlich außerhalb Baden-Württembergs für die Nutzungsklassifizierung verwendet. Die Polygone der ALKIS-Nutzung unterscheiden zwischen 87 Nutzungsklassen (kombinierte Objektart und Unterart).

Diese Klassen wurden zum großen Teil über eine Look-Up-Tabelle direkt zu den FITNAH-Nutzungsklassen reklassifiziert. Landnutzungsklassen, bei welchen keine eindeutige FITNAH-Klasse zugewiesen werden konnte, wurden über weitere Analysen klassifiziert. Bei einigen Flächen kann über das Nutzungsattribut nicht pauschal festgelegt werden, ob es sich um Freiflächen oder versiegelte Flächen handelt (z. B. „Flugverkehr-Landeplatz“, „Sonderlandeplatz“ oder „Platz“). Hier wurde der Versiegelungsgrad für die Klassifizierung verwendet.

Auch Fließgewässer wurden gesondert betrachtet. Die Flussbreite der Fließgewässer schwankt erheblich von der Quelle über Ober- bis zum Unterlauf, was dazu führt, dass Flüsse im 50 m Raster nicht durchgängig abgebildet werden. Um diese jedoch in ihrer gesamten Länge im Nutzungsraster abbilden zu können, wurden größere Fließgewässer als durchgängige Pixellinie in das Nutzungsraster eingepflegt, indem die Mittellinie der Fließgewässer-Polygone der ALKIS-Nutzung extrahiert und gerastert wurde.

Die FITNAH Mesoskalenklassen unterscheiden fünf urbane Klassen (vgl. Tabelle 2.2). Die ALKIS-Nutzung unterscheidet zwischen folgenden urbanen Klassen (ausgenommen Gewerbeflächen):

- Fläche besonderer funktionaler Prägung
- Fläche besonderer funktionaler Prägung – Geschlossen
- Fläche besonderer funktionaler Prägung – Offen
- Fläche gemischter Nutzung
- Fläche gemischter Nutzung – Geschlossen
- Fläche gemischter Nutzung – Offen
- Wohnbaufläche – Geschlossen
- Wohnbaufläche – Offen

Die Einteilung der urbanen Klassen kann nicht ausschließlich über die ALKIS-Attribute erfolgen. Damit dennoch zwischen allen fünf urbanen FITNAH-Klassen unterschieden werden kann, wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher zum größten Teil auf Gebäudeanteilen und Versiegelungsgraden basiert. Gebäudeanteile und Versiegelungsgrade wurden über die ALKIS-Gebäudeumrisse und den Versiegelungsanteilen der Copernicus Imperviousness Density Map auf eine 50 m Rasterzelle berechnet. Statt der Copernicus Imperviousness Density Map aus dem Jahr 2018 stand alternativ eine klassifizierte Versiegelungskartierung für Baden-Württemberg des LGL aus dem Jahr 2022 zur Verfügung. Diese weist zwar eine höhere Aktualität auf, unterscheidet jedoch nicht zwischen Versiegelungsgraden in Prozent und ist fehleranfälliger bei Ackerflächen, weshalb entschieden wurde, die Copernicus Imperviousness Density Map zu verwenden.

Die Gebäudeanteile und Versiegelungsgrade werden gemeinsam betrachtet, um eine urbane Klasse zu definieren. Klasse 1 – Zentrumsbebauung wird z. B. nur vergeben, wenn der Versiegelungsgrad > 80 % ist und der Gebäudeanteil > 40 %. Tabelle 2.4 zeigt wie die urbanen Klassen festgelegt wurden. Zusätzlich zu den fünf urbanen Klassen wurde hier auch Klasse „8 – baulich beeinflusste Grünfläche“ vergeben, wenn der Versiegelungsgrad > 20 % und der Gebäudeanteil > 30 % ist. Gewerbeflächen werden ausschließlich über die ALKIS-Nutzung gesetzt und sind hier nicht aufgeführt.

Ergänzend dazu folgten anschließend einige gezielte Abfragen, um die Klassifikation der urbanen Klassen zu verbessern. So wurde unter anderem festgelegt, dass Klasse „1 – Zentrumsbebauung“ nur dort vorkommen darf, wo in der ALKIS-Nutzung die urbane Klasse „Fläche gemischter Nutzung – Geschlossen“ liegt. Sollte das nicht der Fall sein, wird aus einem als Klasse „1 – Zentrumsbebauung“ klassifizierter Pixel ein Klasse „2 – Block- und Blockrandbebauung“ klassifizierter Pixel. Auch der Gebäudehöhendatensatz (vgl. Kapitel 2.3.3) wird zur Verbesserung der urbanen FITNAH-Klassen verwendet. Klasse „4 – Zeilen- und Hochhausbebauungen“ zeichnet sich z. B. auch durch höhere Baukörper aus. So wurde ein Klasse „5 – Einzel- und Reihenhausbebauung“-Pixel zu einem Klasse „4 – Zeilen- und Hochhausbebauungen“-Pixel, wenn die mittlere Gebäudehöhe an dieser Stelle höher 15 m beträgt. Gewerbeflächen werden separat über die Attribute der ALKIS-Nutzung ausgewiesen. Aber auch hier erfolgte eine nachträgliche Korrektur mit Hilfe der Versiegelungsgrade, da andernfalls Grünflächen innerhalb Gewerbeflächen nicht als solche klassifiziert würden. Folgende Abfragen werden zu Verbesserung der Klassifizierung der urbanen FITNAH-Klassen verwendet:

Wenn FITNAH = 1 und ALKIS = „Fläche gemischter Nutzung – Offen“ dann FITNAH > 2

Wenn FITNAH = 1 und ALKIS = „Wohnbaufläche - Offen“ dann FITNAH > 4

Wenn FITNAH = 2 und ALKIS = „Wohnbaufläche - Offen“ dann FITNAH > 4

Wenn FITNAH = 4 und ALKIS = „Fläche gemischter Nutzung - Geschlossen“ dann FITNAH > 2

Wenn FITNAH = 5 und ALKIS = „Fläche gemischter Nutzung - Geschlossen“ dann FITNAH > 2

Wenn FITNAH = 1 und ALKIS = „Fläche gemischter Nutzung – Offen“ dann FITNAH > 2

Wenn FITNAH = 5 und Gebäudehöhe > 15 m dann FITNAH > 4

Tabelle 2.4: Bestimmung der urbanen Klasse durch Kombination von Gebäudeanteil und Versiegelungsgrad

| | 0 % – 5 % Gebäudeanteil | 6 % – 15 % Gebäudeanteil | 16 % – 30 % Gebäudeanteil | 31 % – 40 % Gebäudeanteil | 41 % – 100 % Gebäudeanteil |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0 % – 20 % Versiegelungsgrad | 8 | 8 | 8 | 5 | 5 |
| 21 % – 35 % Versiegelungsgrad | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 36 % – 60 % Versiegelungsgrad | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 61 % – 80 % Versiegelungsgrad | 5 | 5 | 5 | 4 | 2 |
| 81 % – 100 % Versiegelungsgrad | 5 | 4 | 4 | 2 | 1 |

Wenn FITNAH = 3 und Versiegelungsgrad < 35 % dann
FITNAH > 8

Wenn FITNAH = 9 und Versiegelungsgrad > 20 % dann
FITNAH > 8

Wenn FITNAH = 9 und Versiegelungsgrad > 35 % dann
FITNAH > 6

Abbildung 2.4 veranschaulicht noch einmal, wie aus Versiege-
lungsgrad, Gebäudeanteil und ALKIS-Nutzung die urbanen
FITNAH-Klassen klassifiziert werden.

Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 zeigen das Ergebnis der
Aufbereitung der Landnutzungsklassen für ganz Baden-

Württemberg und die Stadt Stuttgart. Bis auf die Nutzungs-
klasse „17 – Gletscher“ wurden alle in Tabelle 4 aufgeführten
Nutzungsklassen vergeben. Insgesamt umfassen die urbanen
Klassen 8,3 % des Nutzungsrasters in Baden-Württemberg.
91,7 % des Bundeslandes sind Nutzungsklassen zuzuordnen,
die im umweltmeteorologischen Kontext den sog. Ausgleichs-
raum darstellen, potentiell also Klimafunktionen bereit-
stellen. Demgegenüber bilden die fünf Klassen der urbanen
Strukturen den Wirkraum. Hier können thermische Belas-
tungen für die menschliche Gesundheit auftreten, die u. a.
über Kaltluftzuflüsse abgemildert werden können.

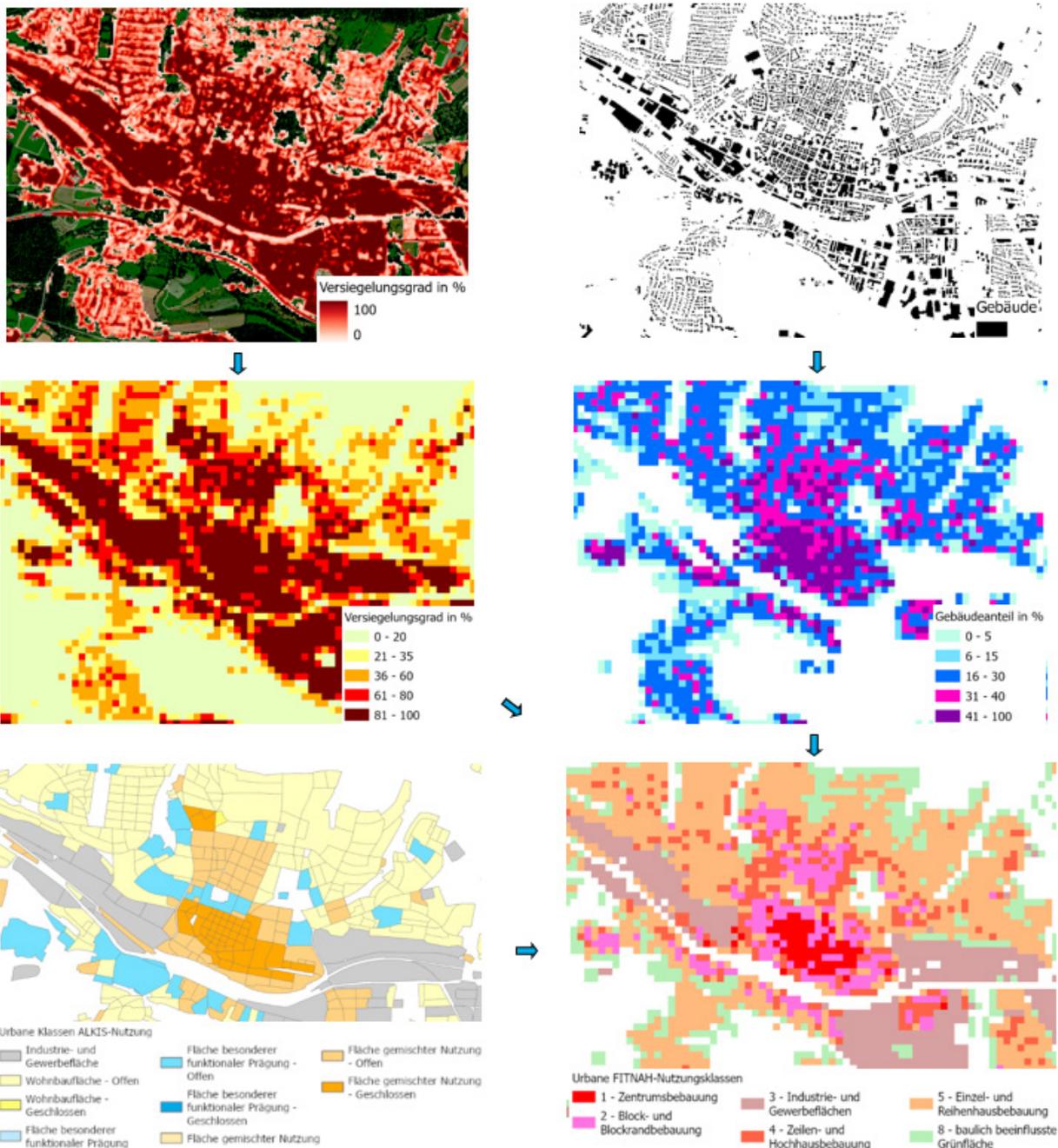


Abbildung 2.4: Klassifikation urbaner FITNAH-Nutzungsklassen aus Versiegelungsgrad, Gebäudeanteil und ALKIS-Nutzung



Abbildung 2.5: Nutzungsraster Baden-Württemberg und Umland

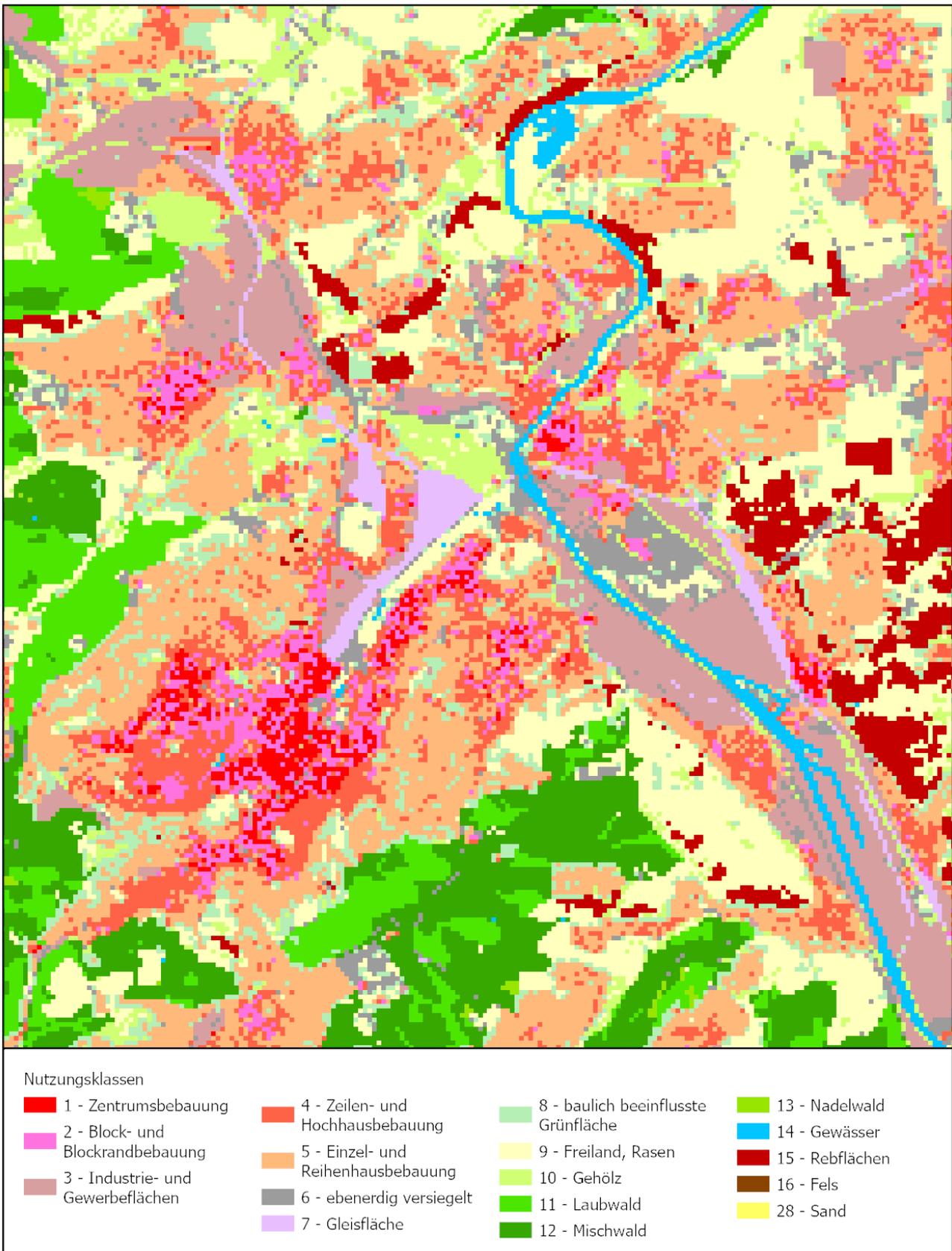


Abbildung 2.6: Nutzungsraster bei Stuttgart

2.3.3 Strukturhöhen

Die Strukturhöhe als dritte wichtige Modelleingangsgröße gibt die Höhe von sich auf der Erdoberfläche befindenden Objekten wie Gebäuden oder Vegetationsstrukturen an. Die Strukturhöhe dient als Rauigkeitsmaß und ist v. a. für das Strömungsgeschehen relevant. Sie ergibt sich dabei aus der Subtraktion von Digitalem Oberflächenmodell (DOM) und Digitalem Geländemodell (DOM – DGM = Strukturhöhe). Das Digitale Oberflächenmodell wurde als klassifizierte LAS-Punktwolke mit dem Stand 2016 - 2021 für fast ganz Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Die Bereiche, die noch nicht zur Verfügung stehen, wurden durch das ältere Oberflächenmodell aus den Jahren 2000 - 2005 ergänzt [LGL, 2022].

Über die Klassen der LAS-Punktwolke (> Brückenpunkte, Bodenpunkte, Gebäudepunkte, Unterbodenpunkte, Vegetation und sonstige Nichtbodenpunkte) konnten Gebäude- und Vegetationshöhen separat aufbereitet werden. Die daraus abgeleiteten Strukturhöhen wurden für alle urbanen Klassen (1 – 5 und 8) und Klassen, welche Vegetation abbilden (10, 11, 12 und 13), verwendet. Alle übrigen Klassen bekommen eine Strukturhöhe von 0 zugewiesen. Außerhalb von Baden-Württemberg wurden empirischen Standardhöhenwerte für die urbanen und Vegetations-Nutzungsklassen genutzt. Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8 zeigen das Strukturhöhenraster für ganz Baden-Württemberg und die Stadt Stuttgart.

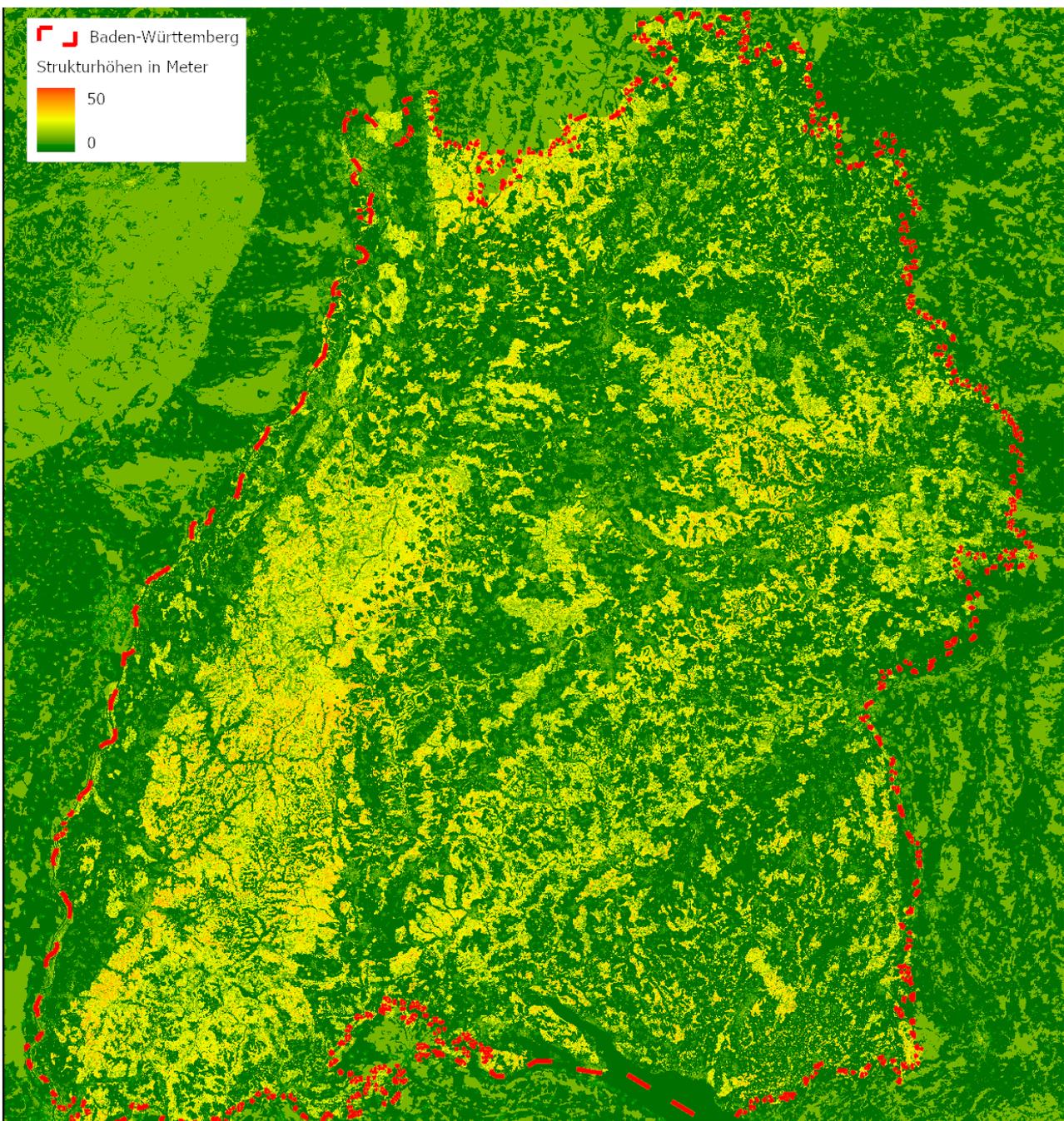


Abbildung 2.7: Strukturhöhen Baden-Württemberg und Umgebung

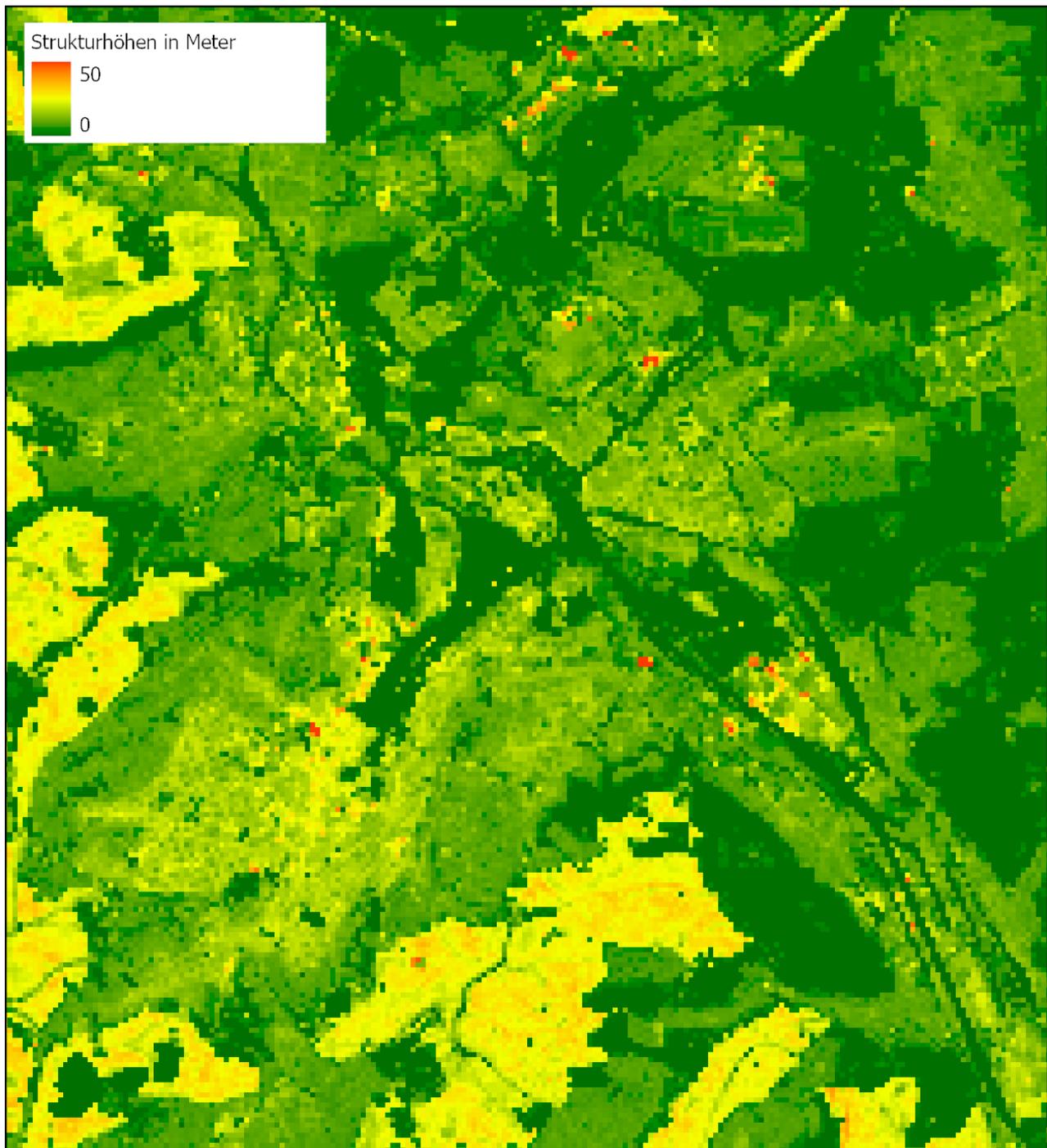


Abbildung 2.8: Strukturhöhen bei Stuttgart

2.3.4 Daten zur Luftqualität

Für die Betrachtung der Referenzsituation in Baden-Württemberg wurden ergänzend zur Klimamodellierung eine Modellrechnung zur Luftqualität durchgeführt. Eine Übertragung auf die Zukunftsszenarien war hier aufgrund der benötigten Eingangsdaten nicht sinnvoll möglich.

Generell wird ein überwiegender Anteil der Luftschadstoffe durch den Straßenverkehr freigesetzt. Anders als bei industriellen Quellen und Kleinf Feuerungsanlagen werden die straßenverkehrsbedingten Emissionen in geringen Höhen und

in direkter Nähe zum Schutzgut (menschliche Gesundheit) freigesetzt. Infolgedessen treten insbesondere an Straßen mit hohen Verkehrsströmen und unmittelbar angrenzender Wohnbebauung hohe Immissionsbelastungen und ggf. mit möglichen Grenzwertüberschreitungen auf. Diese Zusammenhänge betonen die besondere Relevanz der Berücksichtigung des Straßenverkehrs als Schadstoffquelle in stadtklimatischen Untersuchungen.

Wesentliche Datengrundlage für die Erfassung der Emissionen aus dem Bereich Straßenverkehr ist die aktuelle Bun-

desverkehrsählung sowie die Verkehrszählungen an landeseigenen Verkehrszählstellen. Die Verkehrsstärken aus den Verkehrszählungen werden in Durchschnittlicher Täglicher Verkehrsstärke (DTV) für die verschiedenen Fahrzeuggruppen und Straßentypen angegeben. Basierend darauf wird mittels einer Modellierung ein Verkehrsnetz abgebildet, mit den entsprechenden Verkehrsbelastungen.

Bei der Ermittlung von Verkehrsmengen werden Verkehrsablauf/ Verkehrsqualität/ Staupotenziale und eine Vielzahl an Verkehrssituationen im Stundenraster betrachtet.

In einem weiteren Schritt werden für die Emissionsberechnungen des Straßenverkehrs auf der Grundlage des „Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA, Firma Infrac GmbH) entsprechende Emissionsfaktoren angewandt. Diese unterscheiden pro Schadstoff, pro Fahrzeugart (unterschieden nach Motorkonzept, Euronormstufe, Gewichtsklasse, etc.), pro Verkehrssituation (stop and go, etc.), Neigungsklassifizierung (bergige Strecke, Ebene, etc.) und Analysejahr/ Szenario, um eine möglichst realistische Abbildung der Schadstoffbelastung abzugeben. Die Emissionsfaktoren geben die charakteristischen spezifischen Abgasemissionen für die betrachtete Verkehrssituation in g/ (Fahrzeug*km) an. Diese Emissionsfaktoren wurden im Rahmen umfangreicher europäischer Projekte ermittelt, wobei zunächst typische Real-World-Fahrzyklen definiert und daraus die sogenannten Verkehrssituationen abgeleitet worden waren.

Zur Ermittlung der charakteristischen Emissionsfaktoren für ein Untersuchungsgebiet ist es zunächst notwendig, die regional auf den Straßen eingesetzte Fahrzeugflotte zu ermitteln.

Die Emissionen im Bereich des Straßenverkehrs für das Land Baden-Württemberg berechnen sich daher unter Berücksichtigung der Verkehrsstärken und entsprechend den oben genannten Faktoren bis auf die Ebene einzelner Straßenabschnitte.

Auch im Rahmen des Atmo-Vision Projekts wurde die Lufthygiene in Teilen Baden-Württembergs untersucht (ATMO-VISION 2018). Da in diesem Projekt jedoch in erster Linie eine Verdriftung der Emissionen berücksichtigt wurde, wurden diese Daten für die Lufthygiene-Betrachtung der landesweiten Klimaanalyse nicht verwendet.

Die zur Verfügung gestellten Daten wurden in eine Emissionsdichte von Stickoxiden (NO_x) in Gramm pro Tag und Meter (g/ d*m) umgerechnet und auf die 50 m Auflösung des Nutzungsrates übertragen. Dabei erfolgte eine teilautomatisierte Korrektur der Datensätze. Die Raster wurden so bearbeitet, dass jede Rasterzelle nur zwei Nachbarn mit Emissionen besitzt, außer im Bereich von Straßenkreuzungen. In den Kreuzungsbereichen, wo sich Straßen mit unterschiedlichen Emissionsniveaus schneiden und mehrere mögliche Emissionsdichten für eine Rasterzelle vorlagen, wurde der jeweils höhere Wert beibehalten.

2.4 Rahmen- und Randbedingungen

2.4.1 Wetterlage

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. autochthoner Sommertag (wolkenloser Himmel, Windstille und maximale Sonneneinstrahlung) als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 Uhr bis um 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes. Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und durch Windstille bezüglich der Wetterlage gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Baden-Württemberg besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-)Wetterlage sind die in Kapitel 1.4 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeineleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 2.9 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland (landwirtschaftliche Nutzfläche), Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z. B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeineleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen Luftaustauschs zu den im Jahresverlauf höchsten Wärmebelastungen. Diese

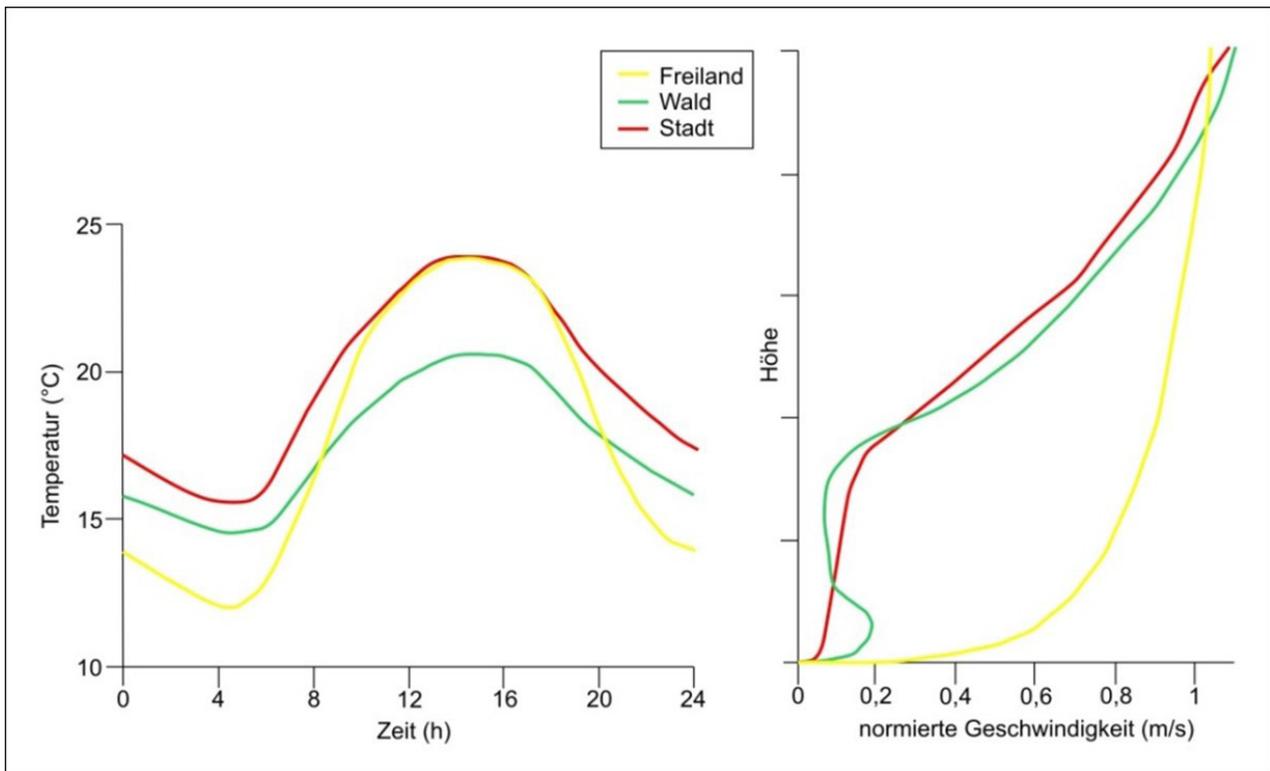


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Tagesordnung der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen [Eigene Darstellung nach GROSS 1992]

thermisch besonders belastende Wetterlage tritt regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf.

2.4.2 Höhengradient

Der für die Erwärmung der Atmosphäre wesentliche solare Strahlungsumsatz findet an der Erdoberfläche bei verhältnismäßig hohem Luftdruck statt. Lufttemperatur und atmosphärischer Luftdruck stehen in einem engen physikalischen Zusammenhang. Je höher der Luftdruck, umso höher die Temperatur. Erwärmte Luft dehnt sich mit abnehmendem Luftdruck aus. Ausdehnung bedeutet im physikalischen Sinne Arbeit. Die dafür notwendige Energie wird aufsteigender Luft entnommen, wodurch sich diese abkühlt. Mit zunehmender Höhe nimmt im Allgemeinen der Luftdruck ab, somit bildet sich ein hypsometrischer (also höhenabhängiger) Temperaturgradient aus [KUTTLER 2013]. Im Mittel beträgt dieser Temperaturgradient 0,59 K/ 100 m. Wird Luft durch Konvektion oder Hindernisse wie Gebirge dazu gezwungen vertikal aufzusteigen, können sich jedoch tagesaktuelle Temperaturgradienten einstellen, die erheblich vom genannten Mittelwert abweichen [KUTTLER 2013].

Weiterhin spielt die Luftfeuchte bei der Zustandsänderung von Luft eine wesentliche Rolle. Steigt trockene Luft auf, so kühlt sich diese aus thermodynamischen Gründen beim Aufsteigen um etwa 1 K/ 100 m ab (trockenadiabatischer Tem-

peraturgradient). Kommt es während des Aufstiegs erwärmter Luft zur Kondensation von Wasserdampf, wird die vorher zur Verdunstung benötigte Energie wieder freigesetzt und dem aufsteigenden Luftvolumen zugeführt. Hierbei handelt es sich um einen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten, der Werte zwischen 0,5 und 0,9 K/ 100 m annehmen kann.

Im Rahmen der Erstellung der landesweiten Klimaanalyse für Baden-Württemberg soll untersucht werden, ob der eingangs beschriebene, und im Modell FITNAH ebenfalls verwendete, höhenabhängige Temperaturgradient von 0,65 K/ 100 m im langjährigen Mittel auch für Baden-Württemberg gilt, oder ob diesbezüglich aufgrund regionaler orographischer und/oder klimatischer Besonderheiten ein abweichender Wert angenommen werden muss.

