

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Zielkonflikt Klimakomfort – Nachverdichtung: Entwicklung von Lösungsstrategien zur klimawandelangepassten Siedlungsentwicklung der Stadt Singen

von GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Zusammenarbeit mit
DUH Umweltschutz-Service GmbH und ÖKOPLANA

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

September 2018

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	<p>GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5a 30161 Hannover Tel. (0511) 3887200 www.geo-net.de</p>  <p>in Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Groß Anerkannt beratender Meteorologe (DMG), Öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen und Kleinklima der IHK Hannover- Hildesheim</p> <p>DUH Umweltschutz-Service GmbH Fritz-Reichle-Ring 4 78315 Radolfzell www.duh.de</p>  <p>ÖKOPLANA Seckenheimer Hauptstraße 98 68239 Mannheim Tel.: 0621 - 474626 www.oekoplana.de</p> 
Bezug	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U83-W03-N39
STAND	September 2018, Internetausgabe Januar 2019
<p>Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.</p> <p>Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.</p>	

Inhaltsverzeichnis

GLOSSAR	V
1 ZIELE UND ANALYSEANSATZ	1
2 FACHLICHE GRUNDLAGEN	2
2.1 Der Stadtklimaeffekt	2
2.2 Untersuchungsgebiet	3
2.3 Meteorologische Messkampagne im Stadtgebiet Singen	4
2.4 Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	20
3 EVALUATION DES PROJEKTBEGLEITENDEN FACHBEIRATES	21
3.1 Hintergrund und Ziele	21
3.2 Teilnehmende	21
3.3 Diskussionsverlauf und Ergebnisse der Workshops	21
4 METHODE DER MODELLGESTÜTZTEN STADTKLIMAANALYSE	25
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	25
4.2 Modelleingangsdaten	26
4.3 Meteorologische Rahmenbedingungen	28
4.4 Methodik Zukunftrechnung (Stadtklima im Jahr 2050)	30
5 MODELLERGEBNISSE AUSGEWÄHLTER PARAMETER	33
5.1 Modellergebnisse Status Quo	33
5.2 Modellergebnisse Zukunftsrechnung	41
6 PLANUNGSKARTEN	44
6.1 KlimaanalyseKarte Status quo	44
6.2 Klimaanalysekarte 2050 inkl. FNP-Potentialflächenbewertung	48
6.3 Planungshinweiskarte Nacht	52
6.4 Planungshinweiskarte Tag	60
6.5 Empfehlungen aus den Ergebnissen der Planungshinweiskarten	66

7	DETAILUNTERSUCHUNG BRUDERHOF	68
7.1	Aufgabenstellung	68
7.2	Methodik und Modelleingangsdaten	69
7.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	71
7.4	Fazit	78
8	MODELLGEBIET KNÖPFLESWIES	84
8.1	Planungsgebiet und städtebauliche Vorgaben	84
8.2	Ergebnisse der Klimaaanalyse	86
8.3	Stadtklimatische Vorgaben	86
9	ZUSAMMENFASSUNG UND ÜBERTRAGBARKEIT	90
	QUELLENVERZEICHNIS	93
	ANHANG	95

Glossar

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

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch großräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. Kaltluftabflüsse und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

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

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

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

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

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* $> 92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

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

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius ($^{\circ}C$) interpretiert werden.

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

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

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

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

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Straße).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.

1 Ziele und Analyseansatz

Die Stadt Singen am Hohentwiel (im Folgenden: Singen) gilt als überdurchschnittlich stark wachsende Mittelstadt (BBSR 2018) und steht vor der Herausforderung, Wohnraum schaffen zu müssen. Neue Gebäude sollen jedoch möglichst nicht dazu beitragen, dass sich die Stadt weiter aufheizt oder sich deren Durchlüftung bzw. allgemein die klimatische Situation der Bevölkerung verschlechtert.

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung (vgl. Kap. 2.4) und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung bzw. Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

Die vorliegende Stadtklimaanalyse erarbeitet diese flächenbezogenen Fachinformationen für Singen. Neben der Untersuchung gesamtstädtischer Zusammenhänge liegt dabei ein Schwerpunkt auf den klimatischen Auswirkungen von Nachverdichtung im Stadtgebiet und es wird exemplarisch anhand von Modellgebieten gezeigt, welche Maßnahmen zur Anpassung bestehen. Die Analyse erfolgt nicht nur auf zeitlicher Ebene des Status quo, sondern es werden zusätzlich räumlich konkret die Folgen des Klimawandels auf das Singener Stadtklima untersucht (Bezugsjahr 2050). Die Notwendigkeit dieser lokalen Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels ergibt sich aus dem prognostizierten Trend eines sich auch zukünftig fortsetzenden Temperaturanstiegs in Baden-Württemberg (LUBW 2016).

Zur Validierung der Modellergebnisse wird eine projektbegleitende klimatologische Messkampagne durchgeführt. Außerdem soll ein regelmäßig tagender Projektbeirat aus Vertretern von Wissenschaft und Praxis für die Berücksichtigung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse und die Sicherstellung von Wirksamkeit bzw. Praxistauglichkeit der entwickelten Strategien und Instrumente sorgen. Damit wird gewährleistet, dass die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse samt ihrer Planungskarten und Maßnahmenempfehlungen als Grundlage für die künftige Stadtplanung und Entscheidungshilfe für den Gemeinderat dienen können.

Unter dem Titel „Zielkonflikt Klimakomfort – Nachverdichtung: Entwicklung von Lösungsstrategien zur klimawandelangepassten Siedlungsentwicklung der Stadt Singen“ wird das Projekt im Rahmen des KLIMOPASS-Programms vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert. KLIMOPASS steht für „Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg“ und soll Forschungsvorhaben und Modellprojekte fördern, die die Auswirkungen des Klimawandels untersuchen und geeignete Anpassungsmaßnahmen definieren bzw. in Pilotprojekten beispielhaft umsetzen.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 DER STADTKLIMAEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als *Städtische Wärmeinsel* bezeichnet, die auch in Mittelstädten zu beobachten ist (vgl. Kap. 5.1.1).

Solch belastenden Situationen entstehen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt (autochthone Wetterlagen). Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die Ausgleichsströmungen hervorrufen (Flurwinde; Abb. 1).

Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen in Form eines bodennahen Zuströmens von Luft aus dem Umland über gering bebauete Flächen hin zum Stadtgebiet auf. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, sodass die Ausgleichsströmungen am Tage weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren als in der Nacht. Während der Tagsituation führen sie aufgrund eines meist ähnlichen Temperaturniveaus im Umland nicht zum Abbau von Wärmebelastungen in den Siedlungsflächen, tragen aber zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht und damit zur Verdünnung von Luftschadstoffen bei.

In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen dagegen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld. Während der nächtlichen Abkühlung „fließt“ kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und ggf. innerstädtischen Grün- und Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der bodennahe Zustrom mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse auftreten, insb. über sogenannten Kaltluftleitbahnen.

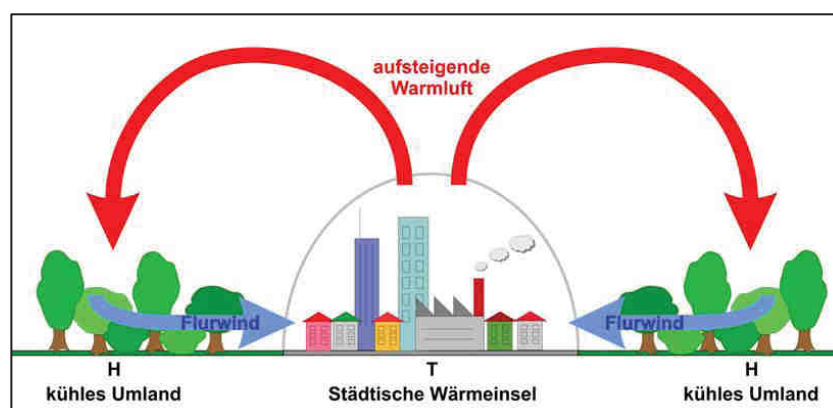


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme, kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo¹, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der starken Versiegelung und geringeren Wasserverfügbarkeit ist der Energieverbrauch zur Verdunstung herabgesetzt, sodass der latente Wärmestrom in der Stadt geringer, der fühlbare Wärmetransport dagegen höher ausfällt. Beide Aspekte haben höhere Temperaturen des Stadtgebiets im Vergleich zum Umland zur Folge (Schönwiese 2008), sodass deren Bevölkerung einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

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

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

2.2 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Stadtgebiet Singens erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 8,9 km in Ost-West- bzw. 13,4 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von knapp 62 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von 143 km² auf (10,5 km x 13,6 km), um die im Umland gelegenen Strukturen mit Einfluss auf das Stadtklima zu erfassen. Die Stadt Singen teilt sich auf in die *Kernstadt* sowie die sechs weiteren Stadtteile *Beuren an der Aach*, *Bohlingen*, *Friedingen*, *Hausen an der Aach*, *Schlatt unter Krähen* und *Überlingen am Ried*.

Singen liegt innerhalb des voralpinen Hügel- und Moorlandes im Naturraum *Hegau*, nordwestlich schließt die *Hegaualb* an (LUBW 2010). Die *Kernstadt* weist ein relativ konstantes Höhengniveau auf, das sich von ca. 425 m über Normalhöhennull (NHN) im südöstlichen bis ca. 450 m NHN im nordwestlichen Teil erstreckt (Abb. 2). Im Stadtgebiet gibt es mehrere Erhebungen wie die Ausläufer der *Schiener Berge* südlich *Bohlingen* (bis über 600 m NHN), den *Galgenberg* nördlich *Bohlingen* (501 m NHN) oder den *Friedinger Schlossberg* (546 m NHN), doch am markantesten – auch in Bezug auf seine Bedeutung für das Stadtklima – ist der westlich an die *Kernstadt* anschließende *Hohentwiel* (690 m NHN; jeweils LUBW 2018). Die Höhenzüge der *Hegaualb* reichen bis über 800 m NHN und beeinflussen ebenfalls die klimatischen Bedingungen in Singen (vgl. Kap. 4.3.1).

Die Entfernung des Singener Stadtzentrums zum Untersee als Teil des *Bodensees* beträgt ca. 8 km Luftlinie (Bahnhof Singen bis *Zeller See*).

¹ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

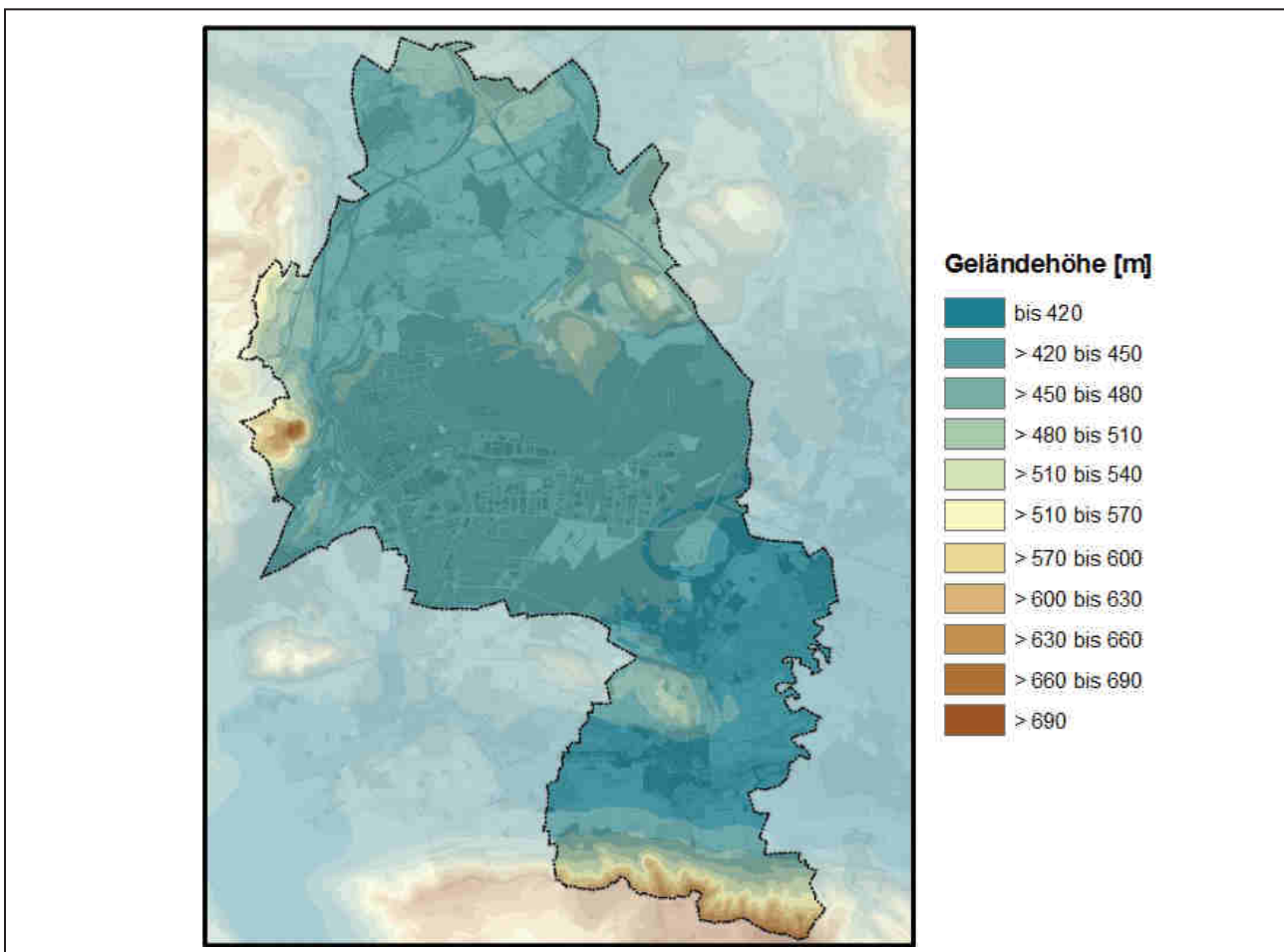


Abb. 2: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (DGM 10 m; Details siehe Abb. A 4 im Anhang)

2.3 METEOROLOGISCHE MESSKAMPAGNE IM STADTGEBIET SINGEN

2.3.1 MESSMETHODIK

Wie in Kap. 1 bereits angeführt, wurden zur Ergebnisvalidierung der numerischen Modellrechnungen in den Jahren 2017 und 2018 ortsspezifische Klimamessungen durchgeführt. Hierbei fanden nachfolgende Messverfahren Anwendung:

- × In den Zeiträumen 31.07.-31.10.2017 und 04.04.-30.07.2018 (Sommer, Herbst, Frühling) wurden an jeweils zwei temporären **Klimamessstationen** im Stadtgebiet von Singen kontinuierlich Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit gemessen (Tab. 1). Die Station Singen-Zentrum konnte im Jahr 2018 aufgrund von örtlichen Bauarbeiten nicht mehr in Betrieb genommen werden. Der zweite Messstandort wurde daher 2018 in der Reichenaustraße eingerichtet.
- × Mit Hilfe von profilhaft angelegten **Lufttemperaturmessfahrten** wurden in einer sommerlichen Strahlungsnacht die ortsspezifischen nächtlichen Lufttemperaturverteilungen im Singener Stadtgebiet erfasst.
- × Mittels **Rauchschwadenbeobachtungen** wurden in zwei Strahlungsnächten an ausgewählten Messstandorten bodennahe Kaltluftbewegungen identifiziert.

Die temporären Messstationen wurden mit Datenloggern (DALOS 515) der Firma *F & C Forschungstechnik und Computersysteme GmbH* ausgestattet. Die Messung der Lufttemperatur erfolgte über einen Pt100-Messwiderstand. Die Windmessungen wurden mit einem Schalenkreuzanemometer durchgeführt.

Tab. 1: Übersicht über die Messstationen (für deren Lage im Stadtgebiet siehe Abb. 3).

	Station 1 Singen-West	Station 2 Singen-Zentrum	Station 3 Singen-Nord
Position	Parkplatz Landesgartenschau südlich der Schaffhauser Straße (B 34)	Herz-Jesu-Platz südlich der Ekkehardstraße	Reichenaustraße nördlich der Kleingartenanlage Knöpfleswies
Rechtswert²	3487089	3488231	3488299
Hochwert²	5291340	5291628	5292510
Geländehöhe (über NHN)	430 m	429 m	436 m
Höhe der Messstationen (über Grund)	Windgeber: 4,0 m Lufttemperatur: 2,5 m	Windgeber: 4,0 m Lufttemperatur: 2,5 m	Windgeber: 4,0 m Lufttemperatur: 2,5 m

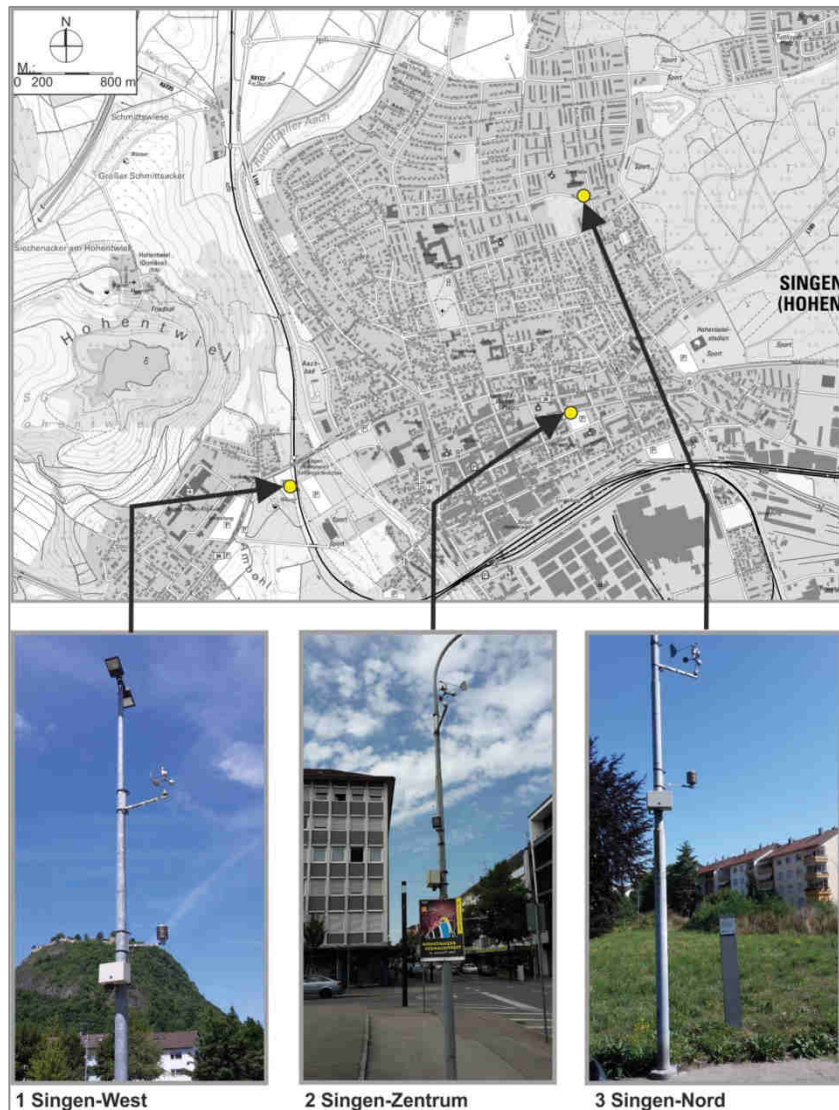


Abb. 3: Lage der temporären Klimamessstationen im Singener Stadtgebiet (Grundlagenkarte bereitgestellt von: Stadt Singen. Fotoaufnahmen: ÖKOPLANA 2017/2018)

² Gauß-Krüger Zone 3

Mittels profilhaft angelegten Messfahrten in einer windschwachen, sommerlichen Strahlungsnacht (30.06.-01.07.2018) wurden die ortsspezifischen Lufttemperaturverhältnisse in unterschiedlichen Relieflagen und Flächennutzungsstrukturen erfasst und geben damit Aufschluss über die städtische Wärmeinselintensität und die thermische Gunstwirkung lokaler Kaltluftbewegungen. Zugleich dienen die Ergebnisse zur Validierung der numerischen Modellrechnungen.

Die Messfahrten wurden mit zwei Messfahrzeugen durchgeführt, die mit einem ventilierten Psychrometer der Firma *Ahlborn* ausgestattet waren (vgl. Abb. A 1 im Anhang). Entlang festgelegter Routen wurden kontinuierlich die Lufttemperaturwerte aufgezeichnet. Die Korrektur der Messwerte auf einen einheitlichen Zeitpunkt erfolgte mit Hilfe der Messstationsdaten.

Zur Erfassung bodennaher Kaltluftbewegungen wurden in zwei sommerlichen Strahlungs Nächten Windmessungen mittels Rauchschwadenbeobachtungen durchgeführt (30.06.-01.07. und 29.-30.07.2018). Ihre Ausbreitung zeigt die bodennahe Windrichtung. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte zeitgleich mit einem hochempfindlichen Hitzdrahtanemometer (vgl. Abb. A 1).

2.3.2 ERGEBNISS DER MESSKAMPAGNE 2017/2018

2.3.2.1 STATIONÄRE WINDMESSUNGEN

In Singen herrschen im Allgemeinen südwestliche und nördliche bis nordöstliche Windrichtungen vor (vgl. Abb. A 2), wobei mittlere Windgeschwindigkeiten von ca. $2,0 - 2,8 \text{ m s}^{-1}$ in 10 m über Grund (ü.Gr.) zu bestimmen sind. Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten zeigen sich in dicht bebauten Stadtstrukturen (z.B. Singener Innenstadt), während in der Höhenlage des *Hohentwiels* die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten auftreten.

Zur Erfassung der lokalen Windverhältnisse in ausgewählten Teilräumen des Singener Stadtgebiets wurden in den Messzeiträumen 31.07.-31.10.2017 und 03.04.-30.07.2018 (wärmere Jahreszeiten) an jeweils zwei Messstandorten die Klimaparameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur erfasst. Die Windmessungen erfolgten in Messhöhen von ca. 4 m ü.Gr., da insbesondere die Belüftungsintensitäten in den bodennächsten Luftschichten von bioklimatischem Interesse sind. Die Station Singen-Zentrum konnte im Jahr 2018 nicht mehr in Betrieb genommen werden, da am *Herz-Jesu-Platz* eine Baustelle eingerichtet wurde. Stattdessen wurde eine Messstation im Bereich *Knöpfleswies* in Betrieb genommen (Singen-Nord).

Wird bei den im Jahr 2017 erfassten Winddaten zunächst das **Datenkollektiv „alle Tage“** betrachtet (Abb. 4), so kann am Messstandort Singen-West südlich der *Schaffhauser Straße* bilanziert werden, dass im 3-monatigen Messzeitraum großwetterlagenbedingt ca. 45 % der am Tag gemessenen Windrichtungen in den westsüdwestlichen bis nordnordwestlichen Sektoren liegen. Die mittleren Geschwindigkeiten betragen dabei ca. $1,1 \text{ m s}^{-1}$. Als Sekundärmaximum treten mit einer Häufigkeit von ca. 34 % ostnordöstliche bis ostsüdöstliche Luftströmungen mit mittleren Geschwindigkeiten von $0,9 \text{ m s}^{-1}$ auf. Das Tagmittel der Windgeschwindigkeit liegt bei $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

An der Station Singen-Zentrum an der *Ekkehardstraße* überwiegen am Tag mit ca. 47 % südsüdwestliche bis westliche Richtungen, wobei die mittlere Windgeschwindigkeit $1,4 \text{ m s}^{-1}$ beträgt. Ost- bis Südsüdostwinde zeigen eine Häufigkeit von ca. 39 % der Tagstunden. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt am Tag ca. $1,1 \text{ m s}^{-1}$. Die gegenüber dem Stationsstandort Singen-West etwas höhere Windgeschwindigkeit ist auf Kanalisierungseffekte entlang der *Ekkehardstraße* zurückzuführen.

In der Nacht zeigt sich an beiden Messstandorten Singen-West und Singen-Zentrum eine deutliche Zunahme westsüdwestlicher bis nordnordwestlicher Windrichtungen. Diese ist auf Kaltluftbewegungen über den Hängen des *Hohentwiels* und entlang der *Radolfzeller Aach* zurückzuführen, die auch im Datenkollektiv „alle Tage“ hervortreten. Die Kaltluftströmungen über den Talzug der *Radolfzeller Aach* zeigen somit auch in der Singener Innenstadt noch eine nachweisbare Wirkung.

Im Datenkollektiv „alle Tage“ im Jahr 2018 tritt an der Station Singen-West der tagesperiodische Windrichtungswechsel noch deutlicher hervor (Abb. 5). Die tagsüber großwetterlagenbedingt vorherrschenden Winde aus östlichen Richtungssektoren treten in den Nachtstunden zugunsten von Nordwestwinden deutlich zurück. Im Bereich des Stationsstandortes wirken Hangabwinde über den Hohentwiel und Kaltluftabflüsse entlang der *Radolfzeller Aach* ein, was die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulationen bestätigt (vgl. Kap. 5.1.2).

Am Messstandort Singen-Nord an der Reichenausstraße machen sich in den Nachtstunden nördliche bis nordöstliche Kaltluftbewegungen bemerkbar. Sie bestimmen mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,4 - 0,8 m s⁻¹ das örtliche Luftaustauschgeschehen. Auch dieser Effekt wird von den durchgeführten Strömungssimulationen sehr gut wiedergegeben.

Im Verlauf von lokalklimatisch besonders relevanten windschwachen **Strahlungstagen** (siehe Abb. 6 und Abb. 7), die durch einen ausgeprägten Temperaturtagesgang und geringe Windgeschwindigkeiten (in den Nachtstunden im Mittel unter 2,0 m s⁻¹) gekennzeichnet sind, wird das nächtliche Strömungsgeschehen vermehrt von Lokal- und Regionalströmungen begrenzter Reichweite bestimmt, deren Existenz der Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen zu verdanken ist. Im Messzeitraum 31.07.-31.10.2017 traten Strahlungstage mit einer Häufigkeit von 25 % der Tage auf. Im Messzeitraum 03.04.-30.07.2018 betrug die Häufigkeit 18 % der Tage.

Den Richtungsverteilungen und Windgeschwindigkeitsmitteln an den Stationen Singen-West und Singen-Zentrum ist zu entnehmen, dass im Messzeitraum 31.07.-31.10.2017 tagsüber die vorherrschenden Gradientwinde aus westsüdwestlichen bis nordnordwestlichen sowie aus ostnordöstlichen bis südsüdöstlichen Richtungen das ortsspezifische Ventilationsgeschehen bestimmen. Die mittleren Windgeschwindigkeiten betragen am Tag ca. 0,8 m s⁻¹ (Station Singen-West) und 1,1 m s⁻¹ (Station Singen-Zentrum).

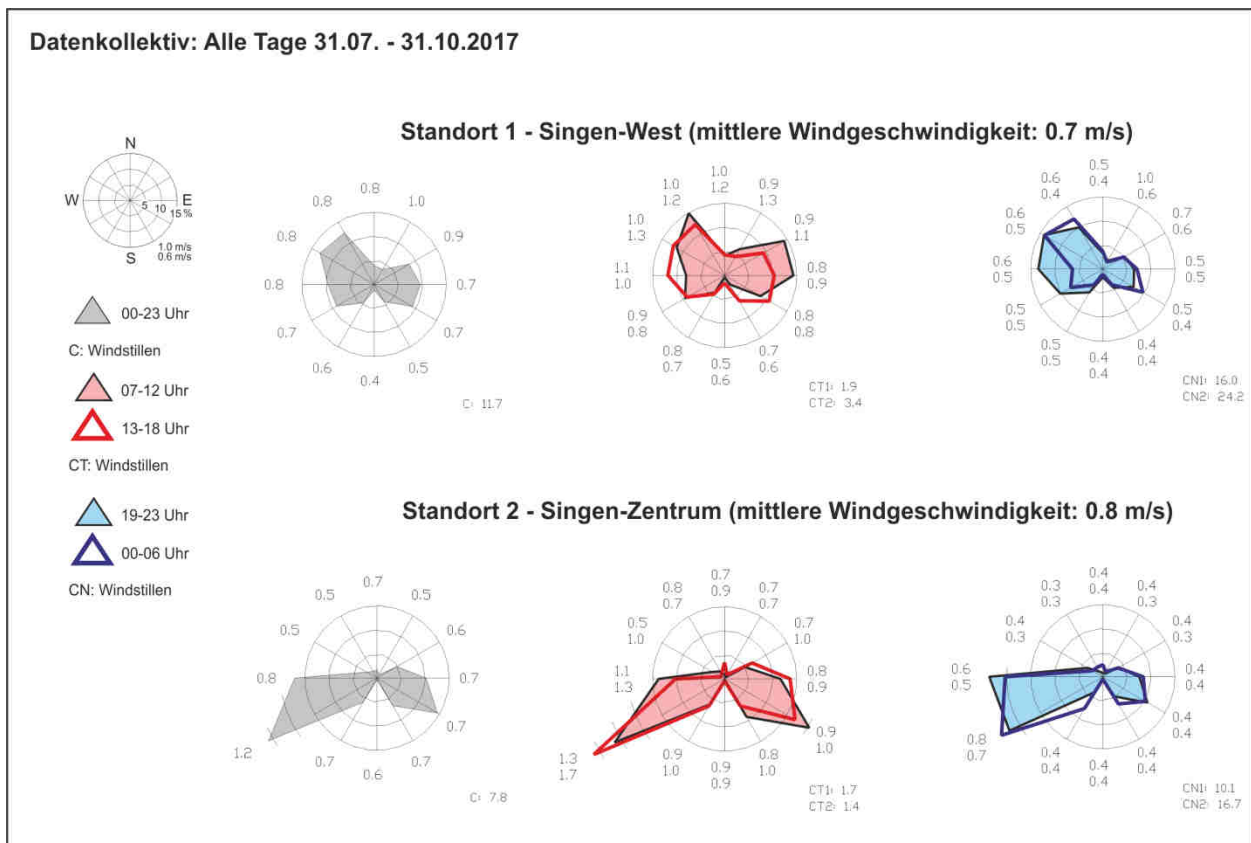


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum 31.07.-31.10.2017, Datenkollektiv „alle Tage“ (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

Datenkollektiv: Alle Tage 03.04. - 30.07.2018

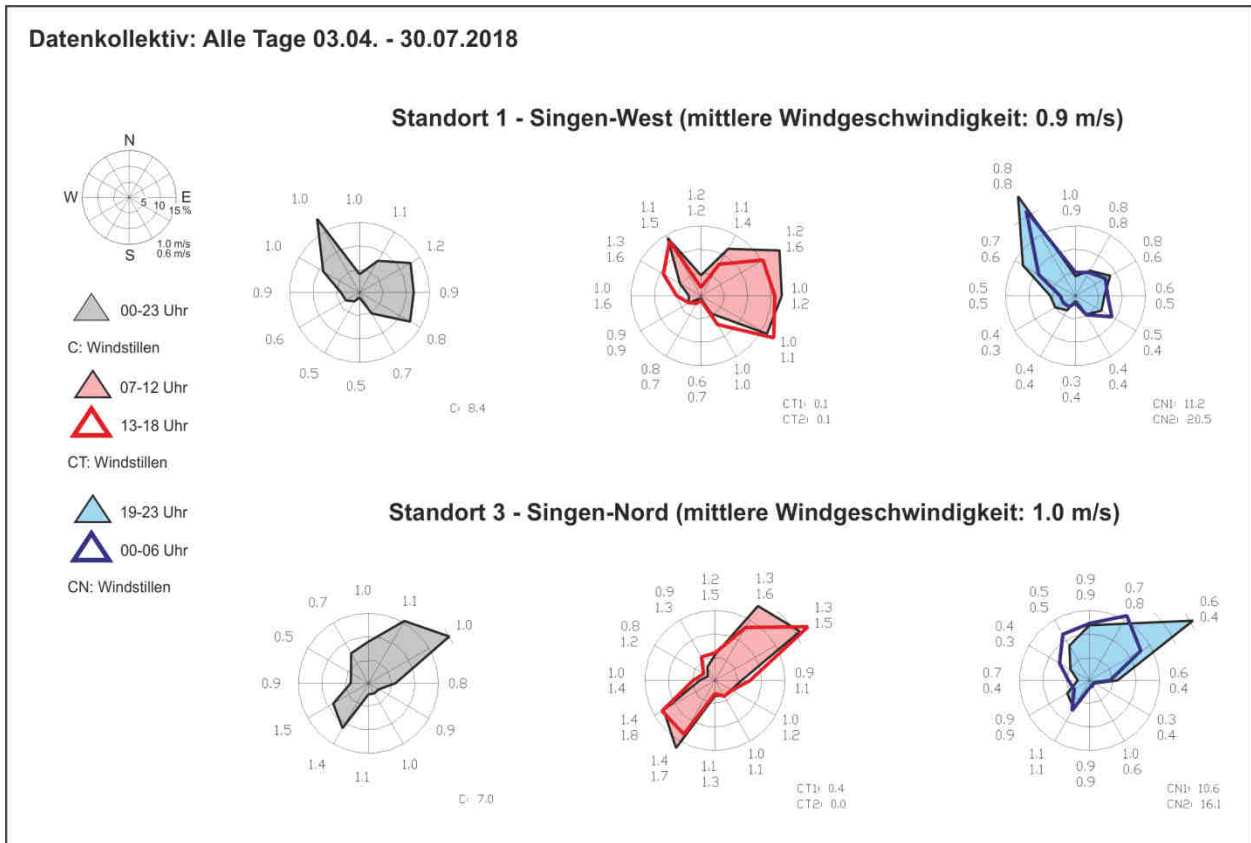


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum 03.04.-30.07.2018, Datenkollektiv „alle Tage“ (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

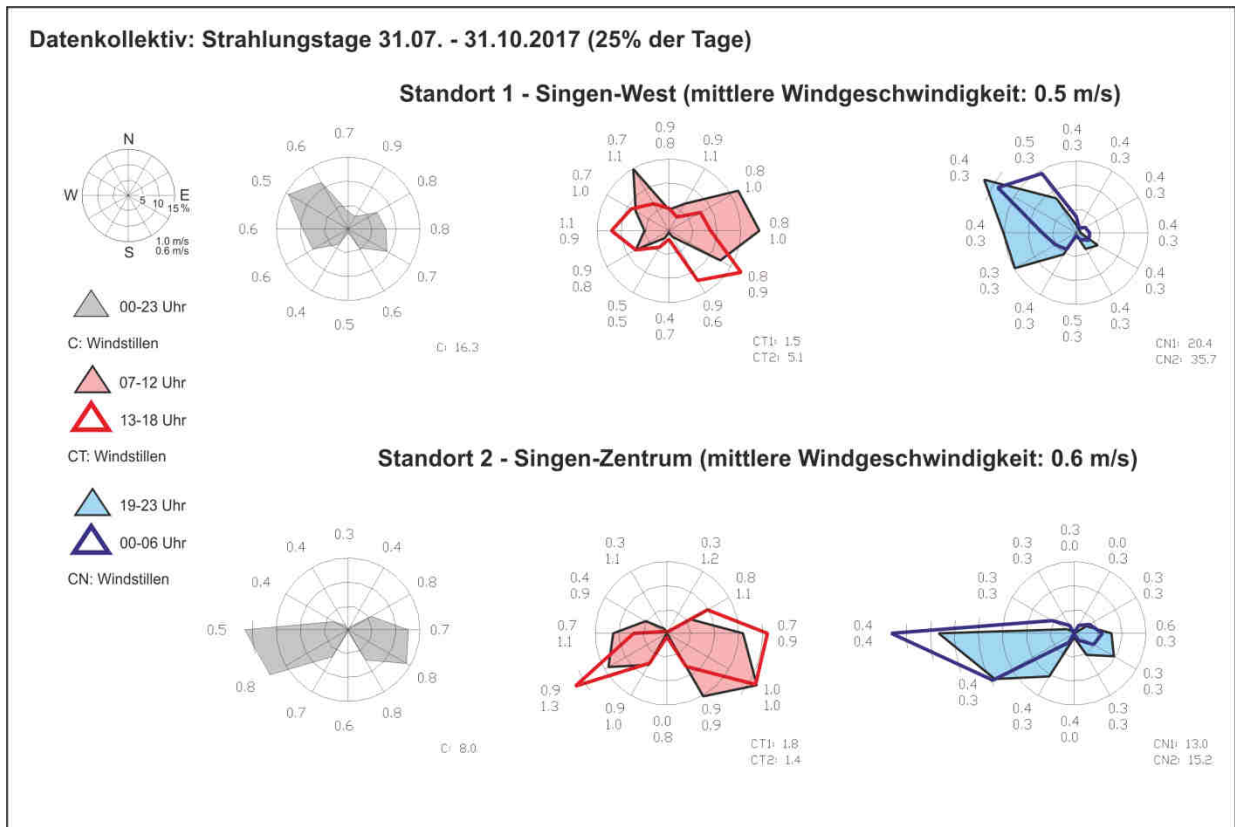


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum 31.07.-31.10.2017, Datenkollektiv „Strahlungstage“ (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

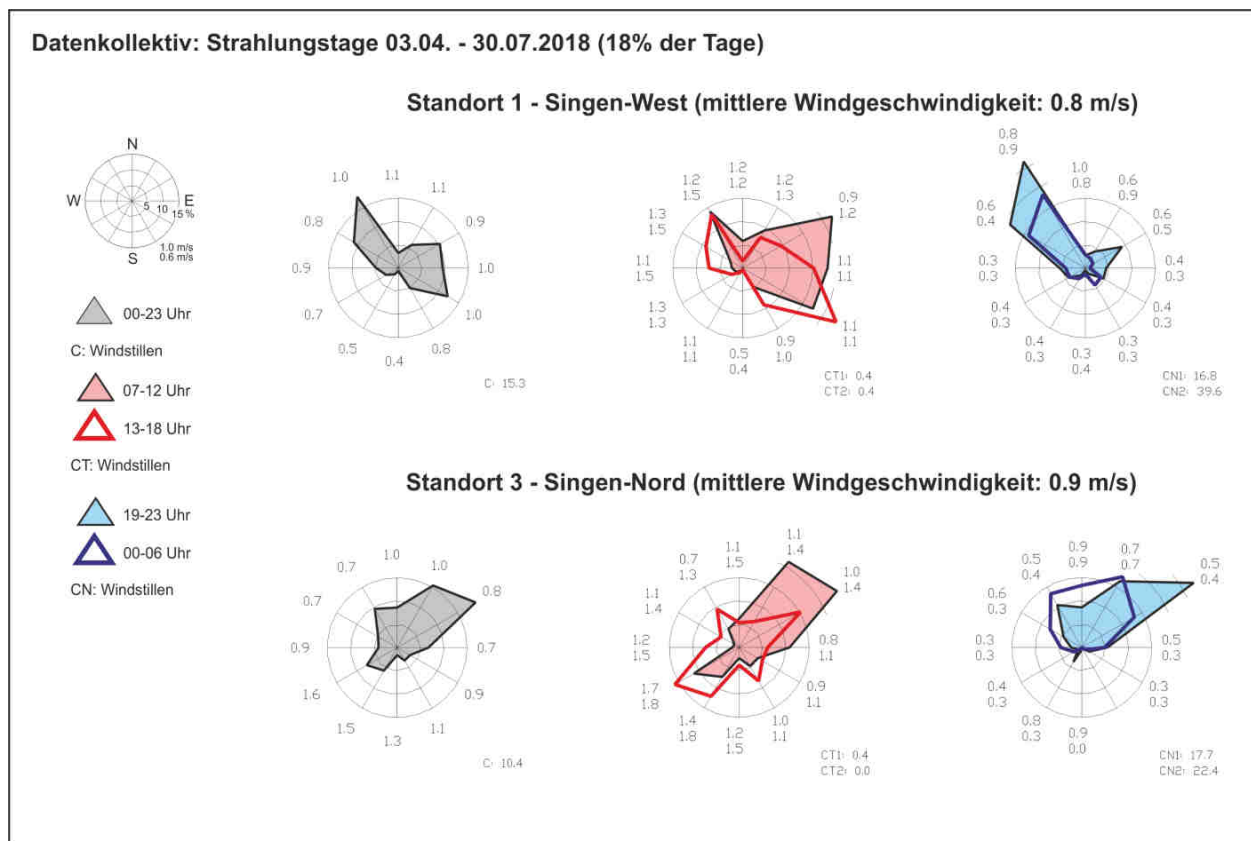


Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum 03.04.-30.07.2018, Datenkollektiv „Strahlungstage“ (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

Nach Sonnenuntergang ist an beiden Standorten ein deutlicher Rückgang der östlichen Strömungsrichtungen zugunsten von westsüdwestlichen bis nordnordwestlichen Windrichtungen zu bilanzieren. Es machen sich vermehrt Kaltluftabflüsse über die Hangzone des *Hohentwiels* (Station Singen-West) und entlang der *Radolfzeller Aach* bemerkbar, die auch das Luftaustauschgeschehen im Singener Innenstadtbereich mit beeinflussen. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten sind dabei recht gering (unter $0,5 \text{ m s}^{-1}$), was ihre Anfälligkeit gegenüber Strömungsbarrieren in Form von Hochbau und dichten Gehölzriegeln unterstreicht.

Im Messzeitraum 03.04.-30.07.2018 ist an windschwachen Strahlungstagen an der Station Singen-West wiederum eine nächtliche Häufung von Nordwestwinden zu bestimmen und bestätigt somit die Ergebnisse der Kaltluftströmungssimulationen. Am Messstandort Singen-Nord ist hingegen eine nächtliche Häufung von nordnordwestlichen bis ostnordöstlichen Windrichtungen festzustellen. Auch diese Luftaustauschbewegungen zwischen der Bebauung im Singener Norden und dem nördlichen und östlichen Freiraumgefüge stimmen mit den berechneten Windfeldern überein (vgl. Kap. 5.1.2).

2.3.2.2 THERMISCHE SITUATION UND VENTILATION BEI KLIMAÖKOLOGISCH RELEVANTEN WETTERLAGEN – VERGLEICHENDE DARSTELLUNG AUSGEWÄHLTER TAGESGÄNGE AUF BASIS DER STATIONÄREN MESSUNGEN

Das Verhalten der Lufttemperatur in Abhängigkeit von Relief, Flächennutzung und Strömungsgeschehen ist ein Indiz für die Funktion des horizontalen und vertikalen Luftaustausches. An klimaökologisch besonders relevanten Strahlungstagen (25 % bzw. 18 % der Tage in den Untersuchungszeiträumen 2017 und 2018) ergeben sich im Stadtgebiet von Singen lokalklimatische Differenzierungen. Typisch für diese Situationen ist, dass sich in der Bebauung verminderte Ventilation und durch die Aufheizung von Baukörpern und befestigten Flächen starke Erwärmung der Luft und Wärmestaus einstellen (→ Tendenz zu bioklimatischen Belastungen). Nach Sonnenuntergang kommt es hingegen zu intensiver Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen und zur Ausbildung stabiler Luftschichtung (Bodeninversionen).

Sowohl am Tage als auch verstärkt in der Nacht stellen sich in Singen flächennutzungsbedingt Lufttemperaturunterschiede ein, wobei zur Zeit der nächtlichen Abkühlungsphase zwischen der Singener Innenstadt und den vegetationsbedeckten Talauen entlang der *Radolfzeller Aach* Temperaturunterschiede bis ca. 8 K³ auftreten können (siehe Kap. 5.1.1). Die thermische Situation und das Ventilationsgeschehen an den temporären Klimamessstationen und in deren Umfeld werden vor allem durch die Flächennutzungsstruktur und die Lagesituation zu klimaökologisch wirksamen Ausgleichsräumen (= Kaltluftproduktionsflächen) bestimmt.

Zur Verdeutlichung der örtlichen Klimadifferenzierung werden nachfolgend für die temporären Stationsstandorte mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur für klimaökologisch relevante Strahlungstage dargestellt. Im Zuge einer vertiefenden Analyse erfolgt anschließend eine Diskussion ausgewählter Tagesgänge der Lufttemperatur und des Windes. Aus den Tagesgängen lässt sich das ortsspezifische Verhalten von Lufttemperatur und Strömungsgeschehen entnehmen.

2.3.2.3 MITTLERE TAGESGÄNGE DER LUFTTEMPERATUR UND DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Nachfolgend werden die mittleren Tagesgänge der Lufttemperatur für hochdruckbeeinflusste Strahlungstage in den Untersuchungszeiträumen 31.07.-31.10.2017 und 03.04.-30.07.2018 dargestellt (Abb. 8).

Die mittleren Tagesgänge dokumentieren, dass die Erwärmung der Luft nach Sonnenaufgang beginnt und ihr Maximum zwischen ca. 14:30 Uhr und 16:00 Uhr (MEZ) erreicht. Die dabei gegenüber dem Sonnenhöchststand verzögerte maximale Erwärmung ist darauf zurückzuführen, dass das Maximum der Energiebilanz der Oberfläche nach Sonnenhöchststand eintritt und sich infolgedessen die Erwärmung der dem Boden aufliegenden Luft auch noch danach fortsetzt. Bereits vor Sonnenuntergang setzt die Abkühlung ein, diese ist in der ersten Nachthälfte am stärksten. Das Temperaturminimum wird an allen Stationen kurz vor Sonnenaufgang gemessen.

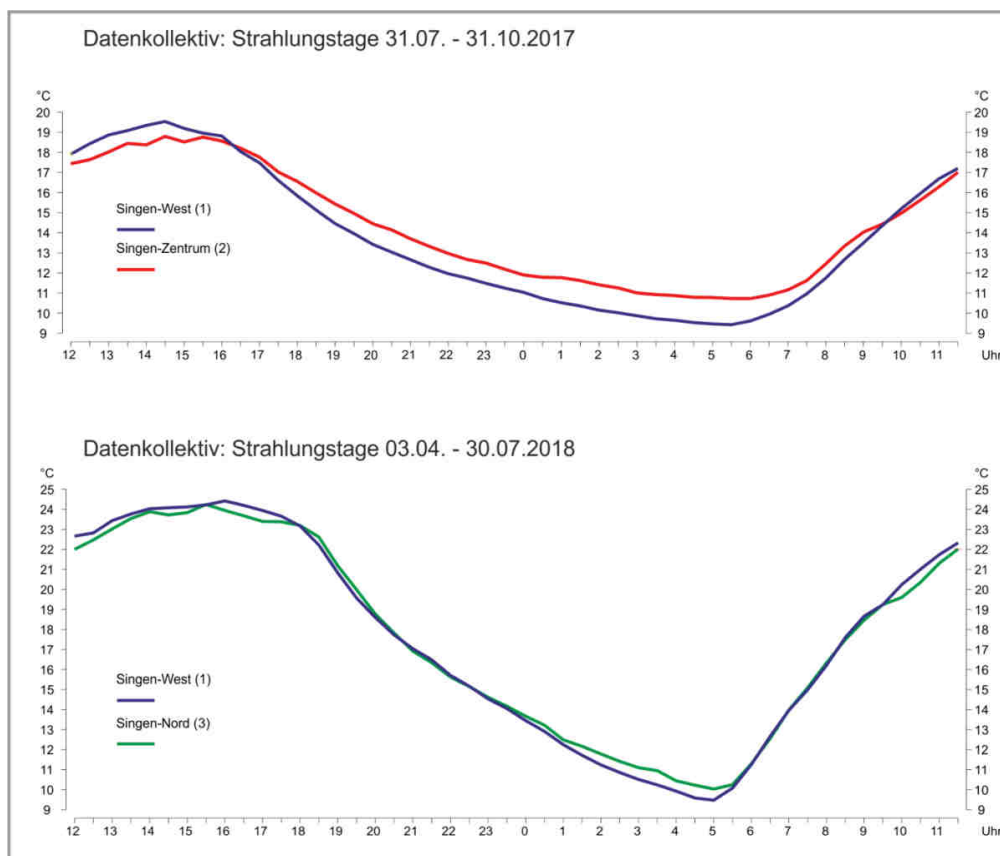


Abb. 8: Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur in den Messzeiträumen 31.07.-31.10.2017 und 03.04.- 30.07.2018, Datenkollektiv „Strahlungstage“ (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

³ Die Temperaturdifferenz in Kelvin (K) entspricht dem Wert in Grad Celsius (°C; siehe Glossar)

Im Datenkollektiv von 2017 stellen sich an den beiden Stationsstandorten Singen-West und Singen-Zentrum mittlere Lufttemperaturmaxima von ca. 19,5 °C bzw. 18,8 °C ein. Der etwas höhere Wert im Bereich des Parkplatzes (Station Singen-West) ist vor allem auf die geringeren Windgeschwindigkeiten und die Wärmeabstrahlung der parkenden Autos zurückzuführen. Die mittleren Lufttemperaturminima zeigen in Strahlungsnächten Werte von 9,4 °C (Station Singen-West) und 10,7 °C (Singen-Zentrum). Die höheren Nachttemperaturen im Stadtzentrum von Singen basieren auf der Wärmeabstrahlung der dichten Bebauung und dem fehlenden direkten Einfluss lokaler Kaltluftbewegungen. Zwischen den Stationsstandorten Singen-West und Singen-Nord ergeben sich im Messzeitraum 03.04.-30.07.2018 nur geringe mittlere Lufttemperaturunterschiede. Auch diese spiegeln die durchgeführten Lufttemperatursimulationen für den Zeitpunkt 04:00 Uhr näherungsweise wider.

**BEISPIELHAFTER TAGESGANG DER LUFTTEMPERATUR, WINDRICHTUNG UND WINDGESCHWINDIGKEIT AM 26.-27.08.2017
– HEISSER TAG ($T_{MAX} \geq 30^{\circ}C$)**

Unter dem Einfluss einer antizyklonalen Westlage Mitteleuropa (Wa) stellen sich am Tag entsprechend der großräumigen Luftdruckverteilung an den Stationsstandorten Singen-West und Singen-Zentrum zunächst schwache Winde aus östlichen Richtungssektoren ein, die mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen ca. 1,0 und 1,5 m s⁻¹ erreichen (Abb. 9). Die Lufttemperaturkurven dokumentieren, dass sich am *Herz-Jesu-Platz* (Station Singen-Zentrum) gegenüber dem Parkplatz südlich der *Schaffhauser Straße* (Station Singen-West) um ca. 0,9 K höhere Lufttemperaturmaxima einstellen. An der Station Singen-Zentrum machen sich die dichte Innenstadtbebauung und die asphaltierten Straßenzüge (*Ekkehardstraße*) und Stellplatzareale (*Herz-Jesu-Platz*) thermisch negativ bemerkbar. Sie heizen sich bei intensiver Sonneneinstrahlung stark auf (Oberflächentemperaturen bis über 40 °C). Die Tageshöchsttemperatur wird mit 30,8 °C gegen 16:00 Uhr an der Station Singen-Zentrum gemessen (= ein sogenannter *Heißer Tag*).

Zwischen 18:00 und 19:00 Uhr ist an beiden Stationsstandorten eine Drehung zu vermehrt westlichen Richtungen zu erfassen. Die bereits kurz vor Sonnenuntergang einsetzende Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen und der durch die nächtliche Ausstrahlung bedingte Aufbau einer Bodeninversion führen zunehmend zu einem von der vorherrschenden Höhenströmung entkoppelten Ventilationsgeschehen.

Am Stationsstandort Singen-West bewirken die Einflüsse von Hangkaltluft über den *Hohentwiel* und von Kaltluftbewegungen entlang der *Radolfzeller Aach* eine Intensivierung der nächtlichen Abkühlung, sodass gegen 20:30 Uhr im Vergleich zum Singener Stadtzentrum (Station Singen-Zentrum) um ca. 3,2 K niedrigere Lufttemperaturen gemessen werden. Kurz nach Sonnenaufgang werden gegen 06:00 Uhr (Zeitpunkt des Temperaturminimums) zwischen den Stationen Singen-West und Singen-Zentrum noch Lufttemperaturunterschiede von ca. 1,5 K registriert. Nach 06:00 Uhr steigen die Lufttemperaturen an den Stationsstandorten wieder an und der Wind dreht wieder zu großwetterlagenbedingten östlichen Richtungen.

**BEISPIELHAFTER TAGESGANG DER LUFTTEMPERATUR, WINDRICHTUNG UND WINDGESCHWINDIGKEIT AM 20.-21.06.2018
– HEISSER TAG ($T_{MAX} \geq 30^{\circ}C$)**

Die Tagesgänge der Lufttemperaturen für die Stationsstandorte Singen-West und Singen-Nord dokumentieren, dass sich an heißen windschwachen Sommertagen zwischen den beiden Stationsstandorten keine prägnanten Temperaturunterschiede ergeben (Abb. 10).

Am Tag werden über dem Parkplatz im Westen von Singen (Station Singen-West) um bis zu ca. 1,5 K höhere Lufttemperaturen gemessen. Ursache ist hierbei vorwiegend die vermehrte Wärmeabstrahlung der befestigten Parkierungsflächen und der abgestellten Kraftfahrzeuge.

Nach Sonnenuntergang herrscht am Stationsstandort Singen-West weitgehend Windstille ($< 0,2 \text{ m s}^{-1}$) vor. Wird die Lufttemperaturkurve betrachtet, die eine deutliche nächtliche Abkühlung nachzeichnet, ist davon auszugehen, dass schwache Kaltluftabflüsse über die Hangzone des *Hohentwiels* und entlang der *Radolfzeller Aach* die örtlichen thermischen Umgebungsbedingungen bestimmen.

Im Norden der *Kernstadt* (Station Singen-Nord) setzen nach Sonnenuntergang typischerweise nördliche bis nordöstliche Windbewegungen ein, die Kaltluft aus dem nördlichen und östlichen Freiraumgefüge heranführen (vgl. Kap. 0).

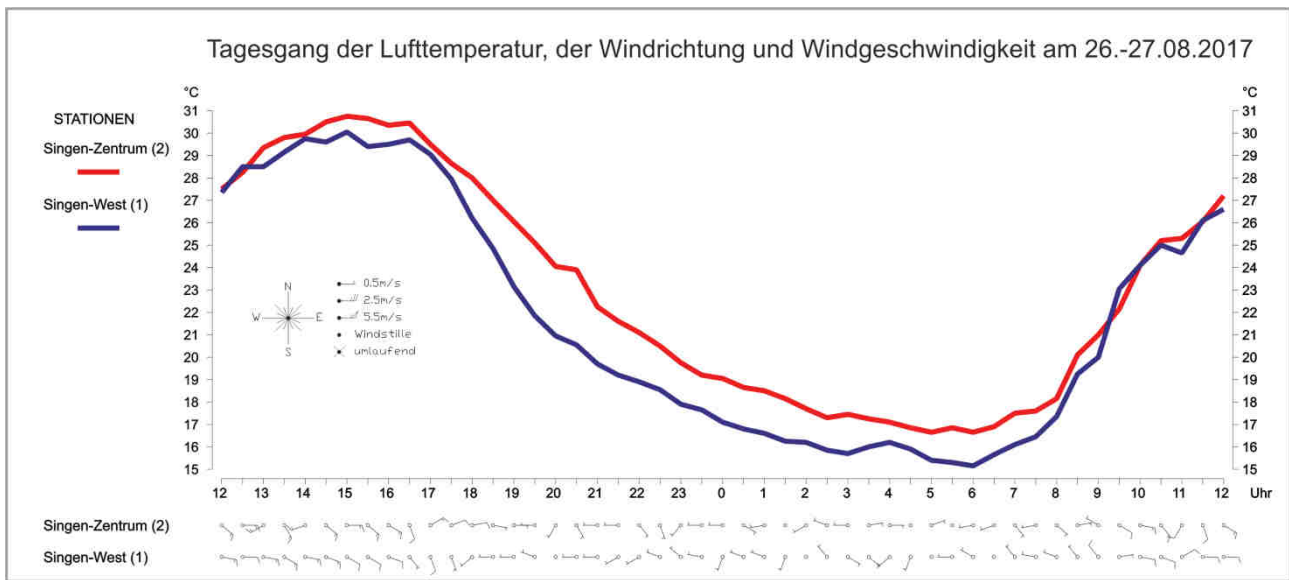


Abb. 9: Tagesgang der Lufttemperatur und des Windes⁴ am 28.-29.05.2017 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

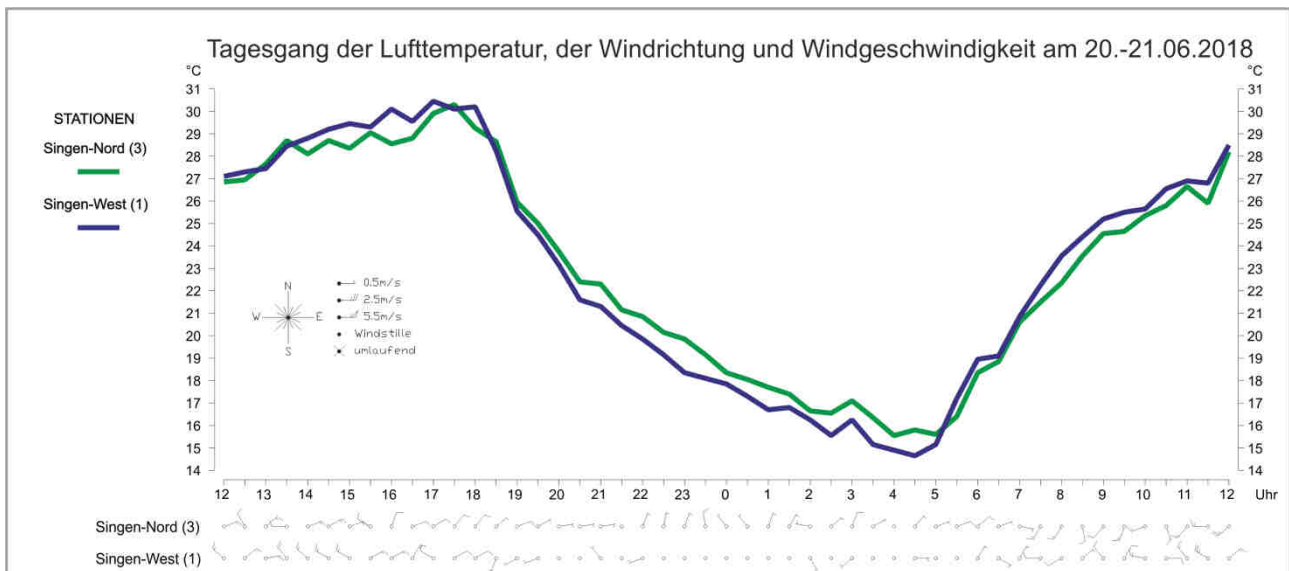


Abb. 10: Tagesgang der Lufttemperatur und des Windes am 20.-21.06.2018 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

⁴ Zeichenerklärung: Die Windfahnen weisen in die Richtung, aus welcher der Wind kommt; ganzer Teilstrich = 1.0 m/s, halber Teilstrich = 0.5 m/s.

2.3.3 ERGEBNISSE MOBILER LUFTTEMPERATURMESSUNGEN

Im Rahmen der Messkampagne 2017/2018 wurden zur Erfassung der Lufttemperaturverteilung im Singener Stadtgebiet in einer sommerlichen Strahlungsnacht an zwei Messterminen profilhaft angelegte Lufttemperaturmessfahrten durchgeführt (30.06.-01.07.2018). Dabei wurden zwei Messfahrzeuge mit einem Psychrometer der Firma *Ahlborn* ausgestattet (vgl. Abb. A 1). Die Messrouten waren derart angelegt, dass die Fahrtdauer je Fahrzeug bei ca. 1 h lag. In Parks und Kleingärten (z.B. *Knöpfleswies*) wurden die Messungen zu Fuß durchgeführt, wodurch die Fahrten kurz unterbrochen wurden.

Die Ergebnisse der Lufttemperaturmessfahrten (22:00-23:00 Uhr, 00:30-01:30 Uhr) sind mit Hilfe der Stationsdaten auf die Zeitpunkte 22:30 Uhr und 01:00 Uhr korrigiert.

Bei der Aufnahme der Lufttemperatur spielen die Wetterbedingungen eine entscheidende Rolle. Die Ausprägung flächennutzungsspezifischer, kleinräumiger Temperaturunterschiede zeigt sich am besten bei windschwachen Strahlungswetterlagen in den Nachtstunden. Der gewählte Messtermin orientierte sich daher an folgenden Vorgaben:

- * Geringe Bewölkung, d.h. intensive Ein- und Ausstrahlung,
- * Geringe Windgeschwindigkeit ($\leq 2,0 \text{ m s}^{-1}$),
- * Witterungsverlauf in den letzten sechs Stunden heiter, höchstens wechselnd bewölkt. Nachts weitgehend wolkenlos.

Wie Abb. 11 dokumentiert, herrschten während der beiden Messfahrttermine (22:30 Uhr und 01:00 Uhr) schwache Winde vor. Da es unter Hochdruckeinfluss (HNFa – Hoch über dem Nordmeer und Fennoskandien, in Mitteleuropa antizyklonal) zudem wolkenlos war, lagen gute Kaltluftbildungsverhältnisse vor. Erst nach Abschluss der Messfahrten traten ab 02:00 Uhr vermehrt Winde mit mittleren Windgeschwindigkeiten von knapp über $2,0 \text{ m s}^{-1}$ auf.

Die Messfahrtergebnisse für die Situation gegen 22:30 Uhr sind in Abb. 12 dargestellt. Die niedrigsten Lufttemperaturwerte ($17,5 - 18,0 \text{ }^\circ\text{C}$) werden im Bereich der *Radolfzeller Aach* nordöstlich und westlich des *Remishofs* sowie entlang der K 6158 bei *Überlingen am Ried* gemessen. Die sich über den Wiesen und Landwirtschaftsflächen bildende Kaltluft sorgt örtlich für eine intensive nächtliche Abkühlung.

Intensive Kaltlufteinwirkbereiche mit Lufttemperaturen unter $19,0 \text{ }^\circ\text{C}$ sind auch stellenweise im Bereich *Buderhof / Großer Tannenwald*, an den Hangzonen des *Hohentwiels*, entlang der *Hohenkrähenstraße* (L 191) im Nordwesten der *Kernstadt* und entlang der L 223 bei *Überlingen am Ried* zu identifizieren.

Auffallende Temperatursenken bilden zudem innerstädtische Grünanlagen bzw. Kleingärten. In der Kleingartenanlage *Knöpfleswies* (Abb. 13), die sich zur Umgebung in leichter Tieflage befindet, werden gegen 22:30 Uhr im Vergleich zu den angrenzenden Straßenzügen (*Reichenaustraße*) um ca. $2,0 \text{ K}$ niedrigere Lufttemperaturen gemessen. Herrschen nördliche Windrichtungen vor (wie bei der vorliegenden Messfahrt) wird die über dem Kleingartengelände lagernde Kaltluft nach Süden in Richtung *Uhlandstraße* verfrachtet, wo sie örtlich zur Forcierung der nächtlichen Abkühlung beiträgt.

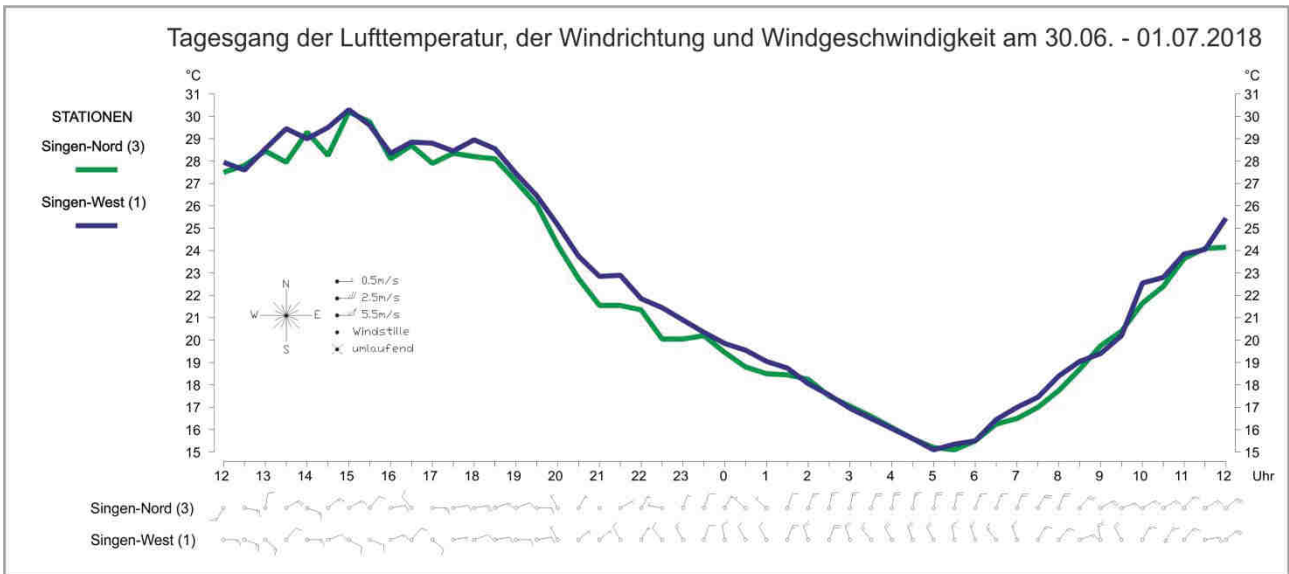


Abb. 11: Tagesgang der Lufttemperatur und des Windes am 30.06.-01.07.2018 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

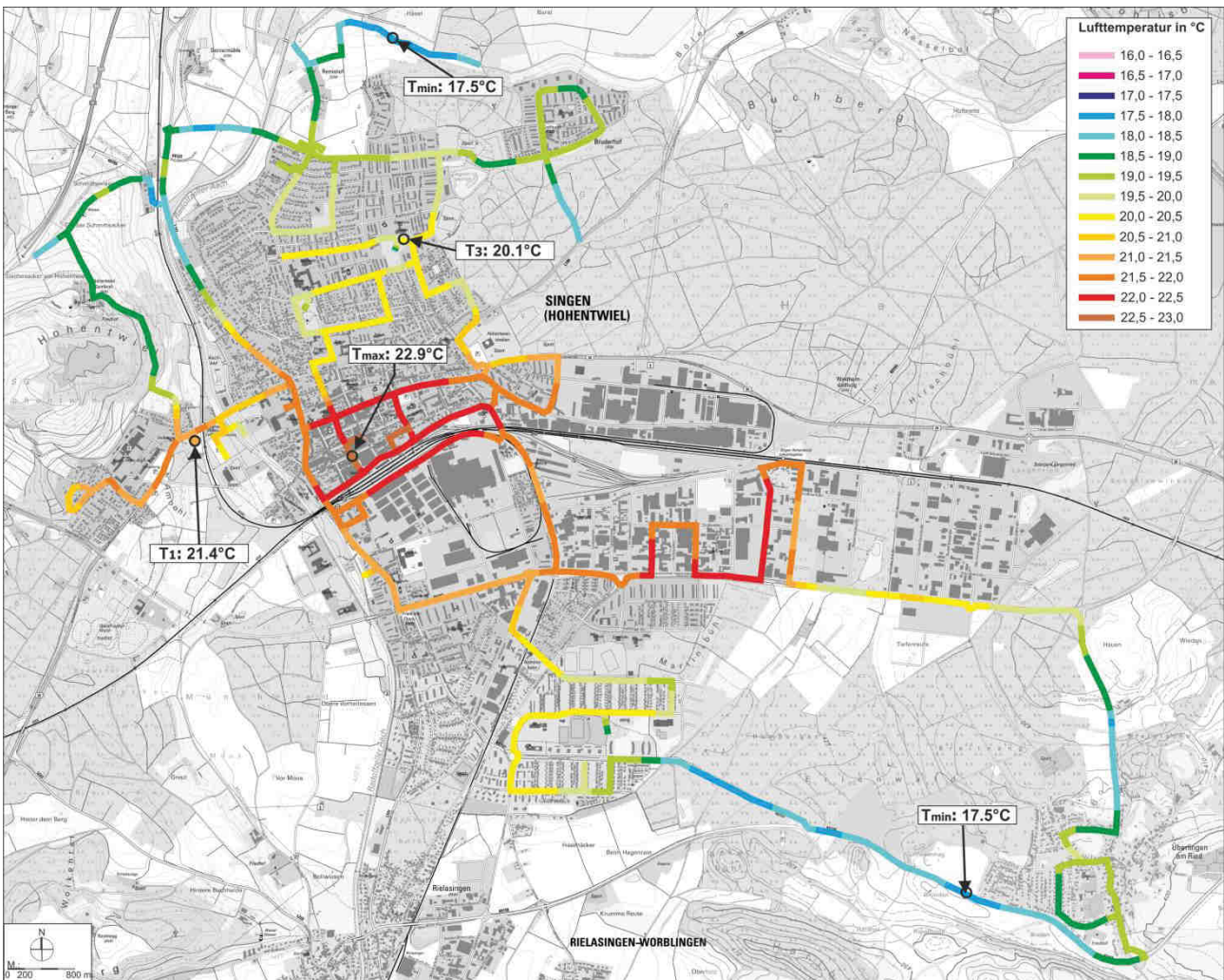


Abb. 12: Ergebnisse profilhaft angelegter Lufttemperaturmessungen am 30.06.2018, 22:30 Uhr (T1 – Station Singen-West, T3 – Station Singen-Nord; Stadtkarte bereitgestellt von: Stadt Singen, Datenerfassung durch ÖKOPLANA)



Abb. 13: Blick auf das Kleingartengelände im Bereich Knöpfleswies (Foto: ÖKOPLANA)



Abb. 14: Blick auf die innerstädtische Freizone „Freizeitzentrum Süd“ (Foto: ÖKOPLANA)

Beim *Alten Friedhof* an der *Anton-Bruckner-Straße* zeigen sich gegenüber der benachbarten Wohnbebauung um ca. 0,5 - 1,0 K niedrigere Lufttemperaturen. Eine auffallende innerstädtische Lufttemperatursenke bilden auch die Grün-, Sport- und Spielflächen im Freizeitzentrum Süd zwischen *Überlinger Straße* und *Masurenstraße* (vgl. Abb. 14). Im Bereich des Minigolfzentrums Singen wurden bei den Messungen gegen 22:30 Uhr im Vergleich zur *Masurenstraße* um ca. 1,5 - 2,0 K niedrigere Lufttemperaturwerte erfasst.

Die höchsten Lufttemperaturen (22,5 - 23,0 °C) zeigen sich bei den Messfahrten gegen 22:30 Uhr im Zentrum der *Kernstadt* (*Erzbergerstraße*, *Hadwigstraße*). Dort macht sich der Wärmeinseleffekt der dicht bebauten Singener Innenstadt bemerkbar. Zu den Bereichen mit der niedrigsten Lufttemperaturwerten (z.B. *Radolfzeller Aach* nordöstlich und westlich des *Remishofs*) ergibt sich somit ein Temperaturgradient bis ca. 5,5 K. Als Wärmeinseln zeigen sich neben der Singener Innenstadt auch die Gewerbebebietsflächen zwischen der *Georg-Fischer Straße* im Süden und der Bahntrasse Singen/Radolfzell im Norden. Dort werden auf den Straßenzügen Lufttemperaturwerte von ca. 21,0 - 22,5 °C gemessen. Neben den großvolumigen Gewerbebauten führen die großen versiegelten Stellplatzflächen zu einer auffallenden Minderung der nächtlichen Abkühlung. Dies spiegeln auch die Lufttemperatursimulationen wider (vgl. Kap. 5.1.1).

Bei den Messfahrten am 01.07.2018 gegen 01:00 Uhr (00:30-01:30 Uhr) beträgt die max. Lufttemperaturdifferenz im Untersuchungsgebiet ebenfalls ca. 5,5 K. Die höchste Lufttemperatur (21,7 °C) wird wiederum in der Singener Innenstadt (*Hadwigstraße*) erfasst. Niedrigste Lufttemperaturwerte (16,2 °C) sind im Norden

an der *Radolfzeller Aach* und im Freiraumgefüge westlich von *Überlingen am Ried* (K 6158) zu bestimmen. Werden die durchgeführten Ergebnisse der Profilmessfahrten mit den Ergebnissen der numerischen Modellrechnungen verglichen, so lassen sich recht gute Übereinstimmungen bilanzieren (Abb. 16).

Der Wärmeinseleffekt der Singener Innenstadt und der Gewerbegebietsflächen nördlich der *Georg-Fischer-Straße* sowie die kühlen Kaltluftzugbahnen in Tallagen (z.B. *Radolfzeller Aach*) zeigen weitgehend identische relative Lufttemperaturdifferenzierungen. Die Berechnungsergebnisse können somit als Grundlage für vertiefende klimaökologische Betrachtungen herangezogen werden.

Kleinere Abweichungen sind im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass bei den Profilmessfahrten allein entlang von Straßenzügen die Lufttemperatur registriert wird und somit zusätzliche Einflüsse unversiegelter bzw. versiegelter Grundstücke / Freiraumareale nur bedingt zum Tragen kommen.

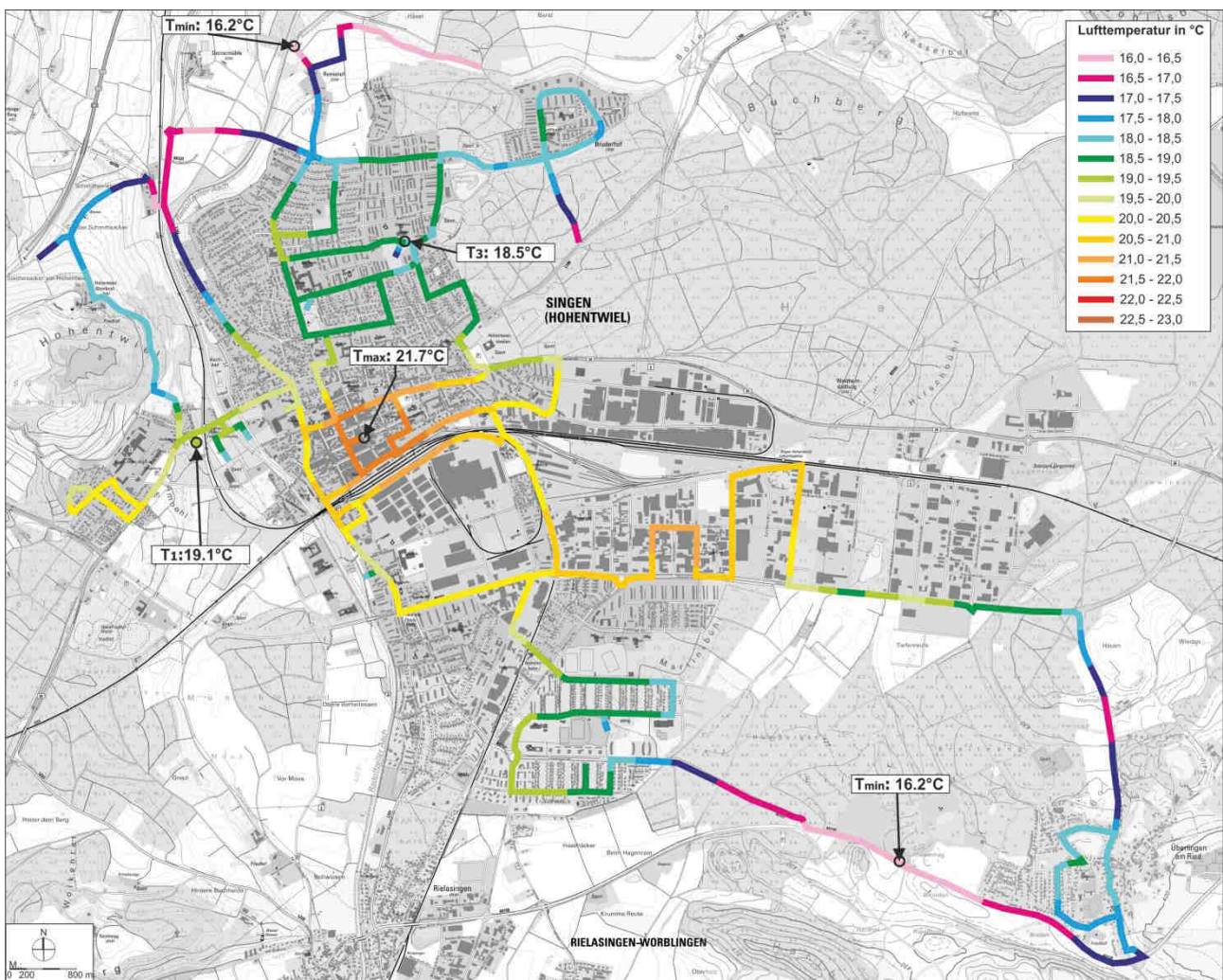


Abb. 15: Ergebnisse profilhaft angelegter Lufttemperaturmessfahrten am 01.07.2018, 01:00 Uhr (T1 - Station Singen-West, T3 – Station Singen-Nord; Stadtkarte bereitgestellt von: Stadt Singen, Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

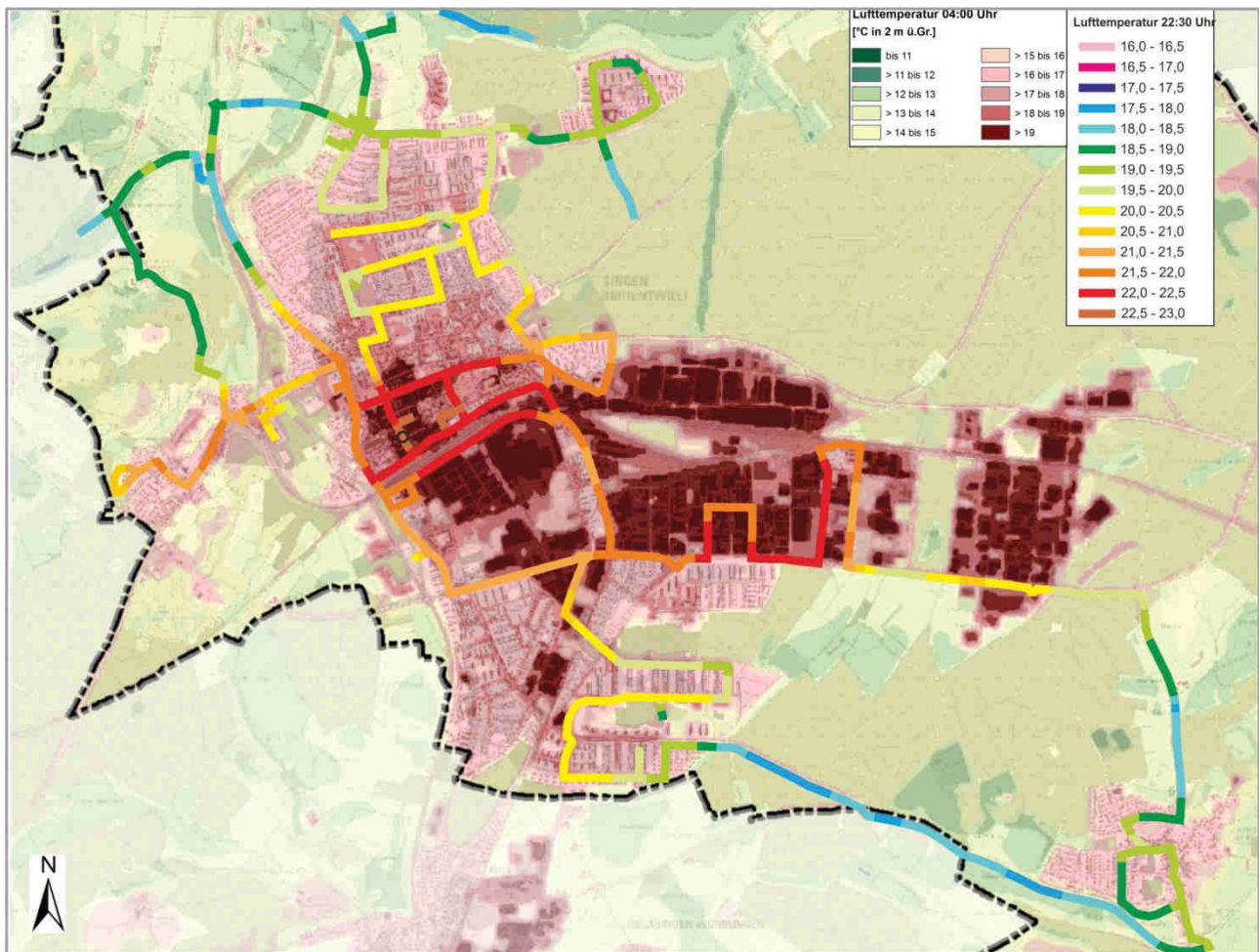


Abb. 16: Vergleich der Ergebnisse profilhaft angelegter Lufttemperaturmessfahrten (30.06.2018, 22:30 Uhr) mit den numerisch berechneten Lufttemperaturverteilungen (04:00 Uhr) für eine windschwache, sommerliche Strahlungsnacht (vgl. Kap. 5.1.1)

2.3.4 ERGEBNISSE MOBILER WINDFELDMESSUNGEN

Zur Erfassung der bodennahen Windfelder bzw. der örtlichen Kaltluftbewegungen wurden in zwei sommerlichen Strahlungs Nächten Windmessungen mit Hilfe von Rauchschwadenbeobachtungen durchgeführt (30.06.-01.07.2018, 29.-30.07.2018). Die Rauchschwaden zeigen über ihre Ausbreitung die bodennahe Windrichtung an. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte zeitgleich mit einem hochempfindlichen Hitzdrahtanemometer (Abb. A 1).

Bei den Messungen am 30.06.-01.07.2018 wurden an zehn ausgewählten Standorten zwischen 22:00 Uhr und 01:20 Uhr Windmessungen durchgeführt. Wie Abb. 17 dokumentiert, herrschen in nahezu allen Standorten schwache Winde aus nördlichen Richtungssektoren vor. Allein am Nordabhang des *Hohentwiel* werden im Hangeinschnitt *Schmiedswiesengraben* prägnante Kaltluftbewegungen aus südsüdwestlichen Richtungen beobachtet. Die Häufung von Winden aus nördlichen Richtungen im Gesamtstadtgebiet ist im Wesentlichen auf lokale/regionale Kaltluftbewegungen zurückzuführen, wie sie auch bei den numerischen Strömungssimulationen aufgezeigt werden (vgl. Kap. 5.1.2).

Abweichungen zu den Strömungssimulationen zeigten sich in der Flussaue der *Radolfzeller Aach* im Nordwesten des Untersuchungsgebiets. Während bei den Strömungssimulationen im Bereich zur *Dornermühle* der Einfluss westlicher Hangabwinde über den *Müllerwiesgraben* zu erkennen ist, zeigen die Rauchschwadenbeobachtungen ein Vorherrschen nordnordöstlicher Winde. Diese kleinräumige Diskrepanz ist auf die bei den Simulationen betrachtete Wetterlage mit einer nur sehr schwachen überlagernden Strömung aus Norden zurückzuführen ($1,0 \text{ m s}^{-1}$ in einer Höhe von 10 m ü.Gr.). Während der Windmessungen am 30.06.2018 wurden vor Ort bereits in der Messhöhe von 1,5 m ü.Gr. Windgeschwindigkeiten von $1,1 \text{ m s}^{-1}$ erfasst.

Zusätzliche Rauchschwadenbeobachtungen wurden am 29.-30.07.2018 zwischen 23:30 Uhr und 04:20 Uhr durchgeführt. Wie der Tagesgang der Lufttemperatur und des Windfeldes aufzeigt (Abb. 18), herrschten während der Messungen bei nur geringer Bewölkung extrem schwache Winde unter $1,0 \text{ m s}^{-1}$ vor, sodass Lokalwindeffekte hervortreten konnten.

Die Beobachtungen und Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Windfeldsimulationen für eine Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Sowohl die Hangabwinde am *Hohentwiel* nördlich der *Schaffhauser Straße* als auch die flurwindartigen Kaltluftbewegungen aus dem Waldgebiet *Großer Tannenwald* in Richtung Südwesten im Bereich der *Fichtestraße* und *Friedinger Straße* finden sich bei beiden Windfeldanalysen wieder.