Für die Bestimmung eines höhenabhängigen Temperaturgradienten für Baden-Württemberg wurden tägliche Messdaten von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese sind auf Grundlage der open data policy des DWD frei zugänglich und können vom Climate Data Center (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/) heruntergeladen werden.

Akquiriert wurden tägliche Mittelwerte der Temperatur in 2 m Höhe aller für Baden-Württemberg verfügbaren Stationen

unabhängig vom Messzeitraum und der Messdauer. Ziel war es dabei auf eine möglichst umfangreiche Ausgangsdatenbasis zurückgreifen zu können, da die Daten für die Auswertungen nach verschiedenen Kriterien eingeschränkt werden müssen.

Abbildung 2.10 zeigt die räumliche Verteilung aller 197 verfügbaren DWD-Stationen mit täglichen Messdaten in Baden-Württemberg. Die abgebildeten Stationen weisen unterschiedliche Messzeiträume auf, da sich das Messnetz seit

1874 schrittweise und mit unterschiedlicher Intensität entwickelt hat. So sind im Laufe der Zeit viele Stationen hinzugekommen und gleichzeitig aber auch Stationen aus dem Netz wieder entfernt worden. Die höchste Stationsdichte mit 125 gleichzeitig messenden Stationen konnte 1990 registriert werden. Danach nimmt die Verfügbarkeit der Stationen wieder ab, wobei für das Jahr 2021 noch 74 Messstationen im öffentlich zugänglichen Datenbestand des DWD aufgeführt sind. Dies entspricht dem Stand von 1952.

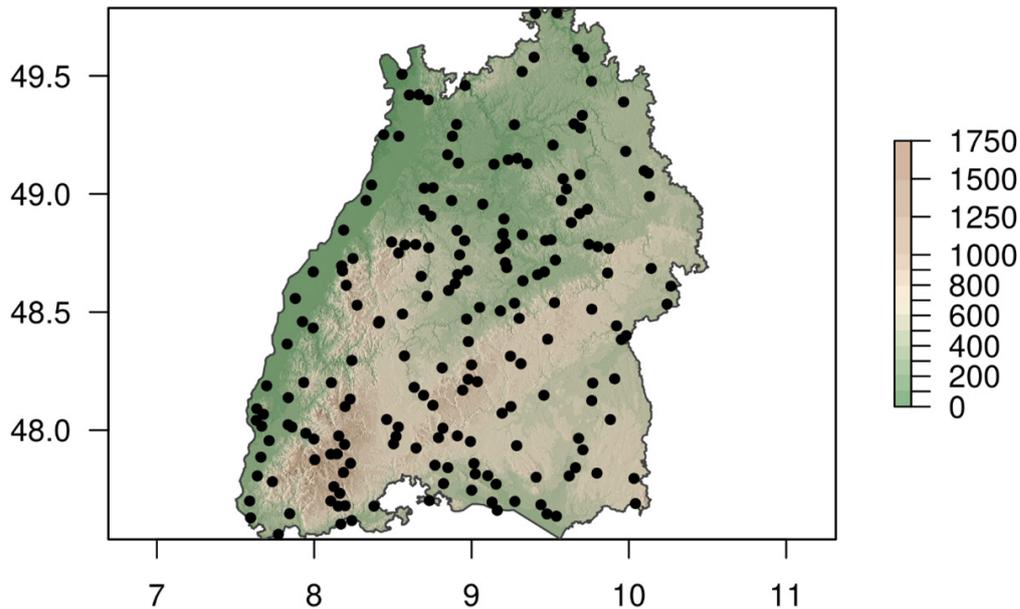


Abbildung 2.10: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen (n = 197) mit täglichen Messdaten im Zeitraum von 1874 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022]

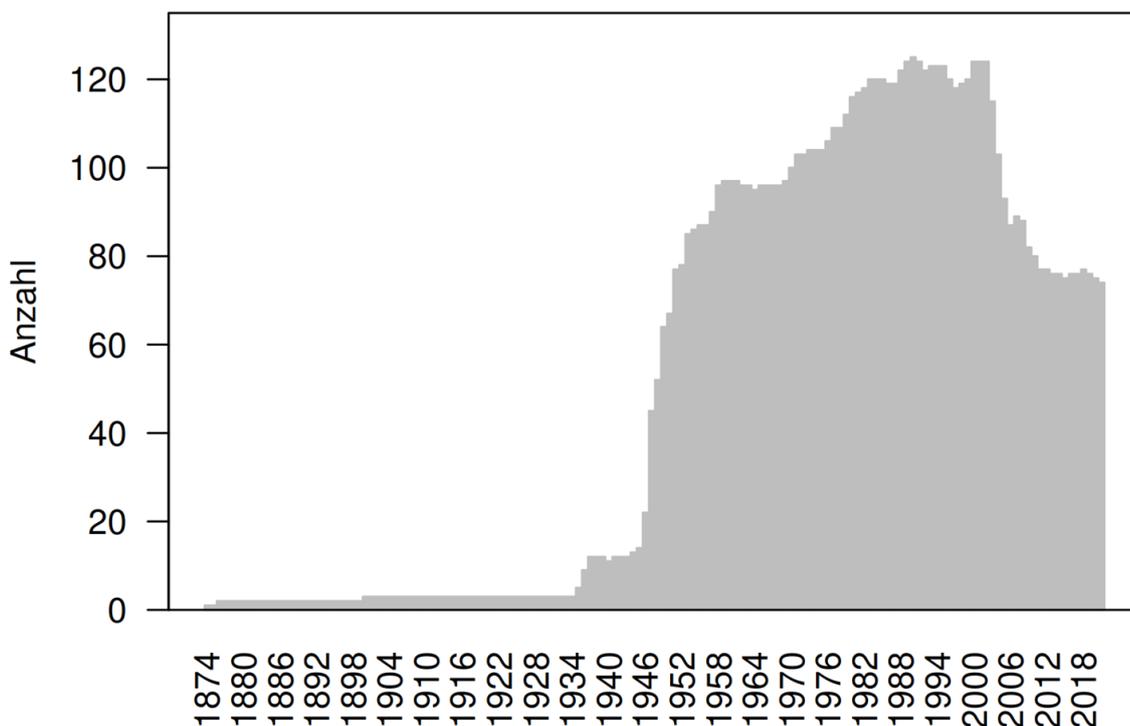


Abbildung 2.11: Anzahl der verfügbaren Messstationen mit täglichen Daten nach Jahren [DWD 2020]

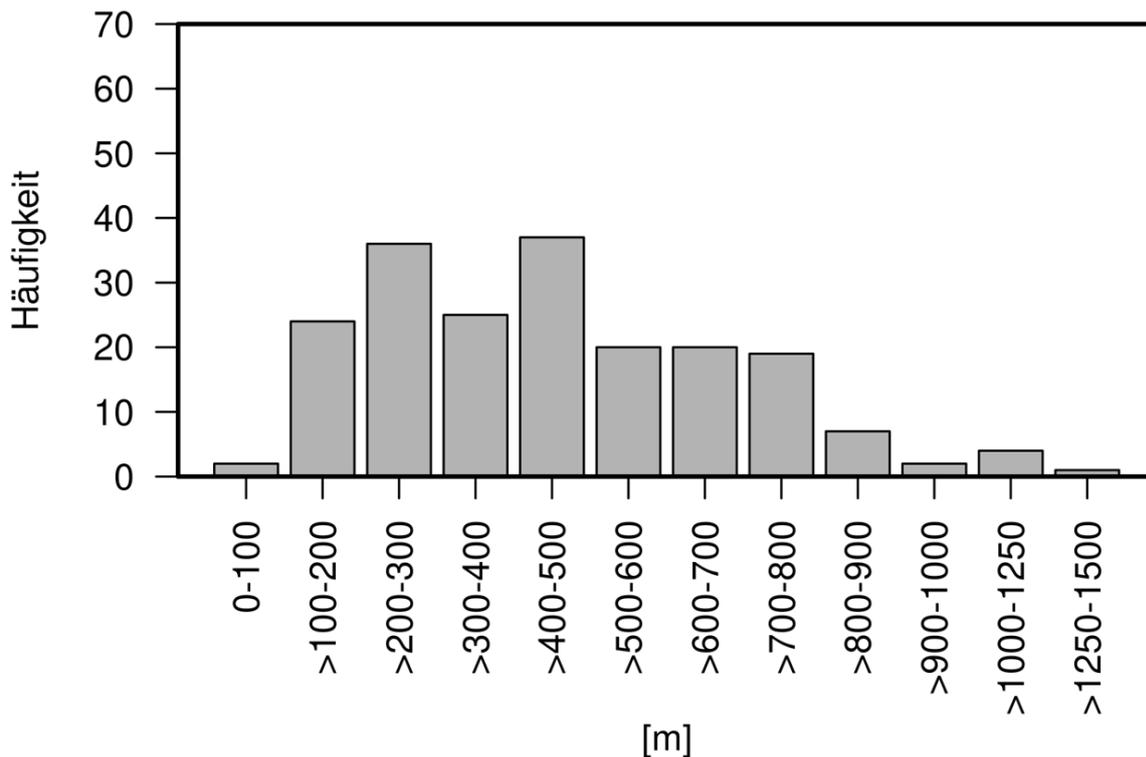


Abbildung 2.12: Verteilung des berechneten taggenauen, höhenabhängigen Temperaturgradienten ($n = 1836$) [DWD 2022]

Für die Bestimmung eines höhenabhängigen Temperaturgradienten ist neben der räumlichen Verteilung und der Stationsdichte die Verteilung der Stationen nach der Höhenlage wichtig. Betrachtet man alle verfügbaren Stationen (1874 bis 2021) zeigt sich, dass 96 % der Messstationen in Höhenlagen unter 800 m verortet sind (Abbildung 2.12). In den oberen Lagen der Mittelgebirge finden sich im Vergleich weniger Stationen, wobei zwischen 800 m und 1250 m die verbleibenden 4 % der Stationen verortet sind.

Die vorangehend beschriebenen Daten wurden skriptbasiert vom Climate Data Center [DWD 2022] heruntergeladen, weiterverarbeitet und ausgewertet [R CORE TEAM 2022]. Da die Klimaanalyse für Baden-Württemberg einen Sommer tag beschreibt wurden die Daten für die Ableitung des höhenabhängigen Gradienten der Temperatur auf die Sommermonate eingeschränkt.

Um ein statistisch möglichst robustes Ergebnis zu erzielen, ist eine ausreichende Stationsdichte wünschenswert, damit entsprechend viele Höhenstufen in der Auswertung enthalten sind und eventuelle Messunsicherheiten das Resultat nicht allzu stark beeinflussen. Die Auswertung der Metadaten der verfügbaren Messstationen hat ergeben, dass im Mittel 42 Stationen pro Jahr gleichzeitig gemessen haben. Dieser Wert wurde als Schwellenwert für eine akzeptable Stationsdich-

te angenommen. Somit wurden nur jene Datensätze aus der Grundgesamtheit der verfügbaren Daten verwendet, die eine gleichzeitige Messung von mindestens 42 Stationen aufwiesen.

Eine Abnahme der Temperatur mit der orographischen Höhe ist nicht zu jedem Zeitpunkt und zu jeder Witterung beobachtbar. Bei Föhnwetter oder auftretenden Inversionen beispielsweise wird sich der typische Gradient, charakterisiert durch höhere Temperaturen in niederen Lagen und geringere Temperaturen in Hochlagen, nicht einstellen. Aus diesem Grund wurde jeder einzelne Datensatz auf einen statistisch signifikanten, starken korrelativen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der orographischen Höhe hin überprüft. Als Maß für eine starke Korrelation wurde ein Korrelationskoeffizient $\leq -0,71$ (entspricht einem $R^2 \geq 0,5$) angenommen. Bei allen Datensätzen mit einer starken Korrelation wurde der gefundene Zusammenhang zusätzlich auf Signifikanz bei einem Signifikanzlevel von $\alpha = 0,05$ getestet. Insgesamt entsprachen 1836 Datensätze den festgelegten Kriterien. Für jeden einzelnen Datensatz wurde mittels einer einfachen linearen Regressionsgleichung (Gl. 1) ein tagesspezifischer höhenabhängiger Temperaturgradient berechnet. Die resultierende Datenmenge wurde dann auf Normalverteilung getestet und das entsprechende statistische Lagemaß berechnet (bei Normalverteilung Mittelwert sonst Median).

$$\Delta T = \left(\frac{T_h - T_0}{h} \right) * 100 \quad (\text{Gl. 1})$$

ΔT – höhenabhängiger Temperaturgradient

T_h – Temperatur in der aktuellen Höhe

T_0 – Temperatur in der geringsten Höhe

h – aktuelle Höhe

Da die tagesspezifischen Temperaturgradienten nur annähernd normalverteilt sind (Abbildung 2.13) ist der Median das robustere Maß für die langjährige, mittlere Abnahme der Temperatur mit der orographischen Höhe. Der Median beträgt $-0,59 \text{ K}/100 \text{ m}$ und kann als ausreichend statistisch robust angenommen werden. Das Ergebnis zeigt, dass der im Modell FITNAH verwendete höhenabhängige Temperaturgradient von $-0,65 \text{ K}/100 \text{ m}$ nur geringfügig vom hier ermittelten Wert abweicht.

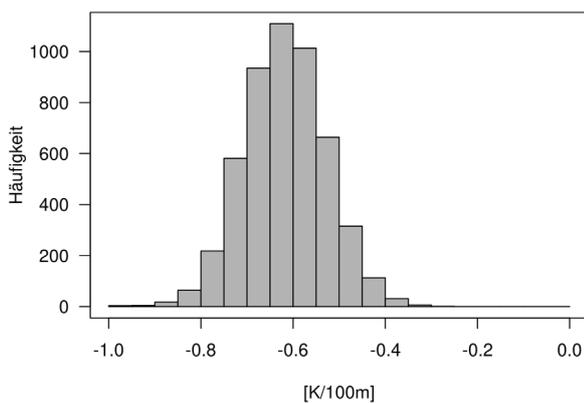


Abbildung 2.13: Verteilung des berechneten taggenauen, höhenabhängigen Temperaturgradienten ($n = 1836$) [DWD 2022]

2.4.3 Starttemperatur

Jeder FITNAH-Modelllauf wird mittels verschiedenster Parameter initialisiert. Dazu gehört auch die Einstellung der meteorologischen Randbedingungen. Eine wichtige Größe ist dabei die Starttemperatur in der bodennahen Luftschicht, die bei großen Domains, wie etwa einem ganzen Bundesland, am orographischen Nullpunkt (0 m NN) verortet und dann über einen höhenabhängigen Temperaturgradienten auf die Gesamtfläche projiziert wird. So können unterschiedliche orographisch räumliche Bedingungen bei der Initialisierung des Modells berücksichtigt werden.

FITNAH-Simulationen betrachten austauscharme (oder auch autochthone) Wetterlagen. Diese sind durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lo-

kalklimatischen Besonderheiten besonders gut ausprägen. Vergleichsweise geringe Windgeschwindigkeiten während austauscharmer Wetterlagen bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Während der Nachtstunden kann sich eine Bodeninversion entwickeln, die den vertikalen Luftaustausch behindert. Bodeninversionen entstehen während Schwachwindphasen bei gleichzeitiger negativer nächtlicher Strahlungsbilanz [KUTTLER 2013].

Im Rahmen der Klimaanalyse für Baden-Württemberg soll untersucht werden, ob die eingangs beschriebene, und im Modell FITNAH verwendete, Initialisierungstemperatur von 21 °C um 21:00 Uhr an Tagen mit austauscharmer Wetterlage in den Sommermonaten im langjährigen Mittel auch für Baden-Württemberg angenommen werden kann, oder ob aufgrund regionaler orographischer und/ oder klimatischer Besonderheiten ein anderer Wert verwendet werden sollte. Für die Bestimmung der Initialisierungstemperatur für Baden-Württemberg wurden die oben genannten stündliche Messdaten von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

Akquiriert wurden stündliche Werte der 2m-Temperatur, der Windgeschwindigkeit und des Bedeckungsgrades aller für Baden-Württemberg verfügbaren Stationen im Messzeitraum von 1990 bis zum Jahr 2021. Zur Ermittlung von austauscharmen Wetterlagen anhand von Stationsdaten müssen alle drei benannten meteorologischen Variablen gleichzeitig an der jeweiligen Station gemessen worden sein.

Von 1990 bis 2021 wurden 52 Stationen mit stündlichen Windmessungen, 77 Stationen mit stündlichen Temperaturmessungen und 72 Stationen mit stündlichen Beobachtungsdaten des Bewölkungsgrades identifiziert. Die Anzahl der Stationen, an denen alle drei Variablen gemessen wurden, beträgt 25 (Abbildung 2.14). Enthalten sind dabei jedoch auch Stationen, an denen alle drei Variablen nicht im gleichen Zeitraum gemessen wurden und/ oder wo die Daten nicht den im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Vollständigkeitskriterien entsprechen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Anzahl der verfügbaren Stationen mit validen Daten nochmals reduziert.

Die oben beschriebenen Daten wurden skriptbasiert vom Climate Data Center [DWD 2022] heruntergeladen, wei-

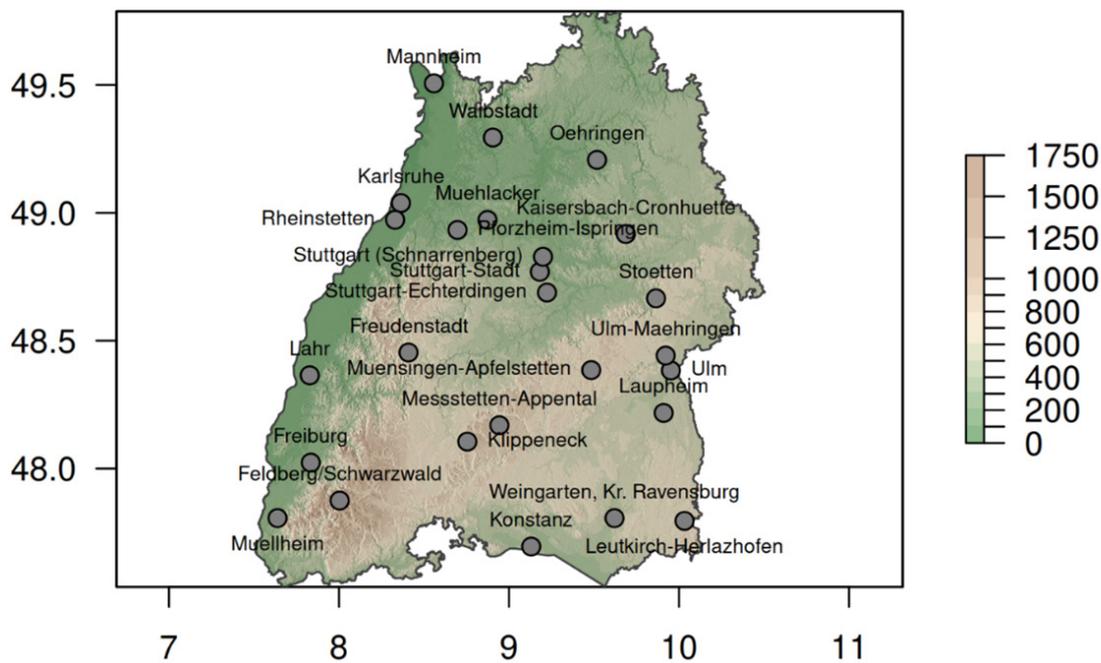


Abbildung 2.14: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen in Baden-Württemberg mit stündlichen Daten und gleichzeitigen Messungen von Wind, Bewölkungsgrad und Temperatur im Zeitraum von 1990 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022]

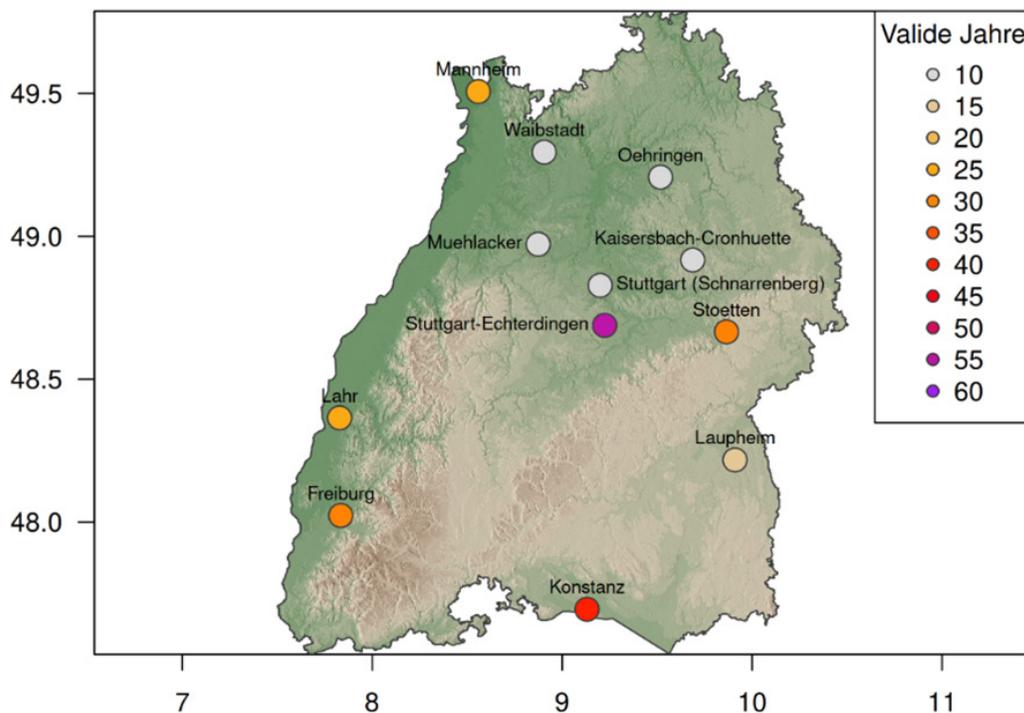


Abbildung 2.15: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen in Baden-Württemberg mit stündlichen Daten und gleichzeitigen Messungen von Wind, Bewölkungsgrad und Temperatur im Zeitraum von 1990 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022]

terverarbeitet und ausgewertet [R CORE TEAM 2022]. Für die Ermittlung der Initialisierungstemperatur um 21:00 Uhr in den Sommermonaten an Tagen mit aus-tausch-arter Wetterlage wurden in einem ersten Schritt die vorliegenden Datensätze hinsichtlich ihrer Vollständigkeit überprüft, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Als Kriterium wurde eine Vollständigkeit von mindestens 90 % zugrunde gelegt. Dies bedeutet in jedem Monat müssen 90 % der stündlichen Daten vorhanden sein, sonst wird der jeweilige Monat von der

weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Weiterhin muss jedes Jahr mindestens 11 Monate mit gültigen Werten aufweisen. Der gesamte Stationsdatensatz gilt schließlich als ausreichend, wenn mindestens 10 Jahre mit validen Daten vorliegen. Von den Stationen, deren Daten die Vollständigkeitsprüfung bestanden haben (insgesamt 14, Abbildung 2.15) wurde diejenige mit der geringsten Höhenlage herausgesucht und alle Zeitpunkte ermittelt, an denen austauscharme Bedingungen vorherrschten.

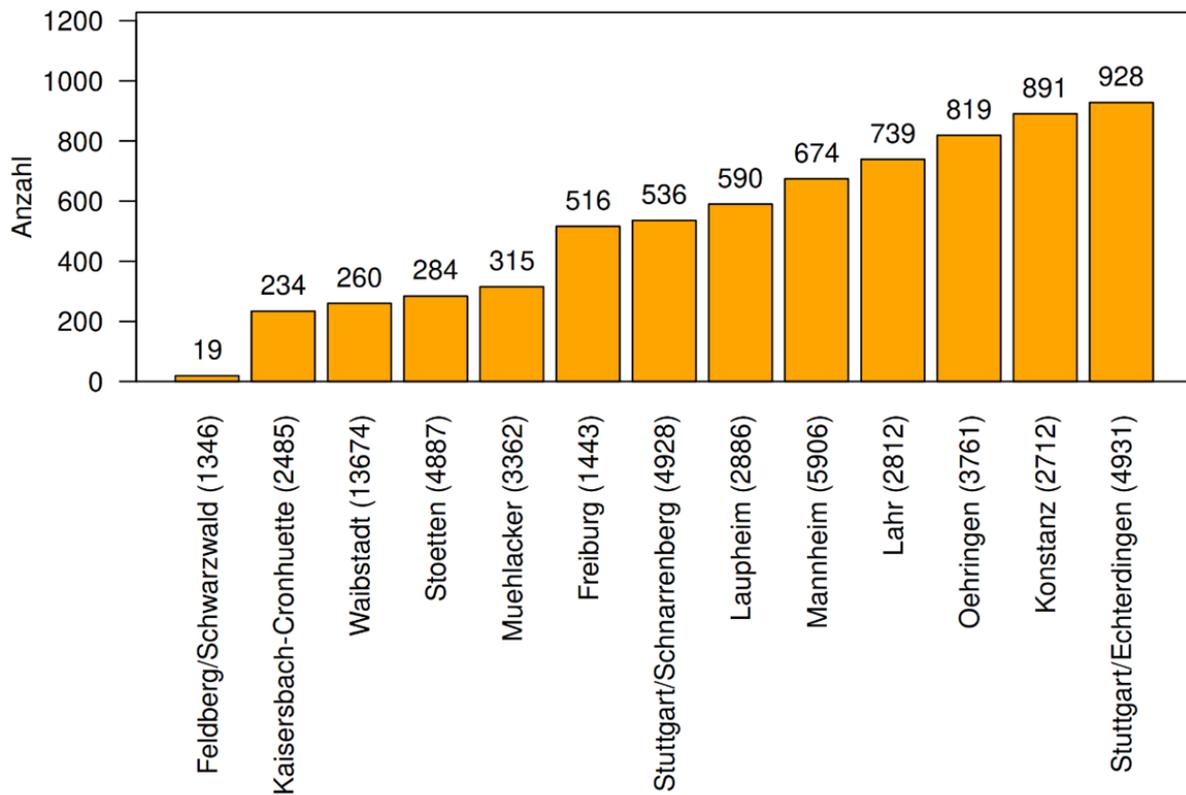


Abbildung 2.16: Anzahl valider Datensätze pro Messstation

Die Bestimmung austauscharmer Wetterlagen wurde nach folgenden Kriterien durchgeführt: Die Höchstwindgeschwindigkeit darf 2,7 m/s nicht übersteigen bei gleichzeitig geringer Bewölkung (Bedeckungsgrad höchstens 4 Achtel) während mehrerer Nachtstunden. In der Regel müssen diese Kriterien für 10 Stunden innerhalb des Zeitraums zwischen 17 MEZ und 5 MEZ erfüllt sein, (d. h. es kann dazwischen eine Lücke auftreten), oder an 7 aufeinanderfolgenden Stunden innerhalb dieses Zeitraums, also ohne Lücke. Falls der Bedeckungsgrad nicht vorliegt, muss an exakt den gleichen Stunden eine Temperaturabnahme von mindestens 0,3 K/h erfolgt sein [AUGTER 1997] [SCHLÜNZEN et al. 2018].

Für jede der in Abbildung 2.15 gezeigten Stationen wurden alle Zeitpunkte ermittelt, welche eine autochthone Wetterlage aufwies. Von diesen Zeitpunkten wiederum wurden alle Tage herausgesucht, die in den Sommermonaten liegen (Juni, Juli und August) und die jeweiligen Temperaturen zum Zeitpunkt 21:00 Uhr in einem Datensatz zusammengestellt. Alle Werte des Datensatzes wurden auf statistische Normalverteilung getestet, um das geeignete Lagemaß (Mittelwert oder Median) bestimmen zu können. Dieses wurde dann letztendlich für jede ausgewählte Station berechnet. Unter Einbeziehung des bereits festgestellten höhenabhängigen Temperaturgradienten (-0,62 K/100 m) wurde im letzten Schritt die langjähr-

ge, mittlere Initialisierungstemperatur zum Zeitpunkt 21:00 Uhr während austauscharmer Wetterlagen für den orographischen Nullpunkt (0 m NN) berechnet.

Die Station Rheinstetten (ID 4117) konnte in der Auswertung nicht berücksichtigt werden, da diese Station zwar in den Metadaten des Climate Data Centers geführt wird, deren Messdaten jedoch in der Datenbank fehlen. Weiterhin wurde die Station Feldberg/Schwarzwald (ID 1346) ausgeschlossen, da die Anzahl der Zeitpunkte mit autochthonen Wetterlagen (n=19) als zu gering bewertet wurde (Abbildung 2.16).

Die langjährige mittlere 21:00 Uhr-Temperatur während autochthoner Wetterlagen beträgt 19,9 °C, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Messstationen in unterschiedlichen Höhenlagen liegen. Für den orographischen Nullpunkt wurden die entsprechenden 21:00 Uhr-Temperaturen anhand des im Vorfeld ermittelten höhenabhängigen Temperaturgradienten von -0,59 K/100 m an jeder Station separat berechnet. Aus allen Werten wurden dann eine gesamtgültige Initialisierungstemperatur ermittelt. Diese beträgt 21,8 °C. Dieser Wert repräsentiert die langjährige mittlere Temperatur um 21:00 Uhr an Tagen mit austauscharmen Wetterlagen in den Sommermonaten in Baden-Württemberg bezogen auf den orographischen Nullpunkt bei 0 m NN.

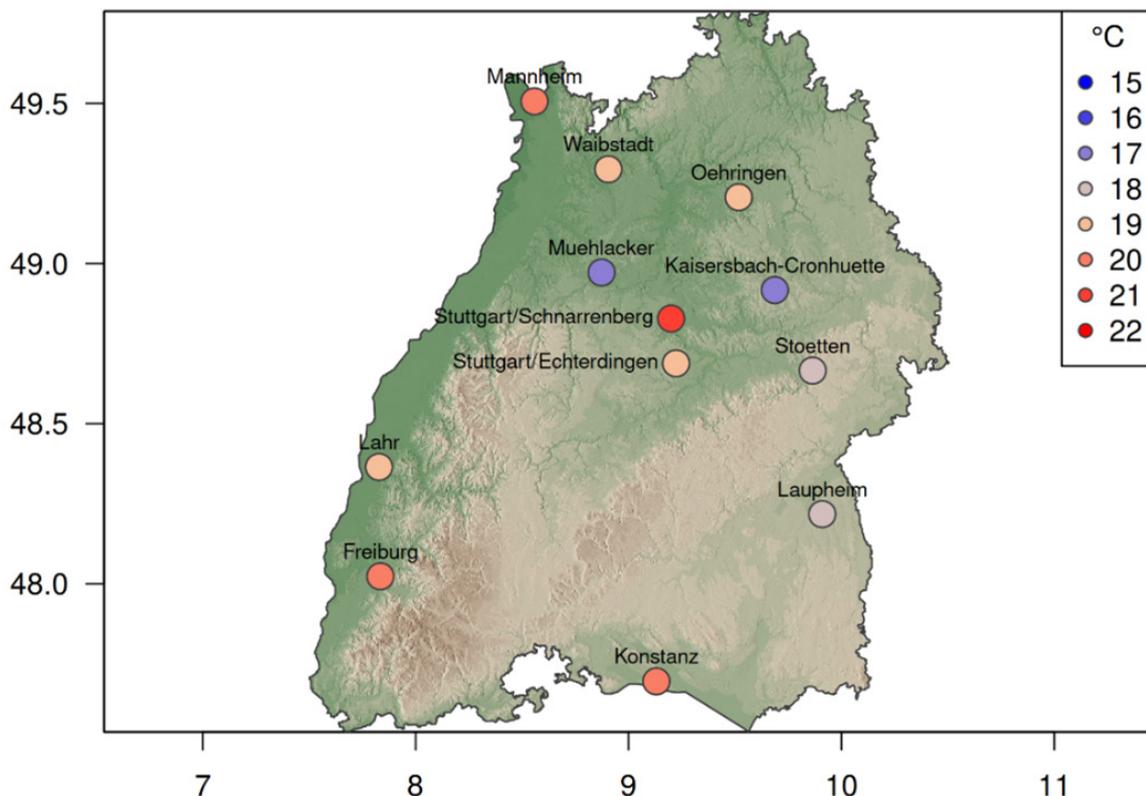


Abbildung 2.17: Lage der zur Ermittlung der Initialisierungstemperatur verwendeten Stationen mit Angabe der langjährigen mittleren Temperatur um 21:00 Uhr während autochthoner Wetterlagen [DWD 2022]

Die Starttemperatur wurde für die Modellierung der Zukunftsszenarien jeweils auf den in Kapitel 2.2 dokumentierten Wert angehoben.

2.4.4 Gewässertemperaturen

Neben einer individuellen bodennahen Lufttemperatur ist FITNAH-3D auch in der Lage, räumlich und tageszeitlich flexible Oberflächentemperaturen von offenen Wasserflächen zu berücksichtigen. Die oberflächennahe Wassertemperatur hängt grundsätzlich von der Entfernung zur Mündung, Breite und Tiefe des Flusses sowie meteorologischen Gegebenheiten wie Sonneneinstrahlung, langwelliger Wärmestrahlung und Verdunstung (Evaporation) ab. Die Wassertemperatur kann am Tag und innerhalb des Jahres mehr oder minder stark schwanken und ist damit das Resultat der Interaktion der oben genannten Prozesse. Der tageszeitliche Wassertemperaturgang schwankt kaum. Flüsse werden im Längsverlauf immer wärmer, je weiter sie von der Quelle entfernt sind (natürlicher Temperaturgradient) [LOZÀN & MAIER 2008, 296ff]. Wie Abbildung 2.18 verdeutlicht, besteht darüber hinaus der Zusammenhang, dass die Erwärmung mit zunehmendem Volumen des Wassers abnimmt. Der Wasserstand des Flusses ist bei der Ableitung der Erwärmung im Modell demnach zu beachten. Niedrigwasserstand führt zu einer stärkeren Erwärmung des Wasserkörpers.

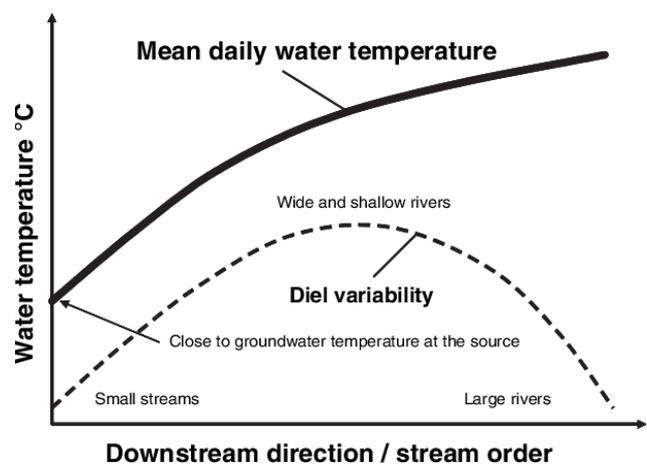


Abbildung 2.18: Zusammenhang zwischen Größe, Tiefe und Flussabschnitt zur täglichen Wassertemperatur [CAISSIE 2006, S. 1391]

Die Strahlungsenergie der Sonne führt bei Wasser nicht nur zu Erwärmung, sondern auch zu Verdunstung. Die Strahlung dringt je nach Trübheitsgrad tief in den Wasserkörper ein. Das Wasser erwärmt sich bis in tiefere Schichten, da es bei Fließgewässern durch die Bewegung zu Durchmischungsprozessen kommt. Durch die zeitgleich auftretende Evaporation erwärmt sich das Wasser jedoch weniger schnell als das bei anderen Strukturen der Fall ist, wie bspw. Boden oder Gestein. Der Prozess der Evaporation verbraucht Wärmeenergie und entzieht der unmittelbaren Umgebung somit die Wärme [OKE et al. 2017, 158, 439]. Durch die geringe Temperaturzunahme bei großer Energiezufuhr und geringe Temperaturabnahme bei Abkühlung sind Wasserkörper gute

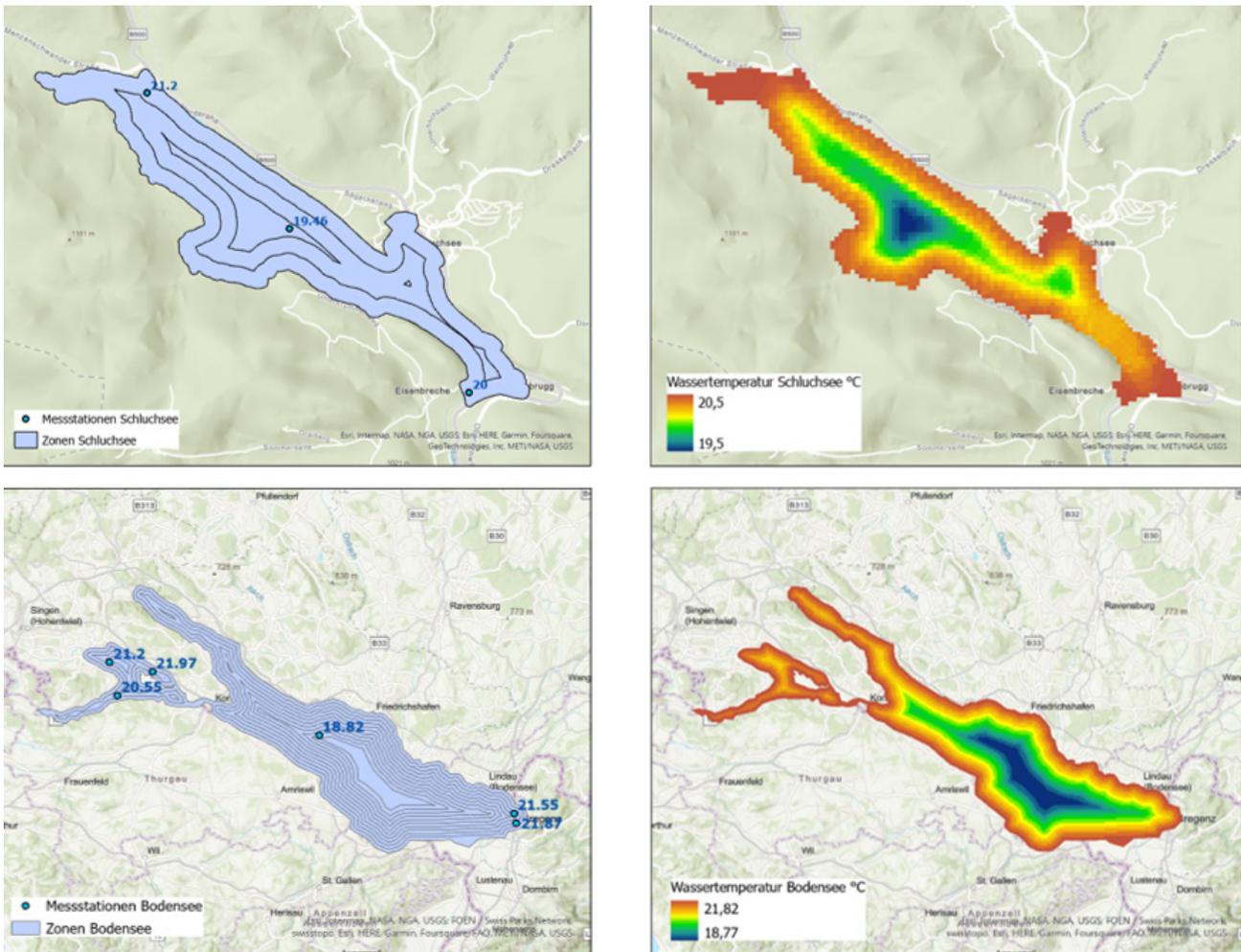


Abbildung 2.20: Wassertemperaturen durch Interpolation über Zonen an Schluchsee und Bodensee

- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB)
- KLIWA-Klimafolgenmonitoring vom Institut für Seenforschung (ISF)
- Untere Wasserbehörden
- Seenprogramm Tübingen
- Diverse Umwelt- und Landratsämter Baden-Württemberg
- Sondenmessungen Schluchsee

Insgesamt lagen 107 valide Messwerte für Seen vor, aus welchen mittlere sommerliche Wassertemperaturen abgeleitet werden konnte. Für die beiden größten Seen „Schluchsee“ und „Bodensee“ wurde zudem eine Interpolation der Messwerte über Zonen vom Rand bis hin zur Seemitte gerechnet. Abbildung 2.20 zeigt die Messstationen, Zonen und das Ergebnis der Interpolation für die beiden Seen. Alle weiteren Seen, für welche keine Messwerte vorlagen, haben eine gemittelte Wassertemperatur der Großlandschaft zugewiesen

bekommen. Für jede Großlandschaft wurde eine mittlere Seewassertemperatur über die 107 Messwerte berechnet.

2.5 Modellausgabegrößen

Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

FITNAH-3D gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf auch für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 2.5). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte (GB). Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter mit den drei Komponenten u (O-W-Komponente), v (N-S-Komponente) und w (Vertikalkomponente) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 2.5: Von FITNAH-3D zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter

| Parameter und Einheit | Einheit | Dimensionalität |
|--|------------------------------------|---|
| U-Komponente (Horizontalkomponente) des Windes | [m/ s] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| V-Komponente (Horizontalkomponente) des Windes | [m/ s] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| W-Komponente (Vertikalkomponente) des Windes | [m/ s] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| Potentielle Lufttemperatur | [K] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| Diffusionskoeffizient für Impuls | [m ² / s ²] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| Turbulente kinetische Energie | [m ² / s ²] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| Wärmestrom der Oberflächen | [W/ s ²] | Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen |
| Luftdruck | [N/ m ²] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |
| Spezifische Feuchte | [kg/ kg] | Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten |

Um die der Analyse zu Grunde liegenden hochgradig angewandten Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sog. postprocessing Schritt werden aus den o. g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Für die FITNAH-3D Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertzeitpunkte entwickelt, von denen für die Zielerreichung im vorliegenden Projekt neun relevant waren (Tabelle 2.6). Hierbei handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wurde. Die Auswertzeitpunkte lagen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Die Vorwärtstrajektorien wurden in einer Zeitspanne von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang ausgewertet. Zusätzlich wurden im Projekt die für die Nacht relevanten Parameter auch für die erste Nachhälfte, also den Zeitpunkt 23:00 Uhr ausgewertet.

In der Literatur und auch in der Praxis werden insbesondere die Kaltluftparameter nicht immer einheitlich abgeleitet bzw. definiert, sodass im Folgenden auf, die im vorliegenden

Projekt verwendeten Parameter kurz im Detail eingegangen werden soll.

Bei Kaltluft handelt es sich allgemeingültig um eine Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Bei der Kaltluftproduktionsrate handelt es sich nun um das Luftvolumen (in m³), das sich pro Flächeneinheit (in m²) und pro Zeiteinheit (in h) um einen bestimmten Faktor abkühlt. Die Kaltluftproduktionsrate ist abhängig von der Landnutzung sowie dem Relief. Dabei gilt, dass im ebenen Gelände weniger Kaltluft produziert wird als an Hängen. In der Literatur sind Werte zwischen 10 (K1a) und 42 m³/ m²h (K1b) für Freilandflächen (z.B. Grünland, Ackerflächen) sowie zwischen 2 und 25 m³/ m²h für Wälder veröffentlicht [z.B. Sievers 2005, Schädler und Lohmeyer 1994, Gross 1987]. Im verdichteten urbanen Bereich sowie über Wasserflächen wird keine Kaltluft produziert. Die höchsten Raten weisen demnach Freilandflächen an Hängen auf. Die entsprechende empirische Formel lautet [vgl. Sievers 2005]:

$KPR = K1a + (K1b - K1a) * (1 - e^{-5 * S})$, wobei S die Steilheit bezeichnet.

Zum Vergleich wurde die Kaltluftproduktionsrate auch nach einer Methodik des DWD abgeleitet. Die Ergebnisse (in Wh/ m²) zeigten dieselben Muster, also eine Übereinstimmung der kaltluftproduzierenden Flächen, wie die oben beschriebene Vorgehensweise und wurden deshalb im weiteren Projektverlauf nicht weiterverarbeitet. Die Kaltluftproduktionsrate ist

Tabelle 2.6: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH-3D zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

| Parameter und Einheit | Einheit | Höhenniveau | Zeitliche Dimension | Untersuchte Szenarien |
|---|------------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| Absolute Lufttemperatur | [°C] | 2 m ü. Gr. | 23:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |
| | | | 14:00 Uhr | Alle |
| Kaltluftproduktionsrate | [m ³ /m ² h] | 2 m ü. Gr. | 23:00 Uhr | Alle |
| | [Wh/m ²] | | 04:00 Uhr | Alle |
| | | | 23:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |
| Kaltluftvolumenstromdichte | [m ³ /s*m] | Integral bis 25 m ü. Gr. | 23:00 Uhr | Alle |
| | | Integral bis 50 m ü. Gr. | 04:00 Uhr | Alle |
| Physiologisch Äquivalente Temperatur | [°C] | 1,1 m ü. Gr. | 14:00 Uhr | Alle |
| Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum | [m] | 20 m ü. Gr. | 22:00 bis 05:00 Uhr | Bestandssituation |
| Windgeschwindigkeit | [m/s] | 2 m ü. Gr. | 23:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |
| Windrichtung [als geographische Rotation] | [°] | 2 m ü. Gr. | 23:00 Uhr | Alle |
| | | | 04:00 Uhr | Alle |

eine wichtige Kaltluftkenngröße. Sie beinhaltet jedoch keine expliziten Hinweise zur Fließdynamik der Kaltluft. Diese Lücke schließt der Kaltluftvolumenstrom als wichtigste abgeleitete Kaltauftausgabegröße. Sie stellt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m³/s) dar. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Kaltluftleitbahn fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit m³/s*m). Der Kaltluftvolumenstrom ist auch deswegen von herausragender Bedeutung, weil er gemäß VDI 3787, Bl.5 [VDI 2003] maßgeblich für die Beurteilung von planerischen Auswirkungen auf die Kaltluftprozesse ist. Eine Reduzierung des Kaltluftvolumenstroms um > 10% ist demnach ein starkes Indiz für eine hohe vorhabenbezogene Auswirkung.

Mit Blick auf diesen Bewertungsmaßstab in Kombination mit den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels ist von entscheidender Bedeutung, dass konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, bisher nicht eingeführt sind [VDI 2003]. Kaltluftproduktionsraten und Kaltluftvolumenströme sind also relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmo-

sphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz auch für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen. Selbstverständlich ist die Kaltluft im Klimawandel aber tendenziell wärmer als gegenwärtig und trägt damit auch weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen bei.

Während die beschriebenen Kaltluftparameter eher die quantitative Ausprägung der Werte zu bestimmten Zeitpunkten beschreiben, können mithilfe von Trajektorien die Pfade von Luftpaketen durch die Atmosphäre über einen definierten Zeitraum ermittelt werden. Eine Trajektorie ist im vorliegenden Fall definiert als Bahnkurve eines sich bewegenden „Luftpartikels“ oder „Luftpaketes“. Die Trajektorie verbindet alle von diesem Luftpaket in einem gewissen Zeitraum überströmten Orte. Durch die Berechnung sogenannter Vorwärtstrajektorien lässt sich – ausgehend von ihrem Ursprungsort – das Ziel einzelner Luftpakete bestimmen, Rückwärtstrajektorien liefern hingegen Rückschlüsse auf die Herkunft eines am Zielort vorgefundenen Luftpaketes. Auf diese Weise werden Aussagen über die Transportrichtung und -weite zum Beispiel von Kaltluft (oder auch von einem Fallout eines explodierenden Kernkraftwerkes oder einer Chemiefabrik) möglich.

Die im vorliegenden Vorhaben analysierten Vorwärtstrajektorien geben an, wohin sich ein Luftpaket bewegt. Sie zeich-

nen den Weg der sich im Laufe der Nacht dynamisch verändernden Horizontalströmung in 20 m über Grund nach. Hierfür wird die Bewegung einzelner Luftpakete zwischen Sonnenuntergang (um ca. 22 Uhr) und Sonnenaufgang (um ca. 5 Uhr) für sieben Stunden verfolgt und als Track aufgezeichnet. Die Startpunkte der Trajektorien werden innerhalb des Ausgleichsraumes (Nutzungsklassen 8-11, vgl. Kapitel 2.3.2) im Abstand von 500 m gesetzt und bis Sonnenaufgang in dem modellierten, sich über die Nacht dynamisch verändernden 10 m Windfeld nachverfolgt. Im Ergebnis erhält man linienhafte Zugbahnen der Trajektorien (in m). Die hier analysierten Vorwärtstrajektorien dienen der Identifikation Regionaler Kaltluftströmungssysteme.

Luftqualität

Die Modelleingangsdaten für die Berechnung der Schadstoffausbreitung sind als Emissionsdichte von Stickoxiden (NO_x) in Gramm pro Tag und Meter [g/ d*m] angegeben. Bei der Umrechnung im Modell ergeben sich Konzentrationswerte in Mikrogramm pro Kubikmeter (Tabelle 2.7).

Tabelle 2.7: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH-3D zum Themenkomplex Luftqualität

| Parameter und Einheit | Einheit | Höheniveau | Zeitliche Dimension |
|--|-----------------------|------------|---------------------|
| NO ₂ -Immissionskonzentration | [µg/ m ³] | 2 m ü. Gr. | 07:00 Uhr |

2.6 Evaluierung der Modellrechnung

Modelle, und somit auch Klimamodelle, sind immer nur ein Abbild der Wirklichkeit und nicht die Wirklichkeit selbst. Sie dienen der Beschreibung von mehr oder weniger komplexen Zusammenhängen und werden in vielfacher Form angewendet. Bei jeder Modellanwendung stellt sich die Frage nach der Güte, also: Wie gut bildet dieses Modell die Wirklichkeit ab? Für die Beurteilung der Modellgüte kommen je nach Fragestellung unterschiedlichste Methoden und Verfahren zur Anwendung. Dazu gehören bspw. einfache visuelle Vergleiche oder aber auch die Berechnung von Fehler- und Gütemaßen.

Zur Beurteilung der Güte von Modellergebnissen werden Vergleichsdaten benötigt, die idealerweise mit einer anderen Methodik erhoben sein sollten. Dies können Messungen oder aber auch Modellierungen, jedoch mit einem anderen Modell oder Modellansatz sein. Dabei ist es wichtig zu beachten welche Eigenschaften die Vergleichsdaten aufweisen, denn Messungen und alternative Modellergebnisse unterliegen wieder

rum eigenen Unsicherheiten und Fehlern, die Einfluss auf das Vergleichsergebnis haben.

Im Rahmen der Klimaanalyse für Baden-Württemberg soll die Güte der durchgeführten Klimasimulation mit dem Modell FITNAH anhand einer Validierung mit Messdaten beurteilt werden. Es wurden die gleichen stündlichen DWD-Messdatensätze verwendet, die bereits zur Ermittlung der Initialisierungstemperatur akquiriert und aufbereitet wurden (siehe Kapitel 2.4.3).

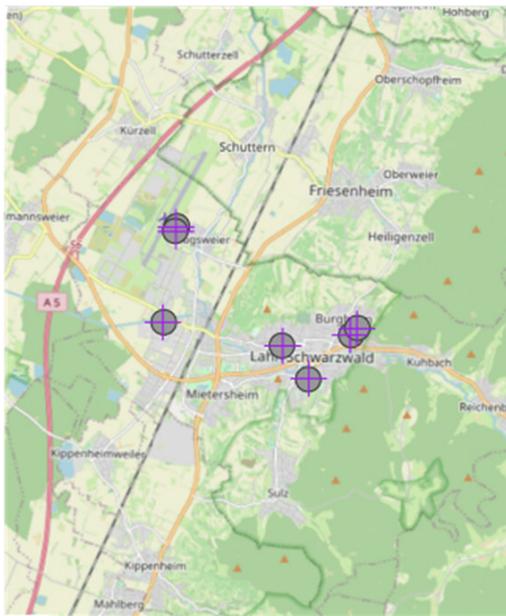
Die Auswahl der Messdaten hinsichtlich autochthoner Wetterlagen ist zum Vergleich mit FITNAH-Modellergebnissen jedoch nicht ausreichend. Nach der aufgeführten Definition (vgl. Kap. 2.4.3) können autochthone Wetterlagen zu Zeitpunkten mit einer weitreichenden Temperaturspanne auftreten. Darin können sowohl kühle als auch sehr warme Tagesgänge enthalten sein. Die FITNAH-Simulation betrachtet jedoch einen einzelnen Tagesgang zu einem konkreten Zeitpunkt mit einer im Vorfeld ermittelten und an das Relief angepassten Initialisierungstemperatur. Demzufolge bewegen sich die mit FITNAH simulierten 2m-Temperaturen in Abhängigkeit von der jeweiligen Gitterpunktlage in einem verhältnismäßig engen Wertebereich, welcher einem warmen Sommertag entspricht. Aus diesem Grund wurden in einem weiteren Selektionsschritt jene Tagesgänge der Messdaten zusammengestellt, die in dem hier als „FITNAH-Temperatur-Wertebereich“ bezeichneten Intervall liegen. Die Parameter des „FITNAH-Temperatur-Wertebereichs“ (Tabelle 2.8) wurden aus den vorliegenden Modellergebnissen ermittelt und jeweils um +1 K an den oberen Grenzen erhöht und um -1 K an den unteren Grenzen erniedrigt, um die Datenmenge der Vergleichszeitreihen nicht zu stark zu reduzieren.

Tabelle 2.8: Parameter des FITNAH-Temperatur-Wertebereichs, jeweils an den oberen Grenzen um +1K erhöht und an den unteren Grenzen um -1 K erniedrigt

| Parameter | untere Grenze [°C] | obere Grenze [°C] |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| Maximumtemperatur | 27 | 33 |
| Minimumtemperatur | 11 | 19 |
| Mitteltemperatur | 17 | 23 |

Viele DWD-Messstationen unterlagen in ihrer Historie mehreren Ortswechseln. Je nach räumlicher Auflösung des Modellgitters müssen diese Ortswechsel zwingend beachtet werden, um die entsprechenden Modellgitterpunkte für einen Vergleich richtig zuzuordnen zu können. Abbildung 2.21 zeigt

Änderung des Standortes der Station Lahr 1949 - 2022



Änderung des Standortes der Station Mannheim 1758 - 2022

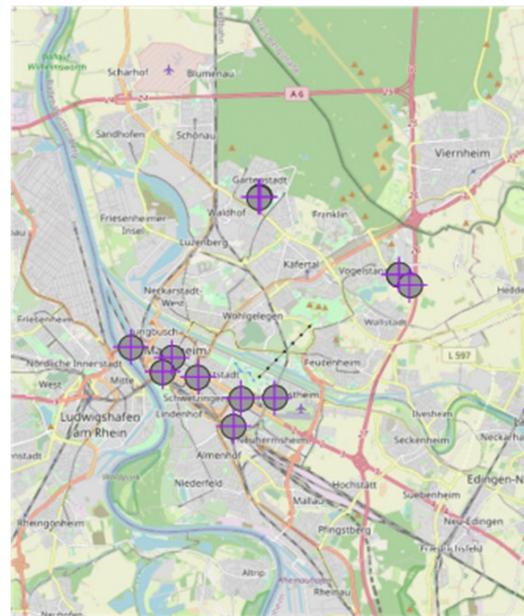


Abbildung 2.21: Beispiele für DWD-Stationen mit vielen Ortswechseln in Baden-Württemberg, Punkte zeigen die jeweiligen Stationsstandorte und Kreuze die räumlich zugehörigen Modellgitterpunkte

beispielhaft für die Stationen Mannheim und Lahr wie viele Standortwechsel auftreten können. Dabei treten räumliche Unterschiede bis zu mehreren Kilometern auf.

Alle bereits selektierten Messzeitreihen wurden hinsichtlich ihrer Verortung über die Zeit untersucht, nach ihrer jeweiligen Position zusammengestellt und bei einem Ortswechsel als separate Station (Substation) definiert. Jeder so zusammengestellten Zeitreihe wurde anschließend der nächste Gitterpunkt aus dem FITNAH-Modellgitter zum Vergleich zugeordnet.

Eine wichtige Voraussetzung beim Vergleich von Zeitreihen ist die zeitliche Übereinstimmung der Datenpunkte. Aufgrund von Modernisierungen der Messtechnik im Laufe der Zeit wurden die Messdaten der DWD-Stationen teilweise in unterschiedlichen Zeitzonen erfasst. Ältere Messungen wurden in MEZ (Mitteleuropäische Zeit) gespeichert und jüngere Messungen in UTC (Coordinated Universal Time) (MEZ = UTC + 1h). Um eine genaue zeitliche Zuordnung mit den FITNAH-Ergebnissen zu gewährleisten, wurden alle Messdaten einheitlich in MEZ umgerechnet.

Zur Quantifizierung und Beurteilung der Modellgüte wurden folgende Gütemaße (oder auch Fehlermaße) berechnet.

- Bestimmtheitsmaß (R^2)

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) gibt an wie gut die unabhängige Variable (Modellwerte) geeignet ist die Varianz der abhängigen Variablen (Messwerte) zu erklären. Dabei wird ein linearer Zusammenhang vorausgesetzt. Das Bestimmtheitsmaß liegt zwischen 0 % und 100 %. Je höher der Wert, umso besser oder stärker der Zusammenhang. R^2 kann als erster Hinweis auf die Modellgüte verwendet werden. Das Maß sagt jedoch nichts über die Abweichung der Modellwerte von den Messwerten aus, so können systematische oder konstante Abweichungen trotzdem einen hohen Zusammenhang aufzeigen.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} (y - y')^2}{\sum_{t=1}^{t=n} (y - \bar{y})^2}$$

y' – Modellwert

y – Messwert

\bar{y} – Mittelwert der Messwerte

n – Anzahl der Werte

t – Zeitpunkte der Zeitreihe

- Mittlerer absoluter Fehler (MAE)

Der mittlere absolute Fehler (MAE) ist der Durchschnitt der absoluten Differenz zwischen den Modell- und Vergleichswerten (Messwerten). Der MAE sagt aus, wie groß im Mittel die Abweichung zwischen Modell und Referenz ist. Die

MAE-Werte sind in der ursprünglichen Einheit und können zwischen 0 und ∞ liegen.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} |y' - y|$$

y' – Modellwert

y – Messwert

n – Anzahl der Werte

t – Zeitpunkte der Zeitreihe

- Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE)

Der RMSE bewertet die Qualität des Modells und beinhaltet sowohl die Varianz (Streuung der Modellwerte zueinander) als auch den Bias (Abstand des Modellwertes vom Vergleichswert). Größere Fehler fallen bei diesem Maß stärker ins Gewicht als bspw. beim MAE. Der RMSE ist immer positiv, wobei die Güte umso höher ist, je kleiner die Werte sind.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} (y' - y)^2}$$

y' – Modellwert

y – Messwert

n – Anzahl der Werte

t – Zeitpunkte der Zeitreihe

- Gewichteter absoluter prozentualer Fehler (WAPE)

Der gewichtete absolute prozentuale Fehler (WAPE) ist ein Maß, das kleinere Abweichungen von größeren unterscheidet. Somit wird verhindert, dass kleine Werte als gleichwertig oder höher in die Fehlerbetrachtung einfließen als größere Werte. Dies gilt besonders dann, wenn nur geringe Datenmengen zur Verfügung stehen.

$$WAPE = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} |y' - y|}{\sum_{t=1}^{t=n} |y|}$$

y' – Modellwert

y – Messwert

n – Anzahl der Werte

t – Zeitpunkte der Zeitreihe

Ergebnis der Evaluierung

Die Gegenüberstellung von Modell- und Messdaten der Klimasimulation für Baden-Württemberg zeigt, dass die Varianz der Messdaten in hohem Maße durch die Modelldaten erklärt werden kann. Alle ermittelten Bestimmtheitsmaße (R^2) liegen zwischen 0,97 und 0,99 (Tabelle 2.9). Im Mittel weichen die Modellwerte von den Messwerten absolut um 1,6 °C ab (Gütemaß MAE), wobei die geringste mittlere absolute Abweichung 0,78 °C beträgt und die höchste mittlere absolute Abweichung 2,39 °C (Abbildung 2.22). Der RMSE liegt bei Werten zwischen 1,83 °C und 2,63 °C mit einem Mittelwert von 0,94 °C und der WAPE zwischen 0,04 % und 0,12 % bei einem Mittelwert von 0,08 %.

Tabelle 2.9: Summarische Statistik der Modellgüte

| | Mittelwert | Minimum | Maximum |
|------------------|------------|---------|---------|
| R2 [-] | 0,98 | 0,97 | 0,99 |
| MAE [°C] | 1,60 | 0,78 | 2,39 |
| RSME [°C] | 1,83 | 0,94 | 2,63 |
| WAPE [%] | 0,08 | 0,04 | 0,12 |
| n | 62 | 29 | 109 |

Am besten ist sicherlich der MAE interpretierbar, da dieser Wert die Höhe der Abweichungen direkt aufzeigt. Deshalb wird im Folgenden der MAE bevorzugt aufgeführt. Abbildung 2.22 zeigt die Modellgüte an den einzelnen betrachteten Stationen, wobei ein MAE kleiner als der Mittelwert von 1,6 °C als gut gewertet werden kann.

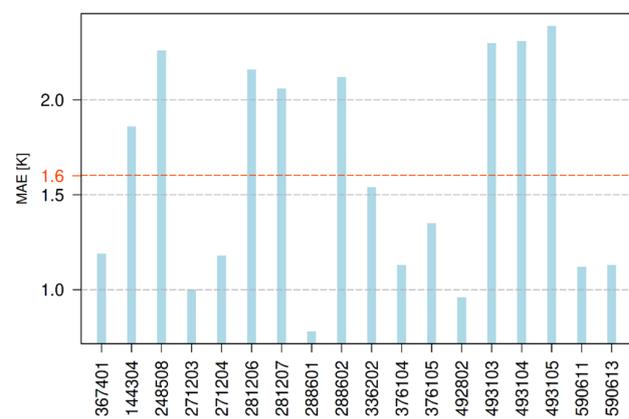


Abbildung 2.22: Modellperformance aller verwendeten (Sub-) Messstationen. Der Mittelwert des MAE in orange

Bei der Betrachtung der einzelnen Stationen (Abbildung 2.23) zeigen die Modellwerte geringere Abweichungen in den Nachtstunden und höhere Abweichungen am Tage. Der

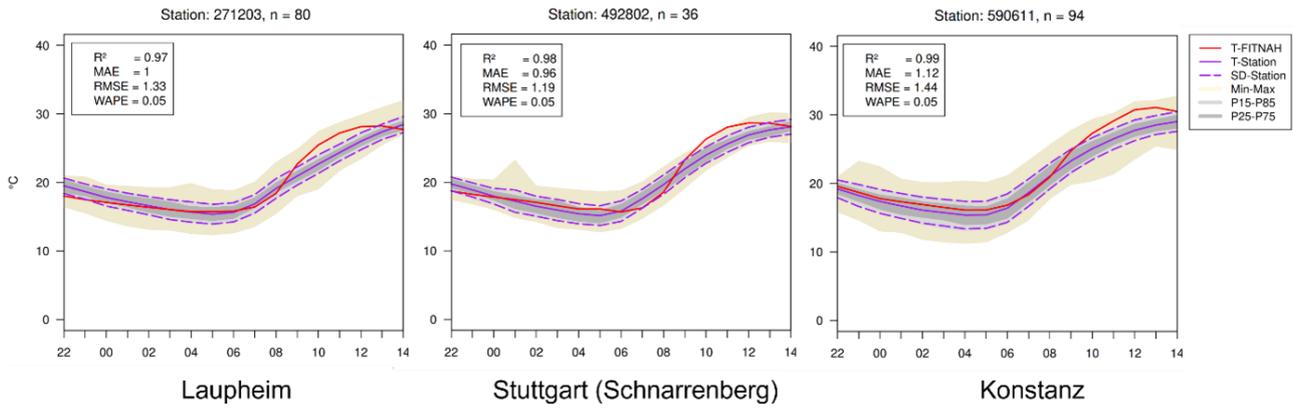


Abbildung 2.23: Gegenüberstellung von Modell- und Messzeitreihen an ausgewählten Stationen (Rote durchgezogene Linie – 2m-Temperatur FITNAH, lila durchgezogene Linie – 2m-Temperatur Messstation, lila gestrichelte Linie -- $\sqrt{\quad}$ - Standardabweichung der Messdaten, beige – alle Messwerte zwischen Minimum und Maximum, hellgrau – alle Messwerte zwischen 15. und 85. Perzentil, dunkelgrau – alle Messwerte zwischen 25. und 75. Perzentil)

Wertebereich, begrenzt durch Minimum und Maximum, wird von den Modellwerten jedoch nicht verlassen.

eintrag und somit bei der Entwicklung der 2m-Temperaturen im Tagesverlauf zur Folge.

An fast allen Stationen werden die Messwerte vom Modell tagsüber überschätzt, wobei sie gegen 14:00 Uhr wieder recht gut zueinander passen (Abbildung 2.24). Gründe für die größeren Abweichungen am Tage sind einerseits der Auswahlalgorithmus der Tagesgänge der Messwerte und andererseits der unterschiedliche Sonnenstand von Mess- und Modellzeitreihen. Die Auswahl der Tagesgänge an den Messstationen erfolgte anhand der Definition für nächtliche autochthone Bedingungen und berücksichtigt vor allem die Nachtstunden. Somit kann es vorkommen, dass die meteorologischen Bedingungen am Tage nicht der idealisierten Wetterlage des FITNAH-Modells entsprechen. FITNAH wird zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr initialisiert, und zwar zum 21. Juni (Sonnenhöchststand). Die ausgewählten Zeitreihen der Messstationen stammen jedoch in den meisten Fällen von anderen Zeitpunkten, somit sind die Sonnenstände und -verläufe von Modell- und Messdaten nicht identisch. Das hat je nach betrachtetem Zeitpunkt Unterschiede im Strahlungs-

Der Vergleich von FITNAH-Simulationsergebnissen mit Messdaten von DWD-Stationen für Baden-Württemberg hat gezeigt, dass es bei Betrachtung der 2m-Temperatur eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messungen gibt. Die mittlere absolute Abweichung im Vergleich aller verfügbaren Daten liegt bei ca. 1,6 °C, wobei die Nachttemperaturen wesentlich besser wiedergegeben werden als die Tagestemperaturen. Die Modellperformance ist im Vergleich der Messstationen untereinander recht unterschiedlich, wobei der Schwankungsbereich der mittleren absoluten Abweichungen zwischen 0,78 °C und 2,39 °C liegt.

FITNAH-Ergebnisse und Messdaten lassen sich nur unter bestimmten Bedingungen miteinander vergleichen. FITNAH bildet eine konkrete (autochthone) Wetterlage ab, in der Realität treten autochthone Wetterlagen eher lokal begrenzt auf. Das bedeutet, je größer das Untersuchungsgebiet, umso geringer die Wahrscheinlichkeit, dass genau diese Wetterlage für das gesamte Untersuchungsgebiet zum gleichen Zeitpunkt auftritt. Somit ist es erforderlich aus Messdaten Zeitreihen auszuwählen, die so gut wie möglich den meteorologischen Bedingungen einer autochthonen Wetterlage entsprechen.

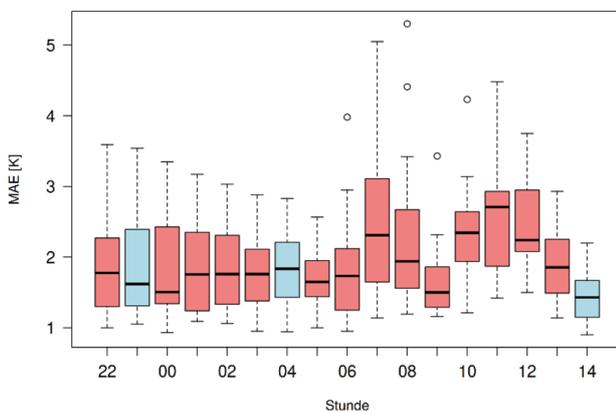


Abbildung 2.24: Modellperformance im Tagesgang, hellblaue Boxen kennzeichnen jene Zeitpunkte, die in der Klimaanalyse für Baden-Württemberg ausge-wertet wurden

Beim Vergleich von Modelldaten und Messdaten ist eine sorgfältige Datenaufbereitung der Messdaten vonnöten. Langjährige gemessene Zeitreihen unterliegen verschiedenen Unsicherheiten, wobei besonders folgende Aspekte berücksichtigt werden müssen: Ortsveränderungen, Messgerätewechsel, sowie Zeitzone und Zeitpunkte der Messungen. Bei der Verwendung von DWD-Messdaten können diese Informationen aus den für jede Station bereitgestellten Metadaten ermittelt

werden. Besonders Ortswechsel müssen unbedingt beachtet werden, da bei einer räumlichen Auflösung des Modells von 50 m ein Ortswechsel von > 25 m bereits dazu führt, dass ein anderer Modellgitterpunkt zum Vergleich herangezogen werden muss. Bei den Untersuchungen wurde weiterhin festgestellt, dass Ortsveränderungen von Messstationen teilweise eine geringere Güte im Vergleich von Modell- und Messdaten zur Folge hatten.

2.7 Bestimmung ausgewählter meteorologischer Kenntage

Beschreibung der Kenntage

Im Rahmen der Klimaanalyse für das Bundesland Baden-Württemberg, wurde eine Methode entwickelt, welche die Ableitung ausgewählter meteorologischer Kenntage aus Regionalmodelldaten und FITNAH-Simulationsergebnissen ermöglicht. Tabelle 2.10 führt die für Baden-Württemberg flächendeckend abgeleiteten meteorologischen Kenntage auf.

Tabelle 2.10: Beschreibung der abgeleiteten meteorologischen Kenntage

| Parameter | Definition | Einheit |
|---|---|-------------------------------|
| Sommertag | Tag mit einer Maximumtemperatur $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | n/ Jahr |
| Heißer Tag | Tag mit einer Maximumtemperatur $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ | n/ Jahr |
| Tropennacht | Tag mit einer Minimumtemperatur $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ | n/ Jahr |
| Anzahl der Überschreitungen einer Wochenmitteltemperatur von $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Summe der Tage, an denen ein gleitender 7-tägiger Mittelwert von $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ überschritten wird. | n/ Jahr |
| Hitzeperiode | Zeitraum von fünf aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Maximumtemperatur $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ | n/ Periode (Periode=30 Jahre) |

2.7.1 Datengrundlage

Regionalmodelldaten

Grundlage für die Ableitung von meteorologischen Kenntagen sind Regionalmodelldaten der EURO-CORDEX-Initiative [JACOB et al. 2014] und des ReKliEs-Projektes [HÜBENER et al. 2017]. Diese Daten sind Rasterdatensätze verschiedener meteorologischer Variablen mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12 km. Vom Deutschen Wetterdienst wurden alle vorliegenden Datensätze biaskorrigiert und auf eine räumliche Auflösung von 5 km skaliert. Basierend auf einem für das Bundesland Bayern entwickelten Auditverfahren [LFU 2020B] wurde für Baden-Württemberg für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 jeweils ein valides und ver-

trauenswürdiges Modellensemble zusammengestellt. Tabelle 2.11 listet die Mitglieder der verwendeten Modellensembles auf.