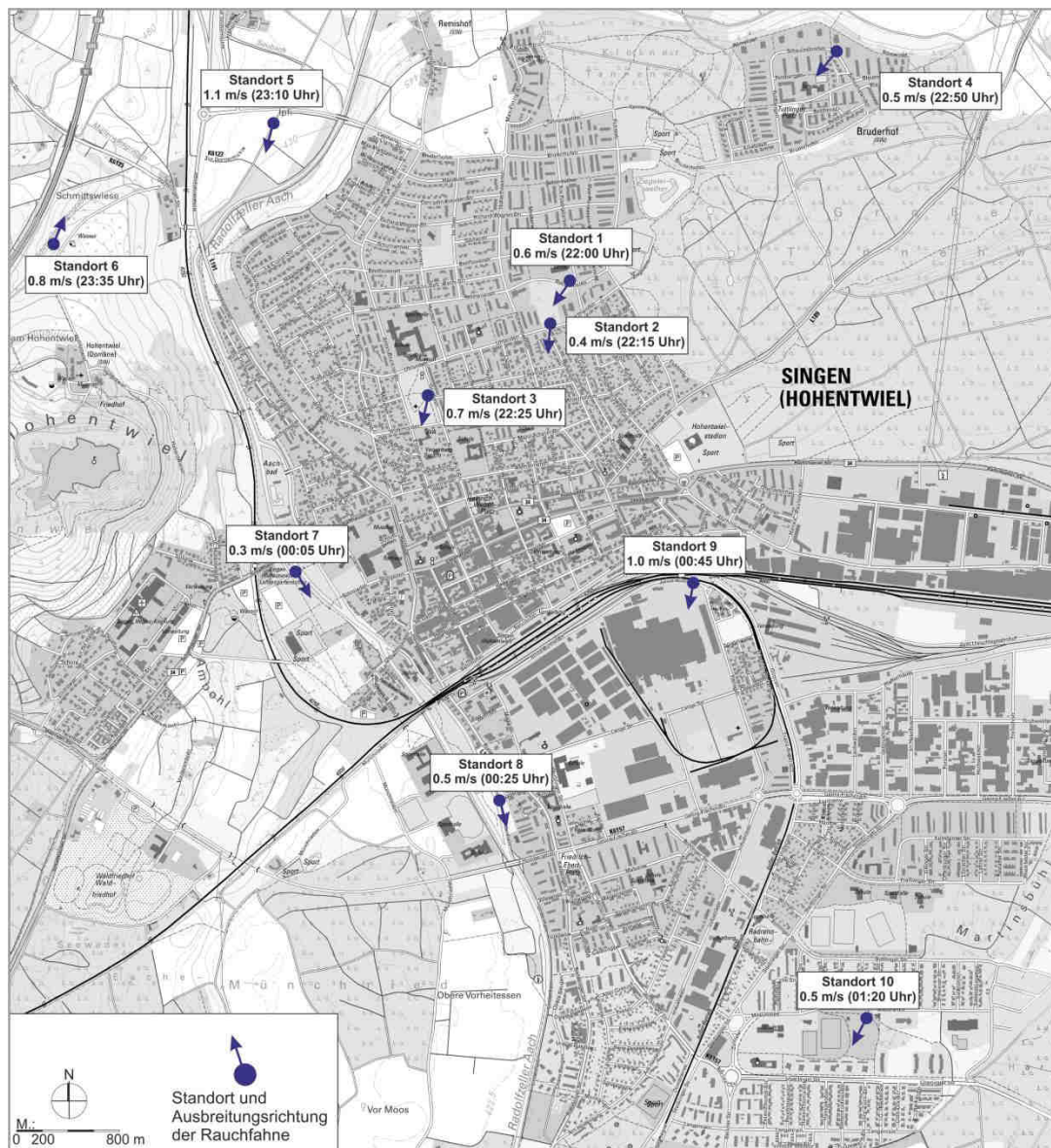


Abb. 17: Ergebnisse von Rauchschwadenbeobachtungen mit Windgeschwindigkeitsmessungen am 30.06.-01.07.2018 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

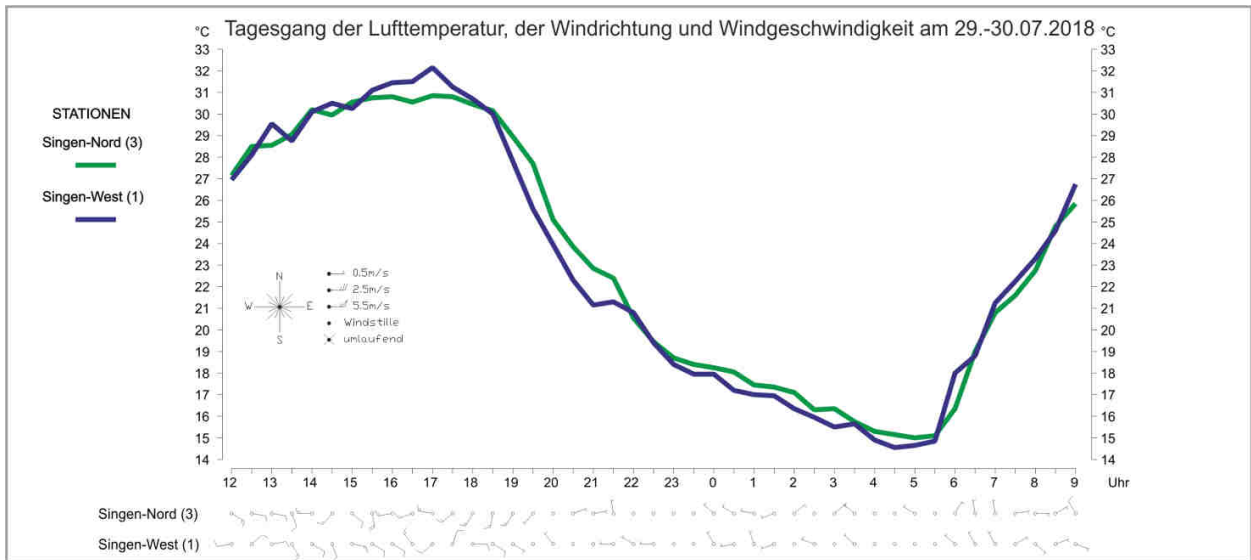


Abb. 18: Tagesgang der Lufttemperatur und des Windes am 29.-30.07.2018 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

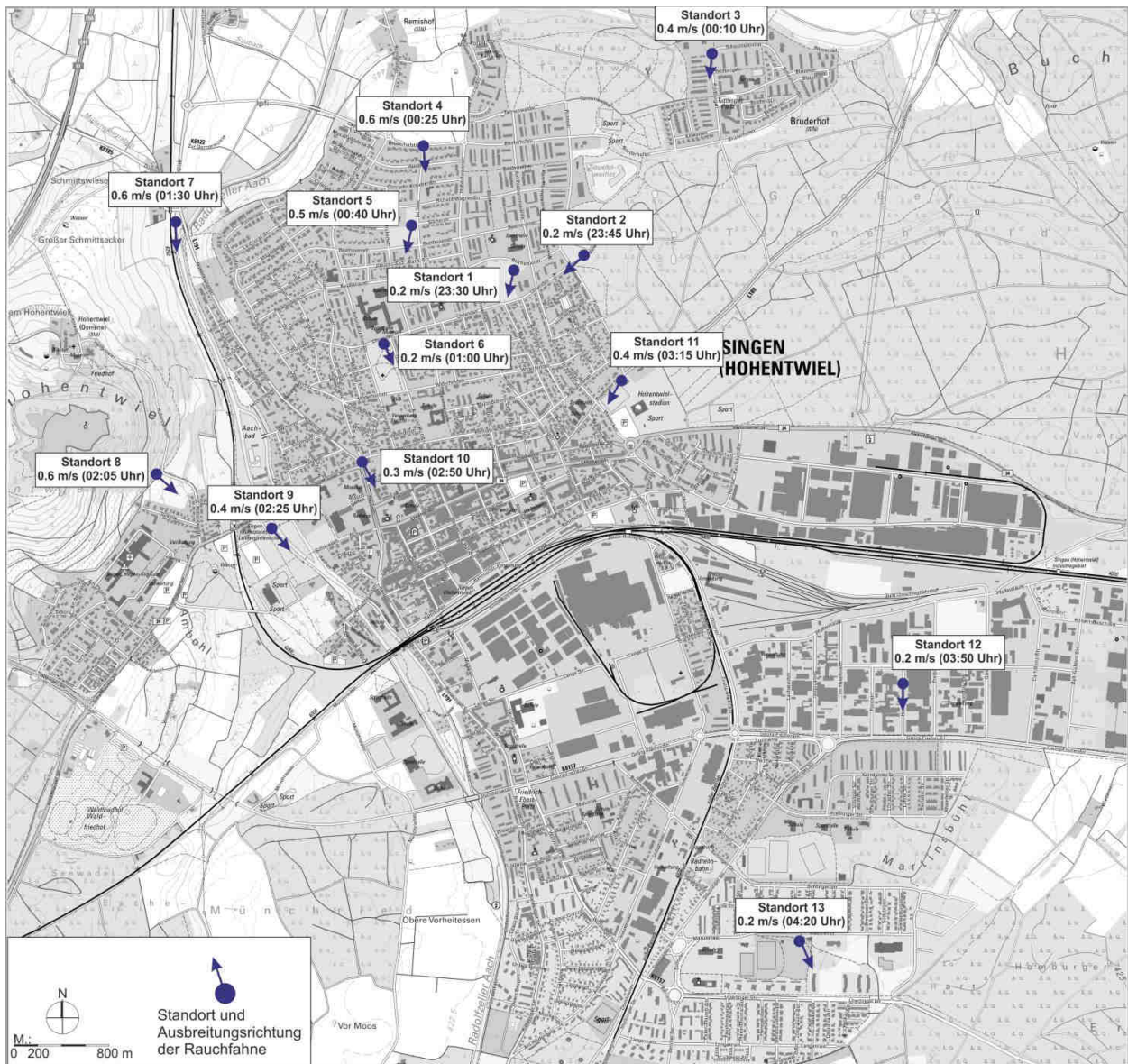


Abb. 19: Ergebnisse von Rauchschwadenbeobachtungen mit Windgeschwindigkeitsmessungen am 29.-30.07.2018 (Datenerfassung durch ÖKOPLANA)

2.4 EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

Mit dem *Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden* im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs (BauGB)) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach § 1 (5) BauGB erklärt worden: „Die Bauleitpläne sollen [...] dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den **Klimaschutz und die Klimaanpassung**, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern [...].“ Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: „Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem **Klimawandel** entgegenwirken, als auch durch solche, die der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, Rechnung getragen werden.“

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

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

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

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

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

3 Evaluation des projektbegleitenden Fachbeirates

3.1 HINTERGRUND UND ZIELE

Um das Projekt „Zielkonflikt Klimakomfort – Nachverdichtung: Entwicklung von Lösungsstrategien zur klimawandelangepassten Siedlungsentwicklung der Stadt Singen (KLIMOPASS)“ (im Folgenden: „KLIMOPASS Singen“) fachlich zu begleiten und um ein breites Spektrum an externer Expertise einfließen zu lassen, wurde die DUH Umweltschutz-Service GmbH (im Folgenden DUH genannt) von der Stadt Singen beauftragt, einen projektbegleitenden Beirat aus Fachleuten zusammenzustellen sowie drei halbtägige Workshops zu organisieren und durchzuführen.

Ziel des Beirates war es, die Projektverantwortlichen in Singen bei der Entwicklung von Maßnahmen im Spannungsfeld zwischen Klimakomfort und Nachverdichtung zu beraten und zu unterstützen. Die Schwerpunkte lagen dabei insbesondere auf dem Einbringen aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler und regionaler Ebene, der Entwicklung von innovativen Vorschlägen für klimawandelangepasste Verdichtung im innerstädtischen Bereich sowie der Diskussion und Sicherstellung der Wirksamkeit und Praxistauglichkeit der entwickelten Instrumente.

3.2 TEILNEHMENDE

Um eine möglichst umfassende Expertise zu erhalten, wurde der Beirat deshalb mit Personen aus Fachverwaltungen von Kommunen aus Baden-Württemberg, die bereits über Klimaanpassungsstrategien verfügen, oder Projekte zur Klimaanpassung durchgeführt haben, besetzt. Des Weiteren wurden Personen aus der Forschung und regionalen Planungsbüros für die Teilnahme am Beirat gewonnen. Gemeinsam mit den Mitarbeitenden des mit der Modellierung beauftragten Büros GEO-NET, den Mitarbeitenden der DUH als Vertretende eines Umweltverbandes und den Beteiligten aus der Singener Verwaltung konnte so ein äußerst breites Spektrum an allgemeinem, speziellem, regionalen und lokalen Fachwissen abgedeckt werden (Tab. 2).

3.3 DISKUSSIONSVERLAUF UND ERGEBNISSE DER WORKSHOPS

3.3.1 ERSTER WORKSHOP

Der erste Workshop fand am 24.05.2017 im Rathaus der Stadt Singen statt. Nach einer Vorstellungsrunde, in der die externen Beiratsmitglieder ihre Projekte vorstellten, folgte von Seiten des Büros GEO-NET die Präsentation zum grundsätzlichen Vorgehen im Projekt.

Kernfrage der Diskussion durch den Fachbeirat war die Auswahl der Modellgebiete für eine mikroskalige Modellierung durch das Büro GEO-NET. Dabei verständigte man sich darauf, die genaue Auswahl nach der gesamtstädtischen Klimamodellierung durch GEO-NET im Herbst 2017 durchzuführen. Als eines der in diesem Zusammenhang denkbaren Gebiete wurde die in den siebziger Jahren entstandene nördliche Stadterweiterung *Bruderhof* in den Fokus genommen, da zum Zeitpunkt des Workshops hier eine direkte Anwendung der erarbeiteten Maßnahmen noch als möglich angesehen wurde.

Außerdem wurde vom Fachbeirat vorgeschlagen, dass anhand der in den Modellgebieten entwickelten Schlüsselmaßnahmen auch eine Strategie für die gesamte Innenstadt entwickelt werden könne. Dazu wurde vorgeschlagen, Szenarien für Klimaentwicklungen mit den Zeithorizonten 2020 und 2050 in die Analyse aufzunehmen und dies auf Basis eines PET-Modells durchzuführen, da sich dieses besser zur Argumentation

gegenüber Entscheidungsträgern eignet. Ebenso wurde es von den Beiratsmitgliedern für sinnvoll erachtet, das Untersuchungsgebiet für die Klimaaanalyse im Norden weiter auf die Region der *Hegauer Alb* auszudehnen, da von dort im Verlauf der Nacht für das Stadtgebiet relevante Kaltluftströme einströmen. Herr Prof. Schwab bot an, dazu großräumige Untersuchungsergebnisse des Regionalverbands Hochrhein-Bodensee zur Verfügung zu stellen. Außerdem wurde vom Beirat angeregt, eine möglichst intensive begleitende Öffentlichkeitsarbeit durchzuführen, beispielsweise durch Pressearbeit während der Messkampagne, um die Bevölkerung frühzeitig zu sensibilisieren und Akzeptanz für zukünftige Maßnahmen zu generieren.

Tab. 2: Übersicht aller an den Treffen des projektbegleitenden Fachbeirats teilnehmenden Personen. Personen aus der Singener Verwaltung sind kursiv hervorgehoben.

Name	Institution	24.05.17	11.10.17	31.01.18
<i>Beermann-Landry, Heike</i>	Stadt Singen, Grün & Gewässer			x
Bobsien, Armin	Stadt Emmendingen, Klimaschutzmanager	x		x
Burkhardt, Albrecht	Stadt Ludwigsburg, FB Stadtplanung und Vermessung	x	x	x
<i>Graf, Nicole</i>	Stadt Singen, Stadtplanung	x	x	x
<i>Kaluza-Däschle, Christiane</i>	Stadt Singen, Umweltschutzstelle	x	x	x
Keleta, Haimanot	Büro 365 Grad, Überlingen		x	
Kratz, Martin	Stadt Karlsruhe, Amt für Bauen und Stadtplanung	x		x
Löbig, Janko	GEO-NET Umweltconsulting, Hannover	x		
<i>Martin, Sonja</i>	Stadt Singen, Stadtplanung	x		x
Reuter, Dr. Ulrich	Stadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie (i.R.)	x		x
<i>Rosol, Adam</i>	Stadt Singen, Stadtplanung		x	
<i>Schneider, Michael</i>	Stadt Singen, Grün & Gewässer	x		
<i>Schultze-Graf, Elke</i>	Stadt Singen, Vermessung/Geoinformation	x		
Schwab, Prof. Andreas	PH Weingarten, Stadt- und Geländeklimatologie	x	x	x
Siemensmeyer, Bernadette	Büro 365 Grad, Überlingen	x	x	x
Spreter, Robert	Deutsche Umwelthilfe, Radolfzell	x	x	x
Stark, Prof. Dr.-Ing. Thomas	HTWG Konstanz, Fakultät Architektur und Gestaltung		x	
Trute, Peter	GEO-NET Umweltconsulting, Hannover		x	x
Wieland, Janos	Deutsche Umwelthilfe, Radolfzell	x	x	x
<i>Zipf, Markus</i>	Stadt Singen, Klimaschutzmanager, Projektverantwortlicher	x	x	x

3.3.2 ZWEITER WORKSHOP

Das zweite Treffen des Fachbeirats fand am 11.10.2017 statt. Zwischen den Beteiligten in der Stadtverwaltung und dem Büro GEO-NET wurde in der Zwischenzeit Konsens darüber erzielt, den *Bruderhof* als Modellgebiet auszuwählen, weil das Flächenreservoir aus den Flächennutzungsplänen (FNP) ausgeschöpft, Nachverdichtung jedoch notwendig und gewollt ist. Da der *Bruderhof* eine geringe Grundflächenzahl (GRZ) aufweist und die klimatische Situation auf Quartiersebene durch die inselartige Lage am Stadtrand hier günstig ist, wurde hohes Potential für Nachverdichtungsmaßnahmen verortet. Daher fand das Treffen vor Ort im *Bruderhof* statt. Peter Trute präsentierte zunächst die Ergebnisse von GEO-NET sowie das weitere Vorgehen, anschließend wurde unter Leitung von Adam Rosol das Modellgebiet besichtigt sowie die aktuelle Situation und Gegebenheiten vor Ort erläutert. Im Anschluss wurden die Ergebnisse eines Workshops vorgestellt, der intern von der Abteilung Stadtplanung Singen durchgeführt wurde, um Nachverdichtungspotentiale im *Bruderhof* auszuloten. Aus diesen Ergebnissen ergab sich die Fragestellung nach der Betrachtungsebene für die mikroskalige Modellrechnung – blockbezogen oder quartiersbezogen. Im Laufe der anschließenden Diskussion wurde die zweite Variante, aber ergänzt um weitere Baukörper, favorisiert, da dafür bereits Vorüberlegungen aus einem internen Workshop der Stadtplanung Singen vorlagen.

Als zweites Modellgebiet wurde die *Knöpfleswies* ausgewählt. Die Möglichkeit, stadtklimatische Anforderungen in Planungsprozesse zu integrieren, soll dort exemplarisch diskutiert werden.

3.3.3 DRITTER WORKSHOP

Der dritte Workshop wurde am 31.01.2018 durchgeführt. Dort wurde noch einmal als äußerst wichtig herausgestellt, die offenen Strukturen am Siedlungsrand zu erhalten bzw. neue Strukturen oder sogar Leitbahnen zu schaffen.

Im Weiteren wurden die entwickelten Maßnahmen für den *Bruderhof* diskutiert, insbesondere der Einfluss des durch Unterbauung (Tiefgaragen) geringen Wasserspeichervermögens der Böden während längerer Hitzewellen und die Summenwirkung von Gebäuden und Begrünung. Für die Argumentation wurde als wünschenswert erachtet, Zwischenschritte (Aufstocken → Begrünen) abzubilden. Die Maßnahmen zum Zeitpunkt des Workshops wurden als nicht ausreichend erachtet, um die Temperatursignale zu kompensieren. Deshalb wurden innovative Maßnahmen vorgeschlagen, um dieses Ziel zu erreichen, beispielsweise die Möglichkeit eines strömungsdurchlässigen, im Erdgeschoss offenen Gebäudes, alles vor dem Hintergrund, die vergleichsweise gute Situation im *Bruderhof* langfristig durch vorausschauendes Planen und Handeln zu bewahren. Größere Potentiale dafür wurden auch auf Flächen für den ruhenden Verkehr verortet, der reale Handlungsspielraum aufgrund kollidierender Vorstellungen seitens der Bewohnenden allerdings als sehr gering eingestuft. Als Möglichkeit wurde aber bspw. eine versickerungsoffene Ausführung der Parkplätze vorgeschlagen.

Anschließend erfolgte eine Präsentation zur Berücksichtigung klimaökologischer Gegebenheiten im Planverfahren. Die beiden im Gebiet *Knöpfleswies* vom Büro GEO-NET als klimaökologisch wichtig identifizierten Achsen wurden auch aus stadtplanerischer Sicht begrüßt. Im Hinblick auf das Stadtklima sei dabei wichtig, dass die Rauigkeit gering gehalten wird, um ein ungehindertes Durchströmen zu gewährleisten. Dies bedeutet z.B. die Vermeidung von dichten Baumgruppen. Die absolute Höhe der Bebauung wurde dagegen nur als untergeordnete identifiziert. Diese beiden Achsen wurden als Vorgaben von allen Anwesenden für sehr bedeutend erachtet, wobei ein Teil der Achsen als Privatgärten o.ä. geplant werden könne. Aus klimatischer Sicht sei weiterhin die Frage nach Unterbauung enorm wichtig. Eine Mindestbodenaufgabe als Kriterium, um ein gewisses Wasserspeichervermögen zu gewährleisten, wurde ebenso diskutiert, wie die Definition von zur Unterbauung freizuhaltender Bereiche. Unterstützung für andere Formen der Mobilität wie beispielsweise Ladestellen für E-Bikes oder Elektroautos wurden als Kriterium für eine Vergabe gewünscht. Auch Vorgaben zu Gebäudebegrünung wurden vom Beirat als sinnvoll erachtet, allerdings in zweckdienlicher Ausführung, die aus klimaökologischer vor allem darin

besteht, dass die Begrünung über Bodenanschluss verfügt. Gebäudefarben und ähnliches könnten ebenfalls festgelegt werden. Bezüglich des Planverfahrens wurde es für sinnvoll erachtet, einige harte Kriterien zu formulieren, die vorgeben werden sollen und zwingend umzusetzen sind.

Die Anwesenden einigten sich auf folgendes weiteres Vorgehen:

- * Im *Bruderhof* exemplarische klimatologische Bewertung der von der Baugenossenschaft Hegau vorgelegte Nachverdichtungsplanung für einzelne Gebäude durch GEO-NET und Formulierung von Maßnahmenempfehlungen und Einspeisung in den politischen Entscheidungsprozess (vgl. Kap. 7).
- * Für das Areal *Knöpfleswies* organisatorische und inhaltliche Erarbeitung von Details für ein eventuelles Wettbewerbsverfahren, dessen Struktur auf andere Gebiete übertragen werden kann (vgl. Kap. 8).
- * Nach Fertigstellung der Klimaanalyse im Frühsommer 2018 Vorstellung der Ergebnisse beim Gemeinderat und den relevanten Abteilungen der Verwaltung.

4 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

4.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom DWD für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet. Beispiele für solche mesoskaligen Phänomene sind Land-See-Winde, der Einfluss von Hindernissen auf den Wind (z.B. Kanalisierung, Umströmung), Flurwinde oder Düseneffekte in Straßen sowie das Phänomen der städtischen Wärmeinsel.

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen der Phänomene bzw. deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten – dieser Nachteil kann jedoch mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988). Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht, neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien, ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Größen wie Wind und Temperatur kann mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich komplexer Umgebungen sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und ist eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Mesoskalige Modelle wie FITNAH 3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung stadtklimatologisch wichtiger Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können – je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 20 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

4.2 MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH 3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen:

- × Geländehöhe
- × Landnutzung
- × Strukturhöhe
- × Versiegelungsgrad

Die Geländehöhe wurde aus einem Digitalen Geländemodell abgeleitet (DGM 5 m), das genau wie das für die Landnutzung zugrunde liegende ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) von der Stadt Singen im Jahr 2016 zur Verfügung gestellt wurde. Bei der hier vorliegenden mesoskaligen Rechnung können im 20 m-Raster keine einzelnen Gebäude oder Bäume aufgelöst werden, sodass diese, genau wie Angaben zur Strukturhöhe und dem Versiegelungsgrad, über verschiedene Nutzungsklassen parametrisiert werden (z.B. weist die Blockrandbebauung eine dichtere und höhere Bebauung auf als Einfamilienhaus-Gebiete, die dagegen einen höheren Anteil an Grünflächen enthalten; vgl. Abb. A 5).

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Außerhalb des Singener Stadtgebiets wurde dabei auf frei verfügbare Daten in geringerer räumlicher Auflösung wie Corine Land Cover-Daten für die Landnutzung (Stand 2012) sowie SRTM-Daten für die Geländehöhe (Stand 2000) zurückgegriffen.

AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN

Im Rahmen der Eingangsdatenaufbereitung wurde aus den zur Verfügung gestellten Informationen zunächst eine Referenzgeometrie erstellt. Die Referenzgeometrie basiert auf den ALKIS-Flächen und wurde dahingehend überarbeitet, dass sich klimatisch ähnliche Flächeneinheiten ergeben, die in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sind (Einteilung in Baublöcke, Grünflächen, Verkehrsräume, etc.). Aktuelle Landnutzungsänderungen wurden mittels eines Luftbildabgleichs erfasst (Digitales Orthofoto der Stadt Singen, Stand 2016).

Anschließend wurden aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Rasterweite von 20 m erzeugt (357.000 Rasterzellen im Untersuchungsgebiet), die wiederum einem Abgleich anhand der Luftbilder unterlagen.

Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter. Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen, sodass die rasterbasierten Modellergebnisse mit Hilfe zentraler Analysen zusammengefasst, statistisch ausgewertet und wiederum der Referenzgeometrie zugeordnet werden (Abb. 20). Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst (z.B. von der Lufttemperatur oder der Windgeschwindigkeit). Darauf basierend wurden den Referenzflächen Bewertungsindizes zugewiesen, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap. 0) sowie als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap. 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Planungskarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

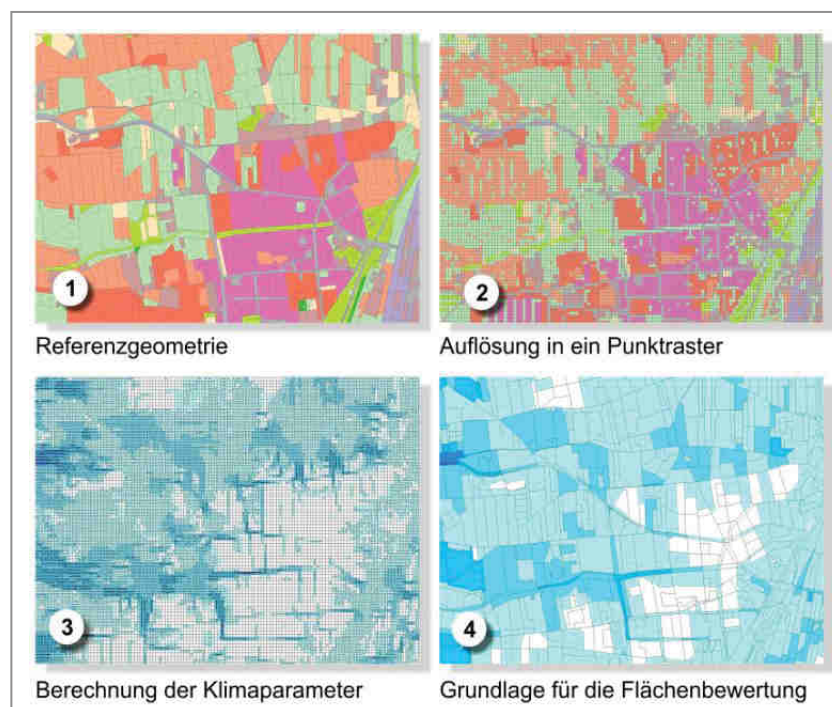


Abb. 20: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

4.3 METEOROLOGISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

4.3.1 VORUNTERSUCHUNG: GROßRÄUMIGE MODELLRECHNUNG

Während des ersten Workshops des projektbegleitenden Fachbeirats wurde auf Untersuchungsergebnisse des Regionalverbands Hochrhein-Bodensee hingewiesen, die für das Singener Stadtgebiet relevante nächtliche Kaltluftströme aus der Hegauer Alb nördlich des Untersuchungsgebiets erkennen lassen (REKLIBO 2009; vgl. Kap. 4.3.1). Um zu prüfen, ob diese bei den meteorologischen Rahmenbedingungen der Modellrechnung berücksichtigt werden müssen, wurde im Vorfeld eine großräumige Rechnung in einem 40 km x 50 km großen erweiterten Untersuchungsgebiet durchgeführt. Die Rechnung erfolgte ebenfalls mit dem Modell FITNAH 3D in einer horizontalen Auflösung von 250 m und fußt auf den bereits genannten Corine Land Cover- sowie SRTM-Daten (Kap. 4.2).

Ausgewertet wurde das nächtliche Strömungsfeld zu den Zeitpunkten 22:00, 01:00 und 04:00 Uhr in einer Höhe von 2 m sowie 10 m ü.Gr. Die Ergebnisse bestätigen, dass sich während autochthoner Bedingungen (vgl. Kap. 4.3.2) nächtliche großräumige Kaltluftströmungen aus der *Hegauer Alb* herausbilden (Abb. 21), die zum Zeitpunkt 04:00 Uhr bis in das Singener Stadtgebiet reichen und entsprechend in Form eines übergeordneten Strömungsantriebs aus nördlicher Richtung in das Modell aufgenommen werden müssen.

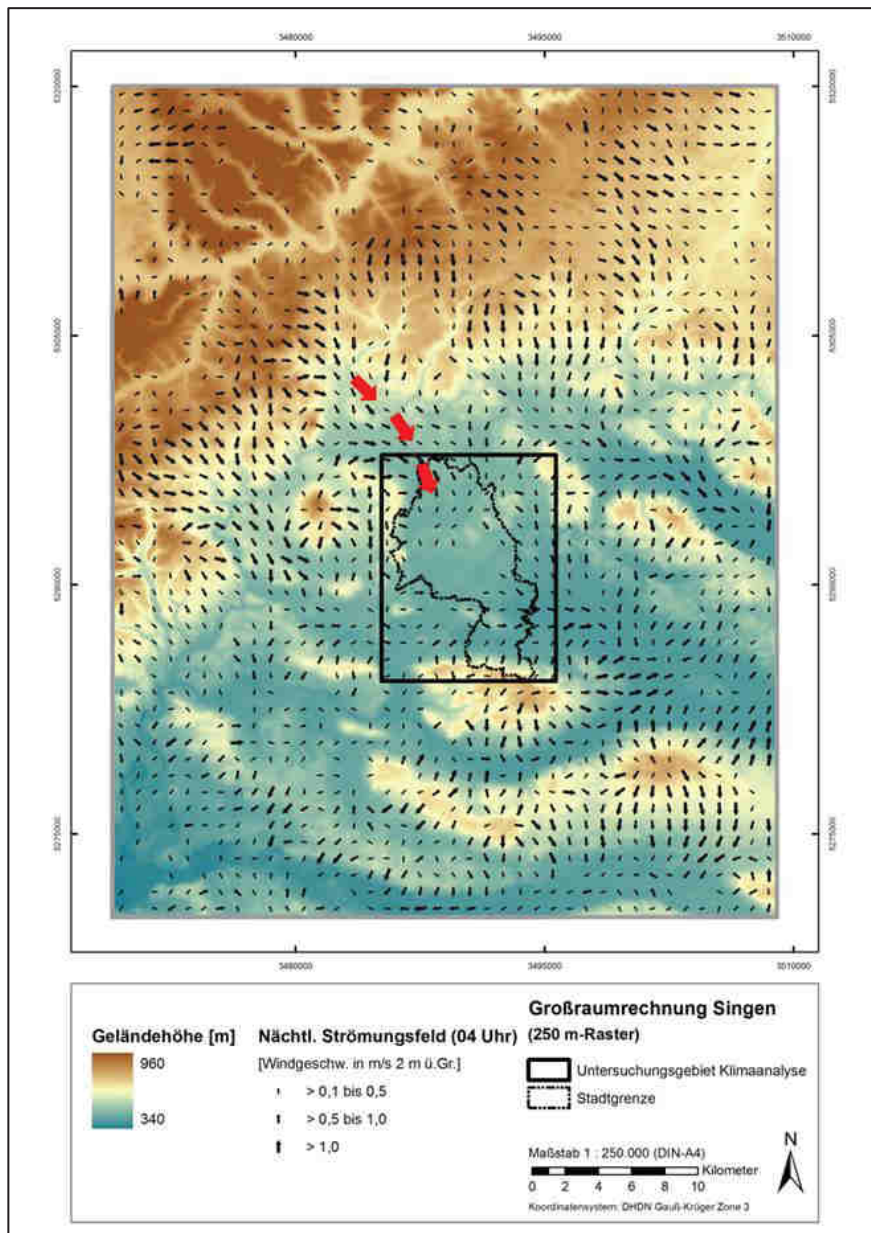


Abb. 21: Geländehöhe und nächtliches Strömungsfeld der großräumigen Modellrechnung (rote Pfeile markieren die übergeordnete Strömung aus Norden)

4.3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die durchgeführte numerische Simulation mit FITNAH 3D legt eine autochthone Wetterlage zugrunde. Diese wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Entsprechend wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermaßen festgelegt:

- × Lufttemperatur 22 °C über Freiland um 21:00 Uhr
- × Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- × Bedeckungsgrad 0/8
- × Übergeordnete Strömung aus Norden mit 1 m s⁻¹ in 10 m über Grund (vgl. Kap. 4.3.1)

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten während der austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitig hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische Belastungsräume ausbilden (Darstellung eines *worst case*-Szenariums). Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

In Abb. 22 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien deutlich geringer ist. 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.

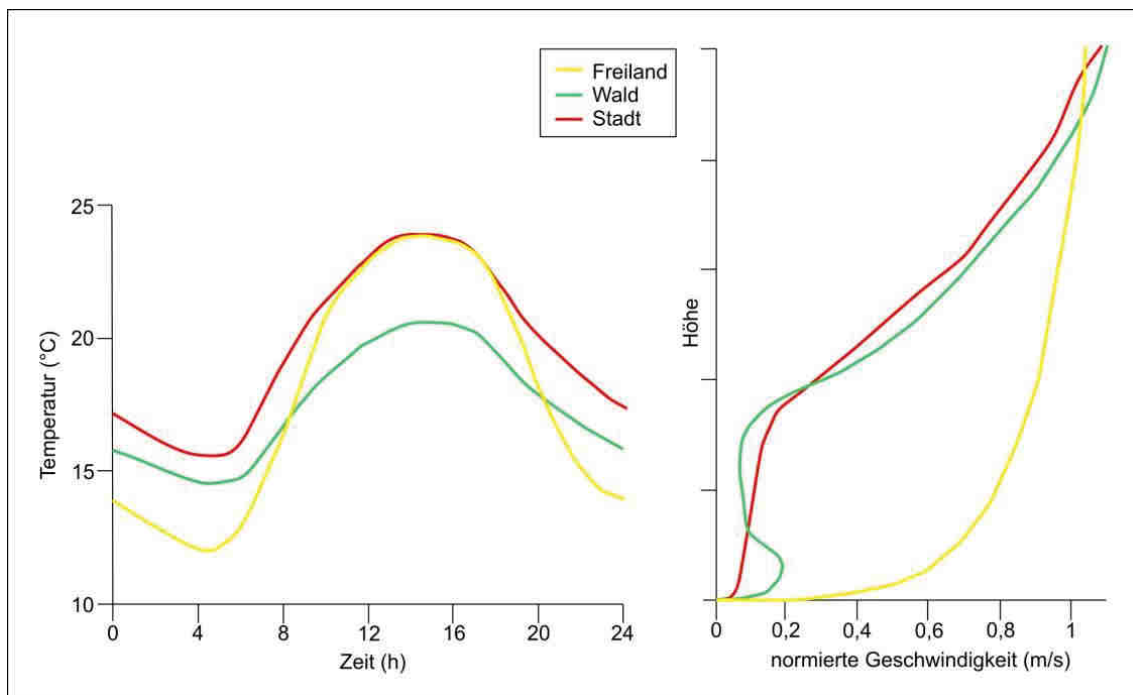


Abb. 22: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen

4.4 METHODIK ZUKUNFTRECHNUNG (STADTKLIMA IM JAHR 2050)

Neben der Analyse der gegenwärtigen Situation (Status quo) sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima untersucht werden – auf Empfehlung des Fachbeirats wurde 2050 als Bezugsjahr gewählt (vgl. Kap. 3). Analog zur Klimaanalyse des Status quo wurde das Modell FITNAH 3D verwendet. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben erfolgt die Modellierung unter gewissen Rahmenbedingungen, die den Antrieb des Modells darstellen. Um das zukünftige Stadtklima abzubilden, hat sich die sogenannte Delta-Methode bewährt, in der das Modell mit einer um 1,9 K erhöhten Temperatur angetrieben wird (Klimaänderungssignal $\delta = 1,9$ K). Potentielle Landnutzungsänderungen wurden nicht in das Modell aufgenommen⁵, sodass alleine die Auswirkungen des Klimawandels untersucht werden können.

Im Folgenden wird die Methodik zur Bestimmung dieses Klimaänderungssignal erläutert und auf die Ergebnisse verschiedener Zukunftsperioden sowie RCP-Szenarien eingegangen.

METHODIK

Das Klimaänderungssignal der Temperatur wurde aus Regionalmodelldaten der EURO-CORDEX-Initiative ermittelt⁶. Dafür standen jeweils 12 Modellsimulationen für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 sowie 8 Modellsimulationen für das Klimaszenario RCP 2.6 zur Verfügung (insgesamt 32 Modellläufe). Die Zusammenstellung der Modellsimulationen wird Ensemble genannt. Eine Modellsimulation besteht einerseits aus der Kombination eines Globalen Klimamodells (GCM) und eines Regionalen Klimamodells (RCM). Andererseits beinhaltet jede Modellsimulation eine Klimaprojektion eines der aufgeführten RCP-Szenarien. Somit setzt sich eine Modellsimulation aus der Kombination von GCM und RCM sowie einem entsprechenden Klimaszenario zusammen.

Für die Stadt Singen wurden aus dem EURO-CORDEX-Modellgitter der nächstgelegene Gitterpunkt sowie seine acht umliegenden Gitterpunkte ausgewählt (räumliche Auflösung der Gitterpunkte $\approx 12,5$ km). Die Daten dieser Gitterpunkte wurden für jede Modellsimulation danach zu einheitlichen Zeitreihen räumlich aggregiert und ausgewertet (vgl. DWD 2016) – die Datensätze umfassen jeweils Werte in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag bis zum Jahr 2100. Betrachtet wird die Klimaänderung in der nahen, mittelfristigen sowie fernen Zukunft, jeweils im Vergleich zu einem Referenzzeitraum. Da Änderungen des Klimas typischerweise über einen Zeitraum von 30 Jahren angegeben werden, wurden folgende in der Wissenschaft übliche Perioden zur Bestimmung der Klimaänderungen festgelegt (klimatische Leitplanken):

- * p0 1971 – 2000 (Referenzperiode)
- * p1 2021 – 2050 (nahe Zukunft)
- * p2 2041 – 2070 (mittelfristige Zukunft)
- * p3 2071 – 2100 (ferne Zukunft)

Die klimatischen Änderungen der langjährigen jährlichen und monatlichen Mittelwerte jeder einzelnen betrachteten Variablen (hier: die Temperatur) wurden für jede Modellsimulation aus der Differenz der jeweiligen Zukunftsperiode zur Referenzperiode ermittelt. Dies ergibt für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 jeweils 12 Änderungswerte bzw. 8 Änderungswerte für das Szenario RCP 2.6, welche die Basis für die Bestimmung der Änderungsstatistik bilden.

Für Europa stehen in den EURO-CORDEX-Daten aktuell die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und RCP 8.5 zur Verfügung, deren Bezeichnung den zusätzlichen Strahlungsantrieb in $W\ m^{-2}$ bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts benennt. Die RCP-Szenarien lösen im aktuellen

⁵ Dies liegt auch daran, dass eine Flächenkulisse 2050 nur auf Annahmen baulicher Änderungen beruhen hätte können, ohne Sicherheit über deren letzliches Eintreffen.

⁶ EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt (www.euro-cordex.net).

fünften Sachstandsbericht des IPCC⁷ („Weltklimarat“ der Vereinten Nationen) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien⁸ ab (Abb. 23):

- * Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf knapp 3 W m⁻². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W m⁻². Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten (vgl. DKRZ 2017).
- * RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach nur noch geringfügig bis etwa 2075 steigt und in der Folge stagniert.
- * Das Szenario RCP 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4 °C gegenüber dem Zeitraum 1986-2005 bewirken würde (ebd.). Dieses Szenario entspricht am ehesten dem *weiter wie bisher*-Trend und würde sich vermutlich ohne zusätzliche Bemühungen zur CO₂-Reduzierung einstellen.

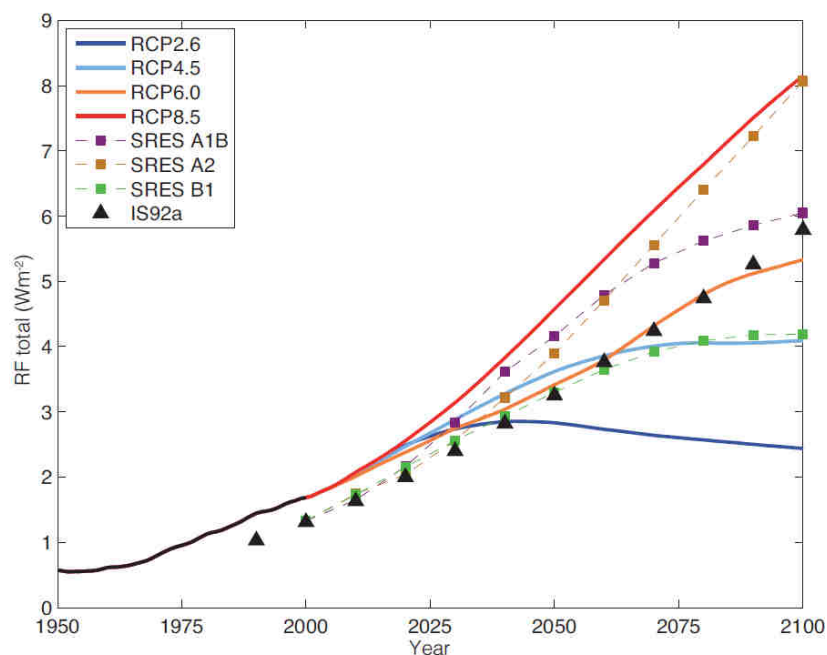


Abb. 23: Anthropogener globaler Strahlungsantrieb (RF) der aktuellen RCP-Szenarien (zum Vergleich die ehemals verwendeten SRES-Szenarien; Quelle: Klimanavigator 2017)

ÄNDERUNGSSTATISTIK

In Tab. 3 ist jeweils der Median der Temperaturänderungssignale des Modellensembles für die drei RCP-Szenarien aufgeführt. Für die Stadt Singen schwanken diese für die nahe bis mittelfristige Zukunft zwischen 1,1 °C (RCP 2.6) und 2,5 °C (RCP 8.5).

Der Median gilt als robuster statistischer Wert und wird als Maß für das Änderungssignal empfohlen. Exemplarisch für das RCP-Szenario 8.5 werden weitere statistische Werte in Tab. 4 aufgeführt (die Änderungen sind auf einem Signifikanzniveau von 95 % statistisch signifikant). Die Schwankungsbreite der Änderungen liegt in der nahen bis mittleren Zukunft zwischen 0,7 °C und 3,3 °C (vgl. Abb. 24). Bei Betrachtung der langjährigen monatlichen Temperaturänderungen wird deutlich, dass die Temperaturzunahmen in den (Spät)Sommer- und Wintermonaten am höchsten und im Frühjahr am geringsten ausfallen (Abb. A 3 im Anhang).