Tabelle 2.11: Regionalmodellensembles für Baden-Württemberg. (Grün markierte Felder bezeichnen verwendete Modellkombinationen und rot markierte Felder nicht verwendete Modellkombinationen; Daten vom LUBW im Rahmen dieses Projektes bereitgestellt)

| Globalmodell | Regionalmodell | RCP 8.5 | RCP 4.5 |
|-----------------------|-------------------|---------|---------|
| ICHEC-EC-EARTH (r12) | CLMcom-CCLM4-8-17 | Grün | Grün |
| ICHEC-EC-EARTH (r12) | KNMI-RACM022E | Grün | Grün |
| ICHEC-EC-EARTH (r12) | SMHI-RCA4 | Grün | Grün |
| ICHEC-EC-EARTH (r1) | KNMI-RACM022E | Grün | Grün |
| ICHEC-EC-EARTH (r1) | UHOH-WRF361H | Grün | Rot |
| MPI-M-MPI-ESM-LR (r1) | CLMcom-CCLM4-8-17 | Grün | Grün |
| MPI-M-MPI-ESM-LR (r1) | SMHI-RCA4 | Grün | Grün |
| MPI-M-MPI-ESM-LR (r1) | UHOH-WRF361H | Grün | Rot |
| MIROC-MIROC5 (r1) | CLMcom-CCLM4-8-17 | Grün | Rot |
| MOHC-HadGEM2-ES (r1) | UHOH-WRF361H | Grün | Rot |

Die Daten beinhalten Modellergebnisse für eine Referenzperiode von 1971 bis 2005 und Klimaszenarien für den Zeitraum von 2006 bis 2100. Für die Ableitung der Kenntage wurden folgende 30-jährige Zeiträume ausgewählt:

- Referenzperiode: 1971 - 2000
- Periode 1: 2031 - 2060
- Periode 2: 2071 - 2100

Die zweite wichtige Datengrundlage stellen die in Kapitel 2.5 vorgestellten Modellergebnisse aus FITNAH dar. Mit einer räumlichen Auflösung von $50 \times 50\text{ m}$ beschreiben diese einen meteorologischen Tagesgang (stündliche Werte) während einer autochthonen Wetterlage.

2.7.2 Datenaufbereitung (Preprocessing)

Zur Berechnung flächendeckender meteorologischer Kenntage mussten die Regionalmodelldaten im Vorfeld aufbereitet werden. Zuerst wurden deren Koordinaten, welche auf dem Referenzsystem Lamberts winkeltreue Kegelp Projektion (Lambert Conic Conformal Projection) basierten in die Transversale Mercator Projektion (Universal Transverse Mercator = UTM) der FITNAH-Daten, bei Erhalt der räumlichen Auflösung von $5 \times 5\text{ km}$, umprojiziert. Danach erfolgte ein Resampling, sodass jeder Gitterpunkt der Regionalmodelldaten mit einem Gitterpunkt der FITNAH-Daten identisch ist. Die Gitter wurden quasi passgenau übereinandergelegt.

Nicht alle Regionalmodelle verwenden den gleichen Kalender. So lagen einige Datensätze mit einem 365-Tage-Kalender und einige mit einem 360-Tage Kalender (jeder Monat hat nur 30 Tage) vor. Weiterhin wurden Schalttage nicht von allen Regionalmodellen berücksichtigt. Zur Vereinheitlichung der zeitlichen Bezüge wurden dementsprechend die Schalttage entfernt. Da die berechneten Kenntage ausschließlich auf den thermischen Aspekt aufgrund hoher Temperaturen abzielen, stellt die Entfernung der Schalttage (29. Februar) keine Beeinträchtigung der Ergebnisse dar. Bei den Daten mit 360-Tage-Kalendern wurden die fehlenden Tage mittels linearer zeitlicher Interpolation der entsprechenden Layer hinzugefügt.

2.7.3 Berechnung der Kenntage

Methode

Das Berechnungsprinzip der Kenntage ist für jeden Parameter (siehe Tabelle 2.10) gleich. Ausgangspunkt sind die Temperaturzeitreihen der Regionalmodellldaten (Tmax, Tmin oder Tmean, je nach Kenntagsparameter). Im Vergleich zu diesen bilden die FITNAH-Ergebnisse nur einen kurzen zeitlichen Ausschnitt ab (Tagesgang), jedoch in sehr hoher räumlicher Auflösung. Die räumliche Variabilität, der mit FITNAH berechneten Temperaturen, wird von den kleinräumigen Nutzungsstrukturen beeinflusst und repräsentiert damit das lokale Klimasignal. Dies kann zur räumlichen Disaggregation der Regionalmodellldaten genutzt werden.

Die Berechnung der Kenntage erfolgt in folgenden Schritten:

1. Für jeden Gitterpunkt des Regionalmodellgitters werden die umliegenden zugehörigen Gitterpunkte des FITNAH-Gitters zusammengestellt (100 x 100 Gitterpunkte) (Abbildung 2.25).

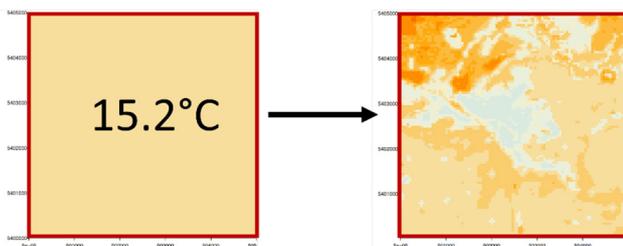


Abbildung 2.25: Repräsentative Fläche eines Regionalmodellgitterpunktes (links) und die zugehörigen 100 x 100 Gitterpunkte aus dem FITNAH-Gitter (rechts)

2. Aus den Werten der zugehörigen FITNAH-Gitterpunkte wird ein räumlicher Mittelwert berechnet.

$$\bar{T}_{FIT} = \frac{\sum_i^n T_{FIT,i}}{n}$$

3. An jedem FITNAH-Gitterpunkt wird nun die Abweichung vom FITNAH-Mittelwert berechnet (Abbildung 2.26).

$$\Delta T_{FIT,i} = T_{FIT,i} - \bar{T}_{FIT}$$

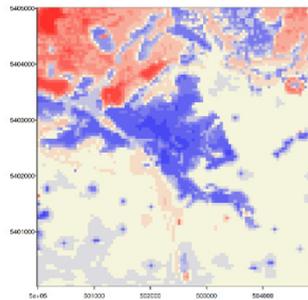


Abbildung 2.26: Abweichung der FITNAH-Werte vom Flächenmittelwert einer repräsentativen Fläche von 100 x 100 Gitterpunkten

4. Danach wird für jeden FITNAH-Gitterpunkt die Abweichung vom Flächenmittelwert mit dem zugehörigen Wert des Regionalmodellgitterpunktes addiert und mit einem empirische Korrekturfaktor (f_{corr}) angepasst. Damit ergeben sich für jeden FITNAH-Gitterpunkt aus den Regionalmodellldaten abgeleitete Temperaturzeitreihen.

$$T_{i,j} = (\Delta T_{FIT,i} + T_{REG,j}) * f_{corr}$$

5. Der letzte Schritt beinhaltet die Berechnung der Auftrittshäufigkeit pro Jahr (bei Hitzeperioden pro 30 Jahre) der jeweiligen Kenntage aus den abgeleiteten Zeitreihen für jeden FITNAH-Gitterpunkt.

$$H_{event} = \frac{\sum event}{\sum_k^n a}$$

- \bar{T}_{FIT} Flächenmittelwert der FITNAH-Werte um einen Regionalmodellgitterpunkt
- $T_{FIT,i}$ Wert an FITNAH-Gitterpunkt i
- $\Delta T_{FIT,i}$ Abweichung des Wertes i vom Flächenmittelwert der FITNAH-Werte

- $T_{REG,j}$ Wert am Regionalmodellgitterpunkt j
- $T_{i,j}$ Summe i aus Abweichung vom FITNAH-Mittelwert uu.. Regionalmodellgitterwert j
- event Kenntag
- H_{event} Auftrittshäufigkeit von Kenntagen
- a Jahr
- f_{corr} empirischer Korrekturfaktor
- i,j,k Indizes

Da die meteorologischen Randbedingungen der FITNAH-Simulationen einer autochthonen Wetterlage entsprechen, welche nur an wenigen Tagen im Jahr auftritt, ist es notwendig die Berechnung der disaggregierten Temperaturzeitreihen durch einen empirischen Korrekturfaktor zu adjustieren (f_{corr} in Schritt 4). Die Ermittlung des Korrekturfaktors erfolgt durch Probeläufe des Kenntagsalgorithmus für einen möglichst repräsentativen, aber kleineren Flächenausschnitt. In diesem Projekt wurde dies anhand eines Ausschnitts rund um die Stadt Freiburg realisiert. Methodisch wurde dabei analog zur Vorgehensweise bei der Evaluierung der Ergebnisse vorgegangen (siehe Kapitel 2.6).

Filterung

Die kartographische Darstellung der thermischen Kenntage offenbart den Einfluss der geringeren räumlichen Auflösung der Regionalmodelldaten in Form von Raster- oder auch Kachel-effekten, die über die gesamte Fläche des Bundeslandes Baden-Württemberg hinweg sichtbar sind. Da die Kenntage auf räumlich kontinuierlichen Größen basieren sind diese Muster realitätsfern und entsprechen nicht den Sehgewohnheiten der Nutzer, was zu einer verminderten Akzeptanz der Ergebnisse führen kann. Daher wurden die Rasterfelder der Kenntagergebnisse in einem Postprocessing-Schritt räumlich gefiltert. Bei dieser Filterung wurde ein sogenannter Kernelfilter auch bekannt unter der Bezeichnung „moving window“ verwendet. Ein Kernelfilter ist eine quadratische Faltungsmatrix mit ungeraden Abmessungen, welche hier in Form eines Glättungsfilters (Mittelwertfilter) angewandt wurde. Dabei bewegt sich ein „Berechnungsfenster“ mit einer definierbaren Größe von links oben nach rechts unten über die als zweidimensionale Datenmatrix vorliegenden Ausgangsdaten. Für die Rasterzelle im Zentrum dieses Fensters wird aus den Werten aller in diesen Rahmen fallenden Rasterzellen ein neuer Wert berechnet (Abbildung 2.27). Anschließend wird das

Fenster verschoben und der nächste Wert berechnet [SPEKTRUM 2001].

Für einen Mittelwertfilter mit einer Kantenlänge von 3 Rasterzellen ergibt sich folgende Berechnungsformel:

$$I'(u, v) = \frac{1}{9} * \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 I(u + i, v + j)$$

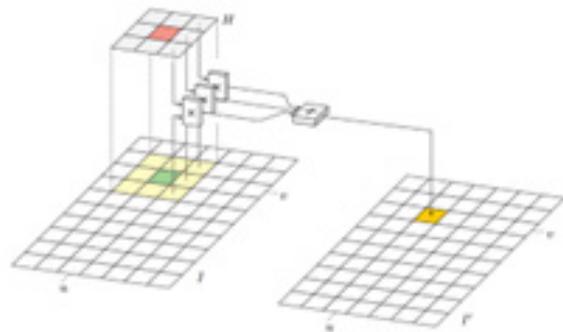


Abbildung 2.27: Funktionsweise des Mittelwertfilters [THIPKHAM 2018]

Bei einem Mittelwertfilter entscheidet die Kantenlänge über die Stärke der Glättung. Je größer die Kantenlänge, umso größer die Filterfläche, umso höher die Anzahl der für die Mittelwertbildung verwendeten Rasterelemente und umso stärker die Glättung. Hier muss je nach Variable individuell entschieden werden, wie intensiv die Glättung ausfallen darf. Dabei sollte auf eine Balance zwischen visueller Ästhetik und Erhalt

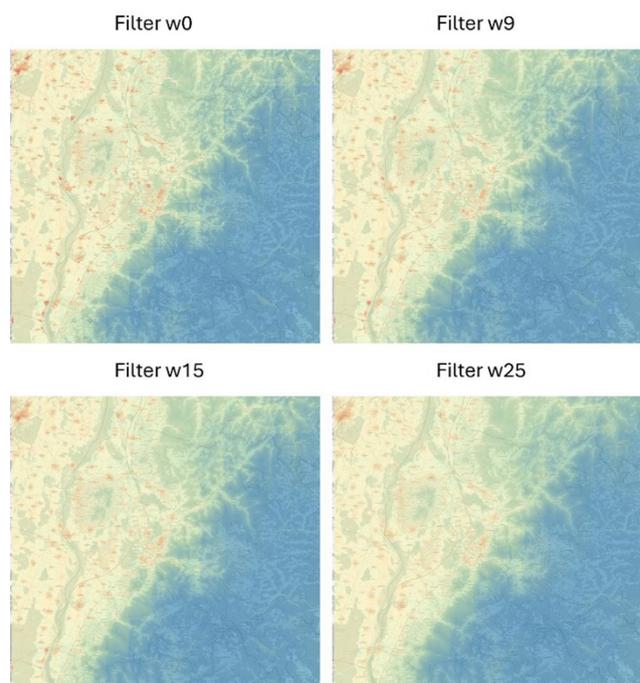


Abbildung 2.28: Unterschiede in der Glättung der Ergebnisse je nach Filtergröße. $w(x)$ bezeichnet jeweils die Kantenlänge der Faltungsmatrix des angewandten Filters

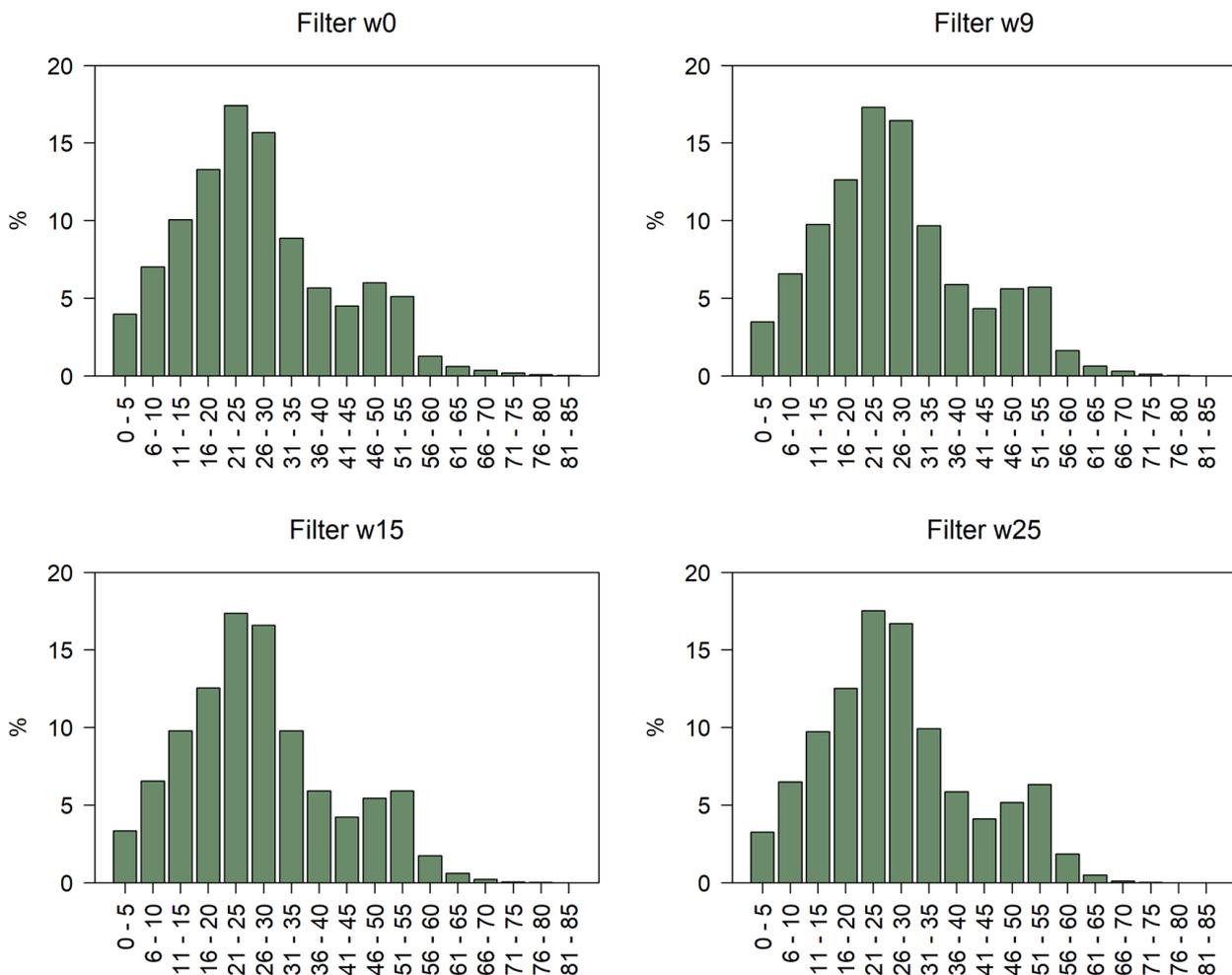


Abbildung 2.29: Änderungen der Häufigkeitsverteilung je nach Stärke des angewandten Filters, hier als Beispiel die Anzahl der Tage mit einer Überschreitung der Wochenmitteltemperatur von 21 °C ($w(x)$ bezeichnet jeweils die Kantenlänge der Faltungsmatrix des angewandten Filters)

der Daten geachtet werden (Abbildung 2.28). Die Filterung wirkt sich auf die Daten dahingehend aus, dass die Häufigkeitsverteilung zugunsten des Gesamtflächenmittelwertes verschoben wird, einhergehend mit einer Abnahme der Maxima (Abbildung 2.29).

Für die kartographische Darstellung der thermischen Kenn-tage im Rahmen der Klimaanalyse Baden-Württemberg wurden, in Abstimmung mit dem Auftraggeber, unterschiedliche Filtergrößen, je nach Variable verwendet. Ziel war es dabei eine visuell ansprechende und inhaltlich richtige Darstellung zu erzielen.

2.7.4 Evaluierung der Kenntagsberechnung Datenaufbereitung

Die Überprüfung der Güte der berechneten Kenntage wurde anhand von Stationsdaten durchgeführt. Hierbei ist die Lage der DWD-Messstationen zu berücksichtigen. Im Laufe ihrer Stationsgeschichte unterlagen viele Stationen einem Orts-

wechsel (Abbildung 2.21 in Abschnitt 2.6). Beim Vergleich von Stationsdaten mit Rasterdaten spielt die korrekte räumliche Zuordnung der Datensätze eine wichtige Rolle.

Aus den verfügbaren Stationsdaten für Baden-Württemberg wurden die Datensätze aller Stationen ausgewählt, die im Zeitraum der Referenzperiode von 1971 bis 2000 Messdaten aufwiesen. Von den ausgewählten Stationen wurden die Metadaten ausgelesen und ermittelt, wie lange Messungen an jeder Stationslage durchgeführt wurden, sofern Ortswechsel stattfanden. Als Bedingung wurden mindestens 10 Jahre kontinuierliche Messungen festgelegt. Jede Ortslage mit Messungen von 10 Jahren wurde dann als eigenständige Messstation deklariert. Dies ergab für ganz Baden-Württemberg 66 Punkte an denen kontinuierliche und mindestens 10-jährige Zeitreihen zum Vergleich zur Verfügung standen. Für jede der Messstationen wurden dann die Auftrittshäufigkeiten der meteorologischen Kenntage als Vergleichswerte berechnet.

Im nächsten Schritt wurden für jede Messstation die nächstgelegenen Gitterpunkte des FITNAH-Gitters sowie alle in einer Fläche von 500 x 500 m umliegenden Gitterpunkte herausgesucht und jeweils das Flächenmittel der Auftrittshäufigkeit des entsprechenden Kenntages berechnet. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass eine meteorologische Messstation auf der lokalen Skala repräsentativ für eine Fläche mit einem Radius von einem bis mehreren Kilometern sein sollte, wobei der direkte Einfluss auf einen Temperatursensor in etwa 1,5 m Messhöhe von einer Quellfläche mit einem Radius von etwa 500 m stammt [OKE 2006].

Methoden

Die Beurteilung der Güte der Ableitung der meteorologischen Kenntage wurde anhand des mittleren absoluten Fehlers (MAE) vorgenommen. In Kapitel 2.6 ist das Gütemaß MAE eingehend beschrieben.

Ergebnisse

Die Bewertung der Güte der meteorologischen Kenntage zeigt, dass die mittleren absoluten Abweichungen (MAE) der Modelldaten von den Messwerten für alle Kenntage, außer den Hitzeperioden, unter dem jeweiligen Mittelwert der Verteilung über alle Stationen hinweg liegt (Tabelle 2.12). Dies weist auf eine gute Abbildung der Modellergebnisse im Vergleich zur Realität hin. Schwierig zu beurteilen ist die Modellgüte hinsichtlich der Anzahl der Tropennächte pro Jahr und der Anzahl an Hitzeperioden pro 30 Jahre. Beide Kenntage repräsentieren für den Zeitraum 1971 bis 2000 seltene Ereignisse mit extremen Temperaturen. So treten Tropennächte an den meisten Stationen seltener als einmal im Jahr auf. Gleiches gilt für die Anzahl an Hitzeperioden. Aufgrund

Tabelle 2.12: Mittlerer absoluter Fehler und Statistik der Kenntage über alle Messstationen (n=66)

| Kenntag | MAE | | Statistik | | |
|--|--------|--------|-----------|------|-----|
| | RCP4.5 | RCP8.5 | Min | Mean | Max |
| Sommertage [n/Jahr] | 6 | 6 | 0 | 35 | 62 |
| Heiße Tage [n/Jahr] | 2 | 2 | 0 | 6 | 17 |
| Tropennächte [n/Jahr] | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Überschreitung der Wochenmitteltemperatur von 21 °C [n/Jahr] | 3 | 3 | 0 | 8 | 30 |
| Hitzeperioden [n/30 Jahre] | 4 | 5 | 0 | 1 | 9 |

dessen lässt sich keine robuste Statistik berechnen und die Aussagekraft des MAE ist nur gering. Bei den Hitzeperioden zeigt sich jedoch eine Tendenz zur Überschätzung der Auftrittshäufigkeit.

2.8 Unsicherheiten und Herausforderungen

Die numerische Stadt- und Regionalklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres flächendeckenden, das Prozessgeschehen abbildenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften subsumieren:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit [STACHOWIAK 1973]. Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses lediglich hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für mesoskalige Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind bzw. die durch den Stand der Technik definierten Mindeststandards. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende berechnungsintensivere sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der z. B. im Modell PALM-4U für Klimanalysen in Klein- und Mittelstädten schon angewendet wird,

aber im Zusammenhang mit landesweiten Klimaanwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungs- (F&E) Vorhaben ist (MARONGA ET AL. 2020).

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarienrechnungen enthält – also z. B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/ oder Maßnahmenzenarien. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei $\pm 0,1 - 0,2$ K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich in der Planungshinweiskarte (PHK) aufgrund der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei $\pm 1 - 2$ % bezogen auf eine Fläche der PHK-Basisgeometrie, bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der Planungshinweiskarte zu vernachlässigen sind.

Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten in den Daten können sich dabei ergeben aus

- der grundsätzlichen Verfügbarkeit,
- der Aktualität (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- der Qualität, Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) sowie dem Informationsgehalt,
- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse.

Bzgl. der Aktualität und Verfügbarkeit der Daten wird auf Kapitel 2.3 verwiesen. Dort werden insbesondere die Unsicherheiten bzgl. einzelner Landnutzungsklassen (insbesondere im urbanen Kontext) sowie bzgl. des Versiegelungsgrades erläutert. Dabei gilt grundsätzlich: Je vollständiger und aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Insbe-

sondere in sich dynamisch entwickelnden urbanen Räumen sollte der Erhebungszeitpunkt nur für einzelne, das Ergebnis nicht nachhaltig beeinflussende Datensätze mehr als drei bis vier Jahre in der Vergangenheit liegen. Diese Prämisse ist für die vorliegende Analyse einzig für die Eingangsdaten zur Strukturhöhe nicht vollumfänglich gegeben. Widersprüchliche und lückenhafte Daten konnten zudem größtenteils korrigiert bzw. aktualisiert werden, kleinere Fehlinterpretationen sind trotz Plausibilitätsprüfung jedoch nicht komplett auszuschließen. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden. Es empfiehlt sich daher, den Fortschreibungsrhythmus der landesweiten Analyse nicht (nur) an ein starres zeitliches Korsett, sondern (auch) an die Aktualisierung bzw. erstmalige Erzeugung zentraler Eingangsdaten zu koppeln. In den letzten zehn Jahren hat die fernerkundliche Erhebungsqualität noch einmal deutlich zugenommen. Die Aufnahmen aus Befliegungen haben heute eine räumliche Genauigkeit von wenigen Zentimetern, sodass sich allenfalls noch kleinere Unsicherheiten aus sichttoten Räumen (z.B. in Gebäudeschatten) ergeben. Mit der seit Anfang 2023 verpflichtenden nächsten Generation (sog. TrueDOP) wird sich aber auch diese Unsicherheitsquelle auflösen und es stünden hinreichend valide Ausgangsdaten für die Erstellung der oben vorgeschlagenen Basisprodukte zur Verfügung.

Sämtliche Eingangsdaten wurden in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 0,25 ha repräsentiert. Dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Insbesondere Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Strukturtypen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass insbesondere in der regionalen Perspektive bzw. auf der Ebene der Planungshinweiskarte keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/ Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundlicher Blick auf die zu Grunde liegenden Eingangsdaten.

Neben den modelltechnischen Unsicherheiten bestehen insbesondere im Zusammenhang mit den vier Zukunftsszenari-

en noch weitere projektrelevante Unsicherheiten. Zumindest teilräumlich relevante Tendenzen (Sommertrockenheit, Siedlungsentwicklung, Aufforstungen, Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen) konnten aufgrund fehlender Datengrundlagen in den Zukunftsszenarien nicht berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle andere Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der Angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber auch

deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse – insbesondere auf die Planungshinweiskarte – einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets in den kommenden Jahren sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern. Das größte Potential besteht in diesem Zusammenhang in der Optimierung der Berücksichtigung von Gebäude- und Bodeneigenschaften.

3 Produktphase

3.1 Verwendung der Modellausgabegrößen

Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der aus den Modellrechnungen zum Kaltlufthaushalt / thermischer Komfort, zur Luftqualität, sowie zu den Kenntagen abgeleiteten Einzelparameter (für Einheiten, Zeitpunkte und Szenarien vgl. Kapitel 2.5) und ihre weitere Verwendung im Projekt. Jede dieser Ausgabegrößen wurde zunächst in einer einheitlich gelayouteten rasterbasierten Karte im A0-Format visualisiert. Sie liegen – wie alle Kartenprodukte – in den Formaten .pdf, sowie als ArcGIS 10.8 bzw. Pro mappackage vor. In der Tabelle sind die jeweiligen korrespondierenden Kartennummern genannt.

Die Tabelle verdeutlicht, dass die über die Einzelkarten hinausgehenden (Zwischen-)Produkte auf einem individuellen Set an (z. T. gutachterlich noch einmal weiterverarbeiteten) Einzelparametern basieren. Dabei wurden alle Parameter für mindestens ein Produkt weiterverwendet. Bei Parametern, die für mehrere Produkte relevant sind, kommt deren Be-

deutung für das gesamte Thema zum Ausdruck. Dies betrifft insbesondere das Temperatur- und Strömungsfeld und die Kaltluftvolumenstromdichte. Die Luftqualitätskarten, die Klimaanalysekarten und allen voran die Planungshinweiskarte stellen Komplexkarten dar, in denen mehrere Ausgabegrößen verarbeitet worden sind. Demgegenüber steht die Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme, die ausschließlich auf den Vorwärtstrajektorien beruht (Details zum Vorgehen siehe Kapitel 3.2 bis 3.5).

Tabelle 3.1: Abgeleitete Ausgabegrößen aus den Modellrechnungen und ihre Verwendung im Projekt unter Nennung der internen Kartennummern

| Parameter | Einzelkarte | Klimaanalyse-karten | Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme | Luftqualitäts-karten | Planungshinweiskarte |
|--|--|---------------------|---|----------------------|----------------------|
| Bodennahe nächtliche Kaltluftproduktionsrate | 04a-d; 24a-d; 34a-d; 44a-d; 54a-d | 07; 27; 37; 47; 57 | | | |
| Bodennahe Lufttemperatur | 01a-b; 21a-b; 31a-b; 41a-b; 51a-b; 05a; 25a; 35a; 45a; 55a | 07; 27; 37; 47; 57 | | | 71 |
| Bodennahes nächtliches Strömungsfeld | 02a-b; 22a-b; 32a-b; 42a-b; 52a-b; 03a-b; 23a-b; 33a-b; 43a-b; 53a-b | 07; 27; 37; 47; 57 | | | 71 |
| Luftqualitätsparameter | | | | 61; 62 | 71 |
| mittlere jährliche Auftrittshäufigkeit von Wochenmitteltemperaturen >= 21 °C | 13a-k | | | | |
| mittlere langjährige Anzahl von Hitzeperioden | 14a-k | | | | |
| mittlere langjährige Auftrittshäufigkeit von Heißen Tagen | 11a-k | | | | |
| mittlere langjährige Auftrittshäufigkeit von Sommertagen | 10a-k | | | | |
| mittlere langjährige Auftrittshäufigkeit von Tropennächten | 12a-k | | | | |
| Nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte | 03a-b; 23a-b; 33a-b; 43a-b; 53a-b | 07; 27; 37; 47; 57 | | | 71 |
| Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) | 06a; 26a; 36a; 46a; 56a | | | | 71 |
| Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum | 08a | | 08b | | 71 |

3.2 Klimaanalysekarten

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte (KAK) die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ [VDI 2015, 4]. Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ [VDI 2015,13]. Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine ganz wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ [GAEDE & HÄRTLING 2010, 32]. Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z. B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ [MOORE 1903] zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 3.5).

Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario +2 K
- Klimaanalysekarte für das Szenario +3 K
- Klimaanalysekarte für das Szenario +4 K
- Klimaanalysekarte für das Szenario +5 K

Um den Komplexitätsgrad zu verringern und die Klimaanalysekarte thematisch-inhaltlich nicht zu überfrachten, sind die Themenfelder „Luftqualität“ und „Regionale Kaltluftströmungssysteme“ aus der Klimaanalysekarte herausgelöst und in eigene Zwischenprodukte überführt worden (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4). Damit wurde in Teilen von den in der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 definierten Vorschlägen für die Inhalte der Klimaanalysekarte abgewichen. Die dort beschriebenen Inhalte finden sich in der Gesamtheit der Zwischenprodukte aber umfänglich wieder. Eine Zusammenführung und planerische Inwertsetzung erfolgt im Rahmen der Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 3.5).

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der fünf Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 3.1). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Sie weist damit einen auf den regionalen Maßstab fokussierten Charakter auf und verzichtet ganz bewusst auf in der VDI-Richtlinie vorgeschlagene Detailinformationen wie Kaltfluthindernisse oder Kaltluftseen (die im Modell aber per se abgebildet sind), die ausschließlich in lokalen Kontexten bzw. Spezialanwendungen eine klimaökologische Bedeutung besitzen.

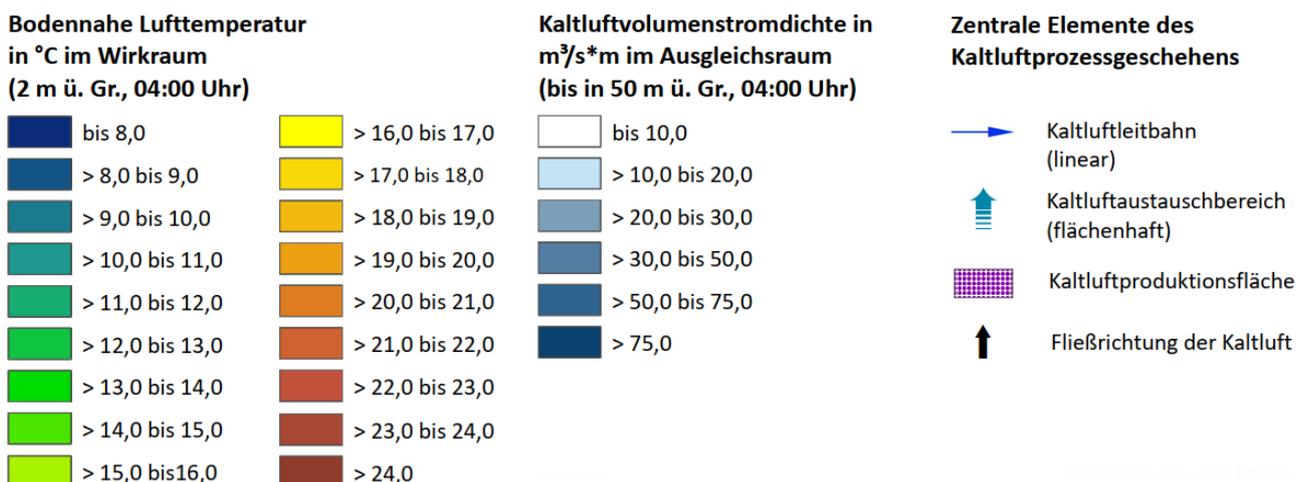


Abbildung 3.1: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten (gekürzt)

Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte für den Zeitpunkt 04:00 Uhr flächenhaft dargestellt (Abbildung 3.2). Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket (vgl. hierzu auch Kapitel 1.4). Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 50 m unmittelbar der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilinare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegendsten Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte. Mit dieser Art der Visualisierung soll verdeutlicht werden, dass die ermittelten Werte in der Realität in einem kontinuierlichen Wertespektrum auftreten und nicht einem Rastermuster folgend feste Werte annehmen. Die Muster der Kaltluftströmungen verändern sich in den betrachteten Zukunftsszenarien nicht signifikant, da die zusätzliche Erwärmung in den vier Warming Levels auf alle Landnutzungsklassen gleichermaßen wirkt, die Unterschiede zwischen Stadt- und Land erhalten bleiben und eine Siedlungsentwicklung nicht Teil der Szenarienbildung war (ohne Abbildung).

Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur um 04:00 Uhr für das 2 m-Niveau flächenhaft dargestellt (Abbildung 3.3). Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Das 50 m Raster

wurde mit Hilfe der Basisgeometrie (siehe Kapitel 3.5.2) auf den Wirkraum zugeschnitten und ebenfalls über die Funktion „bilinare Interpolation“ geglättet dargestellt. In den verschiedenen KAKs zeigt sich der Effekt der Warming Levels deutlich in einem stetig steigenden Niveau der nächtlichen Überwärmung. Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft den Vergleich zwischen der Bestandsituation und der stärksten Überwärmung im Szenario +5 K im Raum Karlsruhe.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 3.2). Die einzelnen Phänomene treten über die Warming Levels hinweg konstant auf (siehe Abschnitt oben zur Kaltluftvolumenstromdichte), daher werden stellvertretend Kartenausschnitte aus der KAK der Bestandsituation gezeigt.

Tabelle 3.2: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

| Legendenelement | Ableitungsmethode |
|--|--|
| Fließrichtung der Kaltluft | Tauf 1000 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,10 m/s |
| Kaltluftproduktionsfläche | Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von |
| Kaltflutleitbahn (linear) | gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen |
| Kaltluftaustauschbereich (flächenhaft) | gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen |

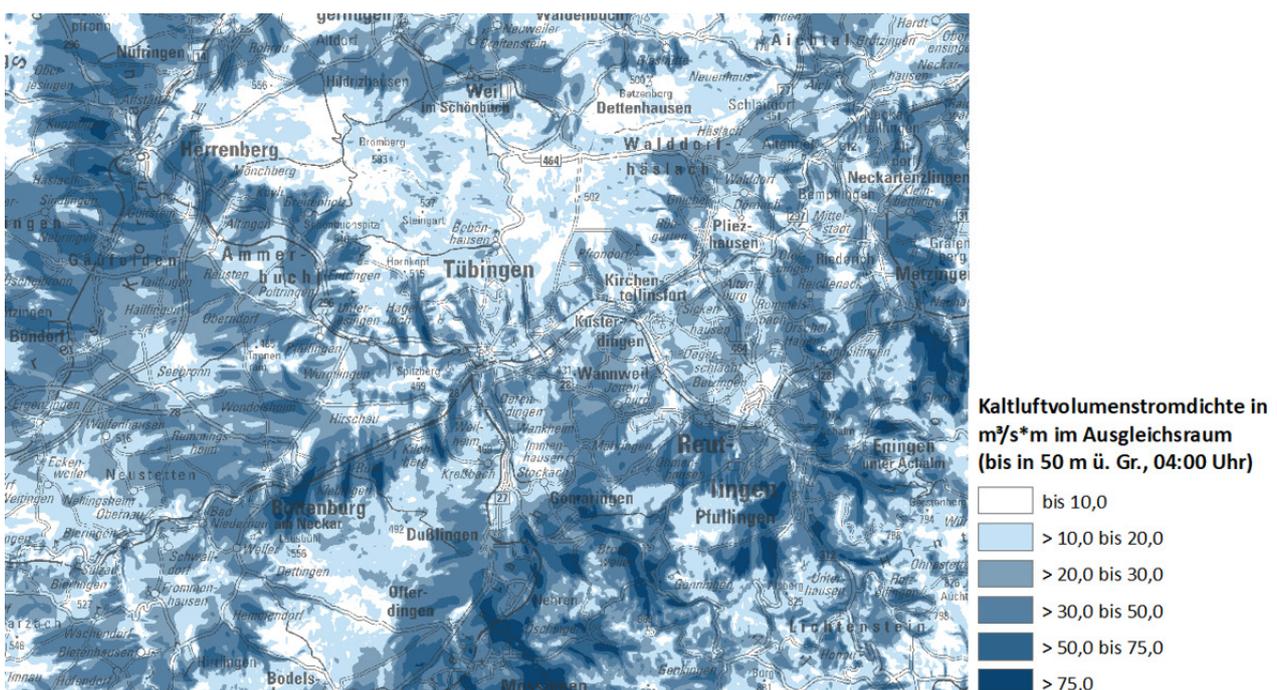


Abbildung 3.2: Ausschnitt der gutachterlich klassifizierten Kaltluftvolumenstromdichte bei Tübingen in der Bestandsituation

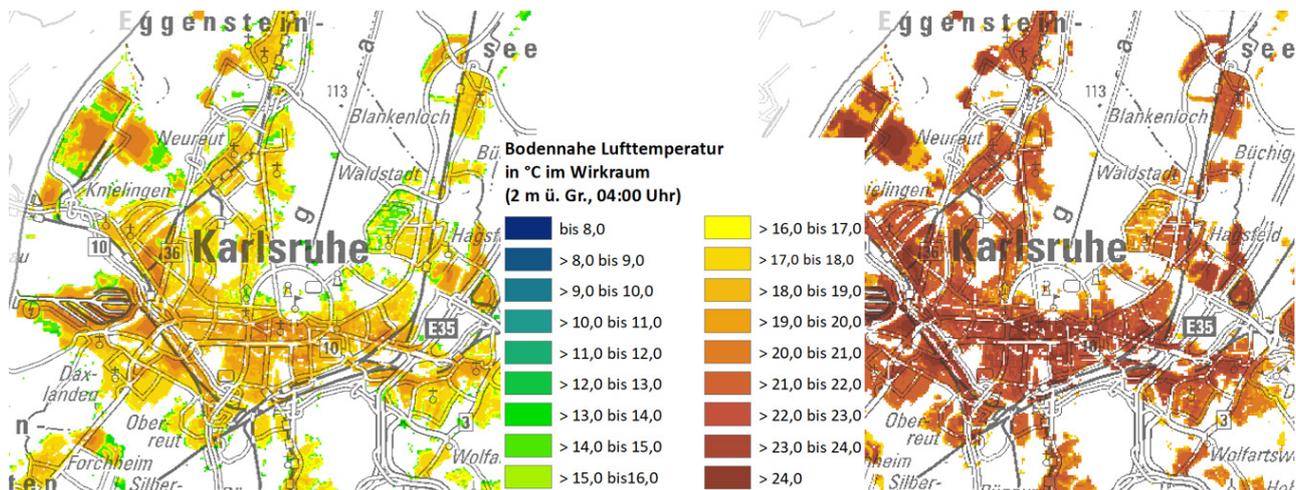


Abbildung 3.3: Ausschnitte der absoluten Lufttemperatur bei Karlsruhe in der Bestandsituation und dem Szenario +5K

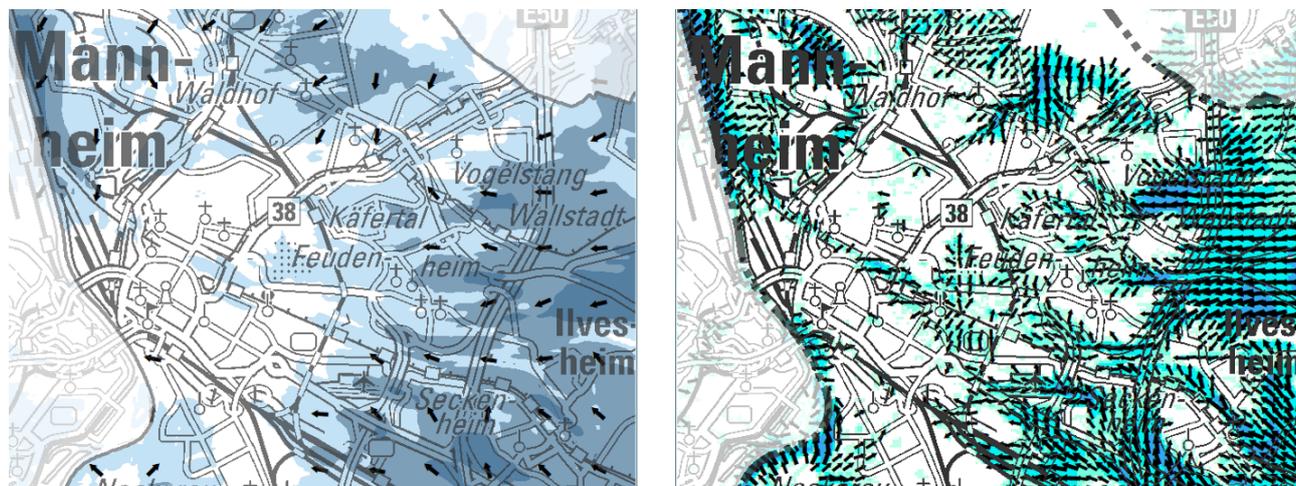


Abbildung 3.4: Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte (links) mit dem 1000 m Windfeld und der Karte der bodennahen Windgeschwindigkeit (rechts) mit dem 200 m Windfeld im Raum Mannheim

Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 1000 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,10 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert (Abbildung 3.4 links). Kleinräumigere und/ oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den ergänzenden Rasterdaten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden (Abbildung 3.4 rechts).

Die als Kaltluftproduktionsflächen gekennzeichneten Räume sind Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 23,4 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{h}$ (Abbildung 3.5). Dieser Schwellenwert wurde anhand einer Mittelwertbildung über das gesamte Raster der Kaltluftproduktionsrate gebildet.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in den einzelnen

Teilräumen Baden-Württembergs von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften Kaltluftleitbahnen (Abbildung 3.6). Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. [MAYER ET AL. 1994]) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Flächenhafte Kaltluftaustauschbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie rein auf wenig dynamischen Flurwinden basieren (vgl. Kapitel 1.4, Abbildung 3.7 links), was im reliefgeprägten Baden-Württemberg vor allem in der oberrheinischen Tiefebene vorkommt. Sehr viel häufiger kommen hangfolgende Kaltluftabflüsse vor (Abbildung 3.7 rechts). Diese reagieren aufgrund der zumeist

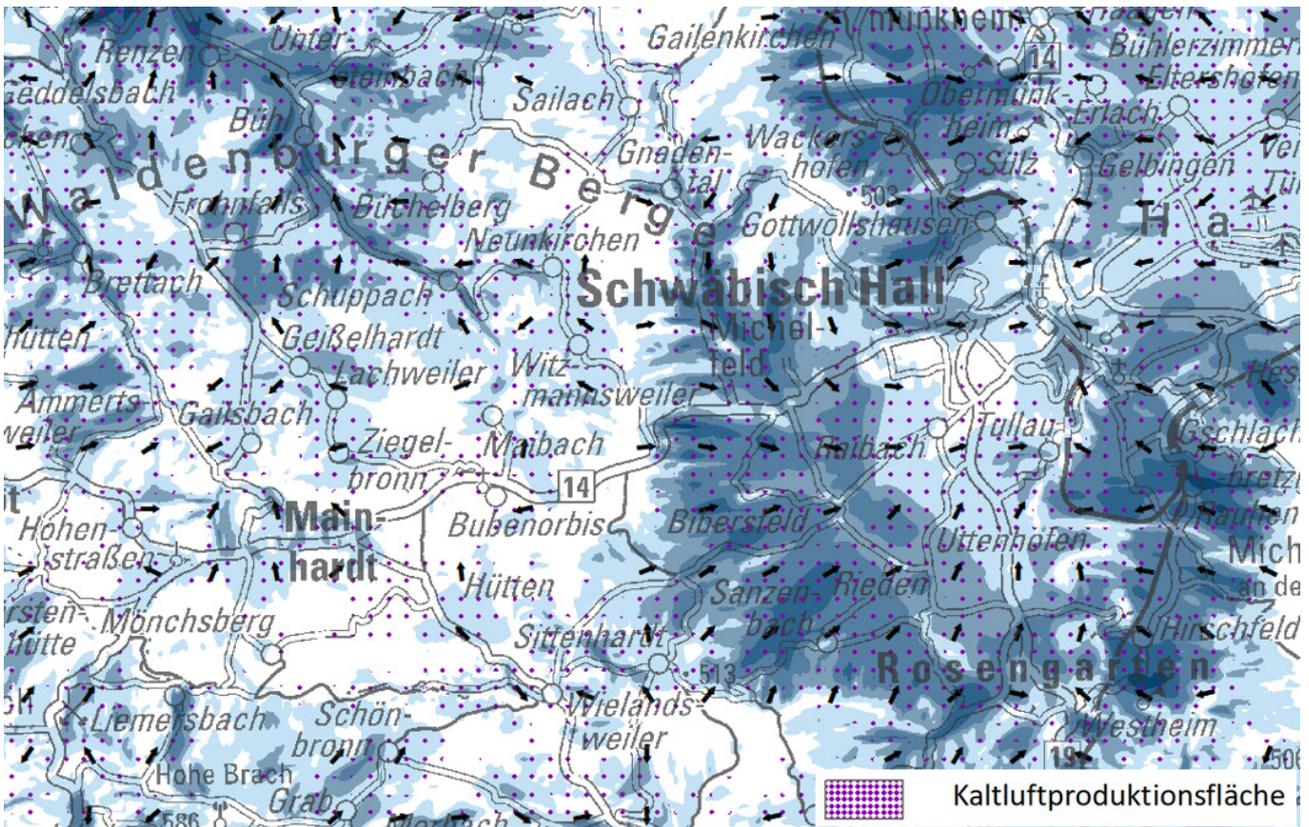


Abbildung 3.5: Ausschnitt der gutachterlich klassifizierten Kaltluftvolumenstromdichte bei Schwäbisch Hall in der Bestandsituation mit ausgewiesenen Kaltluftproduktionsflächen

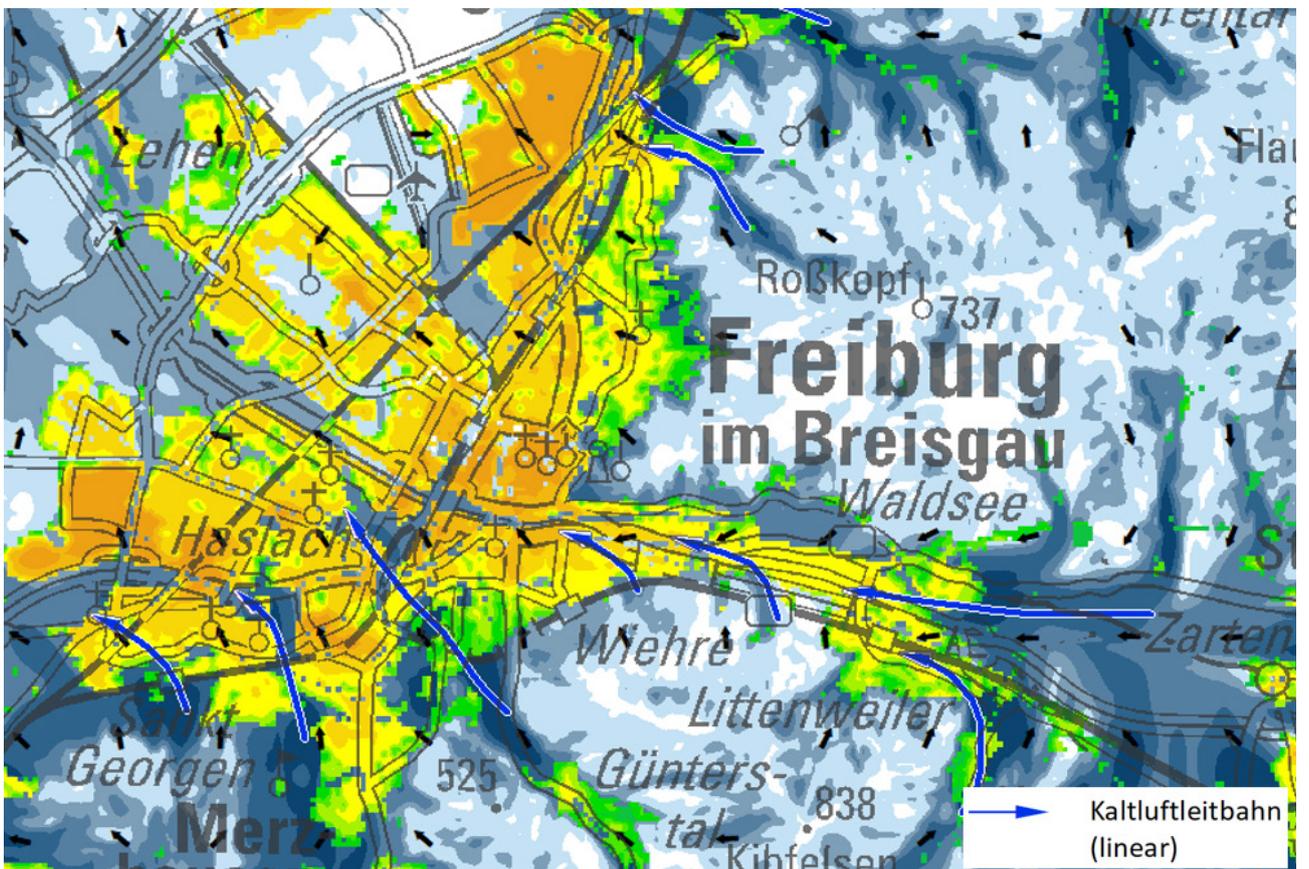


Abbildung 3.6: Ausschnitt der Klimaanalysekarte bei Freiburg in der Bestandsituation mit ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen

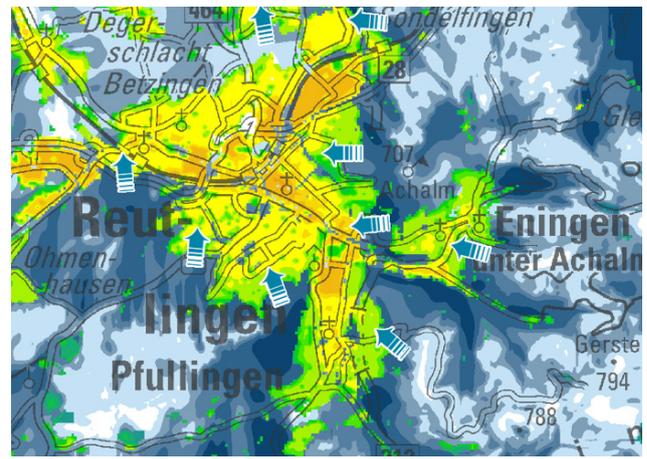
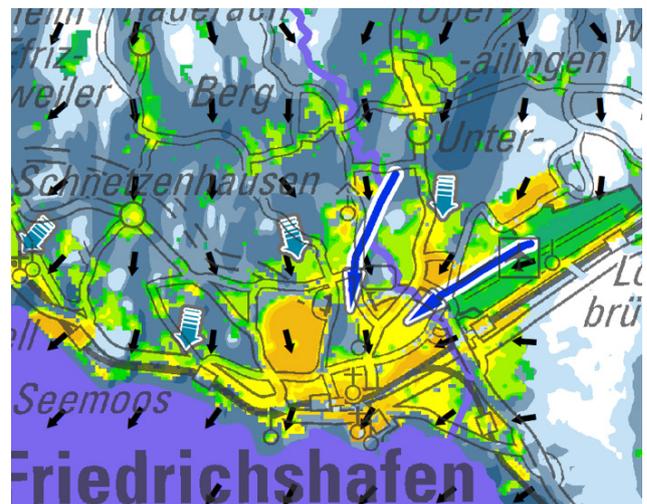
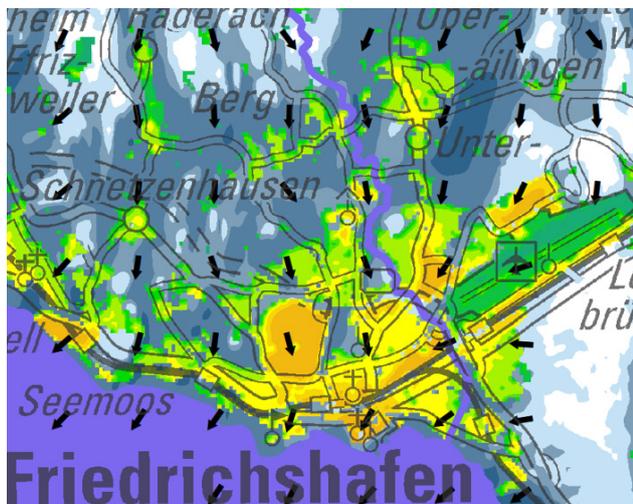


Abbildung 3.7: Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte bei Schwetzingen (links) und Reutlingen (rechts) mit Darstellung der flächenhaften Kaltluftaustauschbereiche (blaue Pfeile)



↑ Kaltluftaustauschbereich (flächenhaft)

→ Kaltluftleitbahn (linear)

Abbildung 3.8: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte bei Friedrichshafen zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung)

gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z. B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) auch hier durchaus möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/ oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen immer auch ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall (z. B. bei der Festlegung von Vorbehaltsgebieten) ggf. noch einmal intensiver zu prüfen ist.

Kaltluftleitbahnen und Kaltluftaustauschbereiche sind für alle Ortslagen ab einer Wirkraumgröße von > 1 km² ausgewiesen worden. Für kleinere Orte bzw. Ortsteile kann davon

ausgegangen werden, dass kein relevanter Wärmeineffekt besteht. Nichtsdestotrotz sollte dieser Wert im konkreten Einzelfall (z. B., wenn im Kaltluft-Luv einer kleineren Ortschaft ein größeres Gewerbegebiet entstehen soll) noch einmal kritisch geprüft werden. Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (d. h. "händisch") unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 3.8 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Friedrichshafen einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil

sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum.

Den Projektzielen entsprechend lag der Fokus bei der beschriebenen Betonung der Kaltluftprozesse also auf der gesamtstädtischen bis regionalen Maßstabebene, sodass insbesondere die Übergangsbereiche zwischen dem Ausgleichs- und Wirkraum betrachtet werden. Prozesse wie Parkwinde aus vollständig umbauten Grünanlagen, die ausschließlich im Innenbereich der Städte von Relevanz sind, sind in diesem Projekt nicht ausgewiesen worden. Hier ist die Grenze, der mit der gewählten Modellauflösung gutachterlich zu vertretenden Analysetiefe erreicht. Entsprechende Analysen sollten im Zusammenhang mit Stadtklimaanalysen in einer räumlichen Auflösung von ≤ 10 m erfolgen.

3.3 Luftqualitätskarten

Die Luftqualitätskarte dient dazu, lufthygienische Belastungsschwerpunkte bei autochthonen Wetterlagen aufzuzeigen und Emissionen an den zugehörigen Quellen gegebenenfalls

zu reduzieren. Hierzu ist es notwendig, die im Kaltluftströmungsfeld verdrifteten Schadstoffe den relevanten, flächenhaft ausgewiesenen Kaltluft- und Frischluftaustauschbahnen zuzuordnen. Um die Herleitung dieser Ausweisung zu dokumentieren, wurden zwei weitere Karten erstellt, die zum einen die berechneten Emissionsdichten (Abbildung 3.9), zum anderen das sich hieraus und aus den morgendlichen Strömungsbedingungen ergebende Immissionsfeld dokumentiert (Abbildung 3.10). Anders als bei den klimatischen Parametern wurden die Berechnungen zur Luftqualität lediglich für die Gegenwart durchgeführt, da eine landesweite Prognose der Verkehrsentwicklung für die nächsten Jahrzehnte im Rahmen dieses Projektes nicht möglich ist.

Zur Berechnung der Immissionsfelder werden die linienhaft vorliegenden Emissionsdichten in das Modellraster überführt und dort im Kaltluftströmungsfeld der Uhrzeit 7:00 Uhr verdriftet. Zu diesem Zeitpunkt ergibt sich die größte zeitliche Überschneidung einer signifikanten Emissionsfreisetzung mit einem noch deutlich durch Ausgleichströmungen geprägten Windfeld. Als Ergebnis stellt die Karte des NO₂-Konzentrationsfeldes die potenzielle Immissionszusatzbelastung dar, die sich im Nahbereich der Straßenverkehrswege entsprechend

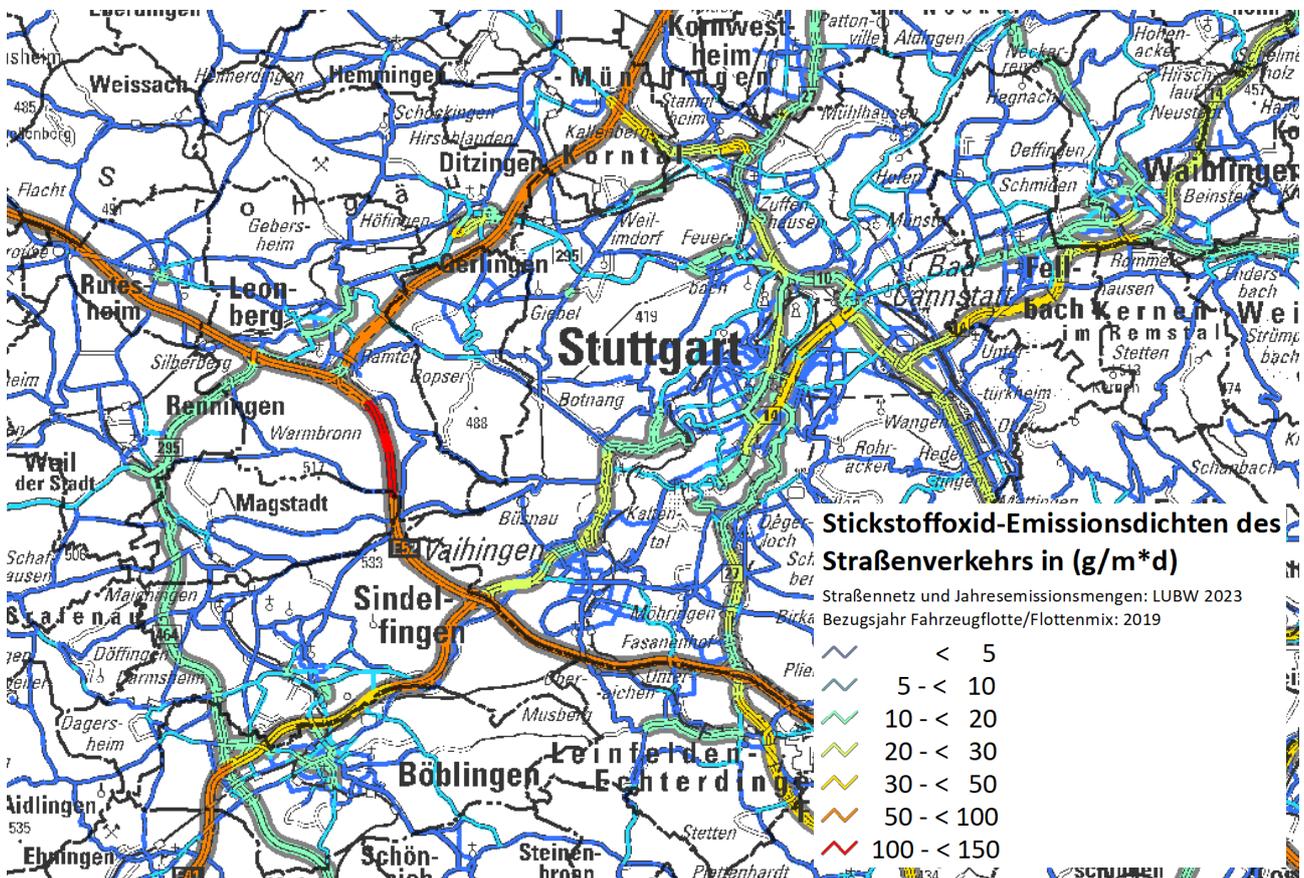


Abbildung 3.9: Ausschnitt der Karte verkehrsbedingter Luftschadstoff-Emissionen bei Stuttgart

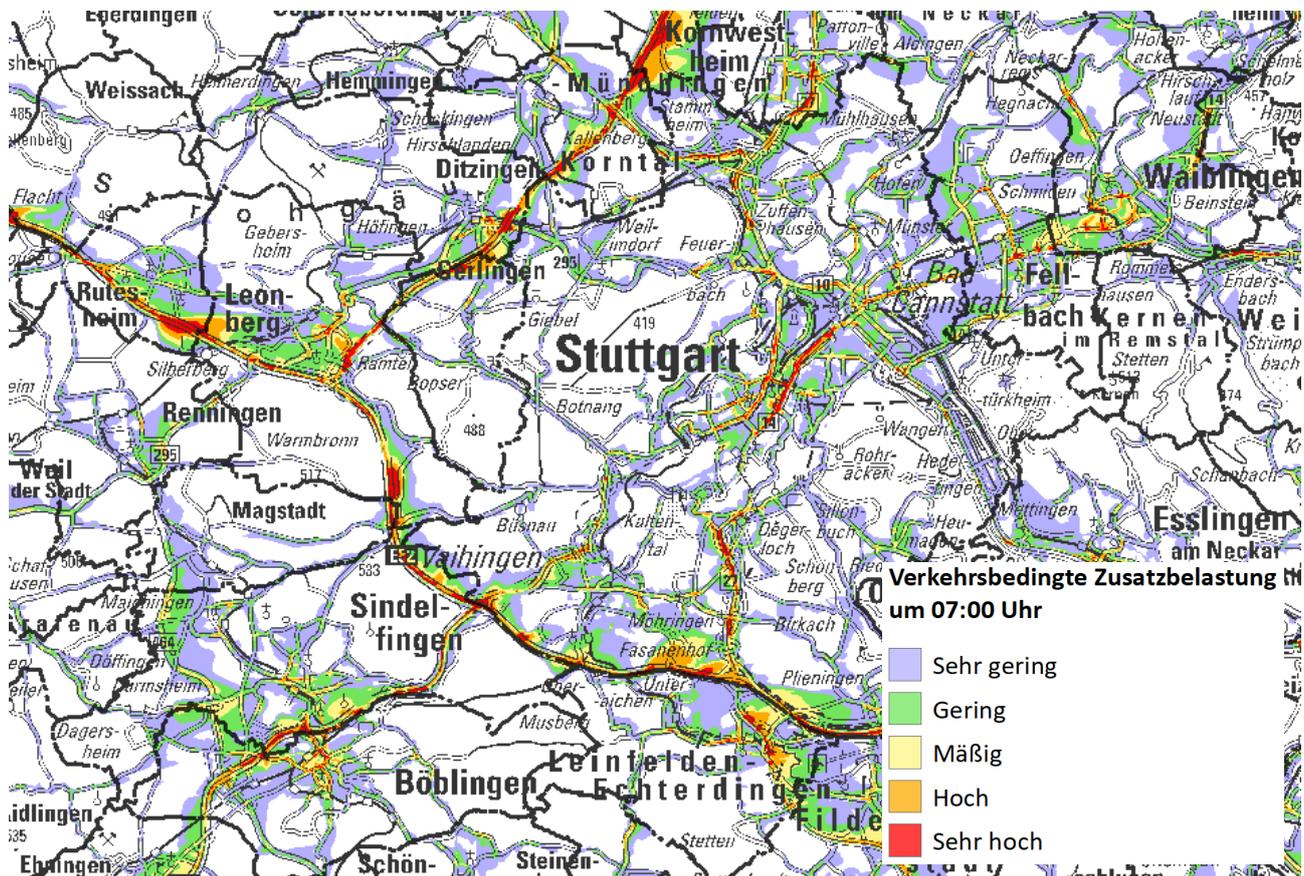


Abbildung 3.10: Ausschnitt der Karte verkehrsbedingter Luftschadstoff-Zusatzbelastungen bei Stuttgart

der modellierten Kaltluftströmungsbedingungen um 7:00 Uhr morgens ergibt (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Einordnung der Zusatzbelastungswerten

| NO ₂ (µg/ m ³) | Bewertung |
|---------------------------------------|-------------|
| < 0,5 | Ohne |
| 0,5 bis < 2 | Sehr gering |
| 2 bis < 5 | Gering |
| 5 bis < 10 | Mäßig |
| 10 bis < 20 | Hoch |
| ≥ 20 | Sehr hoch |

Anders als bei Normalwetterlagen, in denen die Schadstoffe sehr viel effektiver verdriftet und damit verdünnt werden, kann es bei autochthonen Wetterlagen zu einem gezielten Transport der Luftbeimengungen in die Wirkräume hinein kommen: Die nicht-überlagerten, wenig turbulenten Ausgleichsströmungen aus Richtung der nächtlich abgekühlten Grün- und Freiflächen in Richtung überwärmter Siedlungsflächen, können hier auch in relativ quellfernen Siedlungen zu einer signifikanten Erhöhung der Luftschadstoffbelastung führen.

Hieraus ergibt sich, dass eine Bewertung der Kaltluft- und Frischluftaustauschbereiche hinsichtlich ihrer lufthygienischen Belastung nicht direkt aus dem Konzentrationsfeld der

Zusatzbelastung erfolgen kann. Vielmehr besitzt die Kaltluft am Entstehungsort häufig noch Frischluftcharakter und führt erst auf ihrem weiteren Weg in Richtung Siedlung über eine Emissionsquelle hinweg und transportiert auf diese Weise Schadstoffe in den Wirkraum hinein. Da die Pfeile das prozessuale Gesamtgeschehen symbolisieren, werden sie in diesem Fall als „belastend“ eingestuft, obwohl die Luft dort, wo die Pfeile in der Karte lokalisiert sind, noch keinerlei Zusatzbelastung aufweist (siehe auch Kapitel 3.5.6). Die Höhe des Belastungspotenzials des Kaltluftfunktionszusammenhangs wird dabei gutachterlich abgeleitet (Abbildung 3.11). Offensichtliche Lücken in den Eingangsdaten wurden dabei – wenn möglich – geschlossen.