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁸ Special Report on Emissions Scenarios

Das für die Modellrechnung gewählte Änderungssignal basiert in Abstimmung mit der Stadt Singen und auf Anraten des Projektbeirats auf dem Median des RCP-Szenario 8.5, um im Sinne des Vorsorgegedankens das Szenario mit den stärksten Auswirkungen zu berücksichtigen (zumal dessen Eintreten nach derzeitigem Kenntnisstand befürchtet werden muss). Mit Blick auf den gewählten Planungshorizont – das Bezugsjahr ist 2050 – ergibt sich das Klimaänderungssignal von $\delta = 1,9 \text{ K}$ als Mittelwert der Änderungsstatistik in der nahen und mittelfristigen Zukunft.

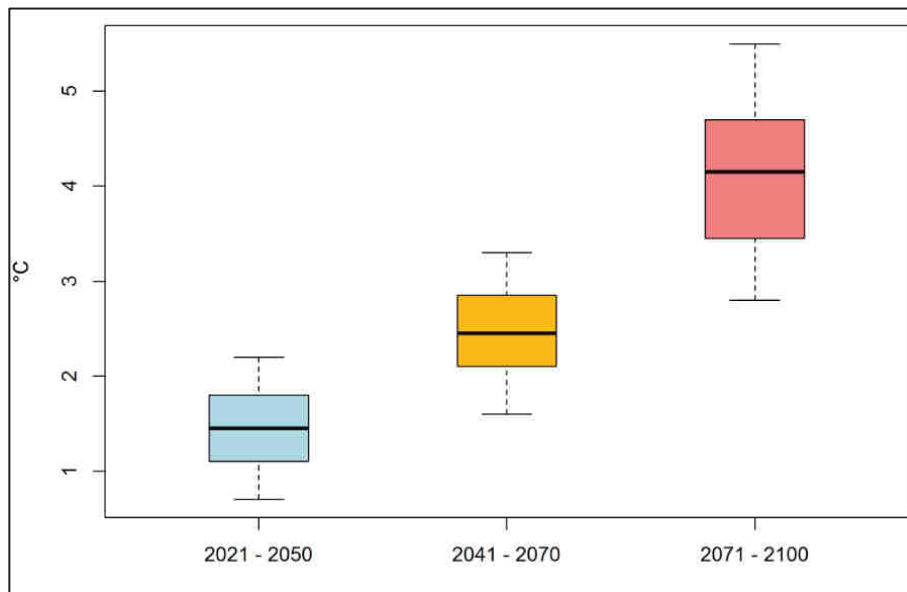


Abb. 24: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für die Stadt Singen, Klimaszenario RCP 8.5

Tab. 3: Statistik der langjährigen mittleren Änderung der Temperatur (in °C, Median des Jahresmittelwerts) für die Szenarien RCP 2.6, 4.5 sowie 8.5 für die Stadt Singen.

Median (Q ₅₀)	2021 – 2050	2041 – 2070	2071 – 2100
RCP 2.6	1,1	1,2	1,1
RCP 4.5	1,4	1,8	2,2
RCP 8.5	1,4	2,5	4,2

Tab. 4: Statistik der langjährigen mittleren Änderung der Temperatur (in °C, Jahresmittelwert) für das Szenario RCP 8.5 für die Stadt Singen (Q = Quantil, MEAN = Mittelwert, SD = Standardabweichung).

Statistischer Wert	2021 – 2050	2041 – 2070	2071 – 2100
Q ₀₀	0,7	1,6	2,8
Q ₀₅	0,8	1,7	3,0
Q ₂₅	1,1	2,1	3,6
Q ₅₀	1,5	2,5	4,2
Q ₇₅	1,8	2,8	4,6
Q ₉₅	2,2	3,3	5,5
Q ₁₀₀	2,2	3,3	5,5
MEAN	1,5	2,5	4,1
SD	0,5	0,5	0,9

5 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 20 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kap. 4.2). Die Ergebnisse gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (in 2 m ü. Gr.) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) sowie 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Planungskarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftereinwirkungsbereichen).

5.1 MODELLERGEBNISSE STATUS QUO

5.1.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

ALLGEMEINES

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Rückgang während der Abend- und Nachtstunden. Kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages wird das Temperaturminimum erreicht. Das Ausmaß der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, große Unterschiede aufweisen (vgl. Abb. 20). Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im *Siedlungsbereich* ist vor allem von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über *grünbestimmten Flächen* weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet).

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im *Wald* beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vglsw. milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – außerdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte diurnale Temperaturamplitude über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere *Gewässer* auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb des Stadtgebiets bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitestgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung etwa der Planungshinweiskarten auf diesen beruht (vgl. Kap. 6.3).

ERGEBNISSE TEMPERATURFELD

Das sich um 04:00 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld im Stadtgebiet umfasst bei Minimalwerten von weniger als 12 °C über siedlungsfernen Freiflächen und Maximalwerten von mehr als 19 °C im Zentrum der *Kernstadt* eine Spannweite von ca. 8 K (Abb. A 6 im Anhang). Die mittlere Temperatur im Stadtgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,1 °C.

Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Einzelhaus- oder Blockbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (Abb. 25). Die höchsten Temperaturen treten mit > 19 °C in den Kernbereichen der Innenstadt (z.B. entlang der *Erzbergerstraße*) sowie den großflächigen Industrie- und Gewerbegebieten auf und resultieren aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad. Die sich an den Innenstadtbereich anschließende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 18,5 - 19 °C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Die Richtung Stadtrand gelegenen Siedlungsflächen sind vorwiegend durch Einzel- und Reihenhausbebauung geprägt (u.a. entlang der *Keltenstraße*, *Laubenweg*) und weisen unter den bebauten Flächen mit durchschnittlich 16,5 °C das geringste Temperaturniveau auf, Werte über 18 °C werden in der Regel nicht erreicht. Die durch Abstandsflächen und höhere Gebäude geprägte Zeilenbebauung, wie sie z.B. entlang der *Rielasinger Straße* auftritt, liegt mit ca. 17,5 - 18,5 °C zwischen den übrigen Strukturtypen.

Im Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Stadtgebiet sind mit weniger als 12 °C über ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im Umland zu verzeichnen. Im Untersuchungsgebiet sinken die nächtlichen Werte in den Senken stärker reliefierter Bereiche, in denen sich Kaltluft aufgrund ihrer – im Vergleich zu wärmeren Luftmassen – höheren Dichte sammelt, bis auf ca. 10 °C. In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü.Gr. Temperaturwerte um 14,5 °C erreicht werden (z.B. *Großer Tannenwald*, *Erlenwald*). Verglichen mit den weitläufigen Freiräumen des Umlandes weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 15 - 16,5 °C ein höheres Wertespektrum auf (z.B. *Alter Friedhof* an der *Anton-Bruckner-Straße*, *Knöpfleswies*), wobei eine Abhängigkeit von der baulichen Umgebung besteht, für die sie dennoch potentielle Entlastungsräume darstellen. Neben der Umgebung sind die Größe und Struktur der Grünflächen entscheidend – so sinkt die Temperatur bspw. über den ausgedehnteren Grünflächen um den *Mühlkanal* bzw. die *Radolfzeller Aach* am Stadtrand bis unter 14 °C.

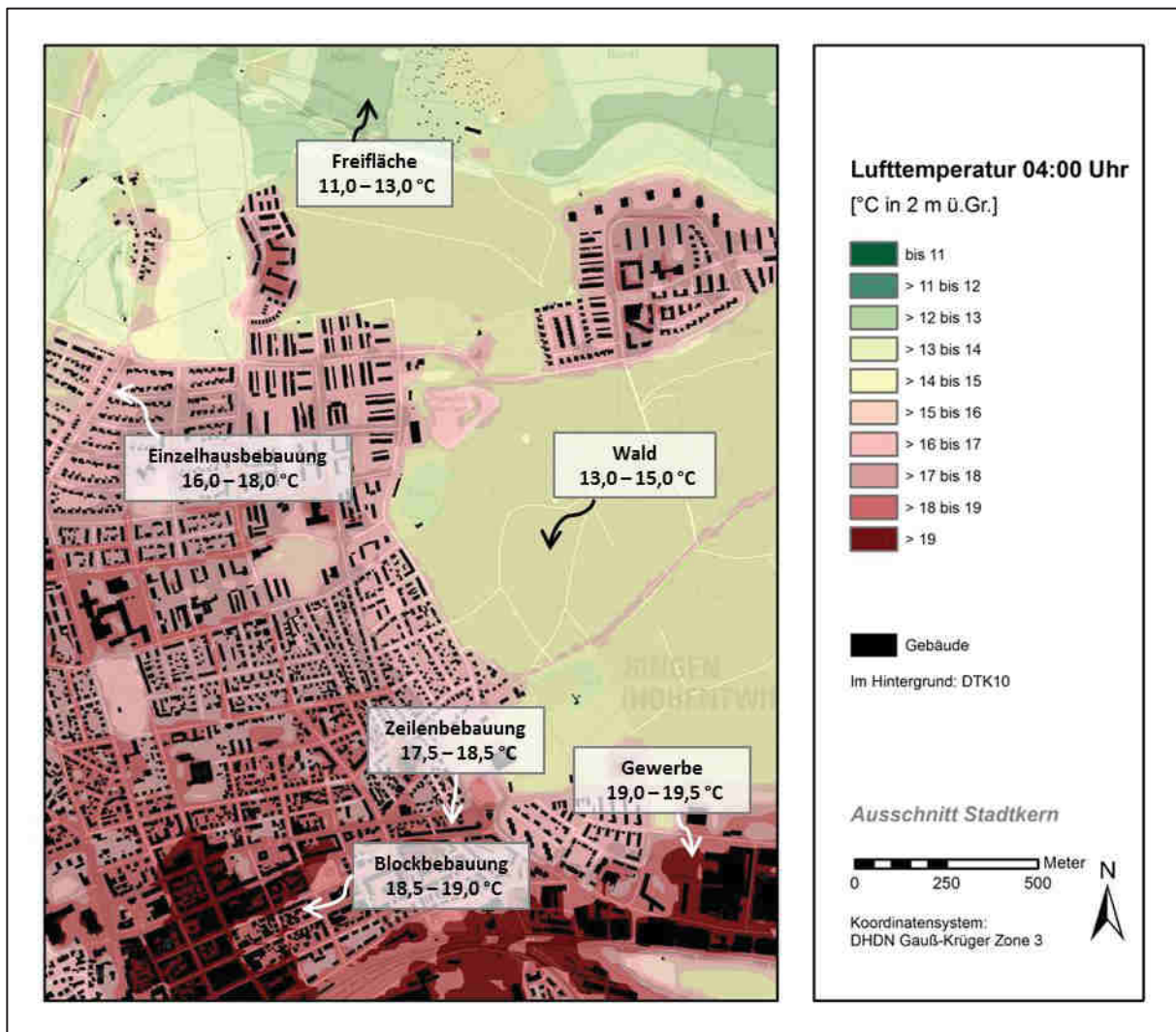


Abb. 25: Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen

5.1.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

ALLGEMEINES

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind Hangabwinde und Flurwinde – erstgenannte treten im Stadtgebiet aufgrund der relativ hohen Reliefenergie häufiger auf.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Mosimann et al. 1999). **Hangabwinde** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m s^{-1} , ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Hergert 1991). In ebenen Lagen bilden sich unter günstigen Bedingungen sogenannte **Flurwinde** aus, die radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet sind. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Kiese et al. 1988). Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene (Geschwindigkeit i.d.R. deutlich $< 2 \text{ m s}^{-1}$), die

bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden **Strukturwinde** genannt.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von belasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßen-schluchten kann in Abhängigkeit von Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

ERGEBNISSE KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln. Abb. 26 zeigt das für den Zeitpunkt 04:00 Uhr modellierte Strömungsfeld für einen Ausschnitt des Stadtgebiets, das sich während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetterlage herausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung bzw. -geschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung bzw. Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt⁹. Die unterlegten Farben stellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft dar. Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einem Wert von mindestens $0,1 \text{ m s}^{-1}$, für die unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potentielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen im gesamten Untersuchungsgebiet von vollkommener Windstille bis zu reliefbedingten Maximalwerten von über 4 m s^{-1} (z.B. Ausläufer der *Schiener Berge* südlich *Bohlingen*; Abb. A 7). Ähnlich hohe Werte werden im Stadtgebiet als Hangabwinde des *Hohentwiel* erreicht. Zusammen mit der Strömung aus den nordwestlich gelegenen Erhöhungen (u.a. *Krützenbühl*) sorgen diese in der *Kernstadt* für eine relativ gute Durchlüftung der Siedlungsgebiete entlang der *Radolfzeller Aach*, wobei Windgeschwindigkeiten $> 1,0 \text{ m s}^{-1}$ unter autochthonen Bedingungen die Ausnahme bleiben. Neben dieser vglsw. großflächigen Strömung sorgen in das Stadtgebiet reichende Grünzüge lokal für eine nächtliche Durchlüftung, so z.B. die Grün- und Sportflächen nördlich der *Überlinger Str.* bzw. *Bohlinger Str.*, im Bereich des *Hohentwielstadions* oder um den *Ziegeleiweiher* zwischen *Bruderhofgebiet* und übriger *Kernstadt*.

In Richtung des Zentrums nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche werden noch wirksam durchlüftet ($> 0,1 \text{ m s}^{-1}$), während in den dichter bebauten Bereichen keine wirksame Strömung mehr erreicht wird. In abgeschwächter Form gilt dies auch für die einzelnen Stadtteile, die überwiegend gute Durchlüftungsverhältnisse aufweisen.

Waldgebiete weisen aufgrund der Betrachtung in 2 m ü.Gr. geringe autochthone Strömungsgeschwindigkeiten auf (unterhalb des Kronendachs), spielen jedoch für den Kalt- und insb. Frischlufthaushalt des Stadtgebiets ebenfalls eine wichtige Rolle.

⁹ Für eine übersichtlichere Darstellung werden die Pfeile in geringerer Auflösung abgebildet.

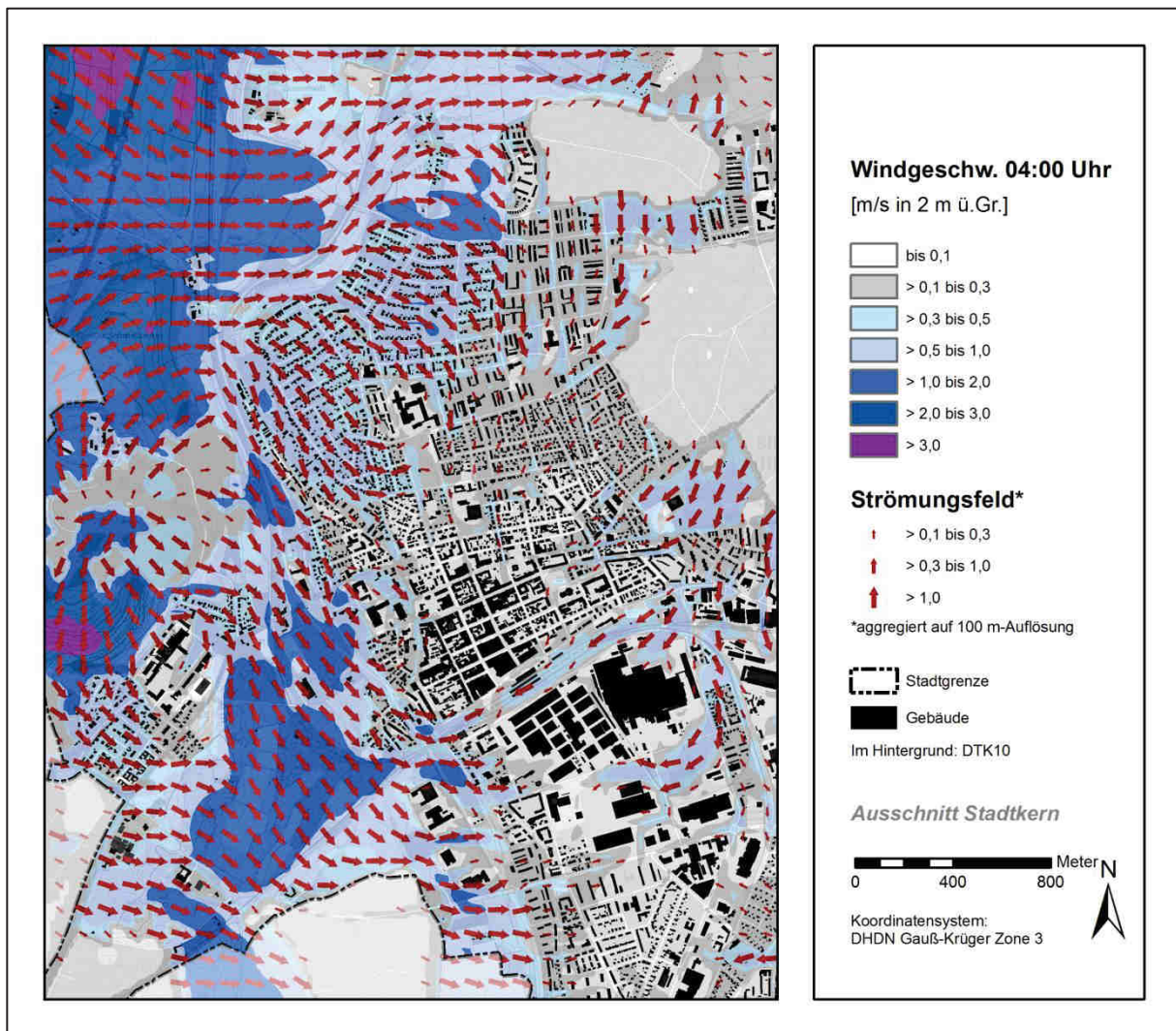


Abb. 26: Nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen

5.1.3 KALTLUFTVOLUMENSTROM

ALLGEMEINES

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potentielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche aber nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Vereinfacht ausgedrückt stellt der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 27). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 20 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*Dichte* aufzufassen. Dieser Wert kann über ein 20 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz veranschaulicht werden, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Wird nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft bestimmt, ist diese als rasterbasierte

Volumenstromdichte zu verstehen. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen wird dieser Wert in den Planungskarten auf einen Querschnitt von 1 m skaliert (Kaltluftvolumenstromdichte in der Einheit $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann.

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder (im Rahmen dieser Modellrechnung nicht einzeln aufgelöste) Gebäude und Mauern können luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab.

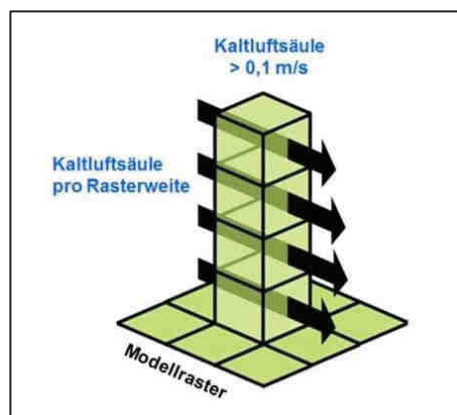


Abb. 27: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

ERGEBNISSE KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum folgt im Wesentlichen dem Muster des Kaltluftströmungsfeldes, weicht an einigen Stellen jedoch von diesem ab (Abb. A 8).

Die geringsten Werte finden sich abermals in der Innenstadt sowie den Industrie- und Gewerbegebieten, die aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur beschränkt durchlüftet werden und in denen nur wenige Grünflächen hohen Kaltluftentstehungspotentials vorhanden sind (Abb. 28).

Die an den Hängen und über Freiflächen mit Siedlungsbezug entstehende Kaltluft strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt für die höchsten Werte (in der *Kernstadt* insb. wiederum im nordwestlichen Siedlungsgebiet bzw. entlang der *Radolfzeller Aach*). Über Grünachsen dringt die Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als

die Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes. Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen.

Bei Betrachtung des gesamten Stadtgebiets treten die geringen Kaltluftvolumenströme um *Bohlingen* hervor. Aufgrund der Tallage heben sich hier die Strömungsgeschwindigkeiten teilweise auf, d.h. die von den Hängen kommende Kaltluft „strömt“ hier nicht weiter – das Gebiet selbst wird jedoch von Kaltluft erreicht, was auch im Temperaturfeld deutlich wird.

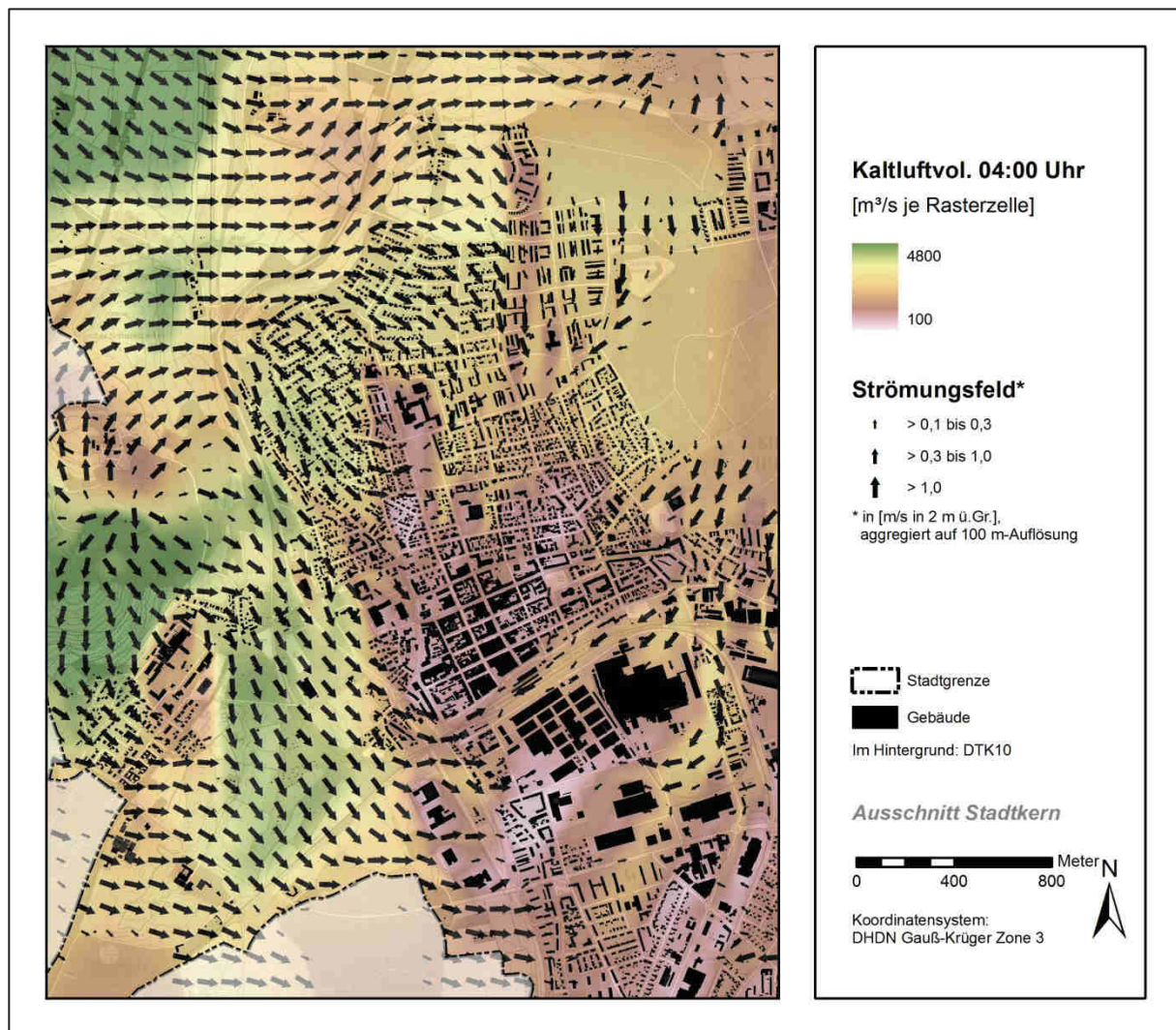


Abb. 28: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen

5.1.4 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

ALLGEMEINES

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹⁰. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

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

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*; vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Braunschweig mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala (VDI 2004), die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. 5).

ERGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Stadtgebiet auf. Werte ≤ 23 °C (*keine Wärmebelastung*) stellen eine Ausnahme dar und sind im Umfeld größerer Gewässer zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. *Kiesgrube Friedingen, Ziegeleiweiher* in der *Kernstadt* sowie *Rickelshausen*; Abb. A 9). Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit einer *schwachen Wärmebelastung* ab (PET ≤ 29 °C), in dichten Beständen werden auch geringere Werte erreicht. Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (Abb. 29).

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte werden über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum erreicht (bis > 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte. Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in der Innenstadt weniger stark aus, da die dichte und zumeist höhere Bebauung für eine gewisse Verschattung sorgt. Innerhalb der *Kernstadt* zeichnen sich die Parkareale entlang der *Radolfzeller Aach* oder an der *Anton-Bruckner-Straße*¹¹ mit einer vglsw. geringen Wärmebelastung aus.

Tab. 5: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET in den Tagesstunden (nach VDI 2004).

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

¹¹ Da die PET knapp oberhalb der Grenze zur *starken Wärmebelastung* liegt (35 °C), wird dies im Kartenbild nicht ersichtlich.

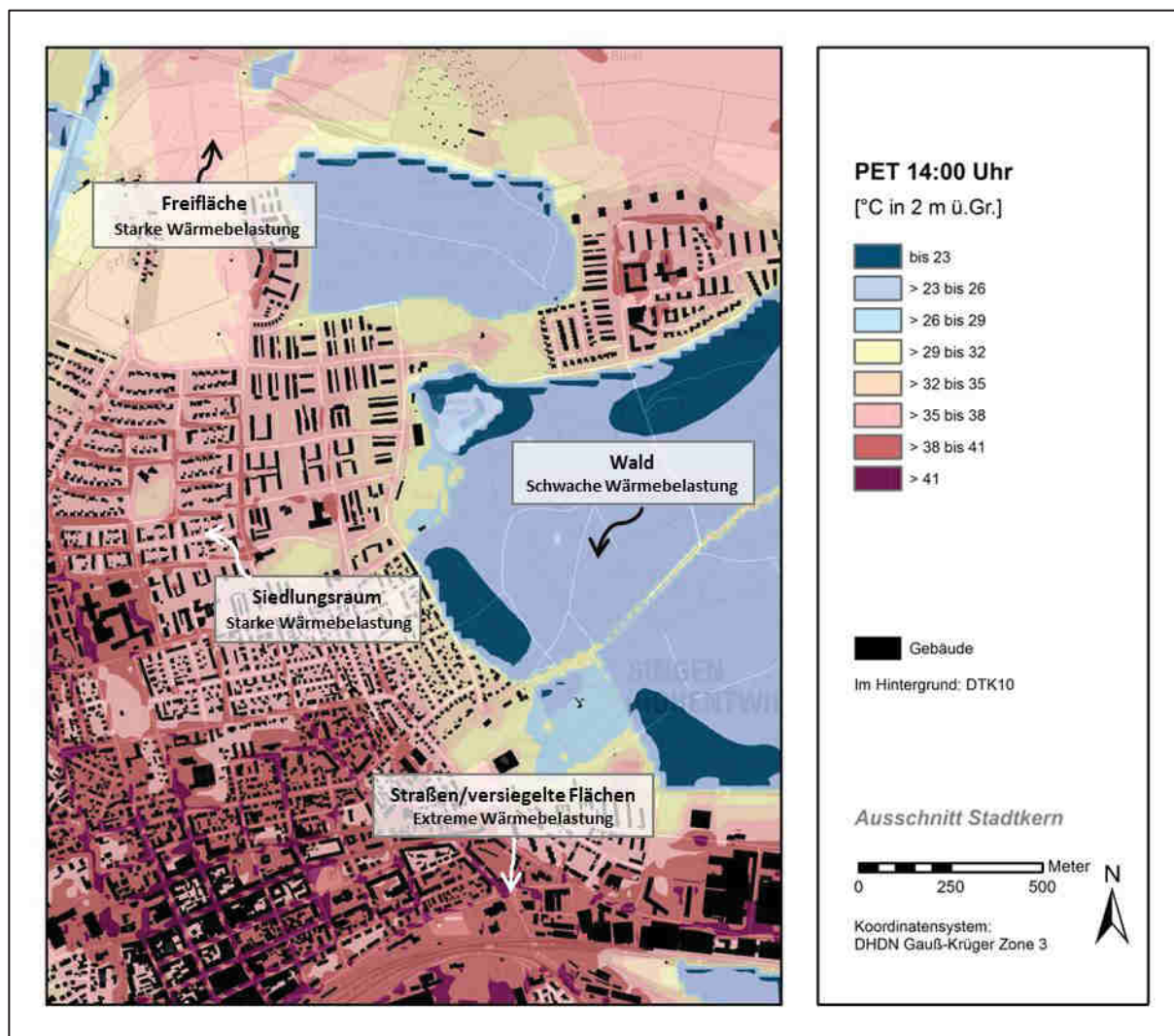


Abb. 29: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen

5.2 MODELLERGEBNISSE ZUKUNFTSRECHNUNG

Um das Stadtklima in Singen im Jahr 2050 abzubilden, wurde die Modellierung mit einem um 1,9 K erhöhten Temperaturantrieb durchgeführt, potentielle Landnutzungsänderungen sind dabei nicht enthalten (vgl. Kap. 4.4).

5.2.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Durch den erhöhten Temperaturantrieb ergibt sich flächendeckend ein höheres Temperaturniveau – im Stadtgebiet liegt die mittlere bodennahe Lufttemperatur unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,7 °C. Die Zunahme gegenüber dem Status quo beträgt 1,57 K und fällt damit geringer aus als der Temperaturantrieb, was darauf zurückzuführen ist, dass verschiedene Nutzungsstrukturen unterschiedlich stark reagieren.

Zwar erhöht sich die Lufttemperatur auch über Grünflächen, doch weisen diese weiterhin ein deutliches Temperaturgefälle zum Siedlungsraum auf und nehmen damit eine wichtige Entlastungsfunktion ein (insb. unversiegelte Freiflächen), deren Bedeutung angesichts der Zunahme im Siedlungsraum sogar noch steigt (vgl. Abb. A 10). Abb. 30 verdeutlicht, dass Temperaturen über 20 °C zukünftig in autochthonen Sommernächten in großen Teilen der *Kernstadt* möglich sind (sogenannte *Tropennächte*), erst Richtung

Stadtrand werden noch als angenehm empfundene Schlaftemperaturen unter 18 °C erreicht¹² (UBA 2016; vgl. Kap. 6.3.2).

5.2.2 KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN

Die Auswirkungen des alleinigen Klimaänderungssignals, d.h. ohne Landnutzungsänderungen, auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen sind minimal. Das Windfeld wird maßgeblich durch Strömungshindernisse gesteuert, auch das Relief übt einen wichtigen Einfluss aus (Hangabwinde) – an beiden Voraussetzungen ändert sich in den Annahmen der Zukunftsrechnung nichts. Durch die unterschiedlichen Temperaturänderungen verschiedener Nutzungsklassen ergeben sich Auswirkungen auf Flur- und Strukturwinde bzw. den Kaltluftvolumenstrom, die jedoch – gerade in einer mesoskaligen Modellrechnung – sehr gering ausfallen, da insgesamt das Temperaturniveau steigt. Entsprechend sind die Unterschiede in der gesamtstädtischen Betrachtung fast nicht auszumachen (vgl. Abb. A 11, Abb. A 12).

5.2.3 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

In Bezug auf die PET ist genau wie bei der nächtlichen Lufttemperatur zukünftig insgesamt ein höheres Niveau erkennbar, doch fallen die Unterschiede nicht so deutlich aus. Auch am Tage erhöht sich die Lufttemperatur, doch ist diese nur eine Eingangsgröße der PET. Für die Bewertung der Wärmebelastung am Tage ist die Strahlungstemperatur ein entscheidender Faktor – der sich durch den Klimawandel an autochthonen Tagen nicht wesentlich ändert (da bereits im Status quo ungehinderte Einstrahlungsbedingungen angenommen wurden).

So heben sich auch in Zukunft Waldflächen mit einer schwachen *Wärmebelastung* im Kartenbild ab, wobei die Bereiche < 23 °C (*keine Wärmebelastung*) nahezu wegfallen (Abb. A 13). Im Siedlungsraum selbst sowie über städtischen Grünflächen sind dagegen höhere Wärmebelastungen vorzufinden, wobei die *extreme Wärmebelastung* weiterhin hauptsächlich im Straßenraum bzw. über versiegelten Plätzen auftritt (Abb. 31).

¹² Mit den steigenden Temperaturen ist jedoch auch von einer gewissen Anpassung des Menschen daran auszugehen, was als angenehme bzw. belastende Bedingungen gelten.

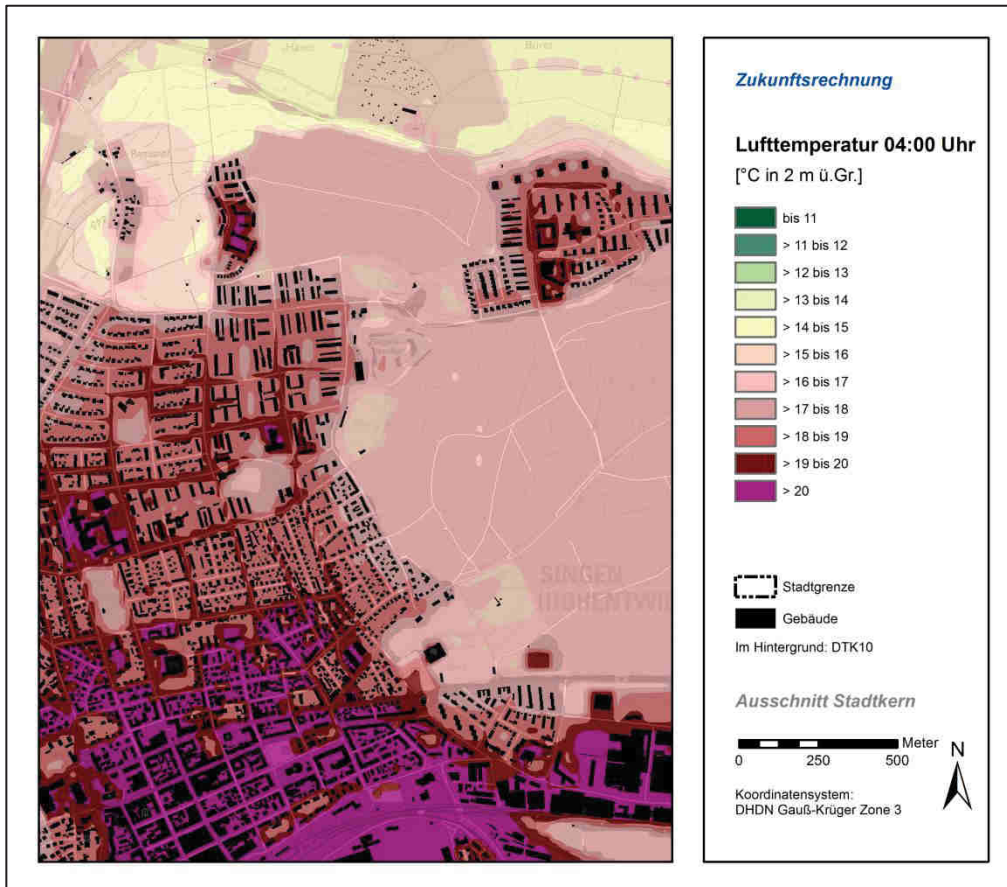


Abb. 30: Nächtliches Temperaturfeld in der Zukunftsrechnung 2050 in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen

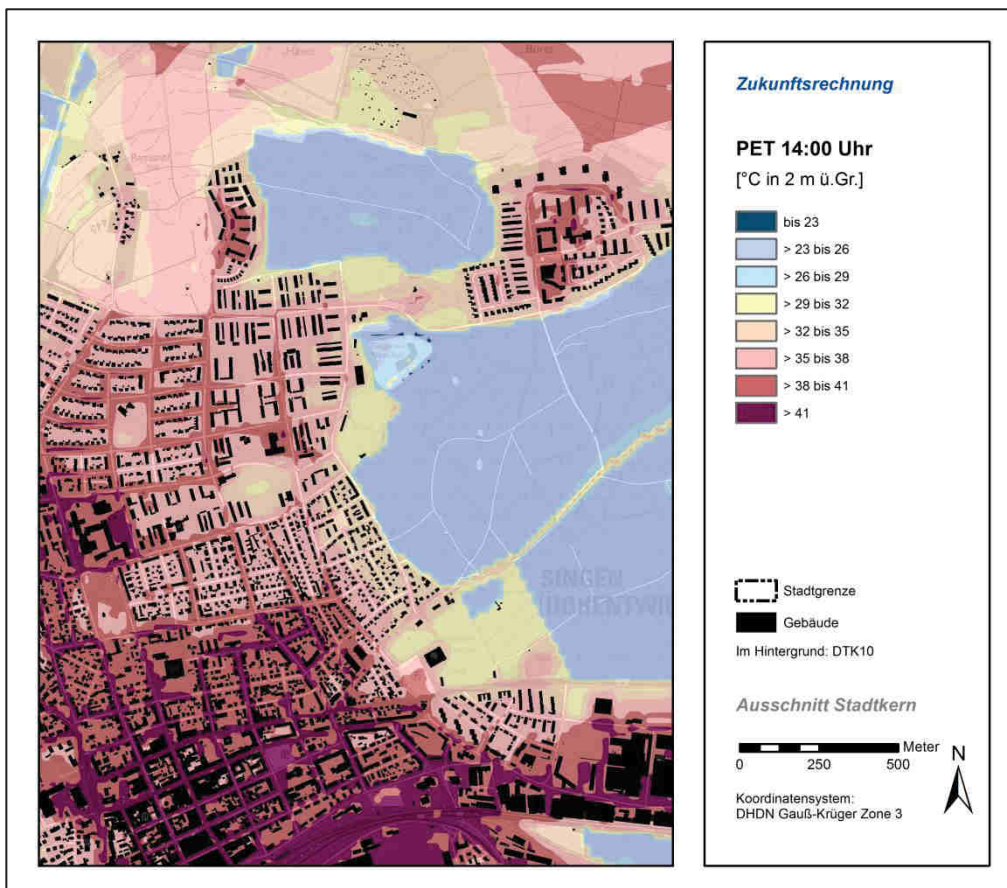


Abb. 31: Wärmebelastung am Tage in der Zukunftsrechnung 2050 in einem Ausschnitt der Kernstadt Singen

6 Planungskarten

Um Aussagen über Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen untereinander abgrenzbar sein. Zum Beispiel ist die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt, auch in den Siedlungsflächen kann die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren. Um diese Heterogenität in den Klimaanalyse- bzw. Planungshinweiskarten darstellen zu können, wurden Blockflächen anhand ihrer Nutzungsinformationen unterschieden und ihnen jeweils die Ergebnisse der Klimaparameter aus der Modellrechnung zugeordnet (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom, PET).

Die Klimaanalysekarte bildet das stadtklimatische Prozessgeschehen in der Nacht ab (Überwärmung der Siedlungsflächen, Kaltlufthaushalt). Für den Status quo und das Zukunftsszenario wurden getrennte Karten erstellt – letztere enthält eine Einschätzung über die klimatischen Auswirkungen von FNP-Potentialflächen, also Wohn- und Gewerbegebieten, die im Flächennutzungsplan 2020 als mögliche zukünftige Baugebiete zur Nachverdichtung bzw. Siedlungsentwicklung enthalten sind. Die Planungshinweiskarten beleuchten neben der Nacht- auch die Tagsituation (getrennte Karten), nehmen jeweils eine Bewertung der Flächen vor und verknüpfen diese mit allgemeinen Planungshinweisen. Die Ergebnisse der Zukunftsrechnung sind jeweils in den Karten integriert, um für die planerische Arbeit möglichst viele Informationen in einem Kartenwerk zu haben. Die Planungskarten basieren auf der Modellrechnung, d.h. die Resultate der Messkampagne sind nicht darin integriert, verdeutlichen jedoch die Gültigkeit der in den Karten getroffenen Aussagen (vgl. Kap. 2.3).

6.1 KLIMAANALYSEKARTE STATUS QUO

6.1.1 VORGEHENSWEISE

Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte und bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftvolumenstrom; VDI 2014). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen und qualitativen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefergehende Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insb. am Rand des Untersuchungsgebiets) – um dies kenntlich zu machen, wurden das außerstädtische Umland in einer leicht transparenten Farbgebung gehalten.

Tab. 6: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbeaum.

Nächtlicher Wärmeinseleffekt [K]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 2	8,9
> 2 bis 3	26,8
> 3 bis 4	37,7
> 4 bis 5	10,8
> 5 bis 6	9,4
> 6	6,3

6.1.2 ERGEBNISSE

BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu unversiegelten Freiflächen im Untersuchungsgebiet, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 13,4 °C aufweisen. Der **Wärmeinseleffekt** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und stellt somit eine geeignetere Kenngröße zur Erfassung der städtischen Überwärmung dar als absolute Temperaturwerte.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 17,4 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass nahezu alle bebauten Flächen eine Überwärmung > 2 K aufweisen, darunter der Großteil Werte von > 2 bis 4 K (ca. 75 %) und mehr als 15 % sogar > 5 K (Tab. 6). Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbebauung tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen bzw. Blockbebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind.

Auch Plätze sowie der Verkehrsraum (Straßen, Wege, Gleisfläche) sind anhand ihrer nächtlichen Überwärmung dargestellt. Diese folgt demselben räumlichen Muster wie bei den Siedlungsflächen, fällt im Mittel jedoch geringer aus, da der Verkehrsraum viele siedlungsferne Flächen geringerer Überwärmung umfasst.

KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom $> 92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet). Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereich ausgewiesen.

Innerhalb des Stadtgebiets gelten mit 39 % mehr als ein Drittel der Siedlungs- und Gewerbeflächen als Kaltlufteinwirkungsbereich (ohne Betrachtung des Verkehrsraums). Mehrheitlich handelt es sich um Wohnsiedlungsflächen am nordwestlichen Rand der *Kernstadt* – im Innenstadtbereich treten sie nur vereinzelt auf. Die Grenze, ab wann eine Fläche als Kaltlufteinwirkungsbereich mit überdurchschnittlich hohem Kaltluftvolumenstrom gilt, wird durch den großräumigen Kaltluftabfluss aus dem Hegau bestimmt und kennzeichnet vor allem die relativen Unterschiede im Stadtgebiet. Der zugehörige Schwellenwert von $92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ liegt, verglichen mit anderen Städten, relativ hoch, sodass weitere Siedlungsbereiche mit vergleichsweise (aber nicht überdurchschnittlich) guter Durchlüftung bestehen – dies betrifft insb. die übrigen Stadtteile wie z.B. *Beuren an der Aach* oder *Bohlingen*.