3.4 Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme

Die Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme beruht im Wesentlichen auf einer Auswertung der berechneten Vorwärtstrajektorien (siehe Kapitel 2.5 S.48) im Hinblick auf ihren Wirkraumbezug. Um die besonders planungsrelevanten Kaltluftströmungssysteme erfassen und in den Vordergrund stellen zu können, wurde für die Wirkräume dieselbe Mindestgröße von ca. 1 km² verwendet wie bei der Ausweisung der Kaltluftprozesse in der KAK (Abbildung 3.12). Dabei stellt 1 km² die Grenzgröße einer Siedlung, der ein planungsrelevan-

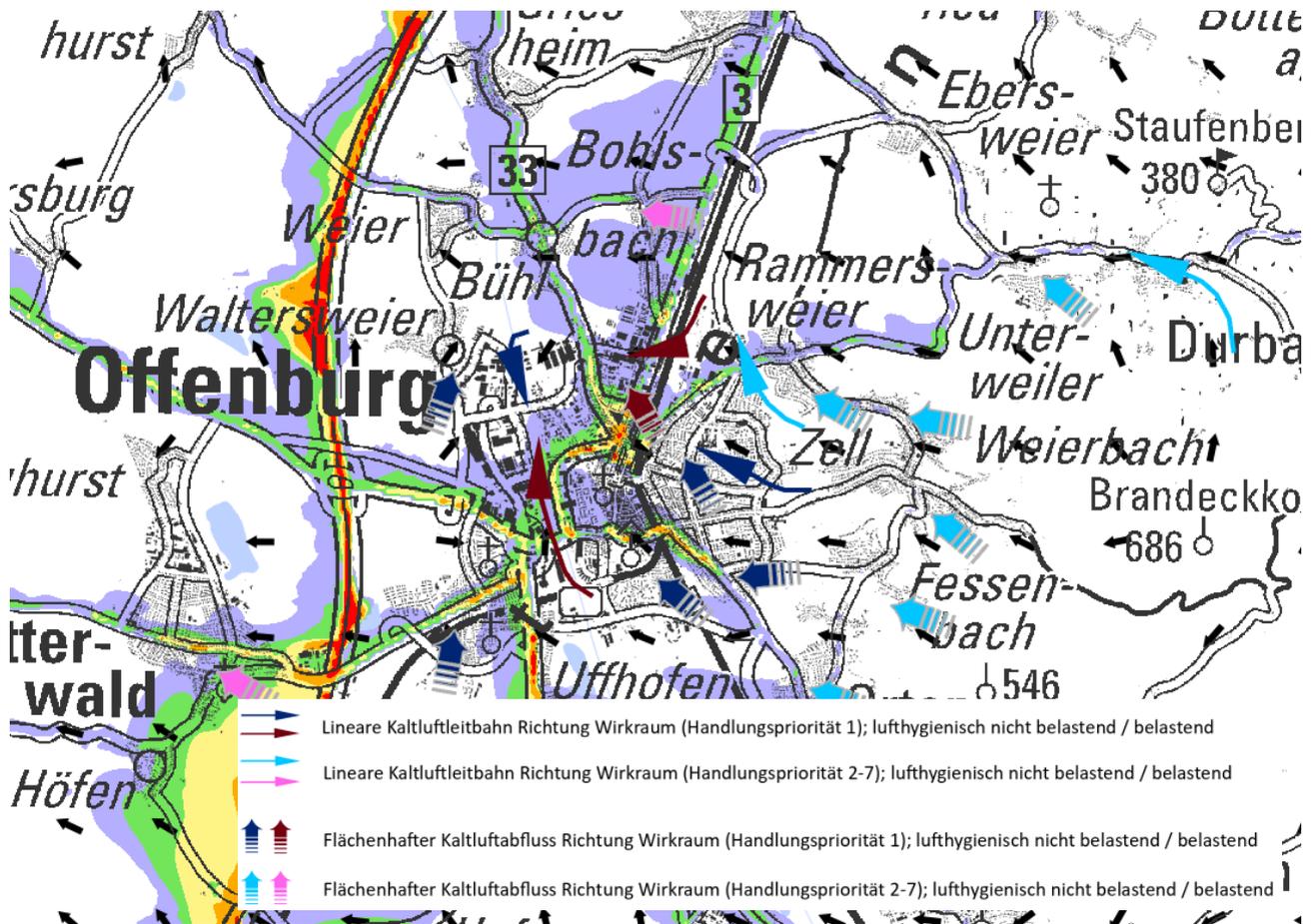
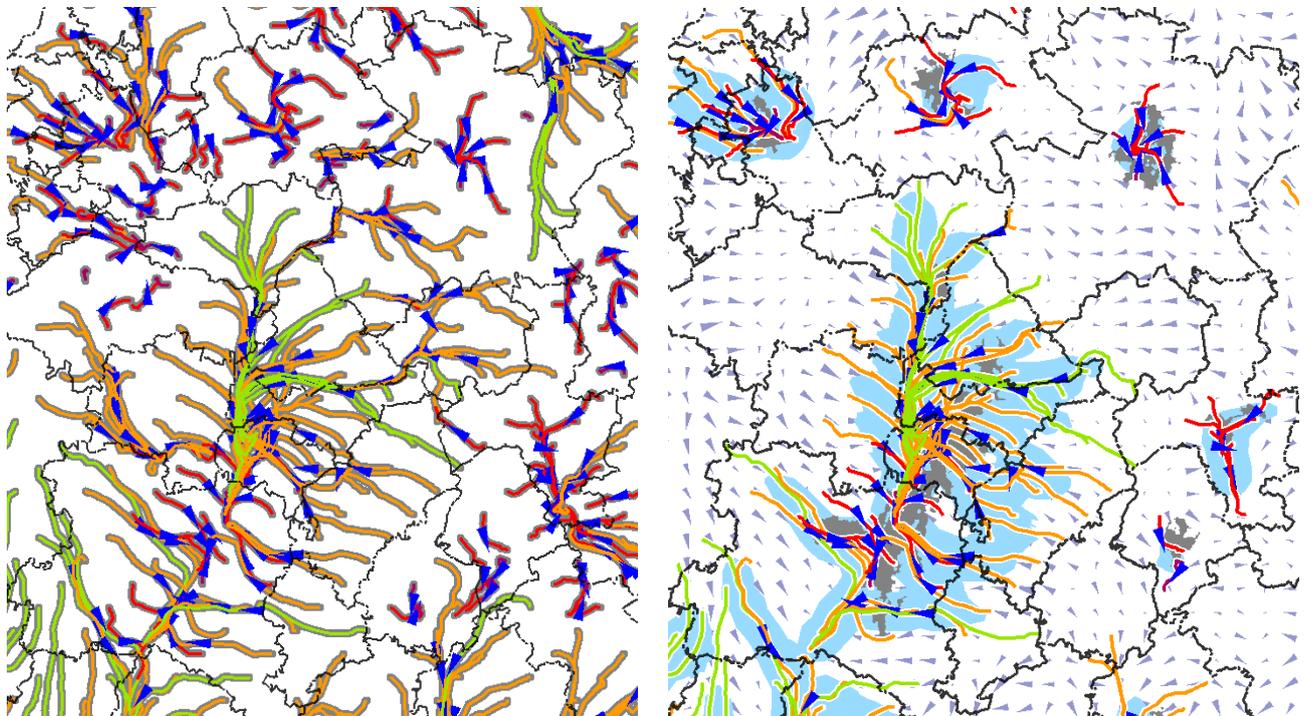


Abbildung 3.11: Ableitung des Belastungspotenzials der bedeutsamen Kaltluftprozesse auf Grundlage des Konzentrationsfeldes der verkehrsbedingten Luftschadstoffimmissionen (blaue Pfeile = nicht belastend, rot/pinke Pfeile = belastend)



- Vorwärtstrajektorien (Länge in m)
- < 2000
 - 2000 - < 5000
 - 5000 - < 10000
 - 10000 - < 15000
 - 15000 - < 20000
 - 20000 - < 25000
 - >= 25000

Flächen mit regional bedeutsamen kaltluftthaushaltlichen Funktionen

Abbildung 3.12: Ableitung der Regionalen Kaltluftströmungssysteme auf Grundlage der Vorwärtstrajektorien

tes Stadtklima zuzuordnen ist, und die damit als „Wirkraum“ im engeren Sinne gelten kann und entsprechender „Ausgleichsflächen“ bedarf, dar [vgl. hierzu MOSIMANN ET AL. 1998]. Für kleinere Orte bzw. Ortsteile kann davon ausgegangen werden, dass kein relevanter Wärmeineffekt besteht.

Über die Selektion einer Trajektorie, die im Umfeld eines solchen stadtklimatisch bedeutsamen Wirkraumes endet, wird die gesamte Fließstrecke eines Luftpaketes von seiner „Quelle“ bis zu seiner „Mündung“ abgrenzbar. Den unterliegenden, in Abbildung 3.12 blau dargestellten Flächen kann damit eine Funktion als regionaler Überströmungsbereich für die aus vorgelagerten Räumen abfließende Kaltluft zugeordnet werden. Ihre Ableitung aus den linienhaften Trajektorien erfolgte über geostatistische Analysen, die unter anderem eine Funktion der Scharung (oder „Verdichtung“) von Linienstrukturen berücksichtigt. Auf Grundlage der Erfahrungen aus vergangenen Gutachten wurde dabei ein Suchradius von 1000 m für die Erstellung der Dichtestatistik verwendet, da sich in diesem Korridor erfahrungsgemäß die wichtigsten überregionalen Kaltluftprozesse abspielen. Ergebnis dieses Analyseansatzes ist ein Raster in 50 m Auflösung aus dem anhand eines gutachterlich ermittelten Schwellenwertes die letztendlichen Flächen der regionalen Kaltluftströmung (KLS) abgeleitet wurden. Diese Scharungs-Funktion vermeidet eine Überbewertung einzelner Linienstrukturen z.B. in denjenigen Bereichen, in denen die Trajektorien sich in Quellnähe der Luftpakete räumlich separieren. In solchen und ähnlichen Bereichen werden daraufhin keine Flächen erzeugt.

3.5 Planungshinweiskarte

3.5.1 Grundlagen und Prämissen

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält“ [VDI 2015,5]. Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben“ [VDI 2015,5-6].

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist dabei zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Lastraum (mit potentiellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum vor, gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung und schlägt auch RGB-Farbcodes vor. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – zunächst keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt auch keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in formelle Planwerke (z.B. dem Regionalplan) übernommen werden; es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte in ihrem wertenden Charakter. Während sich die Klimaanalysekarte noch auf der beschreibenden Sachebene bewegt, ist mit der Planungshinweiskarte die Wertebene erreicht. Diese „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ [GAEDE & HÄRTLING 2010, 32]. Im stadt- und umweltsplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpas-

sung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig [FÜRST UND SCHOLLES 2008]. Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftliche Erkenntnisse aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/ Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

Für die beiden zentralen stadtklimatischen Wirkungskomplexe des thermischen Komforts und der Luftqualität ergeben sich in diesem Zusammenhang diametral unterschiedliche Ausgangsbedingungen. So existieren für die Lufthygiene spätestens seit der Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/ 50/ EG; [EU 2008]) Ziele in Form von Grenz- oder Richtwerten. Die Vorgaben dieser EU Richtlinie wurden in Deutschland im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in nationales Recht umgesetzt und in der 39. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, [BUNDESREGIERUNG 2010]), konkretisiert. Dieser Umstand macht die vorzunehmenden Bewertungen im Sinne einer Nominalskala „Grenzwert überschritten – Maßnahmen notwendig“ bzw. „Grenzwert unterschritten – keine Maßnahmen notwendig“ eindeutig und abschließend.

Ein rechtlich vergleichbares Äquivalent zum BImSchG mit seinen konkretisierenden Verordnungen und technischen Anleitungen inklusive den aus ihnen ableitbaren Rechtsfolgen existiert für den thermischen Wirkungskomplex nicht. Auch entsprechende Gesetzesinitiativen sind gegenwärtig nicht ergriffen oder geplant. Allenfalls übergeordnete Leitbilder wie der Schutz der menschlichen Gesundheit nach Art. 2 GG oder das Gebot der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse gemäß § 34 Abs. 1 Satz 2 BauGB haben als grundsätzliche Begründungszusammenhänge eine gewisse Relevanz. Für den konkreten Einzelfall helfen sie aber aufgrund ihrer nicht oder nur unzureichend vorhandenen Operationalisierung nicht abschließend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/ Zielfindungsprozessen

unter Berücksichtigung fachlicher Expertisen immer wieder aufs Neue erfolgen.

Aus diesen Prämissen wurde für das vorliegende Projekt ein Legitimierungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen (qualifizierter Entwurf) auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäß den Wertmaßstäben der Grundgesamtheit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe andererseits basiert (Abbildung 3.13).

Ein Beispiel für den Ansatz eines qualifizierten Entwurfes, der dann modifiziert wurde, ist die Synthese aller planungsrelevanten Inhalte in einer einzigen Planungshinweiskarte. Möglich (und im Sinne der Wahrung des Standes der Technik genauso „richtig“) gewesen wären analog zur Klimaanalysekarte bis zu fünf Planungshinweiskarten. Die entstandene Planungshinweiskarte ist damit keine rein fachliche „Desktoparbeit“, sondern vielmehr das Ergebnis eines intensiven Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses zwischen Fachexpertise und planerischer Zielvorgabe. Wobei hier nicht Ziele im Sinne der Erfordernisse der Raumordnung, sondern Vorgaben für Planungsinhalte gemeint sind. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei vom definierten Grundgedanken zu lösen.

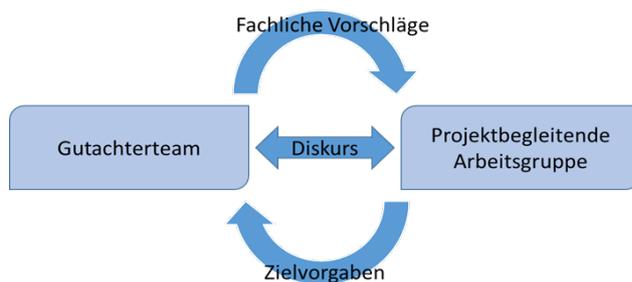


Abbildung 3.13: Gegenstromprinzip zwischen Gutachterteam und projektbegleitender Arbeitsgruppe zur Legitimation der Bewertungen in der Planungshinweiskarte

Dass dem so ist, verdeutlicht ein Blick auf die in Abbildung 3.14 dargestellte Legende als Ergebnis des hochgradig diskursorientierten, iterativen Aushandlungsprozesses. Demnach beinhaltet die Planungshinweiskarte Bewertungen und Planungshinweise für die folgenden Elemente:

- Die humanbioklimatische Belastungssituation im Wirkraum in einer 6-stufigen Skala

- Die Kaltlufthaushaltliche Bedeutung im Ausgleichsraum in einer 4-stufigen Skala
- Die Sonderfunktion der Wälder und siedlungsnaher Grünflächen mit Entlastungsfunktion
- Das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen
- Zusatzbelastungen aus dem Straßenverkehr

Die methodische Herleitung der einzelnen Elemente sowie die zugrundeliegende geometrische Basis sind im Folgenden beschrieben.

Ausgleichsraum

Bewertungsgegenstand ist die sommerliche kaltlufthaushaltliche Bedeutung der Grün-/Freiflächen für die Entlastung des Wirkraums in der Nacht. Je höher die Bedeutung, desto höher ist die Empfindlichkeit der Flächen gegenüber - vor allem baulichen - Nutzungsintensivierungen und damit ihre Schutzbedürftigkeit.

| | |
|---|----------------------------|
|  | Sehr hohe Bedeutung |
| Flächen, die die Kernbereiche der wirkraumbezogenen Kaltluftleitbahnen bilden | |
|  | Hohe Bedeutung |
| Flächen, die die Kernbereiche des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der höchsten Handlungspriorität oder den Rand-/Quellbereich der Kaltluftleitbahnen darstellen | |
|  | Erhöhte Bedeutung |
| Flächen, die die Kernbereiche des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der übrigen Handlungsprioritäten oder den Rand-/Quellbereich des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der höchsten Handlungspriorität darstellen | |
|  | Geringe Bedeutung |
| Alle übrigen Flächen des Ausgleichsraums | |

Grünflächen mit Sonderfunktionen

Einigen Wäldern und siedlungsnahen Grünflächen kommen aufgrund ihrer Wirkung als Kühlinsel am Tage auch dann eine besondere klimabökologische Bedeutung zu, wenn Sie nicht Bestandteil eines wirkraumbezogenen nächtlichen Kaltluftsystems sind. Weitere wichtige Funktionen von Erholungswäldern und deren Erreichbarkeit wurden über die Waldfunktionenkartierung der FVA mit einbezogen, weshalb diese hier nachrichtlich übernommen wurde. (Datengrundlage: FVA, www.fva-bw.de)

-  Stufe 1a: Wald mit sehr großer Bedeutung für die Erholung im urbanen Umfeld
-  Stufe 2: Wald mit relativ großer Bedeutung für die Erholung
-  Stufe 1b: Wald mit großer Bedeutung für die Erholung

◇ siedlungsnaher Grünflächen mit Entlastungsfunktion

Kaltluftprozessgeschehen

Bewertungsgegenstand ist der räumliche Wirkungszusammenhang in Verbindung mit der lufthygienischen Qualität des Kaltluftprozessgeschehens. Als "lufthygienisch belastend" gilt dementsprechend Kaltluft, die auf ihrem Strömungsweg Schadstoffe in den Wirkraum hineintransportiert. Dies bedeutet nicht unbedingt, dass die Belastung bereits an der Signaturposition auftritt; die Pfeile repräsentieren exemplarisch das gesamte lokale Prozessgeschehen. Alle dargestellten Prozesselemente sollten in ihrer Funktion erhalten bleiben. Leitbahnen weisen tendenziell eine höhere Empfindlichkeit gegenüber strömungsrelevanten Eingriffen auf als der flächenhafte Abfluss.

| | |
|---|--|
|  | Fließrichtung der Kaltluft |
|  | Lineare Kaltluftleitbahn Richtung Wirkraum (Handlungsbedarf sehr hoch); lufthygienisch nicht belastend / belastend |
|  | Lineare Kaltluftleitbahn Richtung Wirkraum; lufthygienisch nicht belastend / belastend |
|  | Flächenhafter Kaltluftabfluss Richtung Wirkraum (Handlungsbedarf sehr hoch); lufthygienisch nicht belastend / belastend |
|  | Flächenhafter Kaltluftabfluss Richtung Wirkraum; lufthygienisch nicht belastend / belastend |
|  | Flächen mit Zugehörigkeit zu einem regionalen Kaltluftströmungssystem Die klimabökologischen Auswirkungen raumbedeutsamer Planungen (insbesondere Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung) sollten im Planungsfall summarisch für das gesamte System analysiert und bewertet werden. Die zur Verdeutlichung des Strömungszusammenhangs zusätzlich dargestellten Vorwärtstrajektorien zeichnen den Weg der Horizontalströmung zwischen 22 und 5 Uhr in 20m über Grund nach. |

Hinweis: Die Darstellung der Pfeile und Schraffuren in der Legende ist gegenüber dem Kartenbild aus Maßstabsgründen stark vergrößert

Abbildung 3.14: Legendenelemente der Planungshinweiskarte

Thermische Belastung im Siedlungsbereich

Bewertungsgegenstand ist die thermische Belastungssituation im Sommer für alle Flächen im Siedlungsraum in der Nacht.

| Handlungsbedarf | Hitzebedingte Gesundheitsgefährdung ¹ heutzutage während mindestens | Verschiebung zu Sehr hoher Handlungsbedarf bei zukünftiger Erwärmung ² um |
|---|--|---|
|  sehr hoch | 6 Wochen pro Jahr | |
|  hoch | 5 Wochen pro Jahr | 2 °C |
|  erhöht | 4 Wochen pro Jahr | 3 °C |
|  mittel | 3 Wochen pro Jahr | 4 °C |
|  gering | 2 Wochen pro Jahr | 5 °C |
|  Vorsorgebereich | 1 Woche pro Jahr | >5 °C |

¹Es tritt eine Überschreitung der gesundheitlich relevanten Temperaturschwelle auf. Es ist mit hitzebedingter Übersterblichkeit zu rechnen.

²Erwärmung der Sommermitteltemperatur in Baden-Württemberg gegenüber 1971-2000.

Luftqualität

 **Hohe verkehrsbedingte Zusatzbelastung**
Bewertungsgegenstand sind die lufthygienischen Zusatzbelastungen durch den Straßenverkehr. Hier besteht Handlungsbedarf zur Emissionsreduktion.

3.5.2 Geometrische Basis

Um dem gleichlautenden Anspruch der VDI Richtlinie und der projektbegleitenden Arbeitsgruppe bzgl. der Bewertung von handhabbaren und praxisrelevanten Flächeneinheiten gerecht zu werden, bedarf es zunächst der Definition einer sog. Basisgeometrie, auf die sich die Planungshinweiskarte geometrisch bezieht. Diese muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen:

- Sie muss flächendeckend für das gesamte Bundesland vorliegen
- Sie muss möglichst aktuell sein und einer möglichst standardisierten Fortschreibung unterliegen
- Sie muss eine eindeutige Einteilung zwischen Ausgleichs- und Wirkraum erlauben
- Sie muss passfähig für den vorrangig adressierten regionalen Maßstab sein, also nicht zu kleinteilig ausfallen
- Sie muss passfähig für den Themenkomplex Kaltlufttaushalt und Thermischer Komfort mit seinen z. T. kleinräumig relevanten Effekten sein, also nicht zu grob ausfallen

In Baden-Württemberg existiert mit dem AKTIS-Basis DLM letztlich genau eine geometrische Grundlage, die diese Ansprüche hinreichend gut erfüllt. Einzige Einschränkung ist, dass die Geodaten als nicht überlagerungsfreie Einzeldatensätze vorgehalten werden, die zunächst mit Hilfe einer GIS-Routine zu einem eindeutigen Datensatz zu verknüpfen waren. Im Ergebnis entstand die im Projekt verwendete Basisgeometrie. Sie besteht aus insgesamt mehr als 1,67 Mio. Flächen mit einem Ausgleichs-Wirkungsraumverhältnis von 4:1. Die Zuordnung zum Wirk- bzw. Ausgleichsraum erfolgt über die Objektart. Die Generalisierung gegenüber den originären ras-

terbasierten Modellausgaben liegt damit bei einem Faktor von 3-4. Die Flächen sind allerdings nicht gleich groß, sodass die Generalisierung u.a. in Abhängigkeit des Flächentyps räumlich variiert. So beläuft sich die durchschnittliche Flächengröße im Wirkraum auf 1,0 ha (bei einer Standardabweichung von 1,49 ha). Im Ausgleichsraum liegt die durchschnittliche Flächengröße hingegen bei 2,47 ha (bei einer Standardabweichung von 10,1 ha). Die Flächenzuschnitte im Ausgleichsraum sind damit im Mittel um den Faktor 2,47 größer als im Wirkraum, was angesichts der kleinräumig wechselnden Strukturen in Siedlungsräumen und den eher großräumigeren Strukturen im Ausgleichsraum auch fachlich gewünscht ist. In wenigen Ausnahmefällen führen geometrische Sonderformen im Ausgleichsraum (z. B. langgezogene kleine Bachtäler) zu Unschärfen in der Bewertung, die aus fachlicher Sicht aber hinnehmbar sind (vgl. auch Kap. 3.5.4).

Tabelle 3.4: Flächentypen der Basisgeometrie mit Angaben zu Flächenanzahl, durchschnittlicher Flächengröße und Flächensummen

| Flächentyp | Anzahl Fläche | Durchschnittliche Flächengröße (ha) | Flächensumme (km ²) |
|-----------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Ausgleichsraum | 1.320.249 | 2,47 | 32612 |
| Wirkraum | 333.093 | 1,0 | 3316 |
| Verkehrsflächen | 18.926 | 0,42 | 79 |
| gesamt | 1.672.268 | - | 36.007 |

Neben dem Wirk- und Ausgleichsraum besteht die Basisgeometrie noch aus nachrichtlich übernommenen, in der Planungshinweiskarte nicht bewerteten Verkehrsflächen, die insbesondere auch die Orientierung in der Karte erleichtern sollen. Das resultierende Ausgleichs-Wirkungsraumgefüge zeigt am Beispiel von Karlsruhe. Die Gewässerflächen gehö-

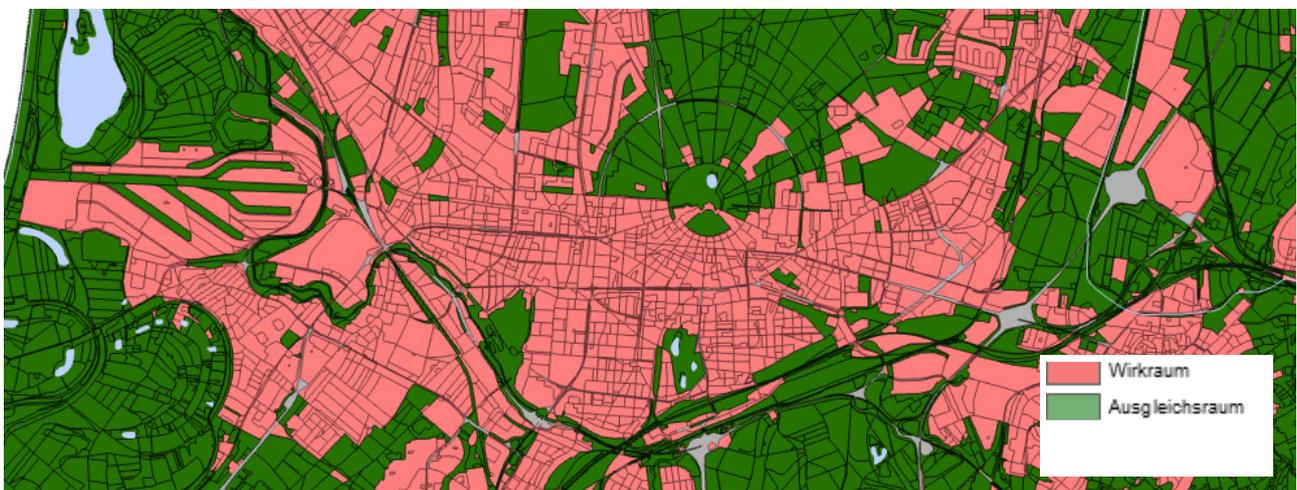


Abbildung 3.15: Ausgleichs-Wirkungsraum-Gefüge am Beispiel Karlsruhe

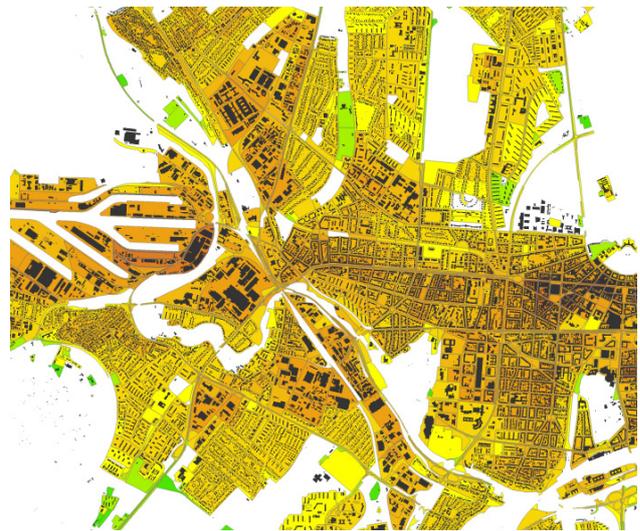


Abbildung 3.16: Übertragung der originären Modellausgabegrößen (links, Rasterebene) auf die Basisgeometrie (rechts, Vektorebene) als nicht gewichtete Raummittelwerte und mithilfe einer zonalen Statistik aller die jeweilige Fläche schneidende Rastermittelpunkte am Beispiel des Wirkraums der Stadt Karlsruhe

ren in der Basisgeometrie zum Ausgleichsraum, sind hier zur besseren Orientierung aber farblich hervorgehoben.

Inhaltlich bezieht sich die Generalisierung auf die für die Planungshinweiskarten relevanten Modellausgabegrößen, allen voran die nächtliche bodennahe Lufttemperatur als Basis für die Bewertungen im Wirkraum. Diese wurden den Flächen der Basisgeometrie mithilfe einer zonalen Statistik als nicht gewichtete Raummittelwerte aller die jeweilige Fläche schneidenden Rastermittelpunkte zugewiesen. Daraus folgt, dass innerhalb der einzelnen Flächen der Basisgeometrie auch höhere und/ oder niedrigere Werte vorkommen können, als der Fläche letztlich als Mittelwert aufgeprägt wurden. Die Generalisierung bringt also auch eine moderate Glättung der Ergebnisse mit sich (Abbildung 3.16).

3.5.3 Bewertung der humanbioklimatischen Belastungssituation im Wirkraum

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation dargestellt. Wertgebend ist dabei die bodennahe nächtliche Lufttemperatur der Außenluft als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden (vgl. Kap. 1.2). Bei den Temperaturen, die dem Basisgeometrie-Wirkraum über die in Kapitel 3.5.2 beschriebene Methode aufgeprägt wurden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb mit einem durchschnittlichen Temperaturniveau gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen (vgl. Kap. 1.2). Die Planungshinweiskarte muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situati-

onen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z. B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 [VDI 2008a] wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 3.17).

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Dabei ist

z standardisierter Wert der Variablen x

x Ausgangswert der Variablen x

μ arithmetisches Mittel

σ Standardabweichung

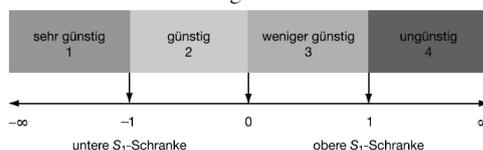


Abbildung 3.17: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen [VDI 2008^a]

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (vgl. hierzu Kap. 1.3). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt fünf Modellrechnungen (Bestandssituation & Warming Levels 2 - 5) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken der beiden Extremsituationen Bestandssituation (als kühlsite Situation) und des Szenarios + 5 K (als wärmste Situation) miteinander verknüpft und aus dieser neuen Grundgesamtheit einheitlich zu verwendende Variablenausprägungen zur Berechnung der z-Werte abgeleitet. Für den Mittelwert ergibt sich somit eine mittlere Temperatur von 17,42 °C bei einer Standardabweichung von 2,81. Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen, da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieses Möglichkeitskorridors auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist das Szenario +3 K, das keinen Einfluss auf die Berechnung der z-Statistik hatte, dessen Temperaturfelder dank der skizzierten Vorgehensweise aber dennoch mit derselben Methode bewertet werden können wie die Bestandssituation und das Szenario + 5 K.

Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche der Wirkraum-Basisgeometrie für alle fünf betrachteten Situationen mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden (Tabelle 3.5). Bei der Betrachtung der Werteverteilung aller Szenarien zeigte sich, dass für den vorliegenden Datensatz eine Abstufung in 5 Klassen pro Szenario eine bessere Differenzierung von belasteten und unbelasteten Fläche ermöglichte.

Tabelle 3.5: Z-Grenzen der 5-stufigen Bewertung der humanbioklimatischen Situation des Wirkraums in der Bestandssituation sowie in den Szenarien +2 bis +5 K

| sehr günstig (1) | günstig (2) | durchschnittlich (3) | ungünstig (4) | sehr ungünstig (5) |
|------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| $z < -1$ | $z < -0,33$ und $z \geq -1$ | $z \geq -0,33$ und $z \leq 0,33$ | $z \geq 0,33$ und $z \leq 1$ | $z > 1$ |

Um die VDI-konformen Bewertungsergebnisse für die fünf betrachteten Situationen in einer Planungshinweiskarte mit möglichst wenig Informationsverlust darstellen zu können, ist ein letzter Verrechnungs-/Verknüpfungsschritt erforderlich. In diesem wurden die Bewertungsergebnisse zunächst in einer 7-stufigen Skala zusammengefasst. In Absprache mit der LUBW wurden die beiden untersten Stufen für die finale Bewertung zusammengekommen (Abbildung 3.18).

Thermische Belastung im Siedlungsbereich

Bewertungsgegenstand ist die thermische Belastungssituation im Sommer für alle Flächen im Siedlungsraum in der Nacht.

| Handlungsbedarf | Hitzebedingte Gesundheitsgefährdung ¹ heutzutage während mindestens | Verschiebung zu Sehr hoher Handlungsbedarf bei zukünftiger Erwärmung ² um |
|---|--|--|
|  sehr hoch | 6 Wochen pro Jahr | |
|  hoch | 5 Wochen pro Jahr | 2 °C |
|  erhöht | 4 Wochen pro Jahr | 3 °C |
|  mittel | 3 Wochen pro Jahr | 4 °C |
|  gering | 2 Wochen pro Jahr | 5 °C |
|  Vorsorgebereich | 1 Woche pro Jahr | >5 °C |

¹Es tritt eine Überschreitung der gesundheitlich relevanten Temperaturschwelle auf. Es ist mit hitzebedingter Übersterblichkeit zu rechnen.

²Erwärmung der Sommermitteltemperatur in Baden-Württemberg gegenüber 1971-2000.

Abbildung 3.18: 6-stufige Bewertungsskala für den Wirkraum in der Planungshinweiskarte

In die höchste Belastungsstufe „sehr hoch“ fallen alle Flächen, die bereits heute durch eine ungünstige oder sehr ungünstige humanbioklimatische Situation gekennzeichnet sind (Klassen 4 und 5 in Tabelle 3.4.). Sie weisen den höchsten Handlungsbedarf für proaktive Anpassungsmaßnahmen auf, treten vorrangig im Oberrheingraben auf und sind in Städten wie Karlsruhe weit verbreitet (Abbildung 3.19). 314 von 1.103 Städten und Gemeinde in Baden-Württemberg weisen Flächen in der höchsten Handlungspriorität auf (entspricht 28,5 %).

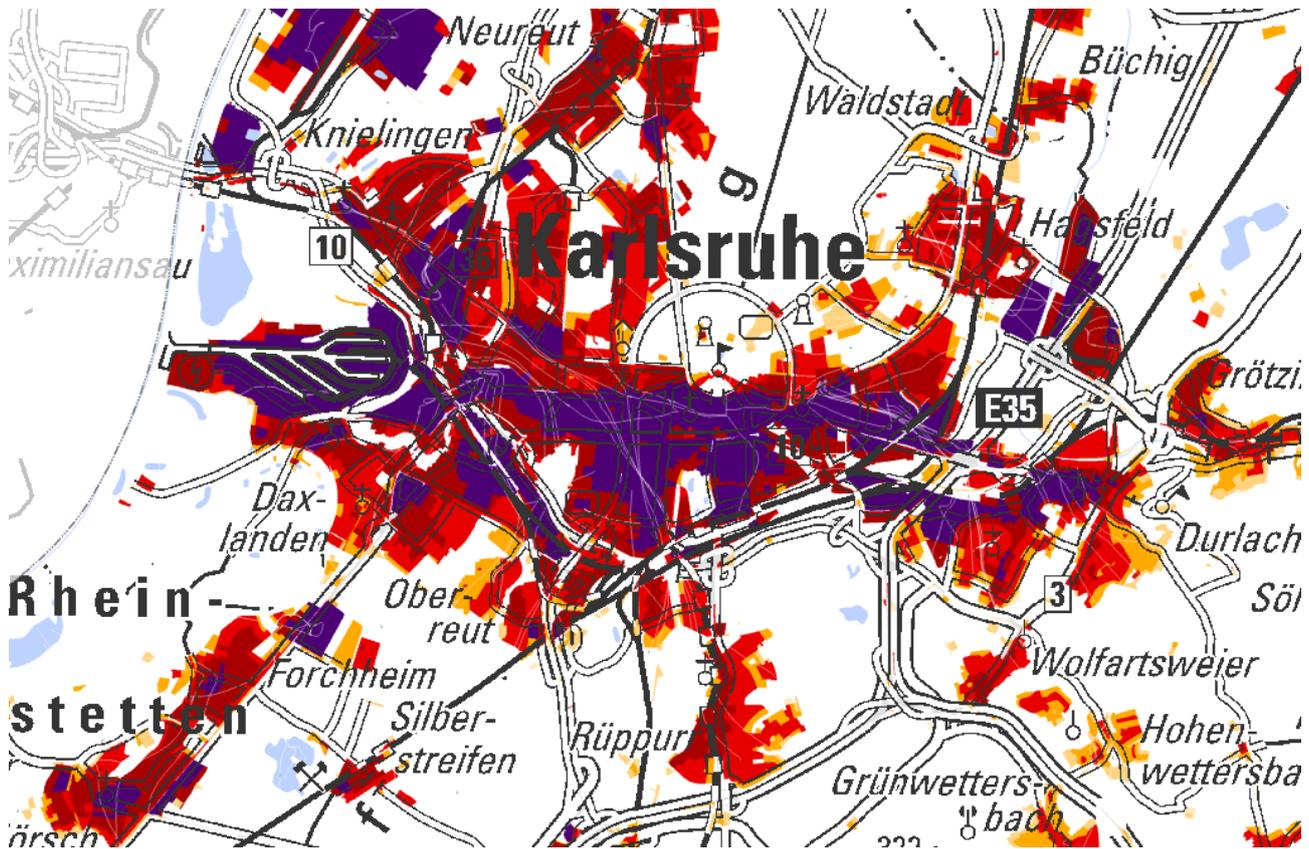


Abbildung 3.19: Auszug aus der PHK bei Karlsruhe in Bezug auf die Bewertungsklassen des Wirkraumes

Die nächsthöhere Belastungsstufe „hoch“ besteht aus Flächen, die unter der Annahme einer zukünftigen Erwärmung um 2 °C eine (sehr) ungünstige Situation aufweisen werden, in der Bestandssituation aber noch eine bessere Bewertung aufweisen. Das Handlungserfordernis ergibt sich hier aus der Tatsache, dass das Eintreten eines des 2-Grad-Weges [LINKE ET AL. 2024] möglich ist und durch die Aufprägung eines einheitlichen, mittleren Temperaturanstieges um 2 °C einige Regionen auch bei Einhaltung der 2-Grad-Obergrenze eine solche thermische Zusatzbelastung erfahren werden. Flächen dieser Klasse liegen meist in direkter Nachbarschaft zu Flächen mit sehr hohem Handlungsbedarf. Städte wie beispielsweise Friedrichshafen weisen dann vor allem in den Innenstadtbereichen einen hohen Handlungsbedarf auf (Abbildung 3.20 links oben).

In der Belastungsstufe „erhöht“ sind Flächen enthalten, die unter der Annahme einer zukünftigen Erwärmung um 3 °C eine (sehr) ungünstige Situation aufweisen werden. Ein Beispiel für eine Stadt, die überwiegend durch diesen Handlungsbedarf charakterisiert ist, ist Bad Rappenau (Abbildung 3.20 rechts oben). Mittlerer Handlungsbedarf besteht meist bei Flächen am Rande von Städten, die in ihrem Kerngebiet höhere Belastungsstufen aufweisen, wie z. B. in Sindelfingen / Böblingen (Abbildung 3.20 links unten).

In den untersten beiden Belastungsstufen nimmt die Anforderung für proaktive Maßnahmen sukzessive ab (Abbildung 3.20 rechts unten). Die Belastungsstufe „gering“ umfasst dabei Flächen, die (erst) unter der Annahme einer zukünftigen Erwärmung von 5 °C (sehr) ungünstige Situationen aufweisen werden. In der niedrigsten Belastungsstufe, dem „Vorsorgebereich“ befinden sich letztlich alle Flächen, die erst ab einer Temperaturzunahme von mehr als 5 °C hinsichtlich ihrer humanbioklimatischen Situation beeinträchtigt werden. Der Handlungsbedarf lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der Matrix aus Bestandssituation und den Warming Levels eindeutig einer der Belastungsstufen zugeordnet werden (Abbildung 3.18).

Im Verlauf des Projektes wurde der Bedarf ermittelt, die Überwärmung in den untersuchten Wirkraumflächen hinsichtlich ihres gesundheitsgefährdenden Potenziales einzustufen. Als geeignetes Maß wurden dabei die Ergebnisse der Wochenmitteltemperatur aus der Kenntagsberechnung (siehe Kapitel 2.7) herangezogen. Die Gesundheitliche Relevanz der Wochenmitteltemperatur ist besonders dadurch gegeben, dass nicht einzelne Events sondern vielmehr die Aneinanderrei-

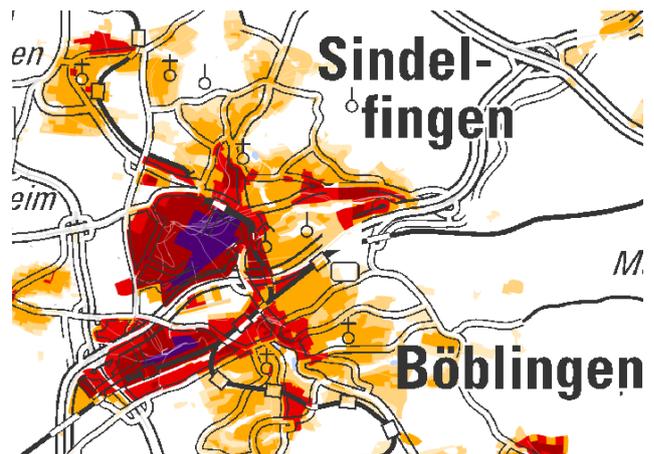
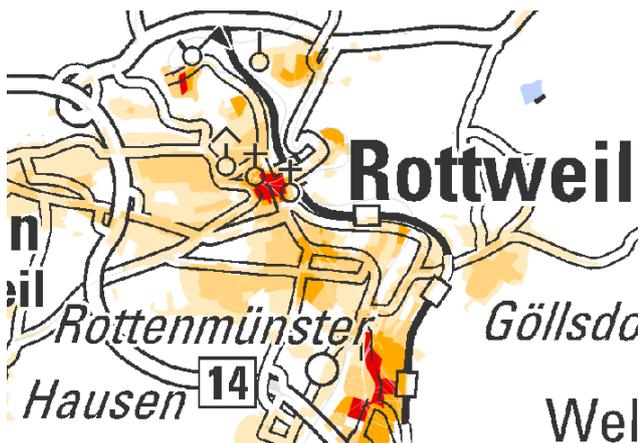
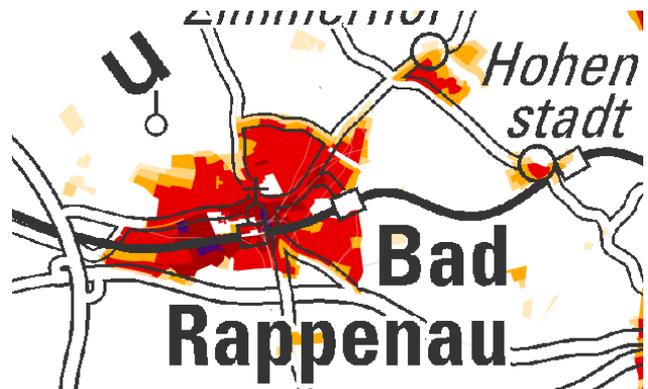
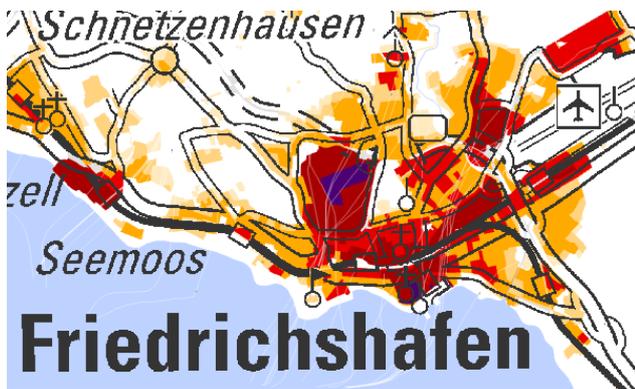


Abbildung 3.20: Auszug aus der PHK bei Friedrichshafen (links oben), Bad Rappenau (rechts oben), Sindelfingen (links unten) und Rottweil (rechts unten) in Bezug auf die Bewertungsklassen des Wirkraumes

hung von Heißen Tagen und die fehlende nächtliche Abkühlung belastend wirken. In einer Studie von RKI, DWD und UBA wurde für den süddeutschen Raum eine Wochenmitteltemperatur von knapp 21 °C ermittelt, ab der ein signifikanter Anstieg der hitzebedingten Übersterblichkeit festgestellt werden konnte. Die Ergebnisse der Kenntagsauswertung zur Anzahl der Überschreitungen einer Wochenmitteltemperatur von 21 °C in der Bestandsituation wurden in Bezug auf ihre statistische Verteilung in den Belastungsklassen ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass in Flächen, die einen sehr hohen Handlungsbedarf aufweisen, heutzutage im Durchschnitt mindestens, während 6 Wochen pro Jahr eine hitzebedingte Gesundheitsgefährdung besteht. Sie besteht, da in dieser Zeit die gesundheitlich relevante Temperaturschwelle (Wochenmitteltemperatur von 21 °C) überschritten wird und mit hitzebedingter Übersterblichkeit zu rechnen ist (nachrichtliche Übernahme LUBW, WINKELMAYR ET AL. 2022). Die Anzahl der belastenden Wochen nimmt mit jeder kleineren Belastungsstufe in der Planungshinweiskarte um eins ab, so dass im Vorsorgebereich in der heutigen Situation noch mit min. einer Woche mit hitzebedingter Gesundheitsgefährdung zu rechnen ist.

3.5.4 Bewertung der kaltlufthaushaltlichen Bedeutung im Ausgleichsraum

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet, die durch Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen lufthygienische oder humanbioklimatische Belastungen in Wirkräumen vermindern oder abbauen können. Somit kommt die Funktion des „Ausgleichsraumes“ all jenen Flächen zu, die direkt an belastete Wirkräume angrenzen oder durch Luftleitbahnen mit ihnen verbunden sind. Die Luftleitbahnen selber sind dabei von besonderer Bedeutung: Sie erschließen vorgelagerte Kaltluftentstehungsflächen für belastete Siedlungsräume, und koppeln damit Funktionszusammenhänge im klimaökologischen Ausgleichsraum-Wirkungsraumgefüge über größere Distanzen hinweg, die ohne sie ungenutzt blieben. Aufgrund ihrer linearen, häufig zwischen Siedlungsstrukturen liegenden Ausprägung, weisen sie eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen auf (vgl. Kap. 3.2).

Während in den Klimaanalysekarten die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen vornehmlich auf Grundlage ihres siedlungsunabhängigen, auf das Prozessgeschehen fokussierten Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in der Planungshinweiskarte deren regional- und stadt-

klimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Daraus ergibt sich eine für die Planungshinweiskarte abweichende Vorgehensweise bei der Bewertung der Grünareale.

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika des Ausgleichsraumes im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Bewertung der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet (Abbildung 3.21). Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Grünflächen und Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann.



Sehr hohe Bedeutung

Flächen, die die Kernbereiche der wirkraumbezogenen Kaltluftleitbahnen bilden



Hohe Bedeutung

Flächen, die die Kernbereiche des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der höchsten Handlungspriorität oder den Rand-/Quellbereich der Kaltluftleitbahnen darstellen



Erhöhte Bedeutung

Flächen, die die Kernbereiche des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der übrigen Handlungsprioritäten oder den Rand-/Quellbereich des flächenhaften Luftaustausches im Bereich der höchsten Handlungspriorität darstellen



Geringe Bedeutung

Alle übrigen Flächen des Ausgleichsraums

Abbildung 3.21: 4-stufige Bewertungsskala für den Ausgleichsraum in der Planungshinweiskarte

Die Grenzgröße einer Siedlung, der ein planungsrelevantes Stadtklima zuzuordnen ist, und die damit als „Wirkraum“ im engeren Sinne gelten kann und entsprechender „Ausgleichsflächen“ bedarf, wurde in diesem Projekt auf 1 km² festgelegt [vgl. hierzu MOSIMANN ET AL. 1998, Kap. 3.2 und 3.4]. Der Versuch, die Grünflächen und Freiräume eines heterogenen Raumes, wie den des Bundeslandes Baden-Württemberg, mit seinen verschiedenartig strukturierten Landschaftsräumen und vielförmig gegliederten Siedlungen einer einheitlichen Bewertung zu unterziehen, ist naturgemäß mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Da eine Einzeluntersuchung der jeweiligen Charakteristika aller Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im vorliegenden Maßstabbereich nicht möglich ist, wird zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen ein vereinfachtes, teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt (vgl. auch Tabelle 3.6):

Sehr hohe Bedeutung:

1. Zuordnung von Flächen im Ausgleichsraum zu den für die KAK abgeleiteten Leitbahnen über einen Suchradius von 300 m.

Allen Flächen aus (1) wird eine sehr hohe humanbioklimatische Bedeutung zugesprochen.

Hohe Bedeutung:

2a. Zuordnung von Flächen im Ausgleichsraum zu den für die KAK abgeleiteten flächenhaften Kaltluftabflüssen über einen Suchradius von 750 m. Händische Filterung, welche dieser Abflüsse auf Flächen mit sehr hohem Handlungsbedarf ausgerichtet sind.

2b. Ermittlung der an (1) angrenzenden Grün- und Freiflächen (Selektionstoleranz im GIS = 100 m). Dies entspricht ungefähr den Kaltluftentstehungsgebieten, die über die Leitbahnen aus (1) für den Wirkraum erschlossen werden.

Allen Flächen aus (2) wird eine hohe humanbioklimatische Bedeutung zugesprochen.

Erhöhte Bedeutung:

3a. Nutzt die im Schritt 2a ermittelten Kerngebiete der flächenhaften Abflüsse für alle übrigen Handlungsbedarfsklassen

3b. Ermittlung der an 2a & 3a angrenzenden Grün- und Freiflächen (Selektionstoleranz im GIS = 100 m). Entspricht ungefähr den Kaltluftentstehungsgebieten, die als Quellgebiete für die flächenhaften Abflüsse wirken.

Allen Flächen aus (3) wird eine erhöhte humanbioklimatische Bedeutung zugesprochen.

Geringe Bedeutung:

4. Alle übrigen Flächen des Ausgleichsraumes

Allen Flächen, die nicht die Kriterien aus (1, 2 oder 3) erfüllen, wird eine geringe humanbioklimatische Bedeutung zugesprochen.

Tabelle 3.6: Ableitungsvorschrift zur Bewertung der Ausgleichsraumbedeutung

| Karte | Bedeutung | Ableitung der Bedeutung | Pufferung |
|-------|-----------|---|----------------|
| 1 | Sehr hoch | Kernbereiche Leitbahnen (Richtung aller Handlungsprioritäten im Wirkraum) | 300 m |
| 2 | Hoch | Kerngebiete flächenhafter Kaltluftabfluss (Richtung höchstem Handlungsbedarf im Wirkraum) Rand-/Quellbereiche Leitbahnen (1) | 750 m 100 m |
| 3 | Erhöht | Kerngebiete flächenhafter Kaltluftabfluss, (Richtung übriger Handlungsbedarfe im Wirkraum) Rand-/Quellbereiche aller flächenhaften Kaltluftabflüsse (2) | 750 m 100m |
| 4 | Gering | Übrige Flächen im Ausgleichsraum | - |

Die nach diesem vereinfachten Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Grünflächen basiert einerseits auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d. h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. So kann eine Ausgleichsfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden flächenhaften Kaltluftabflüssen im direkten Umfeld von Wirkräumen mit besonders ungünstigen humanbioklimatischen Verhältnissen generell eine höhere Bedeutung zugesprochen. Da bei Luftleitbahnen die Empfindlichkeit im Fokus der Bewertung stehen sollte, wurde bei ihnen vorsorgeorientiert auf eine derartige Unterscheidung verzichtet. Der teilautomatisierte Ansatz wurde in einem abschließenden Schritt händisch korrigiert, da die Auswahl von Flächen über eine Selektionstoleranz vor allem bei kleinen Siedlungen zu einer Fehlbewertung führen kann. Die Auswahl über einen Puffer kann zu einem Einbezug von Flächen auf der gegenüberliegenden Seite der Siedlungen führen,



die in der Realität nicht mit dem untersuchten Kaltluftprozess in Verbindung stehen (Abbildung 3.22). Wie im Kapitel 3.5.2 beschrieben, wurde der Flächenzuschnitt der Geometrischen Basis so belassen, wie er im AKTIS-Basis DLM angelegt ist. Durch die langgezogene Gestalt von Flussabgrenzungen (Polygone), kann es bei der verwendeten Methodik zu leichten Fehleinschätzungen der tatsächlichen Reichweite von Kaltluftprozessen kommen. In Abbildung 3.22 ist südlich von Boxberg und westlich von Bobstadt ein Beispiel für zwei langgestreckte Flächen mit hoher Ausgleichsraumbedeutung zu sehen, welche aus der sonst hoch bewerteten Fläche herausragen.

Zusammenfassend wirkt eine in ihrer humanbioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Ausgleichsfläche als Kaltluft- oder Frischluftleitbahn (Abbildung 3.23 links oben). Eine als „Hoch“ eingestufte Ausgleichsfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch hoch belasteten Wirkungsraum oder ist als Quellgebiet einer Kaltluft- oder Frischluftleitbahn einzustufen (Abbildung 3.23 rechts oben). Ist der Wirkraum geringer belastet oder der Ausgleichsraum als Quelle für flächenhafte Kaltluftabflüsse anzusehen, wird den Flächen eine erhöhte Bedeutung zugesprochen (Abbildung 3.23 links unten). Alle übrigen Flächen des Ausgleichsraumes werden in ihrer Bedeutung als „Gering“ eingestuft.

bei autochthonen Wetterlagen. Dieser Fokus wurde gewählt, um eine Vergleichbarkeit zur Bewertung im Wirkraum herzustellen. Für den Wirkraum ist eine Bewertung anhand der Tagergebnisse nicht sinnvoll, da die Modellauflösung die kleinräumigen Prozesse die am Tage entscheidend sind nicht adäquat abbilden kann. Um die Bedeutung von Wäldern und anderen Grünstrukturen, die vor allem tagsüber eine ausgleichende Wirkung gegenüber Hitzebelastungen bieten, hervor-



Abbildung 3.22: Ausschnitt der Ausgleichsraumbewertung in der PHK bei Boxberg (Links vor der händischen Korrektur, rechts nach der Korrektur)

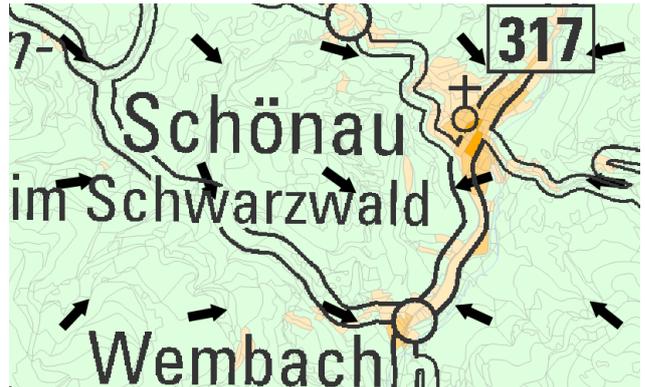
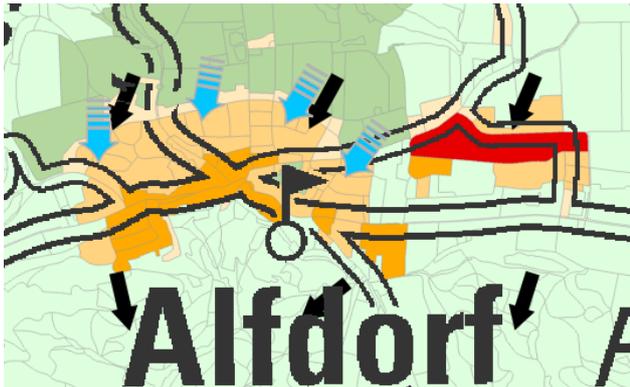
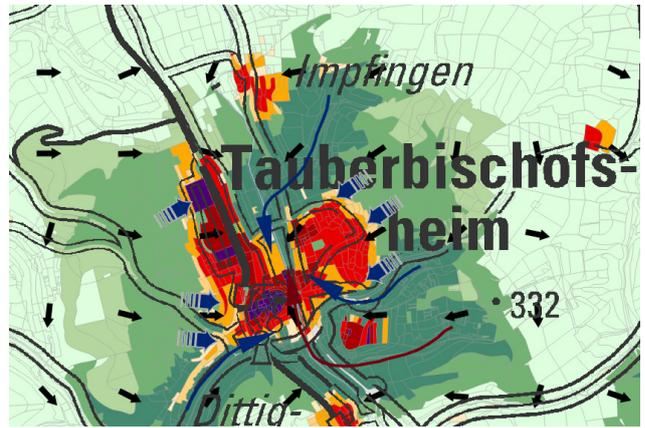


Abbildung 3.23: Auszug aus der PHK bei Villingen-Schwenningen (links oben), Tauberbischofsheim (rechts oben), Alfdorf (links unten) und Schönau (rechts unten) in Bezug auf die Bewertungsklassen des Ausgleichsraumes

zuheben wurden daher ergänzende Punktsignaturen in die PHK eingebracht (Abbildung 3.24).

Grünflächen mit Sonderfunktionen

Einigen Wäldern und siedlungsnahen Grünflächen kommen aufgrund ihrer Wirkung als Kühlinse am Tage auch dann eine besondere klimaökologische Bedeutung zu, wenn Sie nicht Bestandteil eines wirkungsraumbezogenen nächtlichen Kaltluftsystems sind. Weitere wichtige Funktionen von Erholungswäldern und deren Erreichbarkeit wurden über die Waldfunktionenkartierung der FVA mit einbezogen, weshalb diese hier nachrichtlich übernommen wurde. (Datengrundlage: FVA, www.fva-bw.de)

- ▲ Stufe 1a: Wald mit sehr großer Bedeutung für die Erholung im urbanen Umfeld
- ▲ Stufe 2: Wald mit relativ großer Bedeutung für die Erholung
- ▲ Stufe 1b: Wald mit großer Bedeutung für die Erholung
- ◆ siedlungsnaher Grünflächen mit Entlastungsfunktion

Abbildung 3.24: Signatur für Grünflächen mit Sonderfunktionen in der Planungshinweiskarte

In Absprache mit der PAG wurde auf eine eigene Klassifikation der Wälder verzichtet und die Erholungswaldkartierung der FVA nachrichtlich in die PHK übernommen (Abbildung 3.25), da diese von den Regionalverbänden auch bereits in anderen Kontexten verwendet wird. Die zweite Kennzeichnung bezieht sich auf jene siedlungsnahen Grünflächen, die im landesweiten Vergleich heutzutage besonders niedrige Hitzebelastungen am Tage aufweisen und somit zur aktiven Hitzeerholung aufgesucht werden können. Für die Ableitung der Flächen wurden zunächst die Ausgleichsraumflächen hinsichtlich des ATKIS-Attributes „ARTKOMB“ nach bestimmten Werten gefiltert (Tabelle 3.7). Von diesen Flächen wurden nur jene gekennzeichnet, die im Durchschnitt eine besonders niedrige PET aufwiesen. Dazu wurde die im Rah-

men der z-Transformation ermittelte z-PET verwendet und ein Schwellenwert von ≥ -1 für diesen Parameter gesetzt (vgl. Beschreibung der Methode in Kap. 3.5.3).

Tabelle 3.7: Auswahl von ATKIS ARTKOMB Attributen für die Ausweisung von siedlungsnahen Grünflächen mit Entlastungsfunktion

| ARTKOMB |
|---|
| Friedhof |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Freizeitanlage |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Grünanlage |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Park |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Schrebergarten |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Schwimmbad, Freibad |
| Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche - Zoo |

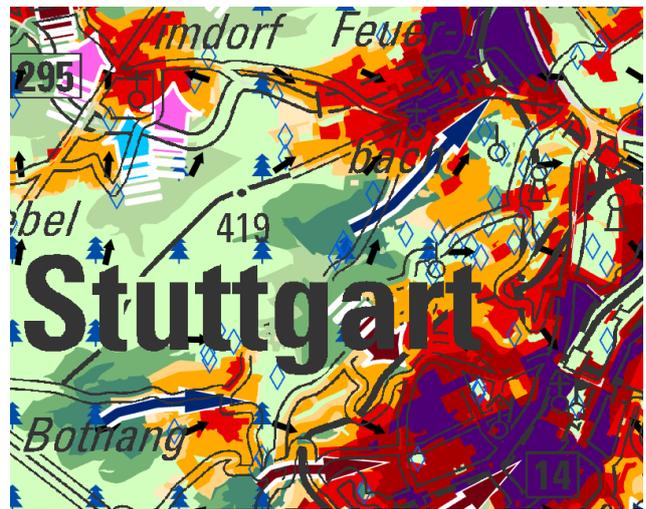


Abbildung 3.25: Ausschnitt der PHK bei Freiburg mit Kennzeichnung der Wälder (links, blaue Bäume) und bei Stuttgart mit Kennzeichnung der siedlungsnahen Grünflächen mit Entlastungsfunktion (rechts, blaue Rauten)

3.5.5 Verdeutlichung des Kaltluftprozessgeschehens

Weil der unmittelbare Luftaustausch am Siedlungsrand stattfindet, sind die Beziehungen zwischen Wirkraum und Ausgleichsraum im Wesentlichen lokaler Natur. Flächen mit direktem Bezug zum Siedlungsraum weisen daher in der Regel die höchste Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen auf. Ein wesentlicher Teil des planungsrelevanten Kaltluftprozessgeschehens spiegelt sich in der Planungshinweiskarte auf diese Weise bereits in den zuvor beschriebenen Ableitungen und Flächensignaturen wider. Zur Verdeutlichung des Prozessgeschehens sind die im Vorkapitel genannten, flächenhaft ausgewerteten Funktionszusammenhänge in der Planungshinweiskarte zusätzlich, analog zur KAK, über Pfeilsignaturen gekennzeichnet (Abbildung 3.26).

Hierbei wird zwischen linearen und flächenhaften Austauschbeziehungen in Verbindung mit der lufthygienischen Qualität des Kaltluftprozessgeschehens unterschieden. Die Pfeile – insbesondere die punkthaften Pfeilsignaturen des flächenhaften Kaltluftabflusses – repräsentieren exemplarisch das gesamte lokale Prozessgeschehen. Die Methodik zur Differenzierung der Pfeile wurde dabei bereits in Kapitel 3.3 (S. 67) und 3.5.4 (S. 77) beschrieben.

- ↑ Fließrichtung der Kaltluft
- Lineare Kaltluftleitbahn Richtung Wirkraum (Handlungsbedarf sehr hoch); lufthygienisch nicht belastend / belastend
- Lineare Kaltluftleitbahn Richtung Wirkraum; lufthygienisch nicht belastend / belastend
- ↑ Flächenhafter Kaltluftabfluss Richtung Wirkraum (Handlungsbedarf sehr hoch); lufthygienisch nicht belastend / belastend
- ↑ Flächenhafter Kaltluftabfluss Richtung Wirkraum; lufthygienisch nicht belastend / belastend

Abbildung 3.26: Signaturen der unmittelbaren Funktionszusammenhänge im Ausgleichs-Wirkungsraumgefüge

Eine Schwierigkeit der oben skizzierten, über Nachbarschaftsbeziehungen definierten Zuordnungen besteht darin, dass weiterreichende Funktionszusammenhänge auf diese Weise kaum zu erfassen und abzugrenzen sind. Zu diesen weiterreichenden Zusammenhängen gehören z.B. Tallagen, in denen bei Schwachwindbedingungen der Kalt- und Frischlufttransport stattfindet und die als Ventilationsbahnen für stärkere regionale Winde dienen. Oder ausgedehntere Hanglagen in besiedelten Gebieten, die einen intensiven und sehr weitreichenden Kaltlufttransport bedingen können. Hinzu kommt, dass solche Flächen in der Regel nicht die Empfindlichkeiten der direkt wirkraumbenachbarten Grün- und Freiflächen aufweisen. Daher ist es nicht sinnvoll, sie in deren Bewertungsschema einzupassen.

Im Kapitel 3.4 wird die in diesem Projekt verwendete Methode zur Erfassung und Abgrenzung dieser weitreichenden Funktionszusammenhänge aufgezeigt. Für die Planungshinweiskarte wurden die relevanten Flächen pauschal mit einer außerhalb der Ausgleichsraumbewertung stehenden diagonalen Schraffur versehen, aus der planerische Hinweise für die zugehörigen Flächen zu entnehmen sind (Abbildung 3.27). Zur Verdeutlichung des jeweiligen Strömungszusammenhanges werden außerdem die jeweiligen Vorwärtstrajektorien



Flächen mit Zugehörigkeit zu einem regionalen Kaltluftströmungssystem

Die klimaökologischen Auswirkungen raumbedeutsamer Planungen (insbesondere Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung) sollten im Planungsfall summarisch für das gesamte System analysiert und bewertet werden.



Die zur Verdeutlichung des Strömungszusammenhangs zusätzlich dargestellten Vorwärtstrajektorien zeichnen den Weg der Horizontalströmung zwischen 22 und 5 Uhr in 20m über Grund nach.

Abbildung 3.27: Signaturen der Regionalen Kaltluftströmungssysteme in der Planungshinweiskarte

in Form einer Linien-Pfeil-Signatur dargestellt (Abbildung 3.27).

Hierbei wird zwischen linearen und flächenhaften Austauschbeziehungen in Verbindung mit der lufthygienischen Qualität des Kaltluftprozessgeschehens unterschieden. Die Pfeile – insbesondere die punkthaften Pfeilsignaturen des flächenhaften Kaltluftabflusses – repräsentieren exemplarisch das gesamte lokale Prozessgeschehen. Die Methodik zur Differenzierung der Pfeile wurde dabei bereits in Kapitel 3.3 (Seite 61) und 3.5.4 (Seite 71) beschrieben.

Eine Schwierigkeit der oben skizzierten, über Nachbarschaftsbeziehungen definierten Zuordnungen besteht darin, dass weiterreichende Funktionszusammenhänge auf diese Weise kaum zu erfassen und abzugrenzen sind. Zu diesen weiterreichenden Zusammenhängen gehören z.B. Tallagen, in denen bei Schwachwindbedingungen der Kalt- und Frischlufttransport stattfindet und die als Ventilationsbahnen für stärkere regionale Winde dienen. Oder ausgedehntere Hanglagen in besiedelten Gebieten, die einen intensiven und sehr weitreichenden Kaltlufttransport bedingen können. Hinzu kommt, dass solche Flächen in der Regel nicht die Empfindlichkeiten der direkt wirkraumbenachbarten Grün- und Freiflächen aufweisen. Daher ist es nicht sinnvoll, sie in deren Bewertungsschema einzupassen.

Im Kapitel 3.4 wird die in diesem Projekt verwendete Methode zur Erfassung und Abgrenzung dieser weitreichenden Funktionszusammenhänge aufgezeigt. Für die Planungshinweiskarte wurden die relevanten Flächen pauschal mit einer außerhalb der Ausgleichsraumbewertung stehenden diagonalen Schraffur versehen, aus der planerische Hinweise für die zugehörigen Flächen zu entnehmen sind (Abbildung 3.27). Zur Verdeutlichung des jeweiligen Strömungszusammenhangs werden außerdem die jeweiligen Vorwärtstrajektorien in Form einer Linien-Pfeil-Signatur dargestellt (Abbildung 3.28.)

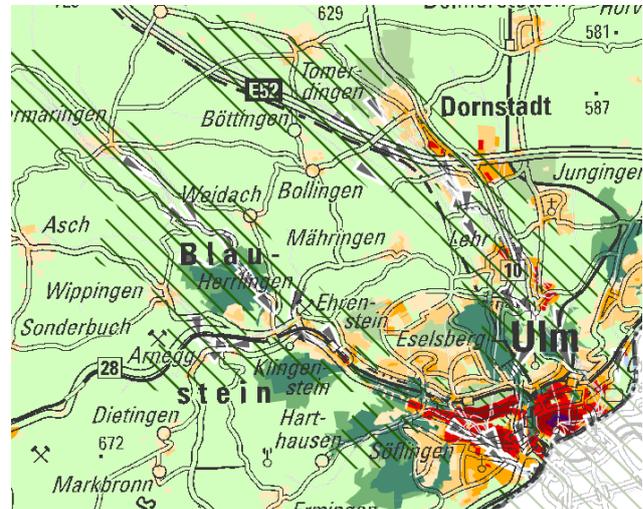


Abbildung 3.28: Ausschnitt der PHK bei Ulm mit Hervorhebung der regionalen Kaltluftströmungssysteme (grüne Schraffur) und der Fließrichtung der zugehörigen Trajektorien (graue Pfeile)

3.5.6 Bewertung der Luftqualität

Die in Abbildung 3.26 aufgeführten Luftaustauschsignaturen sind entsprechend ihres Belastungspotenzials farblich gekennzeichnet. Sie repräsentieren exemplarisch das gesamte lokale Prozessgeschehen. Als „lufthygienisch belastend“ gilt dementsprechend Kaltluft, die auf ihrem Strömungsweg Schadstoffe in den Wirkraum hineintransportiert. Dies bedeutet nicht unbedingt, dass die Belastung bereits an der Signaturposition vorhanden ist. Besteht das Potenzial, dass ein Strömungszusammenhang zwischen Ausgleichsraum und Wirkraum zu einer Erhöhung der Luftschadstoffbelastung im Siedlungsbereich führt, wird dieser Strömungszusammenhang als lufthygienisch belastend aufgefasst. Die Bewertung bezieht sich somit auf das Belastungspotenzial des Kaltluft-funktionszusammenhangs im prozessualen Gesamtgeschehen (siehe auch Kapitel 3.3).

Zusätzlich zu den farblich differenzierten Luftaustauschsignaturen in Abbildung 3.26 wurde eine weitere Signatur eingefügt (Abbildung 3.29): Die Schraffur kennzeichnet das Belastungspotenzial des Straßenverkehrs bei autochthonen Wetterlagen (unabhängig vom Wirkraumzusammenhang). Als „hohe verkehrsbedingte Zusatzbelastung“ werden in der Schraffur der Planungshinweiskarte Immissionskonzentrationen der verkehrsbedingten NO₂-Zusatzbelastung von 5 µg/m³ und mehr ausgewiesen (Abbildung 3.30). Die neuklassifizierten Immissionsraster wurden in Polygone umgewandelt und Flächen kleiner als 1 Hektar gelöscht.

Luftqualität



Hohe verkehrsbedingte Zusatzbelastung

Bewertungsgegenstand sind die lufthygienischen Zusatzbelastungen durch den Straßenverkehr. Hier besteht Handlungsbedarf zur Emissionsreduktion.

Abbildung 3.29: Signatur der Luftqualität in der Planungshinweiskarte

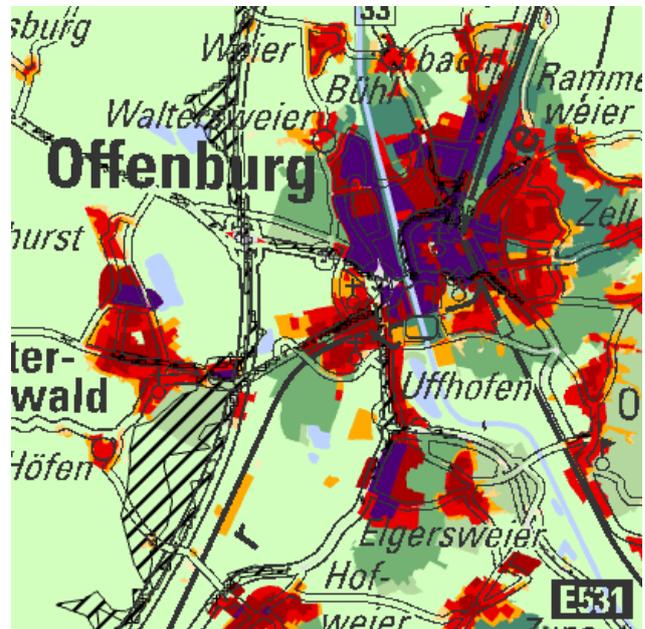


Abbildung 3.30: Ausschnitt der PHK bei Offenburg mit Hervorhebung der hohen verkehrsbedingten Zusatzbelastung (schwarze umrandete Schraffur)

4 Fazit

Mit der modellgestützt erstellten landesweiten Klimaanalyse für den Klimaatlas liegt nun erstmalig ein landesweit einheitliches Produkt zu den Themenkomplexen thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt (inklusive der Luftqualität) vor. Das betrachtete Schutzgut ist die menschliche Gesundheit im Kontext gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Der zukünftige Klimawandel wurde bezogen auf vier mögliche Warming Levels gleichberechtigt mit der Bestandssituation in der Analyse berücksichtigt.

Die Produktpalette des Projektes bilden insbesondere:

- Die Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 3.5)
- Die Karte der Regionalen Kaltluftströmungssysteme (vgl. Kap. 3.4)
- Die Luftqualitätskarte (vgl. Kap. 3.3)
- Die Klimaanalysekarten (vgl. Kap. 3.2)
- Die Karten für die einzelnen Modellausgabeparameter & die Kenntage (vgl. Kap. 3.1 & 2.7)

Alle Produkte liegen als hochaufgelöste PDF-Dateien sowie GIS-basiert als ArcGIS 10.8 oder Pro mappackages (Raster- und Vektordaten, inklusive Metadaten) vor. Insbesondere für tiefere Arbeiten an und mit den Produkten empfiehlt sich die Verwendung der GIS-basierten Produktvarianten. Gegenüber den reinen Kartendarstellungen können hier die teils komplexen flächenbezogenen Informationen über einige Mausklicks direkt und eindeutig abgefragt werden. Zudem besteht die Möglichkeit der Überlagerung und Verknüpfung mit weiteren Daten (z. B. raumrelevanten Vorhaben, bestehenden oder geplanten regionalplanerischen Zielen und Grundsätzen). Auch die grafische Qualität der Karteninhalte ist in den GIS-basierten Versionen aufgrund der großen Datenmengen in der Regel besser als in den exportierten PDF-Dateien (vor allem bei hohen Zoomstufen), so dass auch etwaige Screenshots für Stellungnahmen oder sonstige Kommunikationszwecke vorrangig direkt im GIS erstellt werden sollten.

Hauptadressat der erzeugten Produkte inklusive der sie begründenden analytischen Arbeiten ist die regionale Ebene, zu erwartende Anwendungsbereiche sind beispielsweise:

- Berücksichtigung bei der Erstellung von Landschaftsrahmenplänen
- Grundlage für die Formulierung und Darstellung von Zielen und Grundsätzen, deren Begründung sowie für den Umweltbericht bei der Aufstellung bzw. Fortschreibung von Regionalplänen
- Basis für Stellungnahmen im Rahmen von Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren sowie für Umweltverträglichkeitsstudien
- Berücksichtigung in informellen Planungsprozessen (z. B. Teilraumgutachten und Entwicklungskonzepte, Handlungskonzepte, Regionalmanagement)

Unabhängig von der Anwendung sollte der erste Blick stets in die Planungshinweiskarte gehen. Sie stellt das zentrale Produkt der Analyse dar und sollte vorrangige Begründungsgrundlage für alle klimaökologisch relevanten Planungs-, Entscheidungs- und Abwägungsprozesse

für den oben definierten Maßstab sein. Die Planungshinweiskarte wurde in einem intensiven Dialog- und Aushandlungsprozess mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (Vertreter und Vertreterinnen des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, des Ministeriums für Landesentwicklung und Wohnen, der Regionalverbände, ausgewählter Kommunen, des DWD sowie der LUBW) entwickelt.