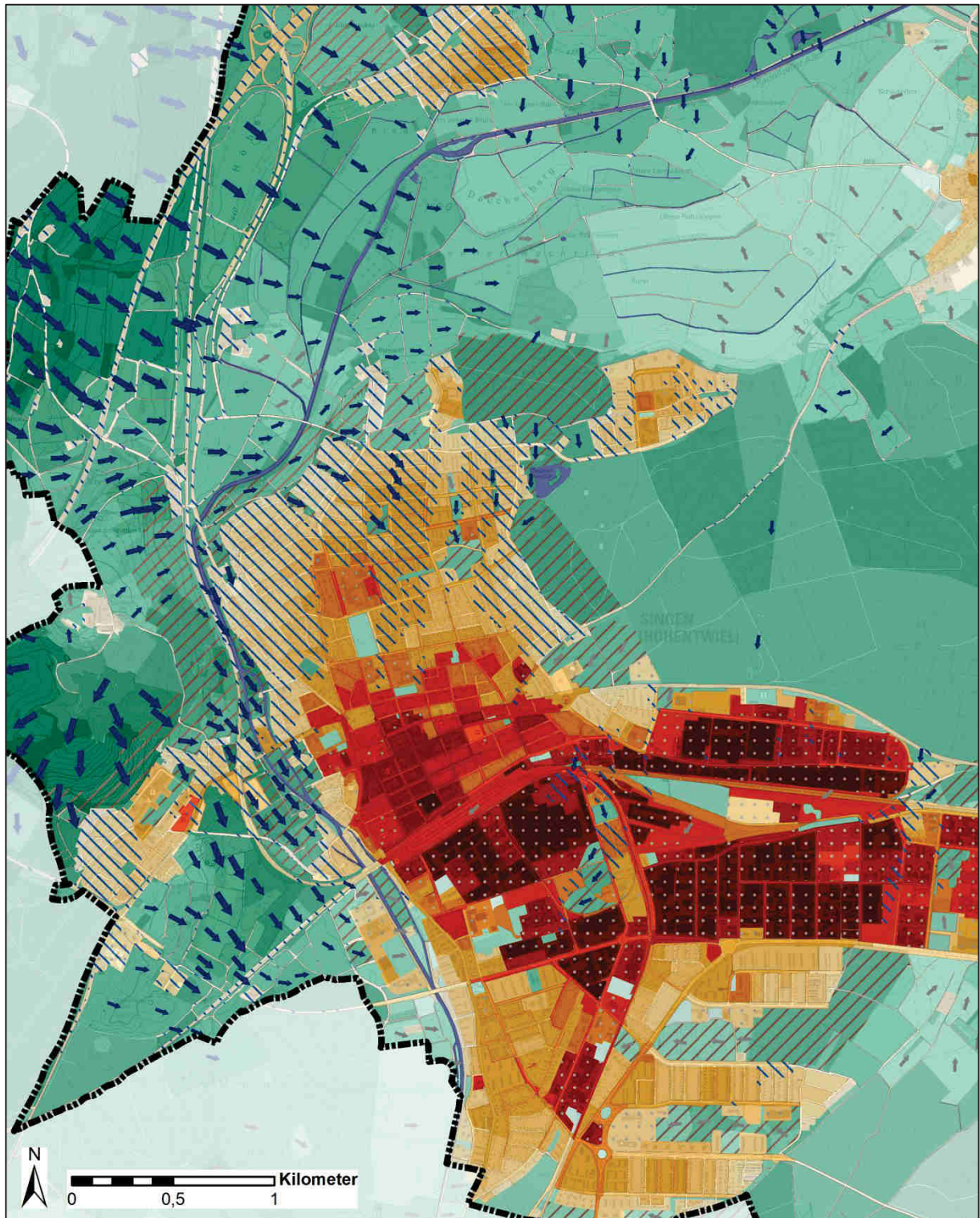
KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN ÜBER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insb. unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z.B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), doch auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kap. 5.1.3).

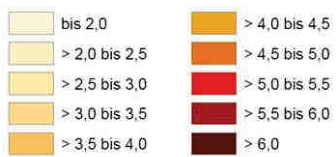
In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen (Abb. 32). Zudem werden über Grünflächen und Gewässern sowie Straßen- und Gleisflächen **Flurwinde** durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine Windgeschwindigkeit von mindestens $0,3 \text{ m s}^{-1}$ aufweisen. Die Pfeilgröße richtet sich dabei nach der Kaltluftvolumenstromdichte. Der Übersichtlichkeit halber sind nur Flurwinde über Gewässern und Gleisflächen sowie Grünflächen ab 1 ha Größe aufgeführt, innerhalb des Stadtgebiets auch über für den Kaltlufthaushalt wichtigen Grünflächen kleiner 1 ha.

Im Singener Stadtgebiet sind keine „klassischen“ Leitbahnstrukturen vorhanden, die linienhaft Kaltluft in den Stadtkörper hineintragen. Dennoch gibt es viele Flächen, die wichtige Funktionen für die städtische Durchlüftung einnehmen und den Luftaustausch zwischen im Umland produzierter Kaltluft und dem Belastungsraum (Wirkungsraum) begünstigen. Diese Bereiche wurden als **Klimaaustauschflächen** hervorgehoben – auf Grundlage der Kaltluftmodellierung ausgewiesene Flächen, die für das Stadtgebiet eine bedeutende Durchlüftungsfunktion aufweisen. Dies gilt insb. für autochthone Wetterlagen (überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstrom bzw. -produktion), aber auch bei übergeordneter Strömung (Ventilation). Dabei wurden vornehmlich siedlungsnahen Flächen ausgewiesen, da auf siedlungsfernen Flächen keine großräumigen Entwicklungen zu erwarten sind. Anhand des Strömungsfeldes und ihrem Kaltluftliefervermögen kann jedoch auch die Bedeutung siedlungsferner Grünflächen in der Klimaanalysekarte abgelesen werden.

Markante Klimaaustauschflächen liegen z.B. durch den flächenhaften Kaltluftabfluss des *Hohentwiel* vor, auch die *Radolfzeller Aach-Aue* im Bereich *Mühlkanal* bzw. am nordwestlichen Kernstadtrand oder die *Knöpfleswies* zählen als gut durchlüftete Areale zu den Klimaaustauschflächen. Der *Alte Friedhof* an der *Anton-Bruckner-Straße* wird als singuläre (ohne Anschluss an umliegende) innerstädtische Grünfläche zwar nicht als Klimaaustauschfläche klassifiziert, die weitere Analyse wird jedoch dessen hohe Bedeutung für das Singener Stadtklima sowohl in der Nacht als auch am Tage zeigen.

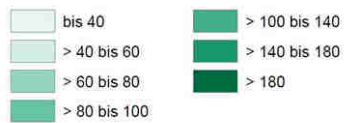


Siedlungs- und Verkehrsflächen
 Wärmeineleffekt im Siedlungsraum⁵
 Temperaturabweichung zu Freiflächen um 04:00 Uhr [K]



☐ Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung⁶

Grün- und Freiflächen
 Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen¹
 Kaltluftvolumenstrom um 04:00 Uhr [m³/(s*m)]



Modelliertes Kaltluftströmungsfeld²

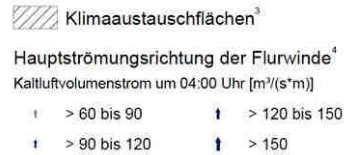


Abb. 32: Klimaanalysekarte Nachtsituation Ist-Szenario für einen Ausschnitt der Kernstadt Singen mit verkürzter Legende (für Details siehe gesamtstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 14 im Anhang)

6.2 KLIMAANALYSEKARTE 2050 INKL. FNP-POTENTIALFLÄCHENBEWERTUNG

6.2.1 KLIMAANALYSEKARTE 2050

Die Klimaanalysekarte 2050 beruht auf den Modellergebnissen, die ein geändertes Klimasignal, jedoch keinen Landnutzungswandel beinhalten (vgl. Kap. 5.2). Das Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen wird analog zum Status quo abgebildet. Die bioklimatische Belastung im Siedlungsraum wird wiederum über den nächtlichen Wärmeineffekt dargestellt, wobei dieser durch den Unterschied zwischen dem zukünftigen Temperaturfeld im Siedlungsraum und der mittleren Temperatur über unversiegelten Freiflächen im Stadtgebiet aus dem Status quo bestimmt wird (13,4 °C). Da die Temperatur über Grünflächen in Zukunft ebenfalls steigt, kann streng genommen nicht von dem „Wärmeineffekt“ gesprochen werden, doch verspricht dieses Vorgehen eine bessere Veranschaulichung der zunehmenden bioklimatischen Belastung des Siedlungsraums im Kartenbild.

Die nächtliche Lufttemperatur erhöht sich flächendeckend, die Zunahme weist jedoch Unterschiede zwischen verschiedenen Nutzungsstrukturen auf. Besonders relevant ist sie im Siedlungsraum, der bereits im Status quo überwärmt ist und dessen mittlere Lufttemperatur sich von 17,4 auf 18,8 °C erhöht (+ 1,4 K; Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet). Das Zentrum der *Kernstadt* sowie die Gewerbeflächen sind in Zukunft weiterhin die am stärksten überwärmten Flächen, doch auch in den umliegenden Stadtteilen ist ein höheres Niveau vorzufinden (Abb. 34). Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, sind die Auswirkungen der Zukunftsrechnung ohne Landnutzungsänderungen auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen minimal. Folglich sind der Kaltlufteinwirkungsbereich und das Strömungsfeld im Zukunftsszenario sehr ähnlich zum Status quo und die Klimaaustauschflächen sogar als identisch einzustufen.

6.2.2 FNP-POTENTIALFLÄCHEN

Eingebettet in die Klimaanalysekarte 2050 ist eine qualitative Bewertung von Potentialflächen möglicher Wohn- und Gewerbebebauung hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Auswirkungen. Damit kann aufgezeigt werden bei der Entwicklung welcher Flächen besondere stadtklimatische Anforderungen beachtet werden sollten. Die Flächenkulisse basiert auf dem Flächennutzungsplan (FNP) 2020 und wurde mit der Stadt Singen abgestimmt (Tab. 7; Stadt Singen 2018).

Tab. 7: FNP-Potentialflächen in Singen und deren stadtklimatische Bewertung (für die Bewertung vgl. Tab. 8).

Stadtteil	Potentialfläche	Typ	Bewertung	Entwicklung
Schlatt	Si-11	Wohn	II-2	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
Hausen	Si-21	Gewerbe	II-3	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
Friedingen	Si-6 (klein)	Wohn	I	vertretbar
	Si-6 (groß)	Wohn	II-2	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
	Si-7	Wohn	III	ohne stadtkl. Maßnahmen nicht zu empfehlen
Kernstadt	Si-12 (Ost)	Wohn	III	ohne stadtkl. Maßnahmen nicht zu empfehlen
	Si-12 (West)	Wohn	III	ohne stadtkl. Maßnahmen nicht zu empfehlen
	Si-13	Wohn	II-3	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
	Si-15	Wohn	II-2	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
	Si-16	Gewerbe	II-1	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
	Si-20 (Nord)	Gewerbe	II-3	mit stadtkl. Maßnahmen vertretbar
	Si-20 (Süd)	Gewerbe	III	ohne stadtkl. Maßnahmen nicht zu empfehlen

Tab. 8: Schema der Bewertung der Potentialflächen in verschiedene Kategorien und damit verbundene Planungshinweise.

Flächenkategorie I: Entwicklung vertretbar	
Potentialflächen der Kategorie I	
Definition	<i>Auch unter dem Einfluss des Klimawandels droht weder ein Verlust wichtiger klimaökologischer Funktionen, noch sind neue humanbioklimatische Belastungssituationen auf den Flächen selbst zu erwarten.</i>
<p>Eine Entwicklung der Flächen in dieser Kategorie kann auf Basis der vorgesehenen Bebauungstypen als stadtklimatisch unbedenklich eingestuft werden. Über das in Singen etablierte Maß hinausgehende Festsetzungen sind im B-Plan-Verfahren nicht zwingend erforderlich.</p> <p>Auf eine Detailuntersuchung im Rahmen der Umweltprüfung kann verzichtet werden.</p>	
Flächenkategorie II: Entwicklung kritisch, unter Beachtung stadtklimatischer Maßnahmen vertretbar	
Potentialflächen der Kategorie II-1	
Definition	<i>In Verbindung mit dem Klimawandel sind zwar keine wichtigen klimaökologischen Funktionen des Ausgleichsraums gefährdet, durch die Bebauung können sich aber neue weniger günstige oder ungünstige humanbioklimatische Situationen auf den Flächen selbst ergeben.</i>
Potentialflächen der Kategorie II-2	
Definition	<i>In Verbindung mit dem Klimawandel ergeben sich zwar keine neuen humanbioklimatischen Belastungssituationen auf den Flächen selbst, aber klimaökologische Funktionen mit hoher oder sehr hoher Bedeutung für die umliegenden Siedlungsräume sind durch die Entwicklung gefährdet.</i>
Potentialflächen der Kategorie II-3	
Definition	<i>In Verbindung mit dem Klimawandel sind klimaökologische Funktionen mit hoher oder sehr hoher Bedeutung für die umliegenden Siedlungsräume gefährdet und es können neue weniger günstige oder ungünstige humanbioklimatische Situationen auf den Flächen selbst entstehen.</i>
<p>Eine Entwicklung der Flächen der Kategorien II-1, II-2 und II-3 kann auf Basis der vorgesehenen Bebauungstypen als stadtklimatisch grundsätzlich vertretbar eingestuft werden, wenn im Rahmen des B-Plan-Verfahrens optimierende Maßnahmen ergriffen werden.</p> <p>In den jeweiligen Umweltberichten sollte diese Einschätzung durch verbal-argumentative (Kategorien II-1 und II-2) sowie ggf. modellgestützte (Kategorie II-3) Detailanalysen verifiziert und konkretisiert werden.</p>	
Flächenkategorie III: Entwicklung aus stadtklimatischer Sicht ohne optimierende Maßnahmen nicht empfehlenswert	
Potentialflächen der Kategorie III	
Definition	<i>Alle Potentialflächen der Kategorie II, die im Bereich bestehender Kaltluftaustauschflächen liegen und von denen angenommen wird, dass sie die Durchlüftung des Stadtgebiets gefährden können.</i>
<p>Auf eine Entwicklung der Flächen dieser Kategorie sollte zum Erhalt eines gesunden Singener Stadtklimas möglichst verzichtet werden. Sollte es zu einem Aufstellungsbeschluss kommen, wird die modellgestützte Herleitung und Umsetzung von optimierenden Maßnahmen mit dem Ziel einer Nivellierung der vorhabenbezogenen Auswirkungen empfohlen, insb. im Hinblick auf die Erhaltung der für das Stadtgebiet wichtigen Funktionen der Kaltluftaustauschflächen.</p>	

BEWERTUNG

Zur Beurteilung der stadtklimatischen Verträglichkeit ihrer Bebauung wurden die Potentialflächen in drei Kategorien eingestuft, die eine Aussage hinsichtlich ihrer möglichen Entwicklung erlauben und mit bestimmten Planungshinweisen verbunden sind (Tab. 8).

Die Bewertung basiert auf einer Kombination der Bedeutung der bisherigen Grünflächen im Status quo (abgeleitet aus der Planungshinweiskarte Nachtsituation; vgl. 6.3) sowie der aus fachgutachterlicher Sicht angenommenen zukünftigen bioklimatischen Situation in den neuen Siedlungs- bzw. Gewerbeflächen in der Nacht (ebenfalls basierend auf der Planungshinweiskarte Nachtsituation; vgl. Abb. 33).

So wird z.B. die Entwicklung von Potentialflächen, deren Bebauung weder einen Verlust wichtiger klimaökologischer Funktionen der bisherigen Grünfläche nach sich zieht, noch neue humanbioklimatische Belastungssituationen auf den Flächen selbst erwarten lässt, als vertretbar gesehen (Flächenkategorie I, z.B. SI-6 (klein) in Friedingen; vgl. Abb. 33).

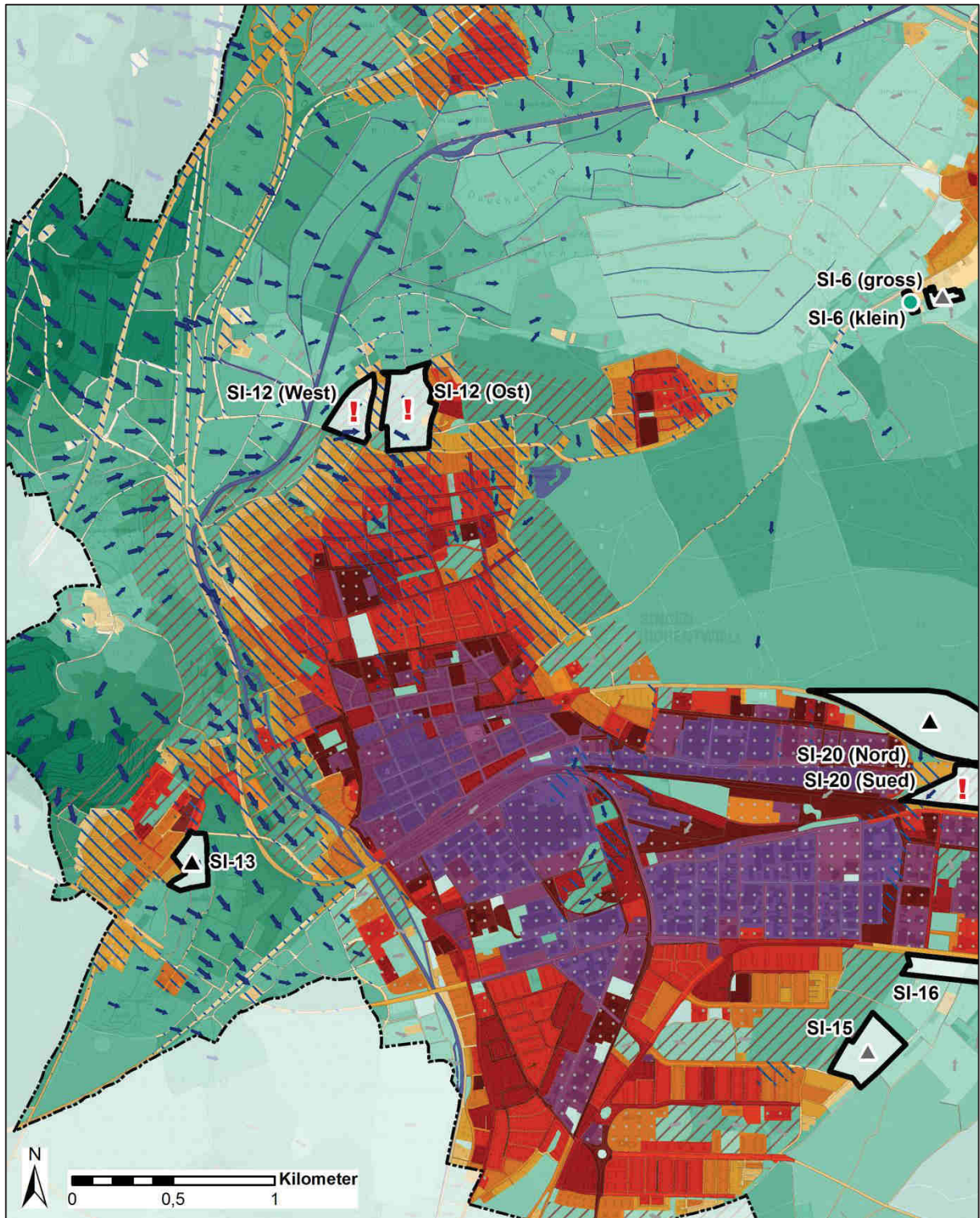
Wird dagegen mindestens eines der beiden Kriterien nicht erfüllt, gilt eine Entwicklung zwar als kritisch, in der Regel jedoch vertretbar, sofern stadtklimatische Anforderungen beachtet bzw. Maßnahmen erfüllt werden (Flächenkategorie II). Je nach Intensität der Auswirkungen wird diese Kategorie in drei Teilkategorien unterschieden, für die verschiedene Planungshinweise gelten (II-1 bis II-3; vgl. Tab. 8).

Als besonders kritisch wird eine Entwicklung gesehen, wenn die Potentialflächen im Bereich bestehender Klimaaustauschflächen liegen (Flächenkategorie III). Dies betrifft insb. Potentialflächen in der *Kernstadt* (z.B. SI-12 im nordwestlichen Stadtgebiet), aber auch die Fläche Si-7 in *Friedingen*. Ohne optimierende Maßnahmen ist von deren Bebauung aus stadtklimatischer Sicht abzuraten. Die Herleitung bzw. Wirksamkeit der Maßnahmen sollte durch modellgestützte Analysen unterstützt bzw. überprüft werden.

Da es sich bei den Potentialflächen um FNP-Entwicklungsvorhaben handelt, kann durch geeignete Vorgaben im B-Plan-Verfahren der einschränkende Einfluss auf den Kaltlufthaushalt gemindert werden. Möglichkeiten dazu bestehen u.a. über die Dichte der Bebauung sowie Ausrichtung von Gebäuden. Im Vergleich zu einzelnen Baulücken erlauben die relativ großen Potentialflächen eine Integration von Grün- und Freiflächen, deren Dimensionierung und Lage auf das Strömungsfeld ausgerichtet werden kann.

		Bedeutung Grün Ist			
		1	2	3	4
erwartetes Bioklima Siedlung Zukunft	1	I	I	II-2	II-2
	2	I	I	II-2	II-2
	3	II-1	II-1	II-2	II-3
	4	II-1	II-1	II-3	II-3
	5	II-1	II-3	II-3	II-3

Abb. 33: Bewertungsmatrix zur Beurteilung der klimatischen Auswirkungen der Potentialflächen (abgeleitet aus der Planungshinweiskarte Nachtsituation)



Potentialflächen

- Kategorie I
- ▲ Kategorie II-1
- ▲ Kategorie II-2
- ▲ Kategorie II-3
- ! Kategorie III

Wärmeinselleffekt Siedlungsgebiet

Temperaturabweichung zu Freiflächen um 04:00 Uhr [K]

- | | | |
|-------------|-------------|-------|
| ■ bis 2 | ■ > 4 bis 5 | ■ > 7 |
| ■ > 2 bis 3 | ■ > 5 bis 6 | |
| ■ > 3 bis 4 | ■ > 6 bis 7 | |

Kaltluftlieferung Grünflächen

Kaltluftvolumenstrom um 04:00 Uhr [m³/(s*m)]

- | | | |
|-------------|--------------|---------------|
| ■ bis 40 | ■ > 60 - 80 | ■ > 120 - 180 |
| ■ > 40 - 60 | ■ > 80 - 120 | ■ > 180 |

Luftaustausch

- ↑↑↑ Kaltluftvolumenstrom (zunehmende Größe)
- ▨ Klimaaustauschflächen
- ▨ Kaltluftwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Abb. 34: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte 2050 inkl. Bewertung der Potentialflächen mit verkürzter Legende (für Details siehe Tab. 8 bzw. gesamtstädtische Darstellung im DIN A3-Format in Abb. A 15 im Anhang)

6.3 PLANUNGSHINWEISKARTE NACHT

Im Unterschied zur Klimaanalysekarte wurden separate Planungshinweiskarten (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Stadtgebiet Singens beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 wurde eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als *Wirkungsraum* bzw. der Bedeutung von Grünflächen als *Ausgleichsraum* vorgenommen (VDI 2008a, VDI 2014) – die Klassifizierung erfolgte sowohl für den Status quo als auch die Zukunftsrechnung 2050. Ausgehend von ihren Bewertungen wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

6.3.1 METHODISCHE GRUNDLAGE: STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

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

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

Erstrebenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine *z-Transformation* standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_i) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; Abb. 35).

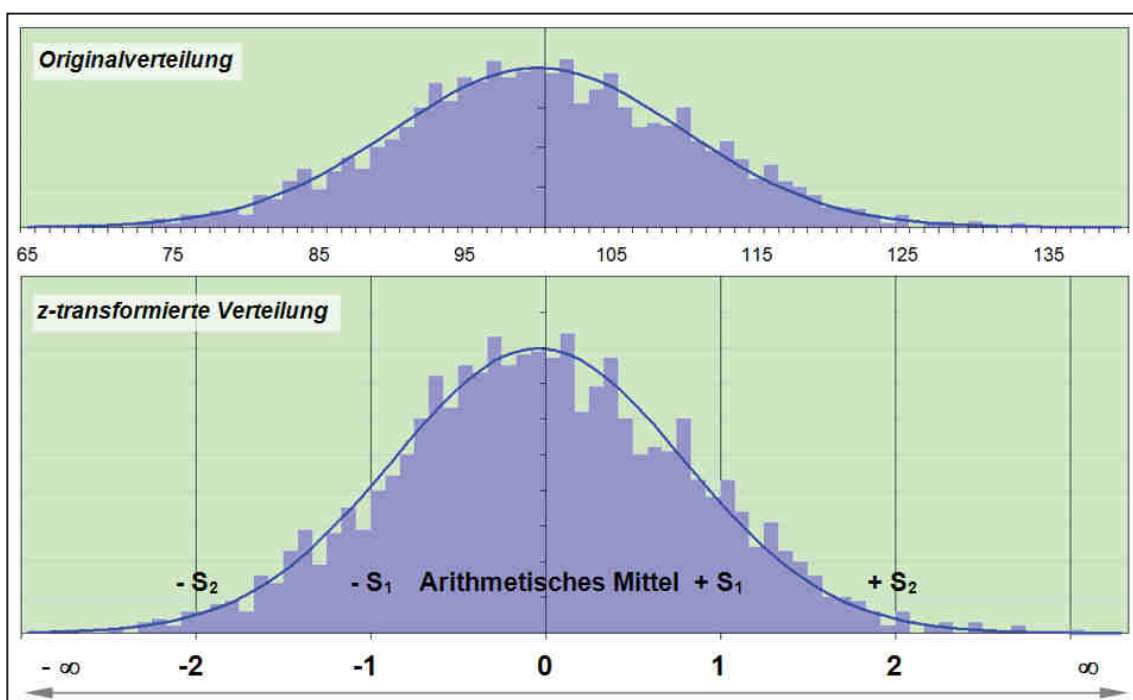


Abb. 35: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern (z-Transformation)

Tab. 9: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerbeaum bzw. Verkehrsraum (Straßen, Gleisfläche) und Plätzen in der Nacht (Lufttemperatur) im Status quo sowie in der Zukunftsrechnung und Mittelwert sowie Standardabweichung (sd) für die entsprechenden Flächen im Singener Stadtgebiet.

z-Wert	Lufttemperatur in der Nacht (04:00 Uhr)				Qualitative Einordnung
	Siedlung und Gewerbe		Verkehrsraum und Plätze		
	Ist [°C]	Zukunft [°C]	Ist [°C]	Zukunft [°C]	
bis -1,2	bis 15,7	bis 16,3	bis 15,2	bis 15,7	1 = Sehr günstig
> -1,2 bis -0,4	> 15,7 bis 16,9	> 16,3 bis 17,5	> 15,2 bis 16,5	> 15,7 bis 17,1	2 = Günstig
> -0,4 bis 0,4	> 16,9 bis 18,0	> 17,5 bis 18,7	> 16,5 bis 17,7	> 17,1 bis 18,4	3 = Mittel
> 0,4 bis 1,2	> 18,0 bis 19,1	> 18,7 bis 19,9	> 17,7 bis 19,0	> 18,4 bis 19,8	4 = Ungünstig
> 1,2	> 19,1	> 19,9	> 19,0	> 19,8	5 = Sehr ungünstig
	17,4 (± 1,4)	18,1 (± 1,5)	17,1 (± 1,6)	17,7 (± 1,7)	Mittelwert (± sd)

6.3.2 METHODIK DER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM

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

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während *Tropennächte* mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

BEWERTUNG DES STATUS QUO

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 9). Auch Gewerbeflächen wurden hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation klassifiziert, doch spielt deren Belastungssituation aufgrund der geringen Betroffenenzahlen in der Nacht eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu Wohnbauflächen. Selbiges gilt für den Verkehrsraum sowie Plätze, die als Teil des Siedlungsgebietes dennoch Eingang in die Bewertung fanden. Die für die z-Transformation maßgeblichen statistischen Kennzahlen wie Mittelwert und Standardabweichung basieren dabei nur auf der entsprechenden Flächenkulisse (Verkehrsraum und Plätze), sodass sie vom Siedlungsraum abweichen (Tab. 9). Auch die Einteilung der Klassen anhand der z-Werte weicht aufgrund der großen Spannweite ab – diese ist darauf zurückzuführen, dass z.B. siedlungsferne kleine Straßen oder Wege nachts ein deutlich geringeres Temperaturniveau aufweisen.

BEWERTUNG DER ZUKÜNFTIGEN BELASTUNG

Die bioklimatische Belastung im Zukunftszeitraum 2050 wurde analog bestimmt, wobei Mittelwert und Standardabweichung für die z-Transformation jeweils auf gemeinsamen Datensätzen der Ist- und Zukunftssituation beruhen, um sich ändernde Belastungen beurteilen zu können (Tab. 9).

Tab. 10: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms (z-Transformation).

Mittlerer z-Wert	Kaltluftvolumenstrom (04:00 Uhr) [m ³ s ⁻¹ m ⁻¹]	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 64	Gering
> -1 bis 0	> 64 bis 96	Mittel
> 0 bis 1	> 96 bis 129	Hoch
> 1	> 129	Sehr hoch

6.3.3 METHODIK DER BEWERTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSPAUM)

Im Gegensatz zur Klimaanalysekarte stehen in der Planungshinweiskarte die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie die Ableitung deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es im Hinblick auf planungsrelevante Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wurde ein teilautomatisiertes Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt.

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation getrennt bewertet und in vier Stufen von *Geringe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet¹³. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IM STATUS QUO

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten Klimaaustauschflächen bzw. Flächen, die diese mit Kaltluft versorgen, die höchste Bedeutung. Auch die Menge der über einer Fläche strömenden Kaltluft spielt eine Rolle. Dazu wurde der Kaltluftvolumenstrom via z-Transformation in vier Klassen von *Gering* bis *Sehr hoch* eingeteilt¹⁴ (Tab. 10). Zusätzlich wurde die Entfernung zu belasteten Siedlungsräumen berücksichtigt – da in der Nachtsituation die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht, wurden dabei nur die Entfernung zu Wohnsiedlungsflächen ohne Gewerbe zugrunde gelegt. Im Einzelnen wurde folgender Bewertungsschlüssel verwendet (vereinfachte Darstellung in Abb. 36):

SEHR HOHE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (4)

- a) Klimaaustauschflächen bzw. Grünflächen, die diese mit Kaltluft speisen, im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).

Klimaaustauschflächen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche und sind von besonders hoher Bedeutung für die nächtliche Durchlüftung des Stadtgebiets.

¹³ Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *Sehr geringe Bedeutung* nicht vergeben wurde.

¹⁴ Der Unterschied zum Mittelwert des für den Kaltluftereinwirkungsbereich maßgeblichen Kaltluftvolumenstrom (92 m³ s⁻¹ m⁻¹), besteht darin, dass hier nur Grünflächen, vorher alle Flächen im Stadtgebiet betrachtet wurden.

- b) Grünflächen > 1 ha bzw. mit einem *Sehr hohen* Kaltluftvolumenstrom im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

Je stärker der Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind Grünflächen als Ausgleichsräume, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Umso größer eine Grünfläche ist, desto weiter reichen ihre ausgleichenden Effekte in das angrenzende Siedlungsgebiet (vgl. Kuttler 2011).

HOHE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (3)

- c) Übrige Grünflächen im Nahbereich belasteter Siedlungsflächen (Entfernungsbereich aus b).
Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima im meist dicht bebauten Umfeld. Selbst mit geringer Funktion für den Kaltfluthaushalt sind sie wertvoll, da sie sich am Tage weniger stark aufheizen und folglich in der Nacht weniger Wärme abgeben.
- d) Grünflächen > 1 ha bzw. mit einem *Sehr hohen* Kaltluftvolumenstrom im Umfeld belasteter Siedlungsflächen (Entfernungsbereich aus a).
- e) Klimaaustauschflächen bzw. Grünflächen, die diese mit Kaltluft speisen, mit Siedlungsbezug (außerhalb des in a) genannten Entfernungsbereichs, jedoch in maximal 500 m Entfernung zu Siedlungsgebieten unabhängig von deren bioklimatischen Belastung).
- f) Grünflächen mit einem *Sehr hohen* Kaltluftvolumenstrom mit Siedlungsbezug (vgl. d).

MITTLERE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (2)

- g) Grünflächen > 1 ha bzw. mit einem *Hohen* Kaltluftvolumenstrom mit Siedlungsbezug (vgl. d).
- h) Übrige Grünflächen mit einem *Sehr hohen* Kaltluftvolumenstrom.

GERINGE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (1)

- i) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen.

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER ZUKUNFTSRECHNUNG

Die Bewertung der Bedeutung der Grünflächen im Zukunftsszenario 2050 erfolgt analog zum Status quo. Aufgrund des reinen Klimasignals ohne Landnutzungsänderung sind die Auswirkungen auf das Kaltluftprozessgeschehen gering (vgl. Kap. 5.1.2), sodass die über den Grünflächen austretenden Kaltluftvolumenströme jeweils ähnlich ausfallen und die Klimaaustauschflächen sogar als identisch zum Status quo angesehen werden können. Entsprechend sind die maßgeblichen Änderungen in der Bewertung auf das gestiegene Belastungsniveau im Siedlungsraum zurückzuführen, das die Bedeutung der Grünflächen als Ausgleichsraum zunehmen lässt.

6.3.4 ERGEBNISSE DER PLANUNGSHINWEISKARTE NACHT

BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM

Flächen mit einer *Sehr ungünstigen bioklimatischen Situation* machen unter reinen (Wohn-)Siedlungen nur einen geringen Anteil von 0,6 % aus, die jedoch nicht verteilt über das Stadtgebiet, sondern flächig in der Innenstadt auftreten (Abb. 37, Tab. 11). In der daran anschließenden dichteren Bebauung ist ebenfalls eine hohe nächtliche Überwärmung vorzufinden (gesamstädtisch 8 % Anteil *Ungünstig* bewerteter Flächen), während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zur Innenstadt tendenziell verbessert (knapp ein Drittel der Wohnflächen weist eine *Mittlere bioklimatische Situation* auf). Zu den Rändern der *Kernstadt* sind vermehrt *Günstige*, stellenweise auch *Sehr günstige* Verhältnisse vorzufinden. Diese günstige

Situation überwiegt auch in den Stadtteilen, sodass sie insgesamt zusammen ca. 60 % der Wohnsiedlungsflächen ausmachen (Abb. A 16 im Anhang).

Die Verkehrsflächen und Plätze weisen sowohl gewichtige Anteile günstiger als auch ungünstiger Belastungen auf, da sie von innerstädtischen Hauptstraßen bis zu kleinen Wegen im unbebauten Umland reichen. Bei den Gewerbeflächen verschieben sich die Flächenanteile deutlich. Der meist hohe Versiegelungsgrad und geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, sodass ca. drei Viertel der Gewerbeflächen eine mindestens *Ungünstige* und nur knapp über 10 % eine *Günstige bioklimatische Situation* oder besser aufweisen (Tab. 11). Wie bereits erwähnt, steht nachts die Belastung in Wohnsiedlungsflächen im Vordergrund und Maßnahmen sind vor allem für den Erhalt bzw. möglichst die Verbesserung der Situation in belasteten Flächen nötig. Doch sollten aufgrund der hohen Belastungen Gewerbeflächen nicht außer Acht gelassen werden, insb. wenn sie einen räumlichen Bezug zu Wohnbebauungen aufweisen.

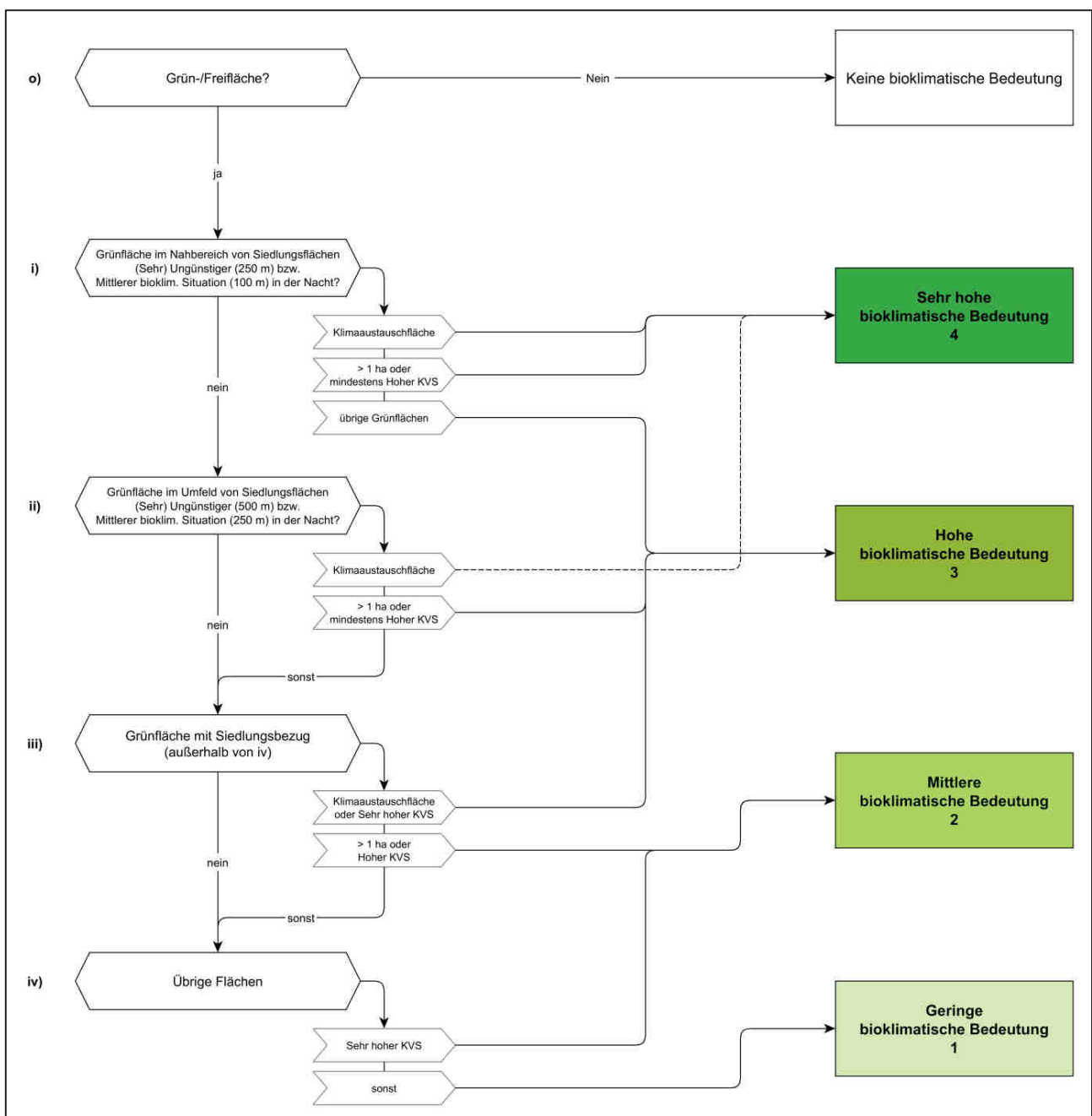


Abb. 36: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht

Im Zukunftsszenario 2050 steigt die bioklimatische Belastung im gesamten Siedlungsraum. Unter den Wohnflächen steigt der Anteil *Sehr ungünstiger* Verhältnisse auf 6 %, die weite Teile des Zentrums in der Kernstadt einnehmen (Abb. 37). In Summe ergibt sich für mehr als ein Fünftel des gesamten Stadtgebiets eine mindestens *Ungünstige bioklimatische Situation*, der nur ca. 16 % Wohnsiedlungen mit *Günstigen* oder *Sehr günstigen* Bedingungen gegenüber stehen. Diese sind nur noch vereinzelt in der *Kernstadt* zu finden, deren Ränder genau wie die Stadtteile künftig von einer *Mittleren bioklimatischen Situation* geprägt sind (gesamstädtisch 61 % an den Wohngebieten).

Dieselben Trends gelten für den Verkehrsraum und insb. Gewerbeflächen in ihren jeweiligen Ausprägungen, d.h. gerade bei den Gewerbeflächen dominiert die höchste Belastungsstufe noch stärker (Tab. 11).

BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Den Grünflächen im Singener Stadtgebiet kommt zu etwas mehr als einem Fünftel eine *Hohe* bzw. *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (17 % bzw. 4 %), was im Umkehrschluss bedeutet, dass knapp 80 % eine *Mittlere* oder *Geringe* Bewertung aufweisen (Tab. 12). Dieser vergleichsweise geringe Anteil bedeutender Grünflächen liegt darin begründet, dass im Stadtgebiet viele siedlungsferne Flächen liegen, die (teilweise auch orographisch bedingt) keine Durchlüftungsfunktion für bestehende Siedlungsgebiete einnehmen (Abb. A 16). Die Zahlen dürfen nicht darüber wegtäuschen, dass die meisten innerstädtischen bzw. stadtnahen Grünflächen der *Kernstadt* eine mindestens *Hohe bioklimatische Bedeutung* besitzen und im Hinblick auf eine Erhaltung des Singener Stadtklimas eine wichtige Rolle spielen.

Besonders deutlich wird dies, wenn die Ergebnisse der Zukunftsrechnung mit berücksichtigt werden. Durch die steigende Belastung in den Siedlungsräumen „wächst“ der Bedarf neuer Ausgleichsräume bzw. die Bedeutung bestehender Grünflächen. Entsprechend erhöht sich der Anteil an Grünflächen mindestens *Hoher bioklimatischen Bedeutung* auf ca. 30 % (Tab. 12). Der Anteil gering bewerteter Grünflächen bleibt dagegen nahezu konstant, da das Argument der Siedlungsferne in der Zukunftsrechnung ohne Landnutzungsänderung in seiner Gültigkeit bestehen bleibt.

Die Bedeutung der Grünflächen ist anthropozentriert ausgerichtet und immer in Bezug auf das vorhandene Siedlungsgebiet zu sehen. Zum einen hängt sie von der Belastung im Siedlungsraum ab. Diese fällt in den Stadtteilen vergleichsweise gering aus, sodass um die Stadtteile herum Grünflächen *Mittlerer bioklimatischer Bedeutung* überwiegen und keine *Sehr hohe Bedeutung* auftritt. Andererseits bedingen die viele Grünflächen um die Stadtteile deren vergleichsweise günstige Situation, was bei Planungen berücksichtigt werden sollte. Zum anderen gilt der generelle Grundsatz, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss – bei größeren Vorhaben (die insb. Grünflächen hoher Wertigkeit betreffen) im besten Falle im Vorfeld mittels einer Modellanalyse der vorhabenbedingten Auswirkungen.

Tab. 11: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete (getrennt nach Wohn-, Gewerbe-, Verkehrsraum) in der Nacht, jeweils für das Ist- und Zukunftsszenario sowie abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen in der Nacht	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Ist	Zukunft	
	Wohn Gewerbe Verkehr	Wohn Gewerbe Verkehr	
1 = Sehr günstig	12,7	2,2	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
	3,6	2,1	
	33,9	17,0	
2 = Günstig	46,6	14,2	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
	9,1	3,9	
	19,0	22,6	
3 = Mittel	32,4	60,9	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
	9,7	11,4	
	18,1	23,7	
4 = Ungünstig	7,6	16,6	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
	30,0	23,8	
	25,6	22,9	
5 = Sehr Ungünstig	0,6	6,1	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).
	47,5	58,7	
	3,3	13,9	

Tab. 12: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Ist	Zukunft	
1 = Geringe	43,0	42,5	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
2 = Mittlere	35,7	26,8	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
3 = Hohe	17,3	19,8	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
4 = Sehr hohe	4,0	11,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

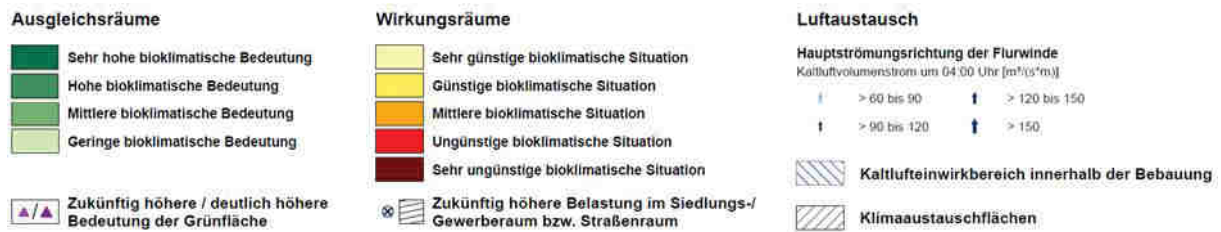
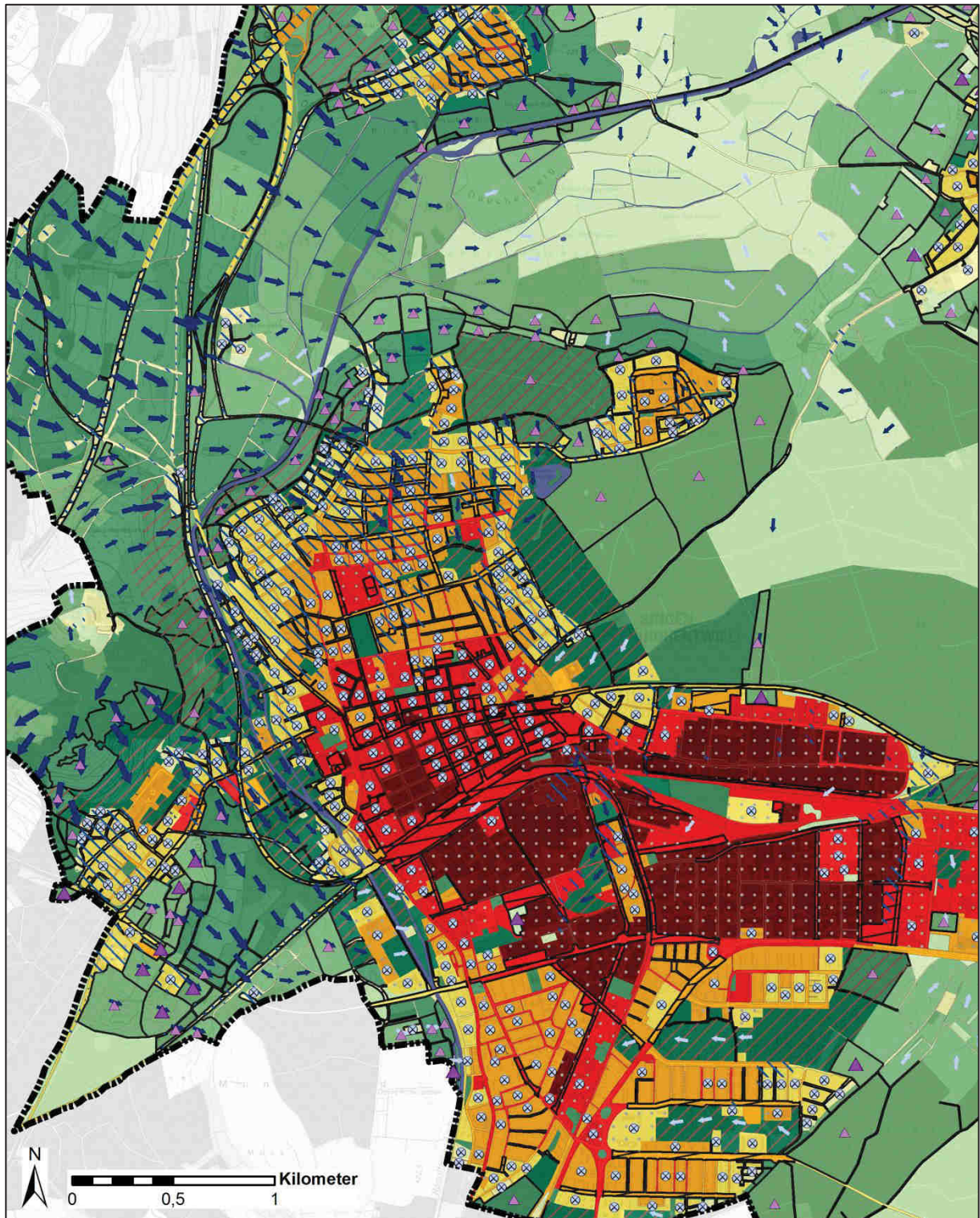


Abb. 37: Planungshinweiserte Karte Nachtsituation für einen Ausschnitt der Kernstadt Singen mit verkürzter Legende (für Details siehe gesamtstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 16 im Anhang)

Tab. 13: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerberaum bzw. Straßenraum und Plätzen am Tage (PET) im Status quo sowie in der Zukunftsrechnung und Mittelwert sowie Standardabweichung (sd) für die entsprechenden Flächen im Singener Stadtgebiet.

PET am Tage (14:00 Uhr)						
z-Wert	Siedlung und Gewerbe		z-Wert	Straßenraum und Plätze		Qualitative Einordnung
	Ist [°C]	Zukunft [°C]		Ist [°C]	Zukunft [°C]	
bis -1,5	bis 33,8	bis 34,0	bis -2,0	bis 31,2	bis 31,6	1 = Sehr gering
> -1,5 bis -0,5	> 33,8 bis 35,6	> 34,0 bis 36,0	> -2,0 bis -1,0	> 31,2 bis 34,4	> 31,6 bis 34,9	2 = Gering
> -0,5 bis 0,5	> 35,6 bis 37,4	> 36,0 bis 38,0	> -1,0 bis 0,0	> 34,4 bis 37,6	> 34,9 bis 38,2	3 = Mittel
> 0,5 bis 1,5	> 37,4 bis 39,1	> 38,0 bis 39,9	> 0,0 bis 1,0	> 37,6 bis 40,8	> 38,2 bis 41,6	4 = Hoch
> 1,5	> 39,1	> 39,9	> 1,0	> 40,8	> 41,6	5 = Sehr hoch
	36,5 (± 1,8)	37,0 (± 2,0)		37,6 (± 3,2)	38,2 (± 3,3)	Mittelwert (± sd)

6.4 PLANUNGSHINWEISKARTE TAG

6.4.1 METHODIK DER BEWERTUNG DER THERMISCHEN BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM

Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen außerhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht gesondert bestimmt werden.

BEWERTUNG DES STATUS QUO

Zur Bewertung der Tagsituation wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tab. 5 auf S. 40; VDI 2004). Die Bewertung der thermischen Belastung in Singen orientiert sich daran, basiert jedoch letztlich auf einer z-Transformation, um das Verhältnis zwischen den Flächen im Stadtgebiet darstellen zu können (wiederum in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig*; Tab. 13).

Am Tage ist die Aufenthaltsqualität auf Straßen, Wegen und Plätzen (kurz: Straßenraum) von Bedeutung, sodass für diese zunächst eine Bewertung in denselben fünf Belastungsklassen vorgenommen wurde. Aufgrund der höheren PET-Werte wurden die Grenzen der dabei verwendeten z-Transformation leicht modifiziert (Tab. 13). Da in der mesoskaligen Modellrechnung Gebäude nicht einzeln aufgelöst werden konnten, sie durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität im Straßenraum genauso wie Bäume maßgeblich beeinflussen, wurden die PET-Belastungsklassen für die Darstellung in der Planungshinweiskarte mit Informationen zur Verschattung anhand des in Abb. 38 gezeigten Schemas verknüpft¹⁵.

BEWERTUNG DER ZUKUNFTSRECHNUNG

Die thermische Belastung am Tage im Zukunftszeitraum 2050 wurde analog bestimmt, wobei Mittelwert und Standardabweichung für die z-Transformation jeweils auf gemeinsamen Datensätzen der Ist- und Zukunftssituation beruhen, um sich ändernde Belastungen beurteilen zu können (Tab. 13).

¹⁵ Die Verschattung beruht auf von der Stadt Singen zur Verfügung gestellten Laserscan-Daten in 5 m-Auflösung (Digitales Oberflächenmodell (DOM)) und wurde in ESRI ArcGIS über das Hillshade-Werkzeug berechnet ("Schummerung"). Dabei wurde die mittlere Verschattung von vier Zeitpunkten eines exemplarischen Sommertages ausgegeben und in die Klassen Hohe, Mittlere bzw. Geringe Verschattung und Freifläche eingeteilt (11:00, 13:00, 15:00 und 17:00 Uhr am 15.07.2017; vgl. Tab. A 1 im Anhang).

		Verschattung			
		Hoch	Mittel	Gering	Freifläche
Belastung am Tage (PET)	Sehr gering	Sehr günstig	Sehr günstig	Günstig	Günstig
	Gering	Sehr günstig	Günstig	Mittel	Mittel
	Mittel	Günstig	Mittel	Mittel	Hoch
	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Sehr hoch
	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch

Abb. 38: Verknüpfungsmatrix zur Darstellung der thermischen Belastung am Tag im Straßenraum anhand der PET sowie Verschattung.

6.4.2 METHODIK DER BEWERTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSPAZIUM)

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen hauptsächlich auf der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerberäumen sowie der physiologischen Belastungsstufe über die PET¹⁶. Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Der Einstufung liegt folgender Bewertungsschlüssel zugrunde (vgl. vereinfachte Darstellung in Abb. 39), wobei städtische Grünflächen mit einer besonders hohen mikroklimatischen Vielfalt nachträglich um eine Stufe erhöht wurden.

SEHR HOHE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (4)

- a) Fußläufig sehr gut erreichbare Grünfläche (300 m) mit maximal *mäßiger Wärmebelastung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger Situation*¹⁷.

Je stärker die bioklimatische Belastung im Siedlungsgebiet, desto wichtiger ist eine für alle Bevölkerungsgruppen fußläufige Erreichbarkeit schattenspendender Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist die Existenz ausreichend beschatteter Flächen, die eine *starke Wärmebelastung* verhindern.

HOHE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (3)

- b) Fußläufig sehr gut erreichbare Grünfläche (300 m) mit *starker Wärmebelastung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger Situation*.

Auch diese Grünflächen können verschattende Elemente erhalten, die im hochbelasteten Siedlungsraum ggf. als Rückzugsorte dienen können.

- c) Fußläufig sehr gut erreichbare Grünfläche (300 m) einer PET von maximal 32 °C (entspricht der Mitte der Klasse „mäßige Wärmebelastung“) aus Siedlungsflächen *Ungünstiger* oder *Mittlerer Situation*.

- d) Grünfläche mit Siedlungsbezug (700 m) und *schwacher Wärmebelastung*¹⁸.

Mit einer hohen Verschattung können auch Grünflächen ohne direkten Siedlungsbezug bzw. im Umfeld von Siedlungsflächen günstigen Bioklimas wichtige Rückzugsorte darstellen (z.B. Wälder als Naherholungsgebiete).

¹⁶ Für eine Bewertung über den Verschattungsanteil analog zum Straßenraum war die Auflösung des DOM (5 m) nicht fein genug, um die Schattenwirkung einzelner Bäume zu erfassen, sodass die Methode hier nicht angewendet werden konnte.

¹⁷ Eine *sehr gute* fußläufige Erreichbarkeit wird bis zu einer Entfernung von 300 m Luftlinie definiert – diese entspricht einem Fußweg bis ca. 500 m (BBSR 2017). Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m s⁻¹ (3,6 km h⁻¹) würde dies eine Wegstrecke bis zu 5 min bedeuten.

¹⁸ Bis zu einer Entfernung von 700 m Luftlinie (ca. 1000 m Fußweg) wird eine Grünfläche als erreichbar angesehen und kann als Ausgleichsraum dienen, insb. wenn es sich um größere Grünflächen handelt (vgl. BBSR 2017).

- e) Straßenbegleitgrün im näheren Umfeld des belasteten Siedlungsbereichs (300 m Entfernung zu Siedlungsflächen mindestens *Ungünstiger bioklimatischer Situation*).

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

MITTLERE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (2)

- f) Übrige fußläufig sehr gut erreichbare Grünflächen (300 m) aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger Situation*.

Diese Grünflächen eignen sich i.d.R. zwar nicht als Rückzugsort, heizen sich jedoch weniger stark auf als versiegelte Flächen, sodass ihnen im belasteten Siedlungsraum eine mittlere Bedeutung zugeschrieben wird.

- g) Fußläufig sehr gut erreichbare Grünfläche (300 m) einer PET von zwischen 32 °C und 38 °C (jeweils Mitte der Klassen „mäßige“ bzw. „starke Wärmebelastung“) aus Siedlungsflächen *Ungünstiger* oder *Mittlerer Situation*.

- h) Übrige Grünflächen mit einer *schwachen Wärmebelastung*.

- i) Übriges Straßenbegleitgrün.

GERINGE BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG (1)

- j) Übrige Grünflächen

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

6.4.3 ERGEBNISSE DER PLANUNGSHINWEISKARTE TAG

THERMISCHE BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM

Auch am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine *Mittlere bioklimatische Belastung* (48 %) und der Anteil (*Sehr*) *Günstiger* Flächen überwiegt gegenüber *Ungünstigen* (ca. 33 % gegenüber 19 %, *Sehr ungünstig* bewertete Flächen sind zu vernachlässigen; Tab. 14). Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen bzw. dichtere und höhere Blockbebauung für Schattenwurf zwischen den Gebäuden sorgt. Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt (knapp 75 % *Ungünstige* bzw. *Sehr ungünstige Flächen*; Abb. 40).

Straßen, Wege und Plätze weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung die höchsten thermischen Belastungen auf (Tab. 13). Um die relativen Unterschiede innerhalb des Straßenraums abzugrenzen und im Kartenbild darzustellen, wurden die Klassengrenzen bei der z-Transformation im Vergleich zu den Siedlungsflächen modifiziert, sodass die Flächenanteile der Belastungsstufen des Straßenraums nicht direkt mit denen der Siedlungsflächen vergleichbar sind, zumal für die Darstellung der bioklimatischen Situation im Kartenbild die Verschattungsanteile integriert wurden. Knapp die Hälfte des Straßenraums weist eine *Mittlere bioklimatische Situation* auf. Dem stehen vergleichsweise wenige *günstige* und fast 40 % *ungünstige* Flächenanteile gegenüber. Insgesamt ergibt sich eine größere Bandbreite als bei den Siedlungs- und Gewerbeflächen, die auf die unterschiedlichen Flächentypen zurückzuführen ist – von vollversiegelten Plätzen bis hin zu (durch Gebäude oder Bäume) stark verschattete Straßenabschnitte.

Im Zukunftsszenario 2050 ist ein zunehmender Flächenanteil höherer Belastungsklassen zu verzeichnen, wobei die Zunahmen moderat ausfallen, da die Änderung der Strahlungstemperatur (als maßgeblich die bioklimatische Belastung steuernde Größe) durch den Klimawandel verglichen mit anderen Parametern wie der nächtlichen Lufttemperatur relativ gering ausfällt.

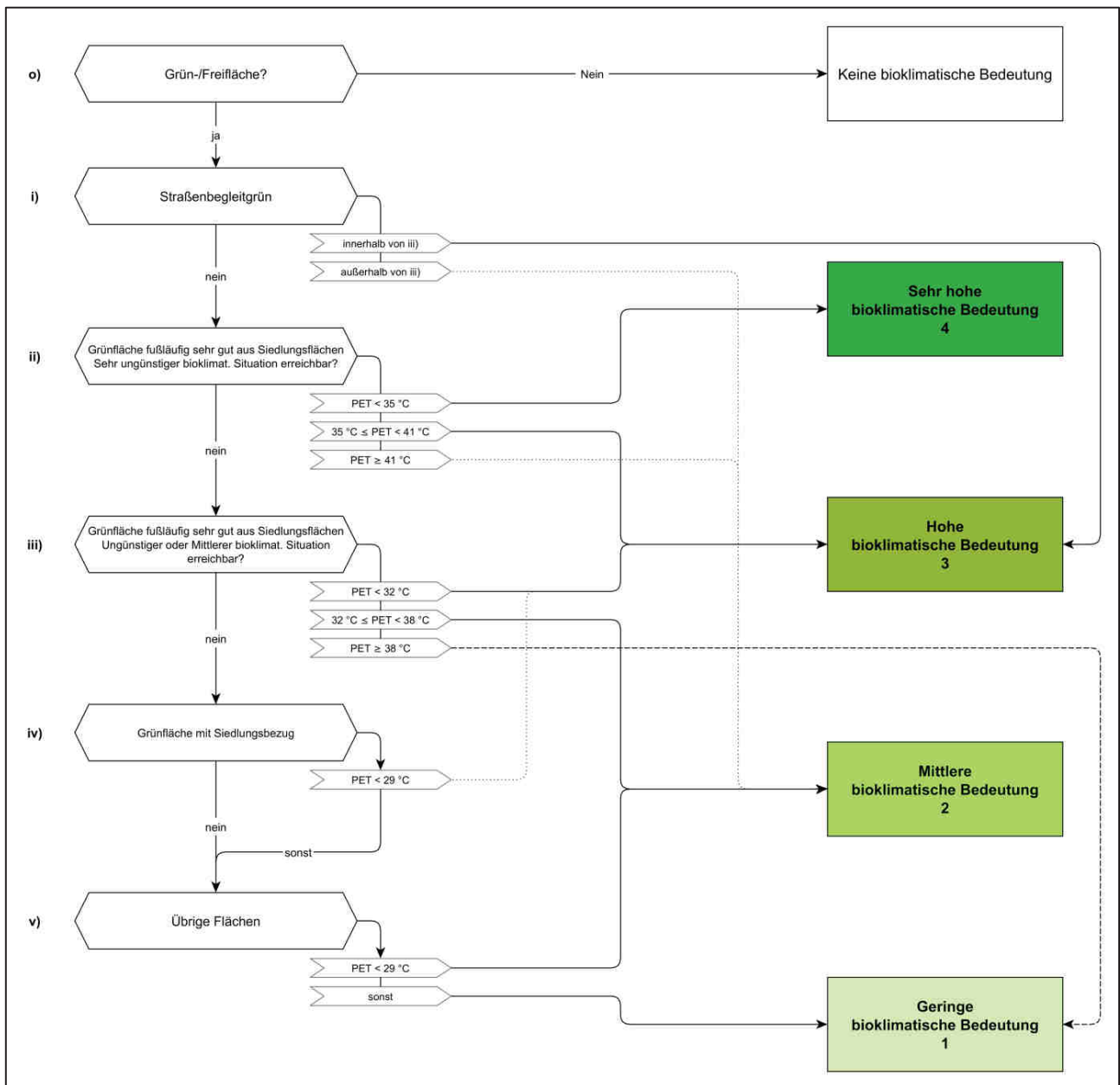


Abb. 39: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage

AUFENTHALTSQUALITÄT IN GRÜNFLÄCHEN

Knapp 23 % der Grünflächen wird eine *Hohe Bedeutung* zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Stadtbevölkerung (Tab. 15). Dass dabei die Grünflächen *Sehr hoher Bedeutung* vom Flächenanteil her eine untergeordnete Rolle spielen (0,5 %) liegt daran, dass es sich dabei allein um innerstädtische Grün- und Parkanlagen handelt (z.B. *Alter Friedhof* an der *Anton-Bruckner-Straße*, Grünflächen um den *Mühlkanal*), die von der Flächengröße gegenüber den weitläufigen Wald- und landwirtschaftlich genutzten Flächen im Umland sehr gering ausfallen. Gleichzeitig verdeutlichen die Zahlen, dass nicht nur der Erhalt dieser Grünflächen hoher Aufenthaltsqualität geboten ist, sondern ggf. zusätzliche städtische Grünflächen angestrebt werden sollten.

In der Zukunftsrechnung ist eine gewisse Zunahme des Anteils bedeutender Grünflächen zu sehen, doch fallen die Auswirkungen insgesamt gering aus, da die Änderungen im Siedlungsraum moderat ausfallen. Die großflächigen Acker- und Wiesenareale im Singener Stadtgebiet erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzug und sorgen für den hohen Anteil an Grünflächen *Geringer Bedeutung* sowohl im Status quo als auch im Zukunftsszenario (49 % bzw. 47 %; Abb. A 17).

Tab. 14: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete (getrennt nach Wohn-, Gewerbe-, Verkehrsraum) am Tag, jeweils für das Ist- und Zukunftsszenario sowie abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen am Tage	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Ist	Zukunft	
	Wohn Gewerbe Verkehr	Wohn Gewerbe Verkehr	
1 = Sehr günstig	7,1	4,0	Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
	4,3	1,8	
	5,7	3,2	
2 = Günstig	25,8	20,0	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
	4,3	6,1	
	7,4	6,6	
3 = Mittel	47,9	50,3	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
	16,9	13,6	
	47,6	42,4	
4 = Ungünstig	19,1	22,2	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
	52,1	26,8	
	31,5	37,0	
5 = Sehr ungünstig	0,2	3,4	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
	22,5	51,7	
	7,6	10,7	

Tab. 15: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Ist	Zukunft	
1 = Geringe	48,9	47,4	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtsch. Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
2 = Mittlere	28,1	28,3	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
3 = Hohe	22,5	22,7	Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
4 = Sehr hohe	0,5	1,6	Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.

6.5 EMPFEHLUNGEN AUS DEN ERGEBNISSEN DER PLANUNGSHINWEISKARTEN

6.5.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DAS STADTGEBIET SINGEN

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es in Singen thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt. Deren bioklimatische Situation sollte mindestens erhalten, möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Klimaaustauschflächen bzw. kleinräumige Ausgleichsflächen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtzentrums ab und fällt in diesem nur noch gering aus bzw. ist teilweise nicht mehr gegeben. Eine ausreichende Belüftung kann nicht nur die thermische Belastung mildern, sondern sich auch positiv auf, die in diesem Gutachten nicht näher betrachtete, Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte eine ausreichende Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen und insb. die Funktion der Klimaaustauschflächen erhalten, d.h. auf deren Bebauung verzichtet werden. Die Betrachtung des zukünftigen Szenarios für das Jahr 2050 verstärkt diese Empfehlungen, da die Belastung flächendeckend zunehmen wird und gerade im Siedlungsraum zu ungünstigeren bioklimatischen Verhältnissen führt.

Die Aufteilung in eine PHK für die Nacht- und eine für die Tagsituation hat den Vorteil, dass einzelne Flächen separat bewertet und mögliche Maßnahmen entsprechend zugeordnet werden können. Während einige Flächen für beide Zeitpunkte dieselben Tendenzen annehmen – z.B. sind innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage i.d.R. positiv zu sehen, Gewerbefläche dagegen jeweils eher ungünstig einzustufen – erfahren andere Flächen unterschiedliche Bewertungen zu den beiden Zeitpunkten. So steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber. In einer kombinierten PHK für die Nacht- und Tagsituation würden solch verschiedene Bewertungen womöglich zu Lasten der Genauigkeit zu einem mittleren Zustand zusammengefasst. Mit der Aufteilung ist allerdings geboten, beide PHKs bei Bauvorhaben bzw. zur Beurteilung von Flächen(nutzungsänderungen) zu Rate zu ziehen. Dabei sollten z.B. Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung geprüft werden, um diese nicht einzuschränken.

6.5.2 ERGÄNZENDE EMPFEHLUNGEN STADTKLIMATISCHER MASSNAHMEN

Den bewerteten Siedlungs- und Grünflächen sind jeweils allgemeine Planungshinweise zugeordnet, die eine erste Einschätzung möglicher Maßnahmen erlauben, doch bezogen auf den Einzelfall genauer betrachtet werden müssen. Im Folgenden soll ergänzend ein kurzer Überblick gegeben werden, welche stadtklimatischen Maßnahmen bzw. Empfehlungen – insb. im Hinblick auf potentielle Nachverdichtung im Stadtgebiet – denkbar sind (vgl. MUNLV 2010, MVI 2012).

Soweit möglich sollte der Grünanteil im Stadtgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (Pocket-Parks, großflächige Grünanlagen). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen **Grünflächen** nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität sowie Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

Neben ihres Potentials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten.

Klimaangepasstes Bauen ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind entsprechende Maßnahmen möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die **Gebäudeausrichtung** zu optimieren und damit den direkten Hitzeintrag zu reduzieren. Unter

Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlaf- bzw. Arbeitszimmern der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird.

Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie **Dach- und Fassadenbegrünung**, Verschattungselemente oder Wärmedämmung sind auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude.

Bei Nachverdichtungen im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die **vertikale Nachverdichtung** dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss.

Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten ist die sogenannte **doppelte Innenentwicklung** in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

7 Detailuntersuchung Bruderhof

7.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Wohlbefinden und die Gesundheit der Menschen werden nicht zuletzt von den meteorologischen Verhältnissen in ihrem Lebensumfeld bestimmt. Dabei wirkt sich die Gestaltung dieses Lebensumfeldes, also vornehmlich die des Siedlungsraumes, direkt auf die in ihm auftretenden Wärme- und Luftbelastungen aus. Klimatische und lufthygienische Aspekte sind somit durch den Menschen beeinflussbar und feste Bestandteile der räumlichen Planung. Im Bruderhofgebiet in Singen sollen die klimatischen Auswirkungen einer potentiellen Nachverdichtung einer bisherigen Zeilenbebauung im Bereich Schauinslandstraße untersucht sowie Möglichkeiten zur stadtklimatischen Optimierung gezeigt werden.

Das Bruderhofgebiet liegt nordöstlich des Singener Stadtkerns und ist, umgeben von Waldflächen im Westen, Süden und Osten sowie Freiland im Norden, nahezu abgetrennt vom übrigen Stadtgebiet. Das Untersuchungsgebiet ist vorwiegend eben auf einer Höhe um 450 m NHN im Bereich der bisherigen sowie geplanten Bebauung und fällt am nordöstlichen Rand bis ca. 435 m NHN ab. Die gesamtstädtische Klimaanalyse der Stadt Singen weist den Bruderhof als relativ gut durchlüftetes Gebiet mit einer geringen Vorbelastung aus (überwiegend mittlere, zum Rand hin günstige bioklimatische Situation in der Nacht; vgl. Kap. 6.3).

Im Zentrum des Untersuchungsgebiets befindet sich die bestehende Zeilenbebauung (definiert als „Maßnahmengbiet“), quer zu deren Kopf als Nachverdichtung ein sechs- bis sieben-geschossiger Gebäuderiegel geplant ist (Dachhöhe ca. 18,5 - 21,0 m), der zwei Durchfahrten von 5,8 m Höhe enthält (Gebäudeplan nach HERRMANN + BOSCH ARCHITEKTEN 2018). Außerdem ist die Aufhöhung der bestehenden Gebäude auf fünf Geschosse geplant (von ca. 13,7 m auf 15,3 m, versehen mit einem Flachdach; vgl. Abb. 41b). Diese gebäudebezogenen Änderungen wurden im **Plan Null-Zustand** untersucht. Weiterhin sind Parkplätze am östlichen Grundstücksende vorgesehen, die genau wie folgende mögliche (Grün-)Maßnahmen zur stadtklimatischen Optimierung Eingang in den **Plan-Zustand** fanden (Abb. 41c):

- * Intensive Dachbegrünung
- * Fassadenbegrünung auf den West- und Südseiten der Gebäude
- * Entsiegelung des nördlich anschließenden Gehwegs
- * Beschattung der Parkplätze durch Bäume
- * Baum-Allee am südlichen Rand des Grundstücks
- * Beschattung des westlichen der drei Innenhöfe durch Bäume

Das vorliegende Fachgutachten geht der Frage nach, in welchem Maße das nächtliche Strömungsfeld durch die Hinderniswirkung der angedachten Bebauung modifiziert wird und ob dies den lokalen Luftaustausch im angrenzenden Siedlungsraum beeinflusst. Weiterhin wird untersucht, ob mit den vorgeschlagenen Grünmaßnahmen eine Minderung der Auswirkungen auf das nächtliche Temperaturfeld sowie auf die Wärmebelastung am Tage im direkten Umfeld der angedachten Bebauung erreicht werden kann. Für die Beantwortung dieser Fragen ist es erforderlich, sich auf eine differenzierte Bewertung der kleinräumig variablen klimatischen Bedingungen einschließlich ihrer komplexen Wechselwirkungen stützen zu können. Daher wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Auswirkungen durchgeführt. Über den Vergleich von Ist- und Plan-Zustand lassen sich anschließend die räumlichen Auswirkungen der potentiellen Bebauung auf diese Parameter abschätzen.

Das Gutachten wurde als eigenständiger Bericht verfasst, d.h. Aussagen zur Methodik oder fachliche Grundlagen können sich ggf. wiederholen.

7.2 METHODIK UND MODELLEINGANGSDATEN

7.2.1 DAS MIKROSKALIGE MODELL ASMUS_GREEN

Für die Darstellung der bioklimatischen Situation im Vertiefungsgebiet wurde das hochaufgelöste Modell ASMUS_Green¹⁹ gewählt. ASMUS_green ist ein numerisches Modell zur mikroskaligen Simulation der dreidimensionalen Wind- und Temperaturverteilung sowie thermischen Behaglichkeit innerhalb von Städten. Es gehört zu einer neueren Generation mikroskaliger Modelle und verbindet die Betrachtung der Strömung im Bereich von Gebäuden und Bäumen mit der Berechnung der Energiebilanz von begrünten und unbegrünten Oberflächen (Groß 2012; Günther 2014).

Das Modell basiert auf meteorologischen Grundgleichungen wie der Navier-Stokes- und der Kontinuitätsgleichung, dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik und einer Gleichung für die spezifische Feuchte. Gebäude und Bäume werden explizit als dreidimensionale Körper mit impermeablem bzw. semipermeablem Gittervolumen dargestellt. Ihre Oberflächentemperaturen werden in Abhängigkeit ihrer spezifischen Orientierung und physikalischen Eigenschaften über eine Energiebilanz berechnet. ASMUS_green modelliert den kurz- und langwelligen Wärmestrom inklusive diffuser Mehrfach-Reflektion von Strahlung an Oberflächen und atmosphärischer Gegenstrahlung, den turbulenten fühlbaren Wärmestrom, den Wärmestrom aus der darunterliegenden Fläche (Erdboden bzw. Gebäude) sowie den turbulenten Verdunstungswärmestrom bei Bäumen und Oberflächenbegrünung. Mit Asmus_green können individuelle Tageszeitausschnitte und komplette Tagesgänge genauso simuliert werden wie mehrtägige (extreme) Wetterlagen und statistisch interpolierte Jahreskenngrößen.

7.2.2 MODELLEINGANGSDATEN

Im Rahmen des Projektes wurde ein Tagesgang der Lufttemperatur, des Strömungsfelds und der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) während einer sommerlichen autochthonen Wetterlage simuliert. Für die Darstellung der nächtlichen klimatischen Situation wurde der Zeitpunkt 04:00 Uhr (Zeitpunkt der maximalen Abkühlung), für die Situation am Tage 14:00 Uhr gewählt (maximale Einstrahlung). In beiden Fällen handelte es sich um das Niveau in 2 m über Grund (ü.Gr.), d.h. dort wo sich Menschen in der Regel draußen aufhalten. Die nächtliche nördliche Anströmung aus der gesamtstädtischen Klimaanalyse wurde als Antrieb für die Modellierung übernommen (vgl. Kap. 5.1.2).

Für die Simulationen wurden Gebäude-, Vegetations-, und Versiegelungsinformationen in ein Raster mit einer Auflösung von 2 m x 2 m überführt (vgl. Abb. 41). Das Untersuchungsgebiet geht über das Maßnahmengebiet hinaus und umfasst 10,8 ha (360 m x 300 m).

¹⁹ Ausbreitung und Strömungs-Modell für Urbane Strukturen und Begrünung



Abb. 41: Ist-Zustand (a), Plan Null-Zustand (b) und Plan-Zustand (c) des Untersuchungsgebiets im Bruderhof sowie in c) rote Linien als Positionsmarkierungen der Vertikalschnitte (vgl. Abb. 46)

7.3 ERGEBNISSE DER MODELLRECHNUNGEN

7.3.1 LUFTTEMPERATUR IN DER NACHT

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung (VDI 2008). Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas. Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten.

Im Bruderhofgebiet ist der sogenannte städtische Wärmeinseleffekt wahrnehmbar, mit einer Überwärmung von 3 - 4 K gegenüber unversiegelten Freiflächen im Umland jedoch geringer ausgeprägt als in der Singener Kernstadt. Dies führt zu einer überwiegend mittleren, zum Rand hin günstigen bioklimatischen Bewertung in der Nacht in der Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 6.3). Im Maßnahmengebiet der bestehenden Zeilenbebauung liegt die bodennahe Lufttemperatur unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt 04:00 Uhr morgens zwischen 15,5 - 17,0 °C (Abb. 42a).

Mit Umsetzung der Bebauung erhöht sich die nächtliche Temperatur im direkten Umfeld des neuen Gebäudes um ca. 0,4 - 1,3 K, wobei die Intensität mit steigender Entfernung abnimmt und nach ca. 30 m vernachlässigbar wird. Damit beschränken sich die Auswirkungen im Wesentlichen auf das Maßnahmengebiet, insb. auf die von der bestehenden und angedachten Bebauung umgrenzten Innenhöfe (Abb. 42b).

Mit den Grünmaßnahmen im Plan-Zustand kann die Temperaturerhöhung sowohl in ihrem räumlichen Ausmaß als auch ihrer Intensität (ca. + 0,4 - 0,7 K) abgemildert, im Bereich der Innenhöfe durch die Kombination der Grünmaßnahmen sogar nahezu kompensiert werden (Abb. 42c).

In beiden Varianten treten durch die Modifikation des Strömungsfeldes auch im östlich angrenzenden Bestand kleinräumige Auswirkungen auf, jedoch in vergleichsweise geringer Intensität. Die kleinräumigen Effekte im Umfeld der bestehenden Punkt-Hochhäuser im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets sind dem Modellrauschen geschuldet und können als vernachlässigbar angesehen werden.

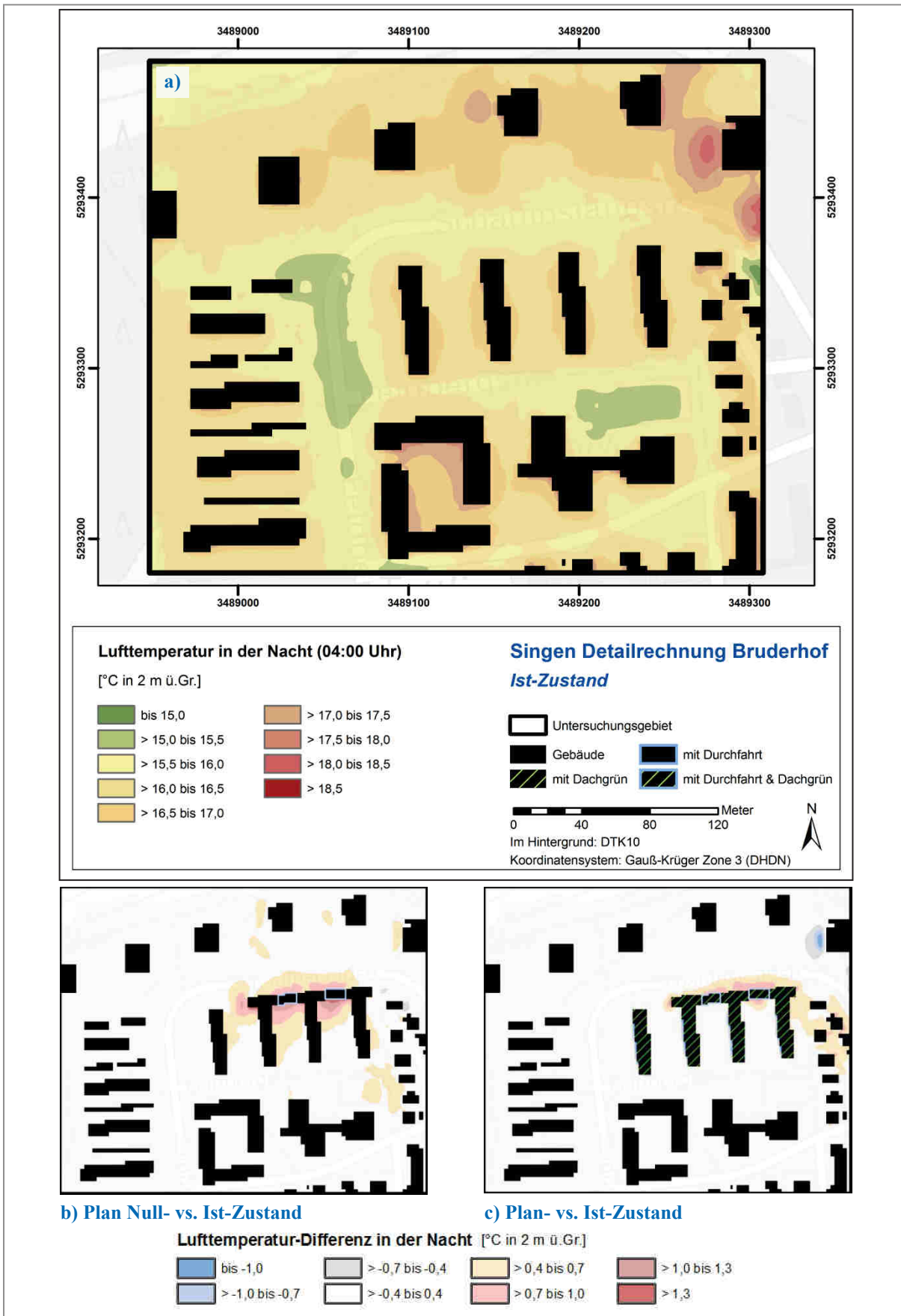


Abb. 42: Ist-Zustand des nächtlichen Temperaturfeldes im Untersuchungsgebiet (04:00 Uhr; a) und Temperaturdifferenzen zwischen Plan-Null- bzw. Plan- zum Ist-Zustand (b bzw. c)

7.3.2 STRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Während autochthoner Wetterlagen können sich sogenannte Flur- und Strukturwinde ausbilden, d.h. durch horizontale Luftdruckunterschiede bedingte Ausgleichsströmungen von hohem zu tiefem Luftdruck. Diese sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können.

Die Ergebniskarten stellen das zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Strömungsfeld in zwei verschiedenen Höhen dar: in 2 m (bodennahe) sowie 10 m über Grund. Die Strömungsrichtung wird über Pfeile (aggregiert auf eine horizontale Auflösung von 10 m), die Windgeschwindigkeit jeweils flächenhaft als Farbstufung abgebildet. Von einer potentiellen klimaökologischen Wirksamkeit wird ab einer Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ ausgegangen.

Das bodennahe autochthone Windfeld ist schwach ausgeprägt, sodass zur besseren Übersicht auch Windgeschwindigkeiten unterhalb der klimaökologischen Wirksamkeit aufgenommen wurden (Grautöne). Hauptsächlich bewegen sich die Werte im Bereich $0,1 - 0,3 \text{ m s}^{-1}$ (hellblau), wobei nur selten Windgeschwindigkeiten über $0,2 \text{ m s}^{-1}$ erreicht werden (Abb. 43a). Dabei werden die Hinderniswirkung der Gebäude und eine teilweise Belüftung der bestehenden Zeilenbebauung im Maßnahmengebiet sichtbar. Die angedachte Bebauung übt insgesamt geringen Einfluss auf das bodennahe Windfeld aus – sowohl ohne als auch mit ergänzenden Grünmaßnahmen (Abb. 43b/c). Bedingt durch die zunehmende nächtliche Lufttemperatur verstärkt sich das autochthone Strömungsfeld im Maßnahmengebiet teilweise (Ausgleichsströmung) – jedoch auf sehr geringem Niveau, ohne die negativen Effekte der Bebauung kompensieren zu können.

Das Windfeld in 10 m über Grund weist höhere Geschwindigkeiten auf, wenn auch mit ca. $0,5 \text{ m s}^{-1}$ im Maximum immer noch vergleichsweise gering ausgeprägt. Dabei ist die nördliche Anströmung aus der gesamtstädtischen Analyse erkennbar (Abb. 44a). Die Ergebniskarten veranschaulichen den Einfluss hoher Gebäude wie der Punkt-Hochhäuser im nördlichen Teil sowie der bestehenden Zeilenbebauung im Maßnahmengebiet auf das Windfeld, während flachere Gebäude überströmt werden. Dadurch ergeben sich „Luftbahnen“, die für eine gute Durchlüftung z.B. des mittleren Innenhofs der bestehenden Bebauung oder am östlichen Rand des Maßnahmengebiets sorgen. Entsprechend verursacht der quer zur Strömungsrichtung angedachte Gebäuderiegel eine vergleichsweise großflächige Modifikation des Windfeldes, die die beiden genannten „Luftbahnen“ unterbricht bzw. umlenkt (so erklären sich z.B. auch die geringfügigen Auswirkungen auf das nächtliche Temperaturfeld im östlich an das Maßnahmengebiet angrenzenden Bestand; vgl. Kap. 7.3.1). Gleichzeitig steigt die Durchlüftung der Feldbergstraße in Richtung Süden westlich des Maßnahmengebiets (Abb. 44b). Insgesamt ist jedoch auch im 10 m-Windfeld die Intensität der Auswirkungen durch die Bebauung vergleichsweise gering (Differenzen $\pm 0,4 \text{ m s}^{-1}$). Da die Gebäude der maßgebliche Faktor für die Modifikation des Windfeldes sind, fallen die Ergebnisse im Plan-Zustand ähnlich aus (Abb. 44c).