Folgende zentrale Planungshinweise lassen sich für die Anwendung der Planungshinweiskarte synthetisieren:

Wirkraum:

- Handlungsbedarf sehr hoch: Die Flächen weisen bereits heute die größte Handlungserfordernis im Wirkraum auf. Maßnahmen zur Verbesserung sollten hier kurzfristig und prioritär umgesetzt werden. Dies kann die Vermeidung von neuen Strömungshindernissen oder von zusätzliche Wärmeemissionen sein. Bei klimaökologisch relevanten Planungen kann aus fachlicher Sicht ein modellgestütztes Detailgutachten helfen, konkrete Maßnahmen zu konzipieren und deren Wirkung abzuschätzen – ggf. unter Berücksichtigung etwaiger weiterer Planungen im Umfeld.
- Handlungsbedarf hoch oder erhöht: Die Flächen weisen unter Berücksichtigung einer zukünftig zu erwartenden Erwärmung von 2 bzw. 3 °C eine relevante Handlungserfordernis im Wirkraum auf. Maßnahmen zur Verbesserung sollten hier proaktiv umgesetzt werden. Es besteht eine Empfindlichkeit gegenüber Nachverdichtungen und Erhöhung der Versiegelung jeglicher Art, so dass bei klimaökologisch relevanten Planungen modellgestützte Detailgutachten eingesetzt werden können– ggf. unter Berücksichtigung etwaiger weiterer Planungen im Umfeld.
- Handlungsbedarf mittel oder gering: Die Flächen weisen unter Berücksichtigung einer zukünftig zu erwartenden Erwärmung von 4 bzw. 5 °C ein relevantes Handlungserfordernis im Wirkraum auf. Proaktive Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht prioritär, sollten im Rahmen von anstehenden Straßen-/ Quartierssanierungen aber Berücksichtigung finden. Es besteht keine Empfindlichkeit gegenüber Nachverdichtungen, die bei Art und Maß der baulichen Nutzung der Umgebung entsprechen. Bei geplanten höheren Dichte- und Versiegelungsgraden sollte auf die begleitende Umsetzung von optimierenden Maßnahmen hingewirkt werden. Auf gutachterliche Bewertungen kann dabei in aller Regel verzichtet werden.
- Vorsorgebereich: Die Flächen weisen bei einer Erwärmung von mehr als 5 °C einen hohen Handlungsbedarf auf. Aufgrund dieser günstigen Ausgangslage sind aus fachlicher Sicht keine Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Es besteht keine Empfindlichkeit gegenüber Nachverdichtungen, die sich bei Art und Maß der baulichen Nutzung an der Umgebung orientieren oder eine moderat erhöhte Dichte aufweisen. Auf gutachterliche Bewertungen kann daher verzichtet werden.

Ausgleichsraum

- **Sehr hohe Bedeutung:** Die Flächen bilden die Kernbereiche der linearen, auf den Wirkraum ausgerichteten Kaltluftleitbahnen. Sie sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches und weisen aufgrund ihrer linienhaften Ausprägung eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen auf. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können. Insbesondere bei geplanten baulichen Entwicklungen jeglicher Art (aber z. B. auch bei Aufforstungen) sollte unbedingt auf den Erhalt der Klimafunktionen der Leitbahnen hingewirkt werden. Es wird ein modellgestütztes Detailgutachten zu entsprechenden Einzelvorhaben empfohlen - ggf. unter Berücksichtigung etwaiger weiterer Planungen im Umfeld.
- **Hohe Bedeutung:** Die Flächen bilden die Kerngebiete von flächenhaften Kaltluftabflüssen in Richtung thermisch besonders belasteter Wirkräume und/ oder die Rand-/ Quellbereiche der Kaltluftleitbahnen. Eine bauliche Entwicklung ist nur unter der Prämisse des Erhalts der jeweiligen Klimafunktion fachlich zu vertreten. Für kleinere Vorhaben (z. B. Einzel-/ Reihenhausbebauungen) ist in aller Regel eine gutachterliche verbal-argumentative Stellungnahme zur Optimierung der Planung ausreichend. Für mittlere und größere Vorhaben (Zeilen-/ Geschosswohnungsbau, Gewerbestandorte, Hochhäuser) sollte ein modellgestütztes Detailgutachten erstellt werden – ggf. unter Berücksichtigung etwaiger weiterer Planungen im Umfeld.
- **Erhöhte Bedeutung:** Die Flächen bilden die Kerngebiete von flächenhaften Kaltluftabflüssen in Richtung thermisch weniger stark belasteter bzw. unbelasteter Wirkräume und/ oder die Rand-/ Quellbereiche von Flächen mit einer hohen Bedeutung. Für kleinere und mittelgroße Vorhaben (z. B. Einzel-/Reihenhausbebauungen, Zeilenbebauungen) sind in aller Regel keine relevanten Auswirkungen auf die Klimafunktionen bzw. den Wirkraum zu erwarten. Für größere Vorhaben (vor allem Gewerbestandorte, Geschosswohnungsbau, Hochhäuser) sollte eine gutachterliche verbal-argumentative Stellungnahme zur Optimierung der Planung erstellt werden.
- **Geringe Bedeutung:** Die Flächen liegen außerhalb der Kern- und Rand-/ Quellbereiche von Richtung Wirkraum ausgerichteten Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüssen. In Abhängigkeit der Lage, Exposition und Entfernung zum Wirkraum kann davon ausgegangen werden, dass auch größere Vorhaben keine negativen Auswirkungen auf den Kaltlufthaushalt in den gegenwärtigen Siedlungsstrukturen aufweisen. Auf gutachterliche Tätigkeit kann insbesondere dann verzichtet werden, wenn die Flächen keine Zugehörigkeit zu einem regionalen Kaltluftströmungssystem aufweisen.
- **Flächen mit der Zugehörigkeit zu einem regionalen Kaltluftströmungssystem:** Die Flächen bilden ein zusammenhängendes Kaltluftströmungssystem ab. Der Erhalt der Systeme ist regional von größter Bedeutung. Gegenüber den Auswirkungen von Einzelvorhaben sind die Systeme tendenziell sehr robust. Die Gefährdung besteht in der allmählichen Zerstö

- rung der Klimafunktionen durch eine Vielzahl realisierter Einzelvorhaben. Insofern sollte der Erhalt der Systeme anlassbezogen (z. B. bei der Neuaufstellung eines Regionalplans) unter Berücksichtigung aller innerhalb des Systems bekannten bzw. zur erwartenden raumbedeutsamen Planungen (insbesondere Siedlungs-/ Infrastruktureinrichtungen) gutachterlich und modellgestützt nachgewiesen werden.
- Grünflächen mit Sonderfunktionen: Wäldern kommt aufgrund ihrer Wirkung als Kühllinsel am Tage auch dann eine besondere klimaökologische Bedeutung zu, wenn sie nicht Bestandteil eines wirkungsraumbezogenen nächtlichen Kaltluftsystems sind. Der Walderhaltung und der Waldmehrung kommt daher auch für die Hitzevorsorge eine ganz entscheidende Bedeutung zu. Selbiges lässt sich auch auf innerstädtische Grünanlagen und Parks übertragen. Beiden Grünraumtypen ist zudem eine wachsende Gefährdung durch den Klimawandel gemein (erhöhter Trockenstress, Schädlingsbefall, Waldbrandgefahr), so dass dem klimaangepassten Waldbau bzw. Stadtgrün sowie im urbanen Kontext auch der aktiven Bewässerung aus rückgehaltenem Regenwasser (Schwammstadtprinzip) eine Schlüsselrolle zukommt. Denn nur vitale Grünstrukturen spenden Schatten und sorgen für Verdunstungskühlung.

Die konkrete Art der Berücksichtigung dieser Planungshinweise sowie der Analyse- und Bewertungsergebnisse in den Landschaftsrahmen- und Regionalplänen obliegt den zuständigen Planungsstellen. Darüber hinaus empfiehlt es sich, einen Austausch zu den Erfahrungen mit der Anwendung der Produkte zu initiieren (z. B. in Form von jährlichen Workshops).

An dieser Stelle muss betont werden, dass die bereits in Regionalplänen dargestellten Instrumente zur Freiraumsicherung wie Regionale Grünzüge, Trenngrüns oder landschaftliche Vorbehaltsgebiete – schon allein wegen unterschiedlicher methodischer Ansätze – grundsätzlich nicht im Widerspruch zu den Darstellungen in der Planungshinweiskarte stehen können. Die Planungshinweiskarte stellt vielmehr einen weiteren zu berücksichtigenden Planungsparameter einer vorsorgeorientierten und klimawandelangepassten Landschaftsrahmen- und Regionalplanung dar. Für die Ausweisung von Regionalen Grünzügen (LEP 7.1.4) und/ oder Landschaftlichen Vorbehaltsgebieten (LEP 7.1.2) können die in die in der Planungshinweiskarte dargestellten klimarelevanten Flächen auch durch weitere planerische Grundlagen ergänzt werden.

Bei allen aus den Analyse- und Bewertungsergebnissen abgeleiteten planerischen Entscheidungen sollten stets auch immer die Grenzen ihrer Anwendbarkeit im Blick behalten werden. Diese ergeben sich alleine schon aus dem intendierten regionalen Anwendungsschwerpunkt, können durch eine gezielte Analyse der bestehenden Unsicherheiten aber noch einmal fokussiert bzw. konkretisiert werden (vgl. Kap. 2.8). Besonders herauszuheben sind hier zum einen die verwendeten Annahmen zum Klimawandel. Diese basieren auf dem Stand der Wissenschaft und stellen somit die beste zur Verfügung stehende Grundlage dar. Dennoch ist ungewiss, wie stark der Klimawandel tatsächlich ausfallen wird (bzw. welches der verwendeten Szenarien realistischer ist) oder ob zukünftig ggf. neue wissenschaftliche Erkenntnisse eine kritische Reflexion, der in der vorliegenden Analyse getroffenen Annahmen notwendig machen. Zudem

tengrundlagen nicht berücksichtigt werden. Im Sinn der Vorsorge ist eine Berücksichtigung eines möglicherweise stärkeren Klimawandels als No-Regret-Ansatz ratsam.

Als zweite relevante Unsicherheitsquelle können, die für die Modellierungen zur Verfügung stehenden Grundlagendaten zur Ableitung einer differenzierten Flächennutzung in Kombination mit der für bundeslandweite Modellrechnungen heute möglichen Modellauflösung benannt werden. Während der für regionalplanerische Fragestellungen vorrangig relevante Ausgleichsraum (Frei- und Grünflächen) an den Siedlungsrändern und zwischen den einzelnen Siedlungen in den Modellrechnungen und den erzeugten Produkten sehr gut repräsentiert wird, ist die innere Differenzierung des Wirkraums (Siedlungskörper) im Sinne der Zielerreichung der Analyse als „lediglich“ hinreichend gut einzustufen. Dies liegt zum einen an in ihrem Detaillierungsgrad begrenzten Datengrundlagen hinsichtlich der Stadtstrukturtypisierung (vgl. Kap. 2.3.2) sowie zum anderen an der für landesweite Analysen zwar sehr hohen, für gesamtstädtische Analysen aber vergleichsweise geringen Modellauflösung von 50 m horizontal (vgl. Kap. 2.1). Einzelne Gebäude und Grünstrukturen sowie viele Straßenräume können bei diesem Ansatz nur vereinfacht berücksichtigt werden. In der Konsequenz wirken Siedlungskörper damit vollkommen korrekt als Einwirkbereiche und Strömungshindernisse für die Kaltluft und erzeugen eine (z. T. auch räumlich ausdifferenzierte) nächtliche Wärmeinsel. Über die Ebene von Stadtteilen (städtische Grobgliederung) hinausgehende Rückschlüsse (z. B. auf Einzelvorhabenebene) sollten aber allein auf der Basis der landesweiten Analyse nicht gezogen werden.

Insbesondere für die Kommunen, für deren Gebiet Ausgleichsräume mit einer hohen bis sehr hohen Bedeutung (vgl. Kap. 3.5.4) identifiziert wurden und/ oder für deren Wirkräume sich eine ungünstige humanbioklimatische Situation bereits in der Bestandssituation ergeben (vgl. Kap. 3.5.3), kann die landesweite Modellrechnung über einen sog. Nestingansatz als Randbedingung für höher aufgelöste Modellrechnungen verwendet werden. Auf diese Weise können insbesondere die regional relevanten Kaltluftströmungen in den städtischen Analysen explizit Berücksichtigung finden. Mit diesen Projekten können die Grundlagen beispielsweise für die Änderung oder Neuaufstellung der vorbereitenden und der verbindlichen Bauleitplanung sowie für eine stadtklimagerechte Nachverdichtung bzw. für Anpassungsmaßnahmen im Bestand geschaffen werden. Die kommunale Landschaftsplanung kann hierbei wertvolle Beiträge zur Klimawandelanpassung im kommunalen Freiraum-Landschaftssystem liefern und Synergien mit anderen Anforderungen wie bspw. zur Erholungsnutzung oder zum Biotopverbund schaffen.

Ein übersichtliches Begleitdokument mit den relevantesten Informationen für die Planungshinweiskarte finden Sie hier:

<https://pd.lubw.de/10678>

Weitere Informationen zum Klimaatlas Baden-Württemberg finden Sie unter:

<https://www.klimaatlas-bw.de/>

5 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

5.1 Abbildungen

| | |
|---|----|
| Abbildung 1.1: Klimakomfort und -diskomfort bei verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen [verändert nach VDI 2020] | 15 |
| Abbildung 1.2: Stündliche Mittelwerte der Innenraumtemperaturen in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 [BECK et al. 2020] | 16 |
| Abbildung 1.3: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) [UNU 2019] | 17 |
| Abbildung 1.4: Jährlich abgeschätzte Hitzetote in Baden-Württemberg für die Jahre 2000 - 2019. Stand: Oktober 2021 Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. | 17 |
| Abbildung 1.5: Grundkonzept der klimatologischen Zeitreihenanalyse [DWD 2024a] | 18 |
| Abbildung 1.6: Jahresmitteltemperatur in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1881) [LUBW 2023] | 19 |
| Abbildung 1.7: Anzahl Sommertage in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1951). [LUBW 2023] | 19 |
| Abbildung 1.8: Anzahl Heißer Tage in Baden-Württemberg (Flächenmittel pro Jahr seit 1951) [LUBW 2023] | 20 |
| Abbildung 1.9: Anzahl der Tropennächte (18 bis 06 UTC, Universal Time Coordinated in Deutschland im Hitzejahr 2003 im 1 km x 1 km-Raster, in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt [UBA 2020] | 21 |
| Abbildung 1.10: Zentrale Elemente des Kaltluftprozessgeschehens [oben: The COMET program 2017, mitte: LUBW 2024, unten: DWD 2024b]. | 23 |
| Abbildung 1.11: Projektphasen und Arbeitsschritte [GEO-NET 2024] | 25 |
| Abbildung 2.1: Schematische Darstellung von idealisierten Landnutzungsklassen in mesoskaligen Stadt-/ Regionalklimamodellen [DWD 2014] | 27 |
| Abbildung 2.2: Zuordnung der RCP-Szenarien zu den Warming Levels, Darstellung der Veränderung der Sommertemperaturen bezogen auf 1971 – 2000 [Modelldaten ReKliEs-De, LfU 2020; Auswertung und Darstellung LUBW] | 28 |
| Abbildung 2.3: Geländehöhen Baden-Württemberg und Umland. | 30 |
| Abbildung 2.4: Klassifikation urbaner FITNAH-Nutzungsklassen aus Versiegelungsgrad, Gebäudeanteil und ALKIS-Nutzung | 33 |
| Abbildung 2.5: Nutzungsraster Baden-Württemberg und Umland | 34 |
| Abbildung 2.6: Nutzungsraster bei Stuttgart | 35 |
| Abbildung 2.7: Strukturhöhen Baden-Württemberg und Umgebung. | 36 |
| Abbildung 2.8: Strukturhöhen bei Stuttgart. | 37 |
| Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Tagesordnung der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen [Eigene Darstellung nach GROSS 1992]. | 39 |
| Abbildung 2.10: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen (n = 197) mit täglichen Messdaten im Zeitraum von 1874 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022] | 40 |
| Abbildung 2.11: Anzahl der verfügbaren Messstationen mit täglichen Daten nach Jahren [DWD 2020] | 40 |
| Abbildung 2.12: Verteilung des berechneten taggenauen, höhenabhängigen Temperaturgradienten (n = 1836) [DWD 2022] | 41 |
| Abbildung 2.13: Verteilung des berechneten taggenauen, höhenabhängigen Temperaturgradienten (n = 1836) [DWD 2022] | 42 |
| Abbildung 2.14: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen in Baden-Württemberg mit stündlichen Daten und gleichzeitigen Messungen von Wind, Bewölkungsgrad und Temperatur im Zeitraum von 1990 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022] | 43 |
| Abbildung 2.15: Räumliche Verteilung aller verfügbaren DWD-Stationen in Baden-Württemberg mit stündlichen Daten und gleichzeitigen Messungen von Wind, Bewölkungsgrad und Temperatur im Zeitraum von 1990 bis 2021. Im Hintergrund ist die Geländehöhe in Meter über NN dargestellt. Die Achsen kennzeichnen die geografischen Längen- und Breitenkoordinaten für Baden-Württemberg [DWD 2022] | 43 |
| Abbildung 2.16: Anzahl valider Datensätze pro Messstation | 44 |
| Abbildung 2.17: Lage der zur Ermittlung der Initialisierungstemperatur verwendeten Stationen mit Angabe der langjährigen mittleren Temperatur um 21:00 Uhr wahren autochthoner Wetterlagen [DWD 2022] | 45 |
| Abbildung 2.18: Zusammenhang zwischen Größe, Tiefe und Flussabschnitt zur täglichen Wassertemperatur [CAISSIE 2006, S. 1391] | 45 |
| Abbildung 2.19: Höhenabhängigkeit der Wassertemperatur bei Flüssen | 46 |
| Abbildung 2.20: Wassertemperaturen durch Interpolation über Zonen an Schluchsee und Bodensee | 47 |
| Abbildung 2.21: Beispiele für DWD-Stationen mit vielen Ortswechslern in Baden-Württemberg, Punkte zeigen die jeweiligen Stationsstandorte und Kreuze die räumlich zugehörigen Modellgitterpunkte | 51 |
| Abbildung 2.22: Modellperformance aller verwendeten (Sub-)Messstationen. Der Mittelwert des MAE in orange | 52 |
| Abbildung 2.23: Gegenüberstellung von Modell- und Messzeitreihen an ausgewählten Stationen (Rote durchgezogene Linie – 2m-Temperatur FITNAH, lila durchgezogene Linie – 2m-Temperatur Messstation, lila gestrichelte Linie -- +/- Standardabweichung der Messdaten, beige – alle Messwerte zwischen Minimum und Maximum, hellgrau – alle Messwerte zwischen 15. und 85. Perzentil, dunkelgrau – alle Messwerte zwischen 25. und 75. Perzentil). | 53 |
| Abbildung 2.24: Modellperformance im Tagesgang, hellblaue Boxen kennzeichnen jene Zeitpunkte, die in der Klimaanalyse für Baden-Württemberg ausgewertet wurden | 53 |
| Abbildung 2.25: Repräsentative Fläche eines Regionalmodellgitterpunktes (links) und die zugehörigen 100 x 100 Gitterpunkte aus dem FITNAH-Gitter (rechts). | 55 |
| Abbildung 2.26: Abweichung der FITNAH-Werte vom Flächenmittelwert einer repräsentativen Fläche von 100 x 100 Gitterpunkten. | 55 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.27: Funktionsweise des Mittelwertfilters [THIPKHAM 2018] | 56 |
| Abbildung 2.28: Unterschiede in der Glättung der Ergebnisse je nach Filtergröße. $w(x)$ bezeichnet jeweils die Kantenlänge der Faltungsmatrix des angewandten Filters | 56 |
| Abbildung 2.29: Änderungen der Häufigkeitsverteilung je nach Stärke des angewandten Filters, hier als Beispiel die Anzahl der Tage mit einer Überschreitung der Wochenmitteltemperatur von 21 °C ($w(x)$ bezeichnet jeweils die Kantenlänge der Faltungsmatrix des angewandten Filters) | 57 |
| Abbildung 3.1: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten (gekürzt) | 62 |
| Abbildung 3.2: Ausschnitt der gutachterlich klassifizierten Kaltluftvolumenstromdichte bei Tübingen in der Bestandsituation | 63 |
| Abbildung 3.3: Ausschnitte der absoluten Lufttemperatur bei Karlsruhe in der Bestandsituation und dem Szenario +5K | 64 |
| Abbildung 3.4: Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte (links) mit dem 1000 m Windfeld und der Karte der bodennahen Windgeschwindigkeit (rechts) mit dem 200 m Windfeld im Raum Mannheim | 64 |
| Abbildung 3.5: Ausschnitt der gutachterlich klassifizierten Kaltluftvolumenstromdichte bei Schwäbisch Hall in der Bestandsituation mit ausgewiesenen Kaltluftproduktionsflächen | 65 |
| Abbildung 3.6: Ausschnitt der Klimaanalysekarte bei Freiburg in der Bestandsituation mit ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen | 65 |
| Abbildung 3.7: Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte bei Schwetzingen (links) und Reutlingen (rechts) mit Darstellung der flächenhaften Kaltluftaustauschbereiche (blaue Pfeile) | 66 |
| Abbildung 3.8: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte bei Friedrichshafen zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung) | 66 |
| Abbildung 3.9: Ausschnitt der Karte verkehrsbedingter Luftschadstoff-Emissionen bei Stuttgart | 67 |
| Abbildung 3.10: Ausschnitt der Karte verkehrsbedingter Luftschadstoff-Zusatzbelastungen bei Stuttgart | 68 |
| Abbildung 3.11: Ableitung des Belastungspotenzials der bedeutsamen Kaltluftprozesse auf Grundlage des Konzentrationsfeldes der verkehrsbedingten Luftschadstoffimmissionen (blaue Pfeile = nicht belastend, rot/ pinke Pfeile = belastend) | 69 |
| Abbildung 3.12: Ableitung der Regionalen Kaltluftströmungssysteme auf Grundlage der Vorwärtstrajektorien | 69 |
| Abbildung 3.13: Gegenstromprinzip zwischen Gutachterteam und projektbegleitender Arbeitsgruppe zur Legitimation der Bewertungen in der Planungshinweiskarte | 71 |
| Abbildung 3.14: Legendelemente der Planungshinweiskarte | 72 |
| Abbildung 3.15: Ausgleichs-Wirkungsraum-Gefüge am Beispiel Karlsruhe | 73 |
| Abbildung 3.16: Übertragung der originären Modellausgabegrößen (links, Rasterebene) auf die Basisgeometrie (rechts, Vektorebene) als nicht gewichtete Raummittelwerte und mithilfe einer zonalen Statistik aller die jeweilige Fläche schneidende Rastermittelpunkte am Beispiel des Wirkraums der Stadt Karlsruhe | 74 |
| Abbildung 3.17: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen [VDI 2008a] | 74 |
| Abbildung 3.18: 6-stufige Bewertungsskala für den Wirkraum in der Planungshinweiskarte | 75 |
| Abbildung 3.19: Auszug aus der PHK bei Karlsruhe in Bezug auf die Bewertungsklassen des Wirkraumes | 76 |
| Abbildung 3.20: Auszug aus der PHK bei Friedrichshafen (links oben), Bad Rappenau (rechts oben), Sindelfingen (links unten) und Rottweil (rechts unten) in Bezug auf die Bewertungsklassen des Wirkraumes | 77 |
| Abbildung 3.21: 4-stufige Bewertungsskala für den Ausgleichsraum in der Planungshinweiskarte | 78 |
| Abbildung 3.22: Ausschnitt der Ausgleichsraumbewertung in der PHK bei Boxberg (Links vor der händischen Korrektur, rechts nach der Korrektur) .. | 79 |
| Abbildung 3.23: Auszug aus der PHK bei Villingen-Schwenningen (links oben), Tauberbischofsheim (rechts oben), Alfdorf (links unten) und Schönau (rechts unten) in Bezug auf die Bewertungsklassen des Ausgleichsraumes | 80 |
| Abbildung 3.24: Signatur für Grünflächen mit Sonderfunktionen in der Planungshinweiskarte | 80 |
| Abbildung 3.25: Ausschnitt der PHK bei Freiburg mit Kennzeichnung der Wälder (links, blaue Bäume) und bei Stuttgart mit Kennzeichnung der siedlungsnahen Grünflächen mit Entlastungsfunktion (rechts, blaue Rauten) | 81 |
| Abbildung 3.26: Signaturen der unmittelbaren Funktionszusammenhänge im Ausgleichs-Wirkungsraumgefüge | 81 |
| Abbildung 3.27: Signaturen der Regionalen Kaltluftströmungssysteme in der Planungshinweiskarte | 82 |
| Abbildung 3.28: Ausschnitt der PHK bei Ulm mit Hervorhebung der regionalen Kaltluftströmungssysteme (grüne Schraffur) und der Fließrichtung der zugehörigen Trajektorien (graue Pfeile) | 82 |
| Abbildung 3.29: Signatur der Luftqualität in der Planungshinweiskarte | 83 |
| Abbildung 3.30: Ausschnitt der PHK bei Offenburg mit Hervorhebung der hohen verkehrsbedingten Zusatzbelastung (schwarze umrandete Schraffur) 83 | |

5.2 Tabellen

| | |
|--|----|
| Tabelle 1.1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden [nach VDI 2022] | 15 |
| Tabelle 1.2: Zukünftige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in °C und von weiteren Klimakennwerten (Flächenmittel) für Baden-Württemberg aus Modellrechnungen für das Ensemble des Szenarios RCP 8.5 [LUBW 2020]..... | 22 |
| Tabelle 2.1: Übersicht der Modellläufe, des Deltas der Initialtemperatur sowie der zugrundeliegenden Warming Levels..... | 29 |
| Tabelle 2.2: Mesoskalige FITNAH-Nutzungsklassen | 31 |
| Tabelle 2.3: Datengrundlage Landnutzung..... | 31 |
| Tabelle 2.4: Bestimmung der urbanen Klasse durch Kombination von Gebäudeanteil und Versiegelungsgrad..... | 32 |
| Tabelle 2.5: Von FITNAH-3D zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter | 48 |
| Tabelle 2.6: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH-3D zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt..... | 49 |
| Tabelle 2.7: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH-3D zum Themenkomplex Luftqualität | 50 |
| Tabelle 2.8: Parameter des FITNAH-Temperatur-Wertebereichs, jeweils an den oberen Grenzen um + 1K erhöht und an den unteren Grenzen um -1 K erniedrigt | 50 |
| Tabelle 2.9: Summarische Statistik der Modellgüte | 52 |
| Tabelle 2.10: Beschreibung der abgeleiteten meteorologischen Kennwerte..... | 54 |
| Tabelle 2.11: Regionalmodellensembles für Baden-Württemberg, (Grün markierte Felder bezeichnen verwendete Modellkombinationen und rot markierte Felder nicht verwendete Modellkombinationen; Daten vom LUBW im Rahmen dieses Projektes bereitgestellt) | 54 |
| Tabelle 2.12: Mittlerer absoluter Fehler und Statistik der Kennwerte über alle Messstationen (n=66)..... | 58 |
| Tabelle 3.1: Abgeleitete Ausgabegrößen aus den Modellrechnungen und ihre Verwendung im Projekt unter Nennung der internen Kartennummern | 61 |
| Tabelle 3.2: Legendelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten | 63 |
| Tabelle 3.3: Einordnung der Zusatzbelastungswerten | 68 |
| Tabelle 3.4: Flächentypen der Basisgeometrie mit Angaben zu Flächenanzahl, durchschnittlicher Flächengröße und Flächensummen | 73 |
| Tabelle 3.5: Z-Grenzen der 5-stufigen Bewertung der humanbioklimatischen Situation des Wirkraums in der Bestandssituation sowie in den Szenarien +2 bis +5 K..... | 75 |
| Tabelle 3.6: Ableitungsvorschrift zur Bewertung der Ausgleichsraumbedeutung..... | 79 |
| Tabelle 3.7: Auswahl von ATKIS ARTKOMB Attributen für die Ausweisung von siedlungsna-hen Grünflächen mit Entlastungsfunktion | 80 |

6 Literatur und Quellen

- AN DER HEIDEN et al (2019): An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- ATMO-VISION (2018): Grenzüberschreitende Erhebung der Luftschadstoffemissionen. (Online: <https://atmo-vision.eu/de/grenzuberschreitende-erhebung-der-luftschadstoffemissionen-2/> zuletzt abgerufen am 09.08.2024)
- AUGTER, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst, interne Ausarbeitung unveröffentlicht.
- BASHFIELD, A. & KEIN, A. (2011): Continent-wide DEM creation for the European Union. In: 34th international symposium on remote sensing of environment. the GEOSS era: Towards operational environmental monitoring. sydney, australia. 2011. S. 10-15.
- BECK et al. (2020): Beck C., Hiete M., Martin K., Repper A., Schneider M.: Projekt Abc – Augsburg bleibt cool. Ergebnisse zu Innentemperaturmessung und Simulationen in Augsburg aus dem Sommer 2019.
- BUNDESREGIERUNG (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- BUNDESREGIERUNG (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV)
- CAISSIE, D. (2006): The thermal regime of rivers. A review. In: Freshwater Biol 51 (8), S. 1389–1406. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x.
- CHEN et al. (2014): Chen, Y. C., Tan, C. H., Wei, C., & Su, Z. W.: Cooling effect of rivers on metropolitan Taipei using remote sensing. In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 11(2), 1195-1210. <https://doi.org/10.3390/ijerph110201195>.
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell. (Online: https://www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/textbausteine/grundlagen/intro_grundlagen.html, zuletzt abgerufen am 16.09.2024)
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020A): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. (ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/)
- DWD (2020B): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2022): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/)
- DWD (2024A): Klimavorhersagen der nächsten Wochen bis Jahre. (https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvhs_de/0_main/start_main.html)
- DWD (2024B): Die städtische Wärmeinsel. (https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html)
- EU (2008): Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (Online: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>, zuletzt abgerufen am 25.07.2024)
- FANGER, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- FÜRST, D. UND SCHOLLES, F. (HG.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umwelplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- GAEDE, M. UND HÄRTLING, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- GEO-NET (2024): Projektphasen und Arbeitsschritte
- GIORGI F, Jones C, Asrar G (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. WMO Bull 175–183
- GROSS, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. Boundary-Layer Meteorol. 38, 315-337.
- GROSS, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.
- GROSS, G.; FREY, T.; TRUTE, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, DEWI Magazin Nr. 20.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002) DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- GROSS, G. (2012): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- GROSS, G. (2012A): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- GROSS, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, Boundary-Layer Meteorol (2014) 150:319-326.
- HÖPPE, P.; H.MAYER: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1987) 1, S. 22–29.
- HÜBNER, H., BÜLOW, K., FOOKEN, C. et al. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. 76 S. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO (1989): ISO 7243: Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg Environ Change 14, 563–578. (<https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>)
- JENDRITZKY (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf

- KUTTLER, W. (2009): *Klimatologie*. Paderborn, 260 S.
- KUTTLER, W. (2013): *Klimatologie*. S. 306
- KRAUSER ET AL. (2018): Krauser, H., Feigenwinter, C., Wicki, A.: Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker. *bz* Basel. p. 1. Liestal.
- LFU (2020A): Landesweite Schutzgutkarte Klima/ Luft für die Landschaftsrahmenplanung. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LFU (2020B): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftreihe: Umweltspezial.
- LGL (Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung) (2022): Digitale Geländemodelle, URL: <https://www.lgl-bw.de/Produkte/3D-Produkte/Digitale-Gelaendemodelle/>, Eingesehen am: 10.08.2022.
- LGL (Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung) (2023): Laserscandaten, URL: <https://www.lgl-bw.de/Produkte/3D-Produkte/Laserscandaten/>, Eingesehen am: 05.07.2023.
- LUBW 2020: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: Monitoringbericht 2020 zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel in Baden-Württemberg, 2020.
- LUBW 2021: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: Klimazukunft Baden-Württemberg - Was uns ohne effektiven Klimaschutz erwartet!, 2021
- LUBW 2023: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: Wieder ein Rekordjahr – So sonnig und warm wie noch nie. Eine klimatische Einordnung des Jahres 2022 für Baden-Württemberg, 2023
- LUBW 2024: Städtebauliche Klimafibel Online. 6.2.4 Günstige Siedlungs- und Bebauungsformen. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=73&p2=6.2.4>
- LAUREANT ET AL (2018): Laurent, J.G.C., Williams A., Oulhote Y., Zanobetti A., Allen J.G., Springer J.D.: Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: *PLOS Medicine*.
- LOZÀN, J.L. & MAIER, M.A. (2008): Warnsignale Klima. Gesundheitsrisiken. Hamburg: Wiss. Auswertungen.
- MARONGA ET AL. (2020): Overview of the PALM model system 6.0, *GEOSCI. MODEL DEV.*, 13, 1335-1372
- MAYER, H.; BECKRÖGE, W. ; MATZARAKIS, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-report* 5/94, S. 265-268.
- MOORE, G. E. (1903): *Principia Ethica*. Ditzingen: REKLAM.
- MOSIMANN ET AL. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- OKE, T. R. (2006): Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, 47 S.
- OKE (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- R CORE TEAM (2022): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- ReKliEs-DE (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland): <https://reklies.hlnug.de/home/>
- SANTHOLZ & SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. *UNU Workingpaper*.
- SCHÄDLER, G.; LOHMEYER, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. *Me-teorologische Zeitschrift*. 3, 167-171.
- SCHLÜNZEN, K. H. et al. (2018): Stadtklima in Hamburg. In: von Storch H., Meinke I., Claußen M. (eds) *Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-662-55379-4_3
- SIEVERS, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. *Berichte des DWD* 227, Offenbach.
- SPEKTRUM (2001): moving window. *Spektrum Lexikon der Geographie*. Online: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/moving-window/5261>
- STACHOWIAK, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- UBA (2005): *GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag*. Umweltbundesamt.
- UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>)
- URBAN H. & STEININGER K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: *Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*. Basel: 301–322.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- THIPKHAM, P. (2018): Image Processing Class #4 – Filters. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/image-processing-class-egbc443-4-filters-aa1037676130>
- VDI (2003): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.5: UMWELTMETEOROLOGIE. Lokale Kaltluft.
- VDI (2008) VDI-RICHTLINIE 3785, BL.1: UMWELTMETEOROLOGIE. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008A): VDI-Richtlinie 3785, Bl.2, Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.
- VDI (2015): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.1: UMWELTMETEOROLOGIE. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI (2017): VDI-Richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.

- VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4, Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.
- VDI (2022): VDI-Richtlinie 3787, Bl.2 Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.
- WILMS, F. (2006): Szenariotechnik. Vom Umgang mit der Zukunft, Haupt Verlag.
- WINKLMAYER ET AL (2022): WINKLMAYR C, MUTHERS S, NIEMANN H, MÜCKE HG, AN DER HEIDEN M: Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. Dtsch Arztebl Int 2022; 119: 451–7. DOI: 10.3238/ARZTEBL.M2022.0202