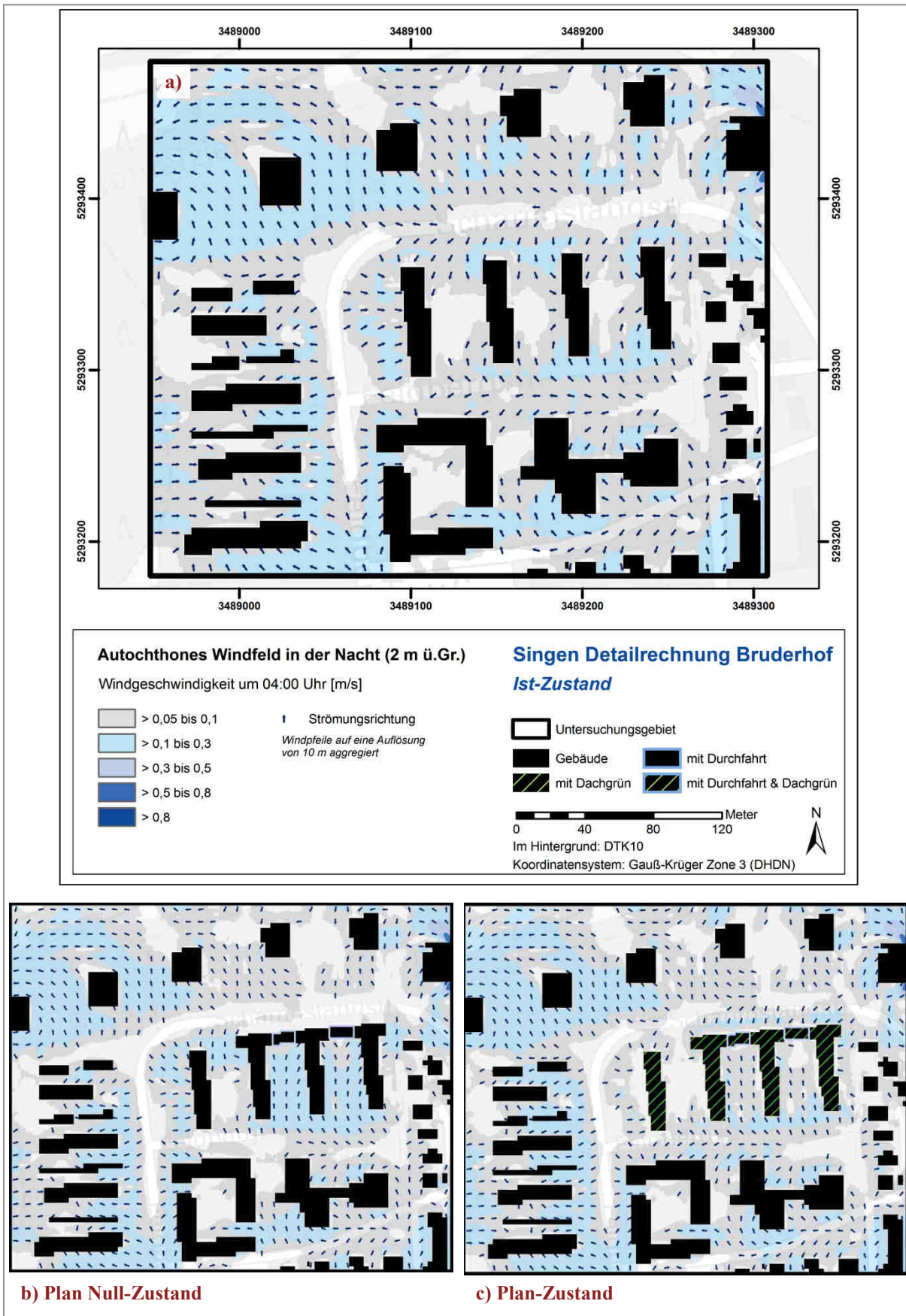


Abb. 43: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Untersuchungsgebiet (04:00 Uhr in 2 m ü.Gr.) für den Ist-Zustand (a) sowie Plan Null- (b) und Plan-Zustand (c)

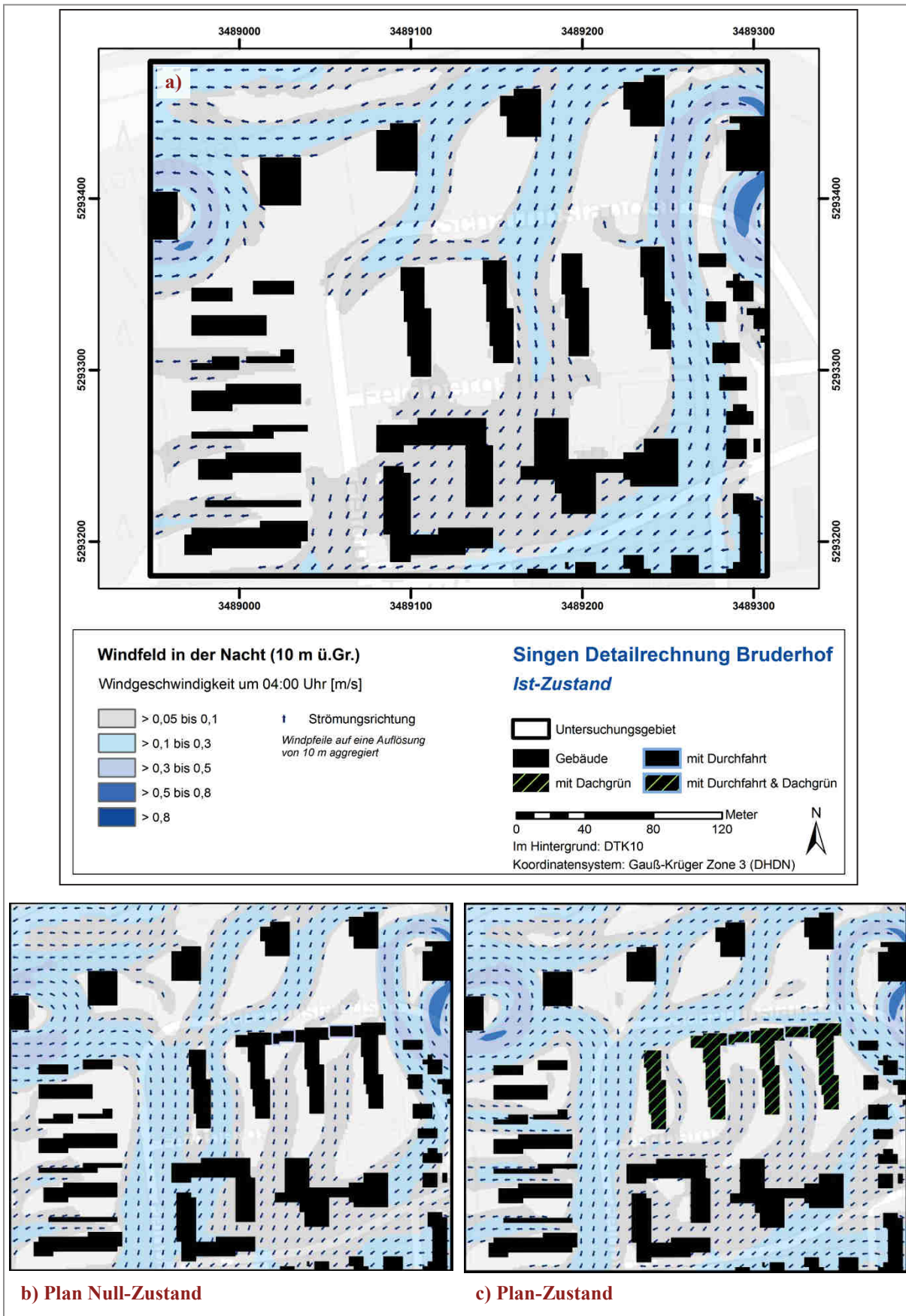


Abb. 44: Nächtliches Strömungsfeld in 10 m ü.Gr. im Untersuchungsgebiet (04:00 Uhr) für den Ist-Zustand (a) sowie Plan Null- (b) und Plan-Zustand (c)

7.3.3 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Zur Bewertung der Wärmebelastung am Tage wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen, der neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse berücksichtigt (Physiologisch Äquivalente Temperatur; vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala (VDI 2004; vgl. Tab. 5), die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; vgl. Abb. 45a).

Im städtischen Vergleich liegt Bruderhofgebiet auch am Tage eine mittlere bis günstige bioklimatische Situation vor (vgl. Planungshinweiskarte Tag in Kap. 6.4), doch erlaubt die vorliegende Detailuntersuchung räumlich genauere und differenzierte Aussagen zur Wärmebelastung, da aufgrund der höheren Auflösung einzelne Gebäude und Bäume berücksichtigt werden konnten.

In Relation zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Die geringsten PET-Werte ≤ 26 °C sind unter dem dichten Baumbestand im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets zu finden. Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können. Auch hohe Gebäude können durch ihren Schattenwurf zu Bereichen *schwacher Wärmebelastung* führen (Abb. 45a). Zwischen den Gebäuden sowie im Straßenraum ist unter den meteorologischen Rahmenbedingungen eines autochthonen Sommertages überwiegend eine *starke Wärmebelastung* vorzufinden (versiegelte und unversiegelte Freifläche), aus denen sich einzelne Bäume bzw. Baumgruppen durch ihren Schattenwurf und damit verbundener *mäßigen Wärmebelastung* hervorheben. Die höchsten Werte sind an den Südfassaden der Gebäude zu finden, bedingt durch zusätzliche emittierte Wärmestrahlung der Gebäude bzw. Reflektion an den Gebäuden.

Im Plan Null-Zustand ist in Bezug auf die bodennahe Wärmebelastung lediglich eine Abkühlung durch den Gebäudeschatten nördlich des Neubaus sowie kleinräumig eine Zunahme der Wärmebelastung im unmittelbaren Nahbereich der Südfassade auszumachen, die Auswirkungen auf die Aufenthaltsqualität in den Innenhöfen südlich des neuen Gebäuderiegels sind zu vernachlässigen (Abb. 45b). Im Vertikalprofil ist jedoch zu erkennen, dass die Lufttemperatur im Umfeld des neuen Gebäuderiegels in der Höhe zunimmt, was sich auf die Bewohnerinnen und Bewohner höherer Etagen der direkt angrenzenden Bestandsgebäude auswirken kann (vgl. Süd-Nord-Profil in Abb. 46).

Durch die ergänzenden Grünmaßnahmen kann in ihrer Kombination sogar eine Verbesserung der Aufenthaltsqualität in den Innenhöfen erreicht werden (Abb. 45c). Dies gilt insb. für den westlichen der drei Innenhöfe, in dem zusätzliche Bäume gepflanzt wurden, die durch ihre Verschattung die größte Wirkung nach sich ziehen. Doch auch die Fassadenbegrünung zeigt sich als wirksame Maßnahme, deren Kombination mit der Dachbegrünung im Vertikalprofil positive Auswirkungen auf die Lufttemperaturen in höheren Schichten zeigt (vgl. Süd-Nord-Profil in Abb. 46). Selbiges gilt für die Grünmaßnahmen in den Innenhöfen, die sogar geringfügige Effekte bis in die östlich angrenzende Bebauung aufweisen (vgl. West-Ost-Profil in Abb. 46).

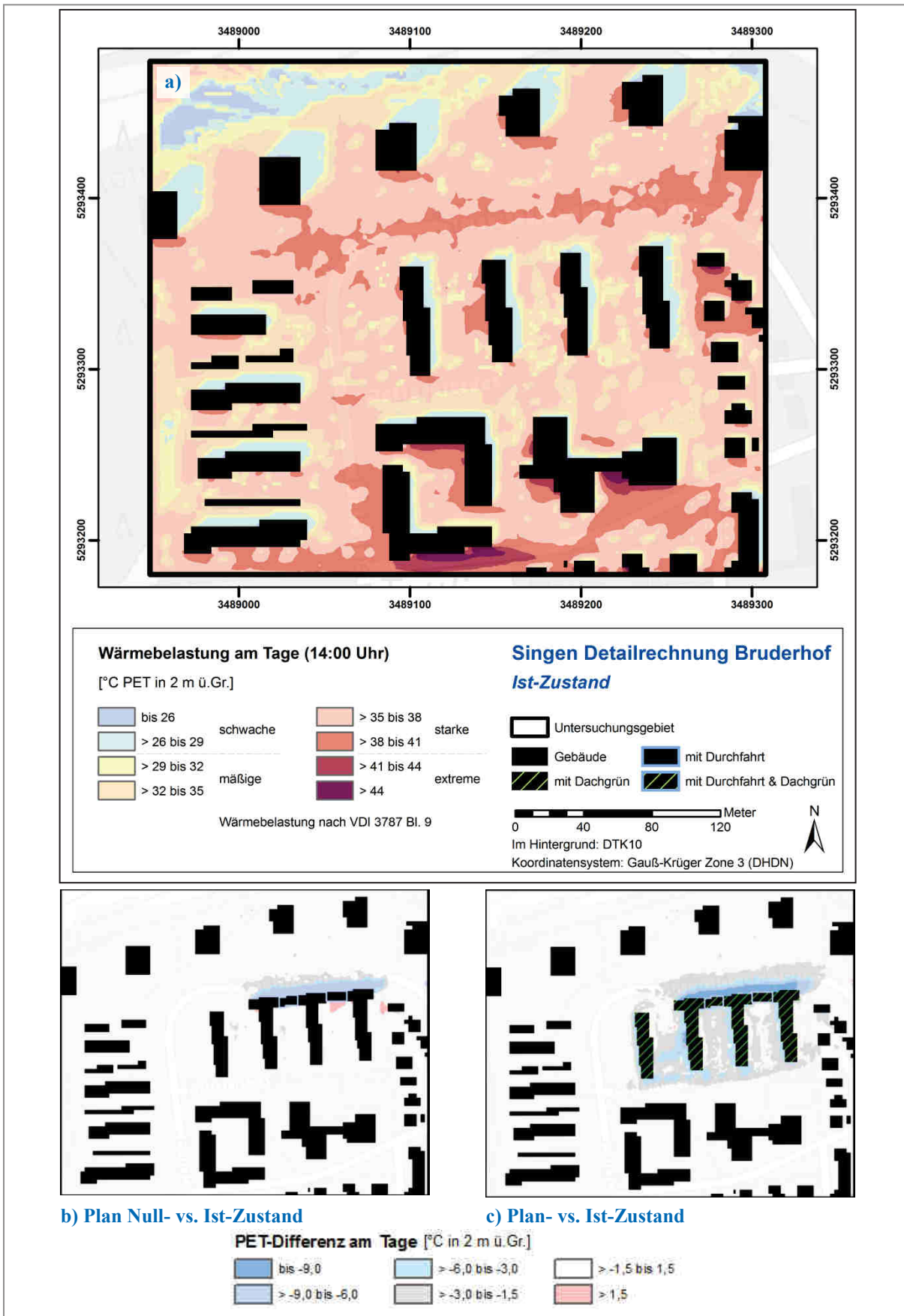


Abb. 45: Ist-Zustand der Wärmebelastung am Tage (PET 14:00 Uhr; a) und PET-Differenzen zwischen Plan-Null- bzw. Plan- zum Ist-Zustand (b bzw. c)

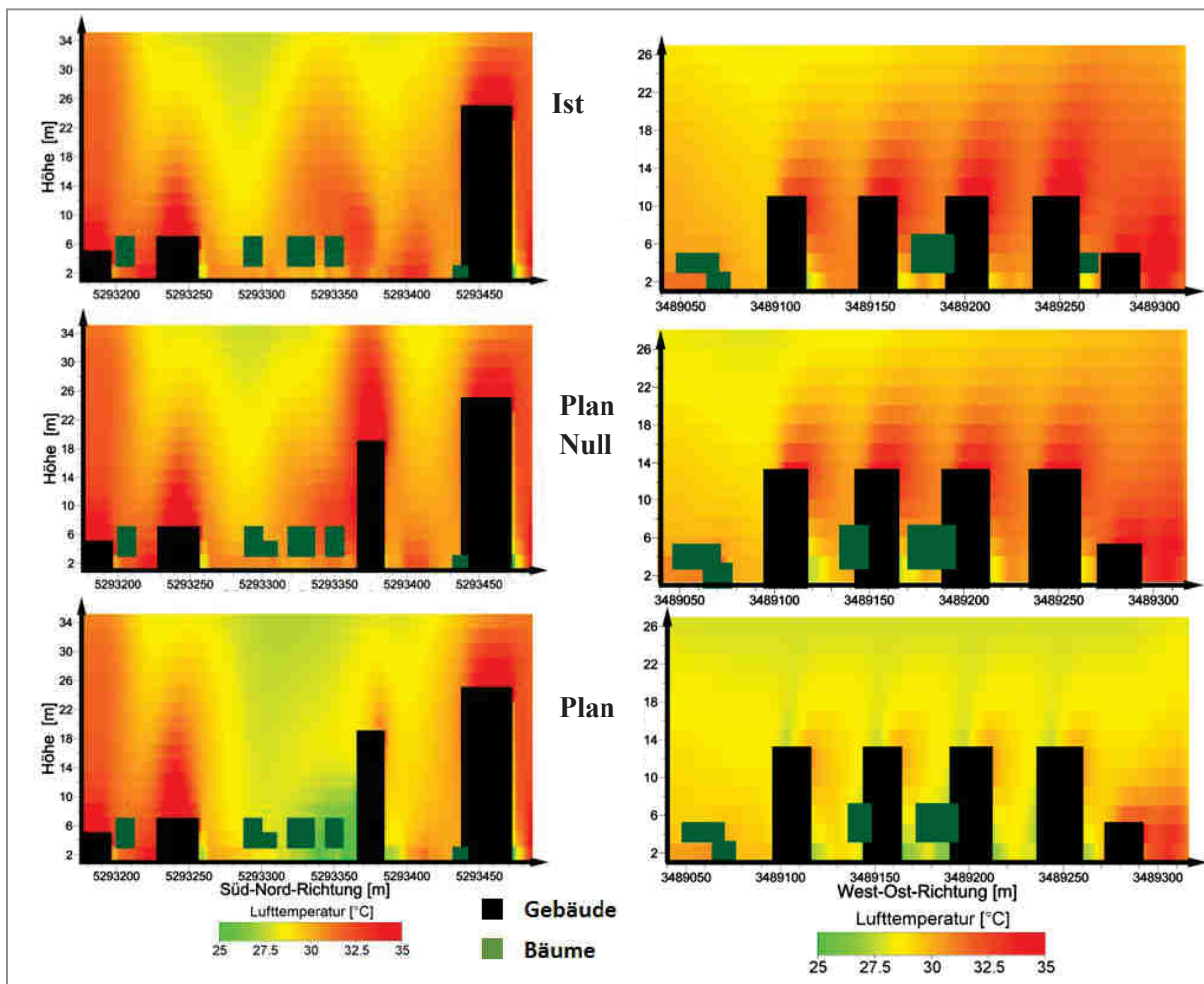


Abb. 46: Vertikalschnitte der Lufttemperatur um 14:00 Uhr in Süd-Nördliche- (links) bzw. West-Östliche-Richtung (rechts) für den Ist-Zustand (oben) bzw. den Plan Null- (mittig) und Plan-Zustand (unten; für Position der Vertikalschnitte im Untersuchungsgebiet siehe Abb. 41c)

7.4 FAZIT

Im Bereich Schauinslandstraße im Bruderhofgebiet in Singen soll eine bestehende Nord-Süd ausgerichtete Zeilenbebauung in Form eines auf der Nord-Seite quer vor Kopf stehenden Gebäuderiegels nachverdichtet werden.

Mit Umsetzung der angedachten Bebauung erhöht sich die nächtliche Lufttemperatur im direkten Umfeld des neuen Gebäuderiegels um ca. 0,4 - 1,3 K, wobei die Intensität mit steigender Entfernung abnimmt und im Wesentlichen auf das Maßnahmengebiet beschränkt bleibt. Durch die Kombination geeigneter Grünmaßnahmen können die Auswirkungen deutlich gemildert werden (Plan-Zustand).

Das nächtliche autochthone Strömungsfeld ist schwach ausgeprägt. Bodennah ergeben sich durch die Bebauung nur geringe Auswirkungen auf das Strömungsfeld. In 10 m über Grund sind großflächigere Effekte erkennbar, die auch die Strömung über umliegenden Siedlungsflächen beeinflussen, jedoch in ihrer Intensität gering bleiben (Differenzen kleiner $\pm 0,4 \text{ m s}^{-1}$). Beachtet werden muss, dass die Hinderniswirkung des Neubaus auch bei anderen Wetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten zum Tragen kommt und das Windfeld modifiziert.

Während die Auswirkungen der angedachten Bebauung auf die Wärmebelastung am Tage bodennah relativ gering ausfallen, ist im Vertikalprofil eine Zunahme der Lufttemperatur in der Höhe zu erkennen, was sich auf die Wohnsituation in den höheren Etagen der direkt angrenzenden Bestandsgebäude auswirken kann. Durch die vorgeschlagenen Grünmaßnahmen kann die Wärmebelastung am Tage sowohl auf Bodenniveau

als auch in der Höhe gesenkt und somit die negativen Effekte der Bebauung kompensiert werden, teilweise ergibt sich in den Innenhöfen eine steigende Aufenthaltsqualität.

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die geplante Nachverdichtung trotz der negativen Auswirkungen auf die bestehende Zeilenbebauung aus stadtklimatischer Sicht vertretbar erscheint, da es sich um kleinräumige Effekte handelt und eine geringe Vorbelastung besteht. Doch gerade um dieses vergleichsweise günstige Bioklima nicht zu gefährden, werden ergänzende Grünmaßnahmen zur stadtklimatischen Optimierung dringend angeraten, die die negativen Auswirkungen der Bebauung mildern können.

KLIMAOPTIMIERTE GRÜNMAßNAHMEN

In die Untersuchung der klimaoptimierten Bebauungsvariante wurden eine intensive Dachbegrünung, Fassadenbegrünung, Beschattung durch Bäume und Entsiegelung aufgenommen. Die größten Effekte bezüglich der Reduktion der Wärmebelastung am Tage bestehen bei der Verschattung durch Bäume, doch Fassaden- und Dachbegrünung sind (gerade für höhere Luftschichten) ebenso von Bedeutung. Auch in der Nacht sind positive Effekte durch die Grünmaßnahmen erkennbar, deren Wirkung generell dann am stärksten ist, wenn sie kombiniert werden. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass die Auswirkungen kleinräumiger Bebauung – sofern sie außerhalb von Kaltluftleitbahnen bzw. Klimaaustauschflächen geschieht – durch geeignete Grünmaßnahmen gemildert bzw. ausgeglichen werden können.

Tab. 16 fasst die hier verwendeten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit sowie Umsetzbarkeit und (soweit möglich) Kosten zusammen, sodass die Erkenntnisse auf andere Plangebiete übertragen werden können – entsprechend wurde die Tabelle als eigenes Poster verfasst, zusammen mit einer Veranschaulichung und Angaben zu näheren Informationen.

In der Modellrechnung nicht enthalten waren klimaökologische Aspekte von Tiefgaragen. Ähnlich wie bei der Dachbegrünung kann davon ausgegangen werden, dass die klimatische Wirkung im Wesentlichen von der Wassersättigung des Bodens abhängt (die wiederum Einfluss auf die Bepflanzung hat). Entsprechend wird auf Tiefgaragen zu einer möglichst hohen Bodenauflage geraten (bis ca. 1 m; zu genauen Kennzahlen sind keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen bekannt), um ein Austrocknen des Bodens während längerer Hitzeperioden zu vermeiden und eine ausreichende Grundlage zur Bepflanzung von z.B. Bäumen zu haben.

Tab. 16: Mögliche Maßnahmen zur Grünoptimierung bei der geplanten Bebauung Schauinslandstraße (Bruderhof) in Singen und Erläuterungen über deren Umsetzung sowie deren stadtklimatischen Wirksamkeit.

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Umsetzbarkeit / Pflegeaufwand	Kosten	Stadtklimatische Wirkung	Synergien	weitere Informationen / Quellen
Stadt-/Straßenbäume	Bäume in Innenhöfen und Gärten bzw. an Straßen, Wegen und Plätzen beschatten den Boden sowie Fassaden und verdunsten Wasser, sodass sie auf doppelte Weise Luft und Oberflächen kühlen.	Besondere Anforderungen an den Standort (möglichst Entsiegelung des Bodenkörpers) sowie Baumartenwahl (vgl. z.B. Empfehlungen wie Straßenbaum-Liste GALK (2018), KLimaArtenMatrix (KLAM 2010), Bäume in Jena (2016)). Herausforderungen: Infrastruktur im Boden (Leitungen, Abwasserkanäle, etc.) verhindern Baumpflanzungen bzw. erhöhen die Kosten. Verminderte Durchlüftung bei zu dichtem Bestand, insb. im Straßenraum, vermeiden (Schadstoffakkumulation unter Kronendach möglich). Erhöhte Ansprüche an die Pflege (insb. Bewässerung), da Stadtbäume besonders vielen Stressfaktoren ausgesetzt sind (u.a. eingeschränkter Wurzelraum, Bodenverdichtung, Schadstoffimmissionen, Beschädigungen, Trockenstress, höhere Temperaturen).	Ca. 1.200 € - 2.000 €, um einen Baum zu pflanzen und für drei Jahre zu pflegen (Berlin 2016, 2018). Ggf. höhere Kosten bei aufwändiger Entsiegelung bzw. Infrastruktur im Boden (bis zu ca. 3.500 - 4.000 €).	Sehr effektive Maßnahme zur Verringerung der Wärmebelastung am Tage (Verschattung, Verdunstungsleistung). Im bodennahen Bereich stärkste Verringerung der Lufttemperatur, Effekte bis auf Dachniveau beobachtbar. Nachts höhere Temperaturen unter dem Kronendach möglich, doch auch Reduktion der städtischen Wärmeinsel durch Verschattung versiegelter Flächen und Fassaden (geringere Wärmespeicherung am Tage).	Luftreinhaltung (Filterwirkung, Sauerstoffproduktion) Biodiversität (Lebensraum) Aufwertung des Straßenraums Stadtentwässerung: Abflussreduzierung durch Verdunstung	Berlin (2011, 2016, 2018) Bäume in Jena (2016) GALK (2018) KLAM (2010) Eigene Analysen GEO-NET
Entsiegelung	Austausch komplett versiegelter Flächen wie Straßen, Parkplätze, Innenhöfe zugunsten teilversiegelter Oberflächenmaterialien (z.B. Rasengittersteine, Fugenpflaster, Sickerpflaster) bzw. Komplettsiegelung mit anschließender Begrünung.	Teilversiegelte Flächen haben generell vergleichbare Unterhaltskosten wie versiegelte Flächen, z.B. für Straßenreinigung. Darüber hinaus entstehen im Regelfall keine zusätzlichen Kosten. Herausforderung: Potentielle Grundwasserbelastung bei unversiegelten Parkplätzen bzw. Verkehrswegen.	Ressourcenverbrauch und Investitionen sind aufgrund des erforderlichen Rückbaus des alten sowie Einbaus des neuen Materials (inkl. Unterboden) relativ hoch. Vergleichbar mit Kosten für Maßnahme des Landschaftsbaus für Grünflächen (ca. 25-40 €/m ² in Abhängigkeit vom aufzubrechenden Material; Sieker 2018).	Abnahme der thermischen Belastung infolge geringerer Oberflächentemperaturen, reduzierter Wärmespeicherung und erhöhter Verdunstungskühlung insb. am Tage (bodennah Absinken der Lufttemperatur, Effekte bis auf Dachniveau beobachtbar). Bei großflächiger Entsiegelung geringere Überwärmung in der Nacht möglich. Wirkung am stärksten bei Komplettsiegelung, aber auch bei Teilentsiegelung vorhanden.	Regenwassermanagement und Hochwasserschutz (Reduktion vom Regenwasserabfluss) Bodenschutz	KURAS (2017) Sieker (2018) Eigene Analysen GEO-NET
Dachbegrünung						
extensiv	Dünne Substratschicht (ca. 8 - 15 cm), rasenartige Vegetation; keine Nutzung zum Aufenthalt (außer Wartungsgänge)	Installation auf Flach-/Schrägdächern (5-15 ° Neigungswinkel) sowie Steildächern (bis max. 45 °), auch zum nachträglichen Einbau möglich. Gewicht (wassergesättigt): ca. 50-180 kg/m ² Bei standort- und substratgerechter Auswahl nach Initialpflanzung meist nur geringe Pflegemaßnahmen notwendig (i.d.R. keine Bewässerung/Düngung, ca. zwei Kontrollgänge pro Jahr).	Im Mittel ca. 15-40 €/m ² Lebenszykluskosten über 40 Jahre in vergleichbarer Größenordnung zu Schwarzdächern (HCU 2017).	Deutliche Reduktion der Oberflächentemperatur. Kühlende Wirkung auf Luftmassen über der Dachoberfläche (lokaler Kühlungseffekt).		
intensiv	Mehrere Substratschichten (ca. 15-100 cm) und höhere Vegetation bis hin zu einer Gartenlandschaft mit Bäumen, etc.; Nutzung zum Aufenthalt	Nur bei flachen bis leicht geneigten Dächern (0-5 ° Neigungswinkel) möglich (höherer technischer und statischer Anspruch). Gewicht (wassergesättigt): ca. 150-1300 kg/m ² Höherer Pflegeaufwand (Strauch-/Baumschnitt, ggf. Mahd bei Gräsern) und i.d.R. Bewässerung sowie ggf. Düngung notwendig.	Im Mittel ab ca. 60 €/m ² bzw. ca. 5 €/m ² je cm Substratstärke	Positiver Effekt auf Mikroklima im Aufenthaltsbereich des Menschen (2 m ü.Gr.), i.d.R. jedoch nur bei niedrigen Dächern bemerkbar (z.B. Tiefgaragen) und mit steigender Dachhöhe abnehmend. Bei großflächiger Installation Reduktion der städtischen Wärmeinsel möglich.	Regenwassermanagement (Retention) Gebäudeenergie (Dämmwirkung) Luftreinhaltung (Filterwirkung) Biodiversität (Lebensraum)	Pfoser et al. (2013) Berlin (2016) GERICS (2017) HCU (2017) KURAS (2017)
blaugrünes Dach	Niederschlag wird fast vollständig zurückgehalten und Pflanzen kontinuierlich mit Wasser versorgt (Wasser-Anstau in Dränschicht oder Bewässerung)	Besonders geeignet sind flache Dächer (bis 5 ° Neigungswinkel möglich). Zunehmende Entwicklung blaugrüner Dächer in den letzten Jahren, die heute als Fertiglösung angeboten werden und mittlerweile selbst auf Bestandsgebäuden eingesetzt werden können.	Noch keine allgemeine Quantifizierung möglich	Wirkung extensiver Begrünung insb. am Tage und insgesamt geringer als von intensiver Begrünung (am Tage und in der Nacht wirksam). Kühleffekte infolge der Verdunstungsleistung von ausreichender Wassersättigung abhängig, somit abnehmend bei Trockenstress und am höchsten bei blaugrünen Dächern.	Photovoltaik (höherer Wirkungsgrad) Aufenthaltsqualität / Nutzung (Dachgärten)	FLL (2018a) Eigene Analysen GEO-NET
allgemein	Dachbegrünungen gelten als harte Bedachung und erfüllen unter den bekannten Bedingungen die Forderungen der Bauordnung (somit derzeit kein weiterer Nachweis über Brandverhalten erforderlich; KURAS 2017). Festsetzungen zur „Bauwerksbegrünung“ können als „Ausgleichsmaßnahmen“ in Bebauungsplänen getroffen werden, wenn sie städtebaulich erforderlich sind. Herausforderungen: Denkmalschutz, Statische Anforderungen, Photovoltaikanlagen		Investitionen lassen sich deutlich reduzieren, wenn Dachbegrünung im Zuge von ohnehin am Gebäude geplanten Baumaßnahmen umgesetzt wird.			

Fassadenbegrünung

erdgebunden	Begrünung der Hausfassade mit erdgebundenen Kletterpflanzen (z.B. Wilder Wein, Efeu, Kletterhortensie, ggf. mit Wuchsergüst).	Bewässerung i.d.R. direkt aus der bepflanzten Mulde, d.h. Regenwasser wird direkt am und im Wurzelraum versickert. Ein- bis zweimal jährlich durchzuführende Pflegemaßnahmen (Rückschnitt, Freihalten von Gebäudeteilen, ggf. Düngung und Schädlingsbekämpfung).	Kosten Selbstklimmer bzw. Gerüstkletterpflanzen (Pfoser et al. 2013): Investitionen ca. 0,40 bzw. 36 - 95 €/m ² Unterhaltung ca. 15 bzw. 10 - 20 €/m ² pro Jahr	Verringerung der Oberflächentemperatur der Gebäudehülle, Erhöhung des thermischen Komforts im Gebäudeinneren sowie des unmittelbar angrenzenden Außenklimas (Reduktion von Hitzestress am Tage bzw. Überwärmung in der Nacht). Besonders ausgeprägt, ist der Effekt in vollbegrüntem Innenhöfen. Während begrünte Dächer vor allem für das Dachgeschoss thermische Vorteile bringen, kann sich der thermische Nutzen bei Fassadenbegrünungen über alle begrünten Stockwerke erstrecken.	Gebäudeenergie (Dämmwirkung) Luftreinhaltung (Filterwirkung) Lärminderung Biodiversität (Lebensraum) Regenwassermanagement (Speicherung von Niederschlagswasser)	Pfoser et al. (2013) GERICS (2017) KURAS (2017) FLL (2018b) Eigene Analysen GEO-NET
systemgebunden	Begrünung der Hausfassade mit wand- bzw. systemgebundenen Techniken (Gabionen, horizontale Kübel, Wandmodule, flächiges Geovlies).	Systemgebundene Fassadenbegrünung benötigt (möglichst automatische) Bewässerung (inkl. Düngung). Fünf- bis zehnmal jährlich Pflegemaßnahmen nötig.	Kosten flächige Systeme (Pfoser et al. 2013): Investitionen ca. 400-1200 €/m ² Unterhaltung ca. 40 €/m ² pro Jahr (höhenabhängig)			
allgemein	Viel Potential bei hohen Bauwerken mit großem Wand-Dach-Verhältnis, aber auch Vorteile für niedriggeschossige Häuser. Wie bei Dachbegrünung rechtsverbindliche Festsetzung in B-Plänen möglich (§ 9 (1) Nr. 25 BauGB). Ansprüche der Pflanzen an Licht, Boden und Klima besonders wichtig, dabei müssen die geeigneten Bedingungen ganzjährig gewährleistet werden. Bewässerungsbedarf: 0,5-0,8 L/m ² pro Tag (je nach Exposition und Pflanzenart), Vorreinigung des Regenwassers (pH-Wert < 7). Herausforderungen: Denkmalschutz, Feuerschutz, Ungeziefer im Bereich der Fenster, Photovoltaikanlagen					

Werden die Maßnahmen zur Grünoptimierung kombiniert, verstärken sich die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen (vgl. Abb. 47).

Literaturnachweis:

- Bäume in Jena (2016) – Stadt Jena: Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- GALK (2018) - Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz: Straßenbaumliste. Online: www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste (Abruf 29.06.2018)
- Berlin (2011) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern.
- Berlin (2016) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin: Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt.
- Berlin (2018) – Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz: Neue Stadtbäume für Berlins Straßen – Häufige Fragen. Online: <https://www.berlin.de/senvvk/umwelt/stadtgruen/stadtbaeume/kampagne/de/faq/index.shtml> (Abruf 11.07.2018).
- FLL (2018a) – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau: Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen. 6. Ausgabe 2018.
- FLL (2018b) – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau: Fassadenbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. 3. Ausgabe 2018.
- GERICS (2017) – Brune, M., Bender, S. und Groth, M.: Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30. Climate Service Center Germany, Hamburg.
- HCU (2017) – Freie und Hansestadt Hamburg (Hrsg.): Hamburgs Gründächer. Eine Ökonomische Bewertung. HafenCity Universität Hamburg.
- KLAM (2010) – Roloff, A. und Gillner, S.: Die KlimaArtenMatrix für Stadtbaumarten (KLAM-Stadt). In: Stiftung Die Grüne Stadt (Hrsg.): Stadtklimatologie und Grün: 33-39.
- KURAS (2017) – Riechel, M., Remy, C., Matzinger, A., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S., Heinzmann, B., Joswig, K., Reichmann, B. und Rehfeld-Klein, M.: Maßnahmensteckbriefe der Regenwasserbewirtschaftung. Ergebnisse des Projektes KURAS.
- Pfoser, N., Jenner, N., Henrich, J., Heusinger, J. und Weber, S. (2013): Gebäude Begrünung Energie: Potentiale und Wechselwirkungen.
- Sieker (2018) - Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH: Entsiegelung. Online: <https://www.sieker.de/de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versickerung/article/entsiegelung-472.html> (Abruf 29.06.2018).

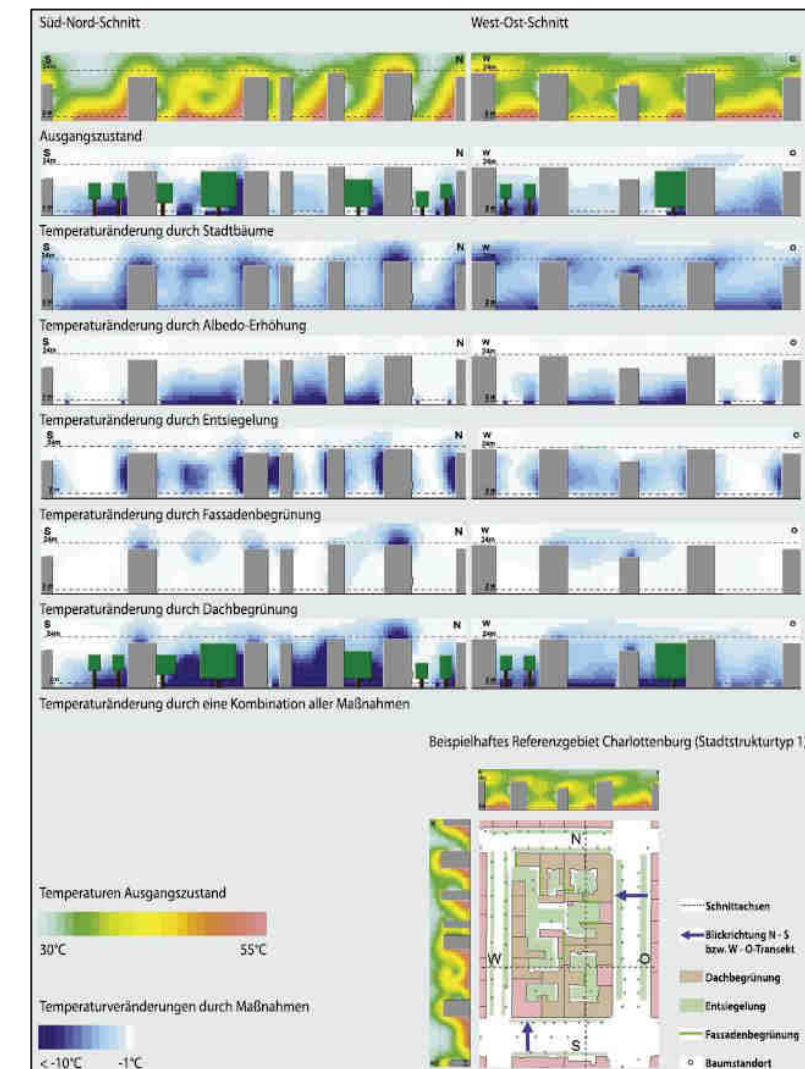


Abb. 47: Mikroklimatische Effekte verschiedener stadtklimatischer Maßnahmen (aus Berlin 2011)

8 Modellgebiet Knöpfleswies

Die Stadt Singen beabsichtigt die Fläche *Knöpfleswies* (Planungsgebiet), die zurzeit durch Kleingärten genutzt wird, als Wohnbaufläche zu entwickeln. Der Projektbeirat empfiehlt, in einem städtebaulichen Wettbewerb oder dem Planungs- und Abwägungsprozess eines städtebaulichen Entwurfs, Kriterien zur Klimawandelanpassung dezidiert zur Erarbeitung heranzuziehen. Durch dieses Vorgehen soll ein attraktives und stadtklimatisch hochwertiges Stadtgebiet geschaffen werden.

Die unten im Einzelnen aufgeführten Kriterien wurden auf Basis städtebaulicher Grundsätze entwickelt und sind zunächst als allgemeingültige Anforderungen für eine stadtklimatisch qualitätsvolle Entwicklung zu verstehen. Zur Diskussion stehende Planungsentwürfe können anhand dieser Kriterien explizit auf ihre Klimaverträglichkeit überprüft und bewertet werden. Dabei müssen gebietsspezifische Besonderheiten zusätzlich in die Bewertung mit einfließen. Auf diese Weise kann der Aspekt des klimaverträglichen Bauens belastbarer in den Entwicklungs-/ Planungs- und Abwägungsprozess eingebunden werden.

8.1 PLANUNGSGEBIET UND STÄDTEBAULICHE VORGABEN

Das Planungsgebiet liegt in der Singener Nordstadt und ist ca. 21.500 m² groß. Die angrenzende Bebauung ist durch einen 4-geschossigen Wohnungsbau geprägt, süd-östlich finden sich vorwiegend Einfamilienhäuser. Die *Knöpfleswies* wird momentan von ca. 50 Kleingärten genutzt, die im Zuge der Entwicklung umgesiedelt werden sollen. Das Planungsgebiet ist Teil einer übergeordneten Verbindung von Grünräumen, die für den Luftaustausch in den angrenzenden Gebieten von Bedeutung ist. Diese verläuft aus Richtung Westen kommend zwischen der Zeilenbebauung hindurch bis zur *Knöpfleswies*, weitet sich dort auf und verläuft dann entlang der *Reichenaustraße* Richtung Osten weiter zum *Großen Tannenwald*. Auch aus nördlicher Richtung erstreckt sich ein bis zu *Knöpfleswies* reichender Grünraum zwischen der Zeilenbebauung.

Im Planungsgebiet soll neben dem Wohnen ein kleinflächiger Einkaufsmarkt ermöglicht werden. Die Neuplanungen sollen möglichst vier Vollgeschosse plus ein nutzbares Dachgeschoss erhalten (z.B. Staffelgeschoss). Die für die Bebauung erforderlichen Stellplätze sind in einer oder mehreren Tiefgaragen nachzuweisen. Durch den Höhenversprung des Planungsgebiets bietet sich der Bau einer Tiefgarage an. Das Planungsgebiet soll von jeglichem MIV freigehalten werden. Die oberirdischen Verkehrswege dienen lediglich der Andienung und z.B. Rettungsdiensten.

Energiesparende Konzepte mit zeitgemäßen, generationen- und bevölkerungsgruppenübergreifenden Wohnformen sollen bei der Entwicklung der Fläche eine wichtige Rolle spielen. Es sind daher folgende Aspekte in besonderer Weise herauszuarbeiten:

- * Suffizienz (z.B. reduzierte Wohnfläche pro Person, flexibles und modulares Raumprogramm, Integration von alternativen Mobilitätslösungen, autofreies bzw. autoarmes Quartier)
- * Klimawandel (mikroklimatisch wirksames Grünraum- und Freiflächenkonzept, Hitzelasten- und Regenwassermanagement)

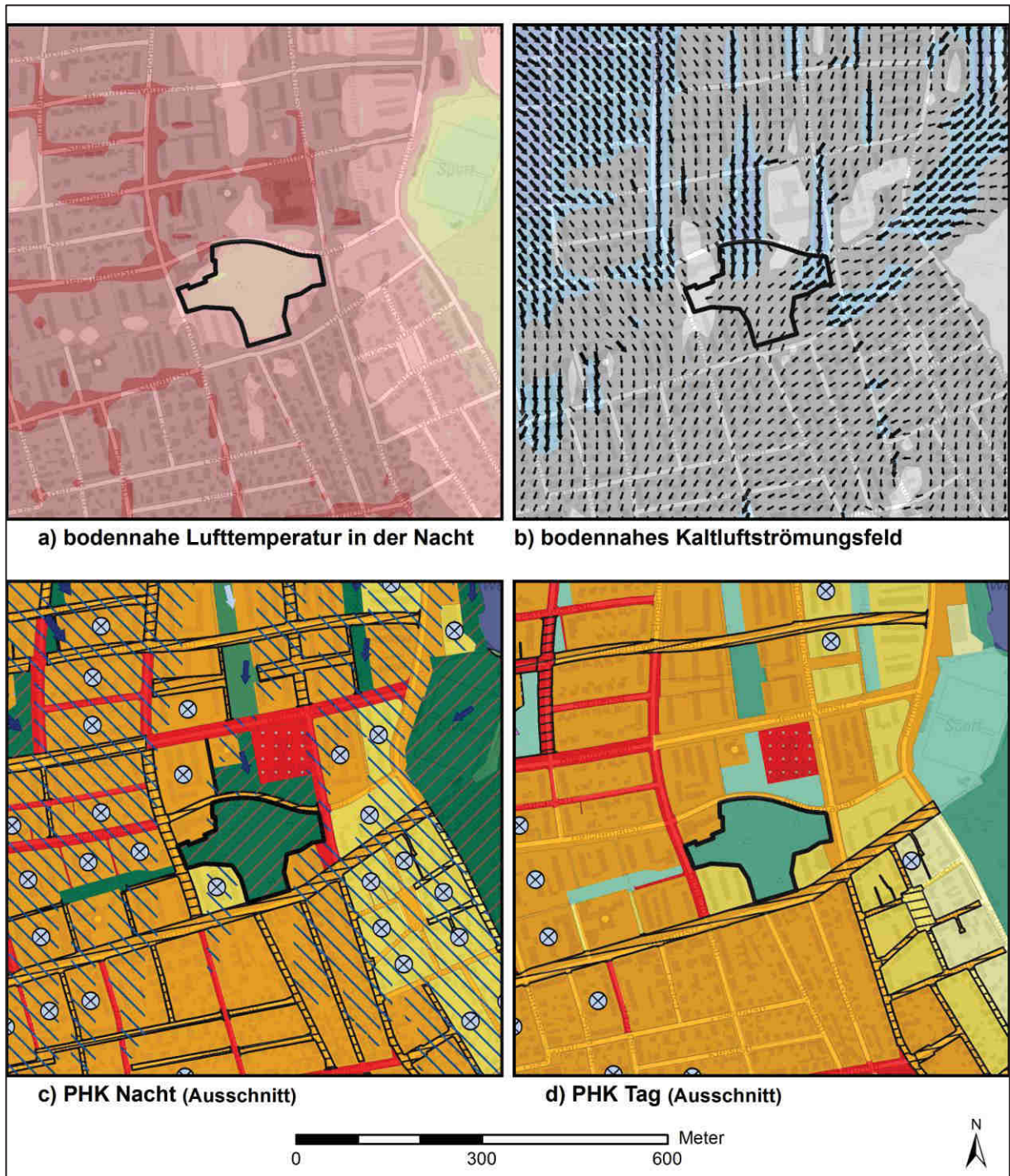


Abb. 48: Ergebnisse der gesamtstädtischen Klimaaanalyse für die Knöpfleswies (schwarze Markierung) in Form des rasterbasierten Lufttemperatur- bzw. Strömungsfelds in der Nacht (a bzw. b) sowie Ausschnitte der Planungshinweiskarten der Nacht- bzw. Tagsituation (c bzw. d; für genauere Informationen und die Legenden siehe jeweilige Karten)

8.2 ERGEBNISSE DER KLIMAANALYSE

Auf Grundlage der klimatologischen Voruntersuchung einer möglichen Bebauung im Gebiet der *Knöpfleswies* und der gesamtstädtischen Klimaanalyse können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- * Die *Knöpfleswies* hebt sich im nächtlichen Temperaturfeld vom umliegenden Siedlungsbereich als kühlere Grünfläche ab (ca. 1,5 K geringe Lufttemperatur; Abb. 48a)
- * Das Planungsgebiet wird über die bestehenden Grünverbindungen mit Kaltluft aus nördlicher sowie (nord-)westlicher Richtung versorgt. Die Strömung setzt sich über die *Knöpfleswies* fort, erreicht den angrenzenden Siedlungsraum und unterstützt somit dessen Durchlüftung (Abb. 48b)
- * Entsprechend wichtig ist die Fläche in Bezug auf die bioklimatische Situation. Als Kaltluftaustauschfläche weist sie eine *Sehr hohe Bedeutung* in der Nacht auf, auch am Tage besteht durch die vergleichsweise geringe Wärmebelastung eine *Hohe bioklimatische Bedeutung* (Abb. 48c/d). Die Siedlungsflächen im Umfeld sind vornehmlich durch eine *Mittlere bioklimatische Situation* geprägt, insb. in der Nacht ist durch den Klimawandel eine steigende Belastung zu erwarten.

Im Sinne der qualitativen Bewertung der FNP-Potentialflächen würde die *Knöpfleswies* damit Kategorie III einnehmen (*Entwicklung aus stadtklimatischer Sicht ohne optimierende Maßnahmen nicht empfehlenswert*; vgl. Kap. 6.2), woraus sich die Empfehlung ergibt, stadtklimatische Vorgaben in den Planungsprozess aufzunehmen.

8.3 STADTKLIMATISCHE VORGABEN

Sofern die Nachverdichtung klimaverträglich erfolgt, erscheint die Entwicklung des Planungsgebiets aus stadtklimatischer Sicht vertretbar. Um dies zu erreichen, werden im Folgenden stadtklimatische Vorgaben für verschiedene Cluster benannt, die im Planungsprozess zu berücksichtigen sind. Neben der Berücksichtigung baulicher Anforderungen (*Gebäude*) und der übergeordneten *Erschließung*, wird im Sinne der doppelten Innenentwicklung dringend zu ergänzenden (Grün-) Maßnahmen geraten (*Freiflächen*).

Für den Planungsprozess werden

1. stadtklimatische Vorgaben definiert, deren Einhaltung dringend empfohlen wird, da sie im Planungsgebiet nicht unmittelbar kompensiert werden können (++)
2. stadtklimatische Vorgaben definiert, deren Einhaltung empfohlen wird bzw. die bei Nichtbeachtung über andere Maßnahmen kompensiert werden sollten (+)
3. Zusatzkriterien definiert, die sich nicht auf stadtklimatische Anforderungen beziehen, jedoch im Hinblick auf die angestrebte Anpassung an den Klimawandel umgesetzt werden sollten (O)

Erschließung und Mobilität:

E.1 Parkplätze

- * Möglichst wenig Stellplätze und Versiegelung gering halten (+)
- * Verschattung durch Bäume (++)
- * Tiefgaragen intensiv begrünen (++)
- * Tiefgaragen mit einer hohen Bodenauflage von 1 m versehen (+)
 - Damit soll ein Austrocknen während Hitzeperioden verhindert und die Versorgung des Grüns mit Wasser gewährleistet werden

Gebäude (vgl. skizzenhafte Abb. 49):

G.1 Die Anordnung der Gebäude ist an das Strömungsfeld auszurichten (++)

- * Keine Gebäuderiegel quer zur Strömungsrichtung (++)
- * Grünachsen einhalten (++)

G.2 Die Bebauungsdichte und Typologie soll sich an der Klimafunktion der Teilflächen orientieren (+). Dabei wird unterschieden zwischen Suchräumen...

- * mit hoher Dichte → z.B. „Solitär“ (bis 8-geschossig)
 - Die vertikale Nachverdichtung stellt ein ausreichendes Angebot von Wohnraum bei geringerer Flächeninanspruchnahme sicher.
 - Die Höhe des Gebäudes sollte auf maximal 8 Geschosse begrenzt bleiben, um keinen zu starken Kontrast zur Umgebungsbebauung zu bilden und den Windkomfort nicht zu gefährden.
- * mit höherer Dichte → z.B. Zeilenbebauung (bis zu 5-geschossig)
- * Geringere Dichte → z.B. Einzel-/Reihenhäuser (2-geschossig)

G.3 Umsetzung gebäudebezogener Maßnahmen:

- * Intensive Dachbegrünung auf den Mehrfamilienhäusern (MFH; ++)
 - Möglichst blaugrüne Dachbegrünung, d.h. in Verbindung mit der Möglichkeit Wasser zu speichern (O)
- * Intensive Dachbegrünung auf allen weiteren Flachdächern (+)
- * Nutzbare Dachlandschaften auf den MFH (O)
- * Fassadenbegrünung an den Süd- und Südwestfassaden der MFH (+)
 - Auch Bäume oder technische Lösungen bieten Möglichkeiten zur Fassadenverschattung
- * (Niederschlags-)Wassermanagement (O)

Freiflächen (vgl. skizzenhafte Abb. 50):

F.1 Hauptgrünachse in Ost-West- bzw. Nebengrünachse in Süd-Nord-Richtung (++)

- * klimatisch begründete Breiten für Hauptgrünachsen bzw. Nebengrünachsen (Abstand zwischen Bebauung wie Gebäude, Garage)
- * Möglichst geringe Versiegelung
 - Hauptgrünachse als Rad-/Fußweg und für Rettungsdienste befahrbar (wassergebundene Decke)
 - Nebengrünachse als befestigter Radweg
- * Verschattung durch Bäume (aber Durchlüftung gewährleisten)

F.2 Ergänzende Nebengrünachse zwischen den Suchräumen unterschiedlicher Dichte mit klimatisch begründeten Breiten (+)

F.3 Suchraum für zentrale Grünfläche (++)

- * Ausgestaltung der Grünfläche als Klimaoase mit vielfältiger Grünausstattung (+)
 - offene Wasserflächen (bewegtes Wasser)
 - verschattende Elemente
 - Spiel-/Sitzbereiche

F.4 Hausgärten/Freiflächen strömungsgünstig anordnen und ausgestalten (++)

- * Vielfältige Grünausstattung und Aufenthaltsqualität sichern (+)

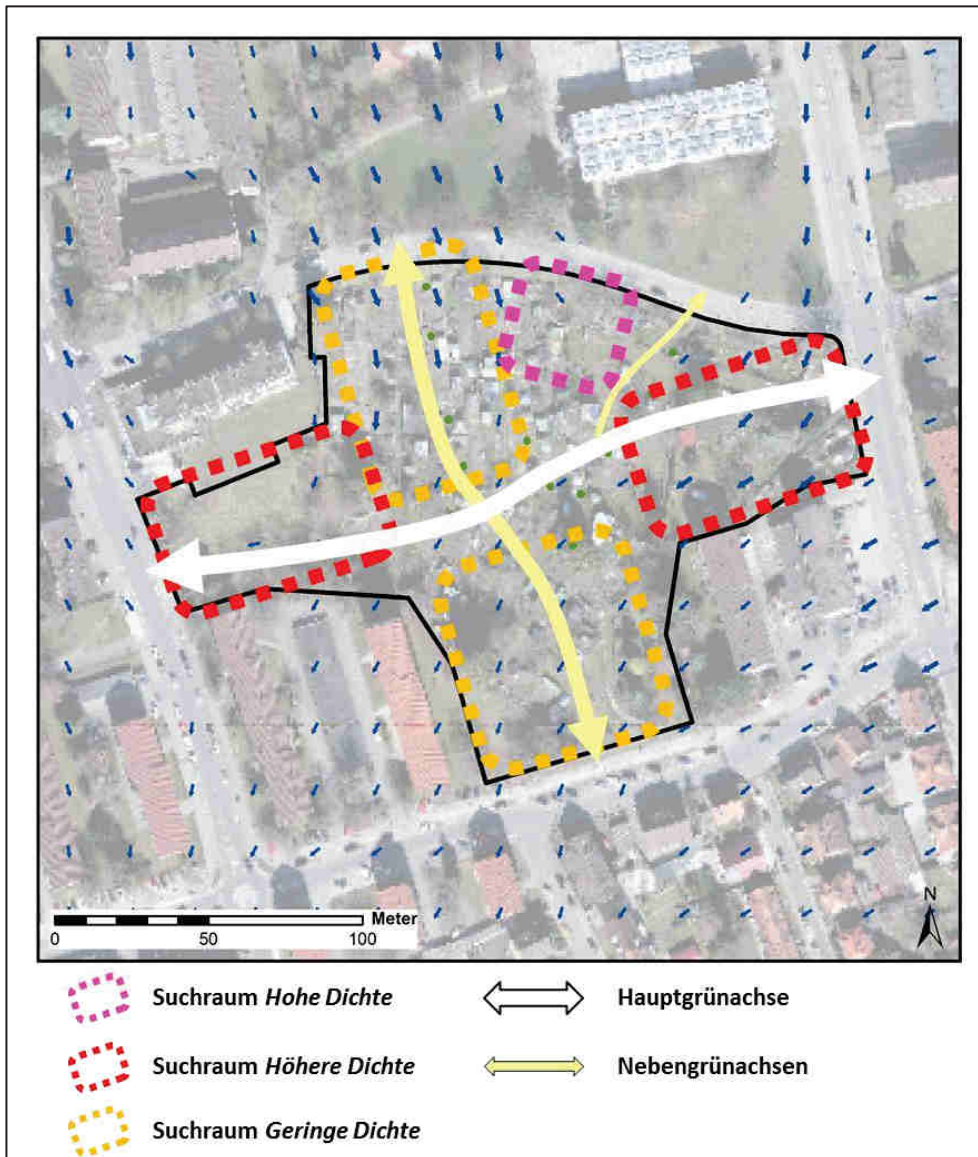


Abb. 49: Skizze stadtklimatischer Vorgaben Bebauungsdichte (blaue Pfeile = nächtliches Strömungsfeld aus gesamtstädtischer Klimaaanalyse in 100 m-Auflösung, sonstige Erläuterungen siehe Text; im Hintergrund Orthophoto 2016 der Stadt Singen)

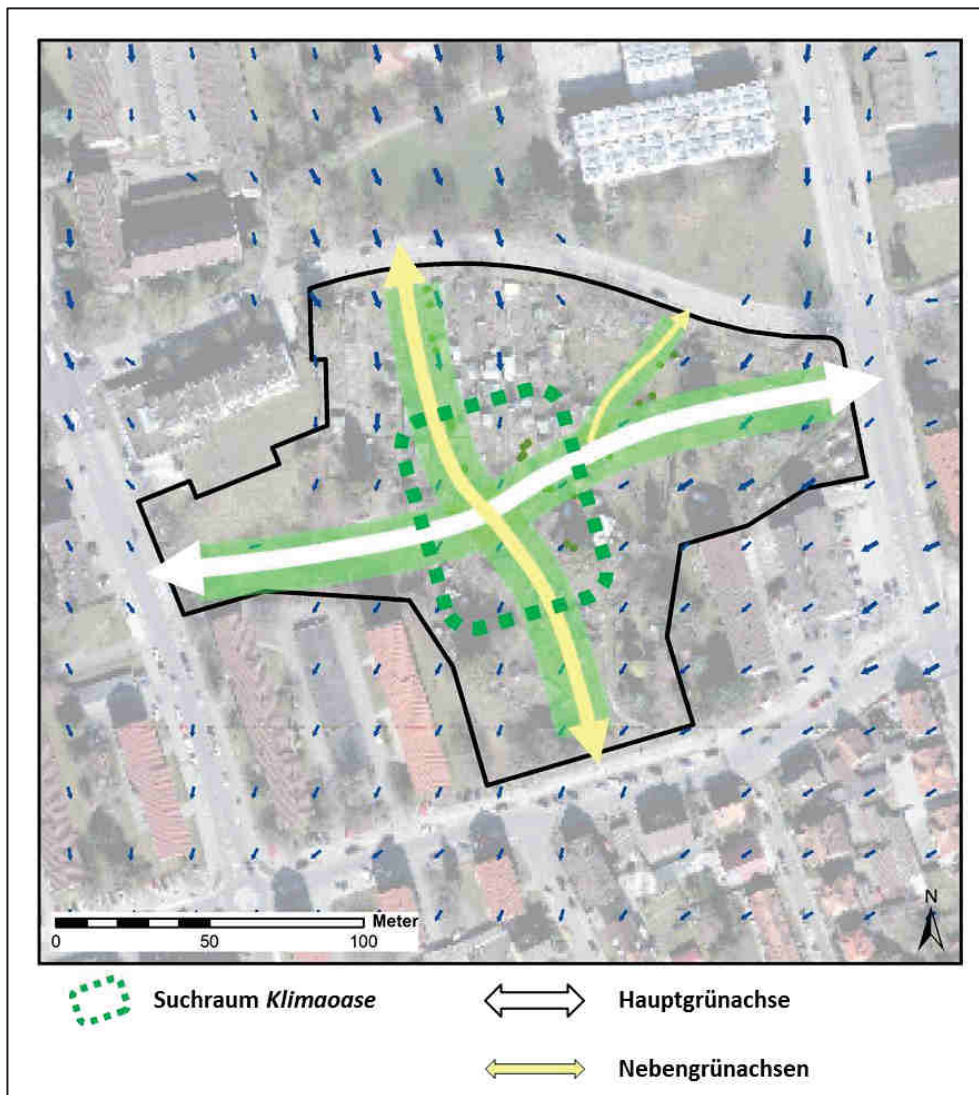


Abb. 50: Skizze stadtklimatischer Vorgaben Grünachsen (blaue Pfeile = nächtliches Strömungsfeld aus gesamtstädtischer Klimaanalyse in 100 m-Auflösung, sonstige Erläuterungen siehe Text; im Hintergrund Orthophoto 2016 der Stadt Singen)

9 Zusammenfassung und Übertragbarkeit

Unter dem Titel „**Zielkonflikt Klimakomfort – Nachverdichtung: Entwicklung von Lösungsstrategien zur klimawandelangepassten Siedlungsentwicklung der Stadt Singen**“ wurden im Rahmen des KLIMOPASS-Förderprogramms des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima in Singen untersucht und verschiedene Möglichkeiten zur angepassten Siedlungsentwicklung aufgezeigt. Zur Validierung der Ergebnisse fand eine klimatologische Messkampagne statt und ein projektbegleitender Fachbeirat sorgte für die Sicherstellung der Wirksamkeit der Instrumente.

Basis der Untersuchung war eine **Analyse des gegenwärtigen Singener Stadtklimas** (Status quo). Dabei wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation mittels des mesoskaligen Stadtklimamodells FITNAH 3D in einer räumlichen Auflösung von 20 m berechnet. Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel).

Auch die räumlichen **Auswirkungen des Klimawandels** auf das Stadtklima im Jahr 2050 basieren auf diesem Modell, das mit einer um 1,9 K erhöhten Temperatur angetrieben wurde (Klimaänderungssignal im RCP-Szenario 8.5 nach EURO-CORDEX-Daten). Potentielle Landnutzungsänderungen wurden nicht mit in das Modell aufgenommen. In Zukunft wird flächendeckend ein deutlich höheres Temperaturniveau erreicht, dessen Zunahme geringer als der erhöhte Temperaturantrieb im Modell ausfällt (im Mittel +1,6 K), da verschiedene Nutzungsstrukturen unterschiedlich stark reagieren. So erhöht sich auch die Lufttemperatur über Grünflächen, die jedoch weiterhin ein Temperaturgefälle zum Siedlungsraum aufweisen und eine wichtige Entlastungsfunktion einnehmen, deren Bedeutung angesichts der Zunahme im Siedlungsraum noch steigt – bspw. sind in der *Kernstadt* zukünftig nächtliche Temperaturen über 20 °C möglich (Tropennächte). Auch am Tage ist insgesamt eine höhere Wärmebelastung vorzufinden, wobei extreme Belastungen weiterhin hauptsächlich im Straßenraum auftreten und sich Waldflächen mit einer geringeren Belastung abheben. Die Auswirkungen des Klimaänderungssignals (ohne Landnutzungsänderungen) auf das nächtliche Strömungsfeld bzw. Kaltluftprozessgeschehen sind dagegen minimal.

Zur Innwertsetzung und Erstellung von Planungskarten wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen. Die **Klimaanalysekarte** spiegelt die nächtliche Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen wider. Sie veranschaulicht die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeineffekt (bis zu > 6 K höhere Temperaturen in der Innenstadt verglichen mit siedlungsfernen Freiflächen). Ferner bildet die Klimaanalysekarte die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen (Flurwinde) sowie die großflächige Kaltluftströmung aus der *Hegauer Alb* ab und identifiziert für den Luftaustausch im Stadtgebiet wichtige Klimaaustauschflächen (z.B. Kaltluftabflüsse des *Hohentwiel*, Grünflächen entlang der *Radolfzeller Aach-Aue* im Bereich *Mühlkanal* bzw. am nordwestlichen Rand der *Kernstadt*). Neben einer Karte für den Status quo wurde eine Klimaanalysekarte 2050 erstellt, die zusätzlich eine qualitative Bewertung von, aus dem Flächennutzungsplan 2020 abgeleiteten, Potential-flächen zukünftiger Wohn- und Gewerbebebauung enthält (Einteilung in Entwicklung *vertretbar* bis hin zu *ohne stadtklimatische Maßnahmen nicht empfehlenswert*). Damit kann aufgezeigt werden, bei der Entwicklung welcher Flächen besondere stadtklimatische Anforderungen beachtet werden sollten.

Die **Planungshinweiskarten** quantifizieren in getrennten Karten für die Nacht und den Tag die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume und

verknüpfen die Ergebnisse des Status quo und der Zukunftsrechnung. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung die reinen Wohngebiete im Vordergrund stehen. Am Tage ist die Aufenthaltsqualität im Freien der maßgebliche Parameter und es werden sowohl Gewerbeflächen als auch der Straßenraum untersucht.

In der Nacht belastete Siedlungsflächen treten ausschließlich in der *Kernstadt* auf, insb. in der Innenstadt sowie der daran anschließenden dichteren Bebauung, während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Zentrum tendenziell verbessert. Zu den Rändern sind vermehrt günstige Verhältnisse vorzufinden, die auch in den Stadtteilen überwiegt. Am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine mittlere Belastung, der Straßenraum dagegen oftmals und Gewerbeflächen sogar überwiegend ungünstige bioklimatische Bedingungen. An Sommertagen bieten knapp ein Viertel der Grünflächen im Singener Stadtgebiet eine relativ hohe Aufenthaltsqualität, die sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung eignen. In der Nacht weisen etwas mehr als 20 % der Grünflächen eine hohe Bedeutung in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen auf. Diese vergleichsweise geringen Anteile bedeutender Grünflächen liegen an den vielen siedlungsfernen Flächen, die sich nicht als Rückzugsorte am Tage eignen (insb. landwirtschaftliche Freiflächen) bzw. keine Durchlüftungsfunktion für bestehende Siedlungsgebiete einnehmen (teilweise auch orographisch bedingt) und dürfen nicht darüber wegtäuschen, dass die meisten innerstädtischen bzw. stadtnahen Grünflächen der *Kernstadt* eine wichtige Funktionen in der Nacht und/oder am Tag einnehmen. Bspw. üben innerstädtische Parkareale i.d.R. zu beiden Zeitpunkten eine positive Wirkung aus, während die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenübersteht (hohe Einstrahlung). Folglich gilt es beide Planungshinweiskarten bei der Beurteilung von Flächen zu betrachten.

Insb. für die Nacht, aber auch für den Tag gilt, dass das Belastungsniveau im Siedlungsraum in Zukunft steigt, was bei künftigen Planungen berücksichtigt werden sollte. Damit nimmt gleichermaßen die Bedeutung der Ausgleichsfunktionen von Grünflächen zu und es wird erkennbar, dass wichtige Grünflächen mindestens erhalten (und ggf. aufgewertet), in belasteten Siedlungsbereichen möglichst ausgeweitet werden sollten.

ÜBERTRAGBARKEIT DER ERGEBNISSE

Das Zukunftsszenario wurde ohne potentielle Landnutzungsänderungen gerechnet, was den Vorteil hat, dass damit eine Datengrundlage besteht, auf deren Basis weitere Planungen unter Kenntnis der Auswirkungen des Klimawandels erfolgen können. Denn die Erfahrung aus anderen Städten zeigt, dass die Effekte baulicher Änderungen im mittelfristigen Zeithorizont (wie im vorliegenden Fall bis 2050) gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels sogar noch überwiegen können. Neue Bebauung ist demnach unter dem Gesichtspunkt zu sehen, dass sie selbst negative Effekte auf das Stadtklima nach sich ziehen kann – zusätzlich zu einem Klimasignal, das ebenfalls zu einer höheren Belastung führt.

Gesamtstädtische Ergebnisse

Daher lag ein Schwerpunkt der Analyse auf den klimatischen Auswirkungen von Nachverdichtung im Stadtgebiet. Die gesamtstädtischen Ergebnisse sind individuell für die Stadt Singen zu sehen, doch können bestimmte Muster auf andere Gebiete übertragen werden. Die Ergebnisse weisen den aus großstädtischen Untersuchungen bekannten Stadtklimaeffekt auch für eine Mittelstadt wie Singen nach. Durch die großflächigen Industrie- und Gewerbegebiete in Singen können strukturelle Unterschiede zwischen bzw. Anforderungen an Wohn- und Gewerbeflächen erkannt werden und der Planung Orientierung bieten (z.B. bessere Grünausstattung zukünftiger Gewerbegebiete, um die hohen Belastungen zu mindern, insb. in Wohnsiedlungsnähe). Weiterhin bietet der Kaltlufthaushalt Anhaltspunkte für ähnliche Räume. Dazu zählen die großräumigen Kaltluftströmungen aus der *Hegau Alb* oder der Kaltluftabfluss an den Hängen des *Hohentwiel*, die zwar eine Besonderheit für das Stadtgebiet Singen darstellen, von denen aber abgeleitet

werden kann, dass sich die Muster in orographisch ähnlichen Regionen wiederfinden. Selbiges gilt für einzelne Grünzüge, die in den Siedlungsbereich reinreichen und dessen Durchlüftung unterstützen. Diese können auch in Form von Sportanlagen genutzt werden (Rasenplätze), sofern es bei einzelnen Gebäuden und geringer Versiegelung bleibt. Schließlich vermitteln die Ergebnisse aus der Untersuchung des zukünftigen Stadtklimas 2050 wertvolle Erkenntnisse, deren Aussagen vielfach auch in anderen Mittelstädten Gültigkeit haben werden.

Detailuntersuchungen

Auswirkungen einzelner Vorhaben können weniger auf gesamtstädtischer, sondern besser auf Quartiers- oder Baublockebene untersucht werden. Werden dabei „geeignete“ Gebiete betrachtet (Modellgebiete), lassen sich die Ergebnisse auf andere Vorhaben übertragen. Ein solches Beispiel stellt die im Rahmen dieses Projekts gewählte angedachte Bebauung im *Bruderhofgebiet* dar. Dabei geht es um eine – im Kontext städtischer Innenentwicklung als typischen Fall anzusehende – Nachverdichtung von Zeilenbebauung, durch einen Gebäuderiegel quer vor Kopf der bestehenden Bebauung. Deren mikroklimatischen Auswirkungen wurden in der Detailuntersuchung Bruderhof hochaufgelöst mit dem Modell ASMUS_Green untersucht (Plan-Null-Zustand). Zusätzlich wurden die Auswirkungen möglicher (Grün-)Maßnahmen zur stadtklimatischen Optimierung geprüft (u.a. Beschattung durch Bäume, Dach- und Fassadenbegrünung, Entsiegelung, *Plan-Zustand*). Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass die Auswirkungen kleinräumiger Bebauung (sofern sie außerhalb wichtiger Kaltluftaustauschflächen geschieht) durch geeignete Grünmaßnahmen gemildert bzw. ausgeglichen werden können – eine im Hinblick auf ähnliche Bauvorhaben wichtige Erkenntnis, die den erläuterten Grundsatz der *doppelten Innenentwicklung* stützt.

- *Nachverdichtung kann durch geeignete Grünmaßnahmen klimaverträglich gestaltet werden*

Die Maßnahmen bewirken eine Reduktion der Wärmebelastung am Tage, doch auch in der Nacht sind positive Effekte erkennbar, deren Wirkung am stärksten ist, wenn die Maßnahmen kombiniert werden. Darauf aufbauend wurde eine Übersichtstabelle erstellt, die die verwendeten Maßnahmen hinsichtlich Wirksamkeit, Umsetzbarkeit und (soweit möglich) Kosten zusammenfasst, sodass die Erkenntnisse auf andere Plangebiete übertragen werden können. Gleichzeitig kann die Tabelle aus der Erfahrung der Singener Stadtverwaltung oder im Zuge weiterer Analysen ergänzt bzw. fortgeführt werden.

- *Werden Maßnahmen zur Grünoptimierung kombiniert, verstärken sich die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen*

Mit der *Knöpflerswies* ist eine hauptsächlich durch Kleingärten und Rasenflächen geprägte Grünfläche im nördlichen Teil der *Kernstadt* in den Fokus des Projekts gerückt. Deren angedachte Bebauung sollte nicht in Form eines neuerlichen stadtklimatischen Gutachtens untersucht, sondern exemplarische **stadtklimatische Vorgaben** erarbeitet werden, die in Planungsverfahren einfließen können. Diese erlauben nicht nur eine Berücksichtigung der stadtklimatischen Belange an der *Knöpflerswies*, sondern lassen sich auch bei zukünftigen städtebaulichen Wettbewerben bzw. Planungsfragen anwenden.

Quellenverzeichnis

- BBSR (2017) - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- BBSR (2018) – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Wachsen und schrumpfen von Städten und Gemeinden im bundesweiten Vergleich. Interaktive Karte. Online: <https://gis.uba.de/mapapps/resources/apps/bbsr/index.html?lang=de> (Abruf 18.07.2018).
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DKRZ (2017) – Deutsches Klimarechenzentrum: Globale Mitteltemperatur. Online: www.dkrz.de/Klimaforschung/konsortial/ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur (Abruf 18.07.2018)
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland.
- DWD (2017a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon (Abruf 18.07.2018)
- DWD (2017b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- Groß G. (2012): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Microscale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift* 21: S. 399-412.
- Günther R. (2014): The role of soil water content for microclimatic effects of green roofs and urban trees – a case study from Berlin, Germany. *Journal of Heat Island Institute International*, Vol. 9-2.
- Häckel, H. (2012): *Meteorologie*. 7. Auflage. Stuttgart.
- Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit an der Universität Hannover.
- Höppe, P. und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1): S. 22-29.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr. 114.
- Kiese, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. *Landschaft + Stadt* 20, H.2: S. 67-71.
- Klimanavigator (2017): Die RCP-Szenarien für den aktuellen 5. IPCC-Sachstandsbericht. Online: www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/012038/index.php (Abruf 18.07.2018)
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig*. Band 13.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie*. Paderborn.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. *Environmental Sciences Europe* 2011: 23:21.
- LUBW (2010 - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: *Naturräume Baden-Württembergs*.
- LUBW (2016 - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: *Klimawandel in Baden-Württemberg. Fakten – Folgen – Perspektiven*.
- LUBW (2018) - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: *Umwelt-Daten und -Karten Online. Topographische Karten*. Online: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public> (Abruf 20.07.2018)
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie-Eine Einführung*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Mosimann et al. (1999): *Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen*. Heft 4/99: S. 202-275.

- MUNLV (2010) – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- REKLIBO (2009) – Regionalverband Bodensee-Oberschwaben und Landkreise Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen (Hrsg.): Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben. Abschlussbericht Anhang – Klimaatlas. Wissenschaftliche Bearbeitung und Kartographie Prof. Dr. Andreas Schwab (Pädagogische Hochschule Weingarten).
- Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- Sonnenverlauf (2018): Online-Dienst zu Solardaten verschiedener Standorte. Online: www.sonnenverlauf.de (Abruf 02.07.2018)
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.
- Stadt Singen (2018): Flächennutzungsplan 2020 der Vereinbarten Verwaltungsgemeinschaft Singen, Rielasingen-Worblingen, Steißlingen, Volkertshausen (VVG). Online: <https://www.in-singen.de/artikel.Flaechennutzungsplan-2020.14040.572.html> (Abruf 01.08.2018)
- UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur. Online: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur (Abruf 07.04.2017)
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lüfthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lüfthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.

Anhang



Abb. A 1: Fotografische Dokumentation: Messfahrzeug mit Psychrometer, Rauchschwadenbeobachtung und Windmessung mit einem Hitzdrahtanemometer (Fotoaufnahmen: ÖKOPLANA 2018)

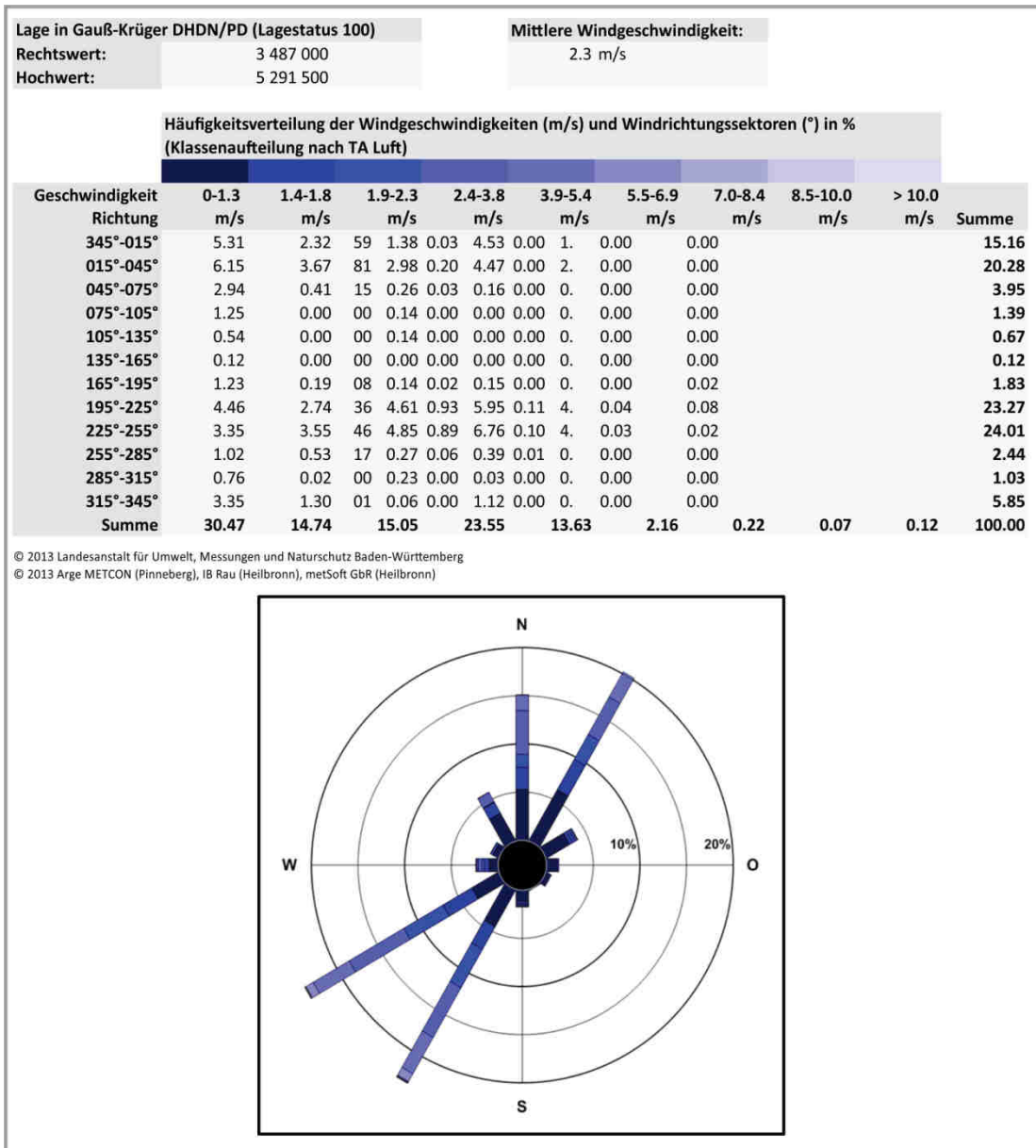


Abb. A 2: Berechnete Windstatistik für den Zeitraum 2001-2010 (Lagesituation Singen Schaffhauser Straße/ Hohentwielstraße; Grafikquelle: <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>)

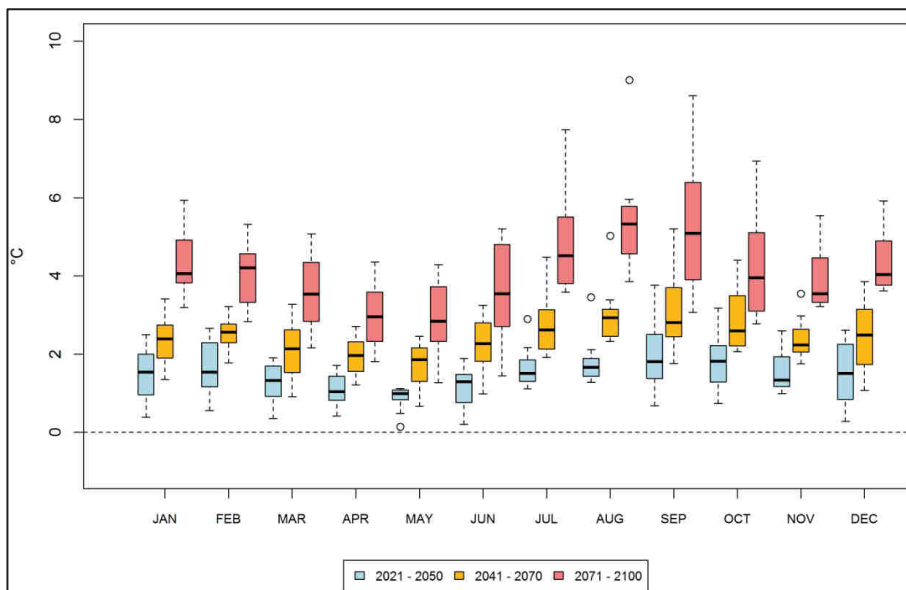


Abb. A 3: Langjährige Änderungen der Monatsmitteltemperaturen für die Stadt Singen, Klimaszenario RCP 8.5

Tab. A 1: Sonnenstand in Singen am 15.07.2017 zu vier verschiedenen Zeiten als Grundlage für die Berechnung der Verschattung (nach Sonnenverlauf 2018) und Einteilung in Verschattungsklassen.

Uhrzeit	Azimut [°]	Sonnenhöhe [°]	Verschattungsklasse	Verschattungsanteil
11:00	117,9	50,1	Hoch	ab 60 %
13:00	164,2	63,0	Mittel	45 % bis < 60 %
15:00	222,2	58,2	Gering	30 % bis < 45 %
17:00	256,7	40,1	Freifläche	< 30 %

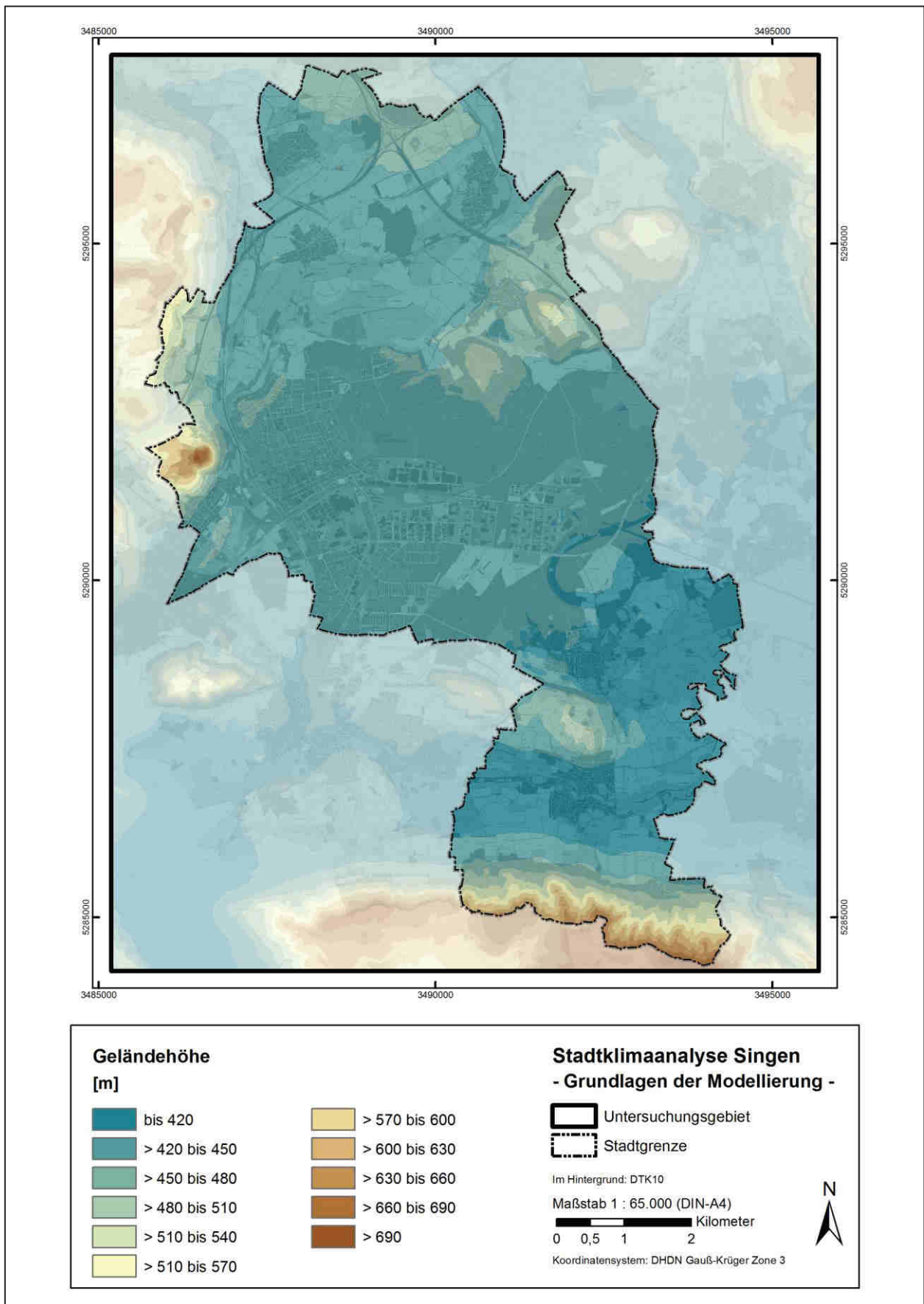


Abb. A 4: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet (DGM)

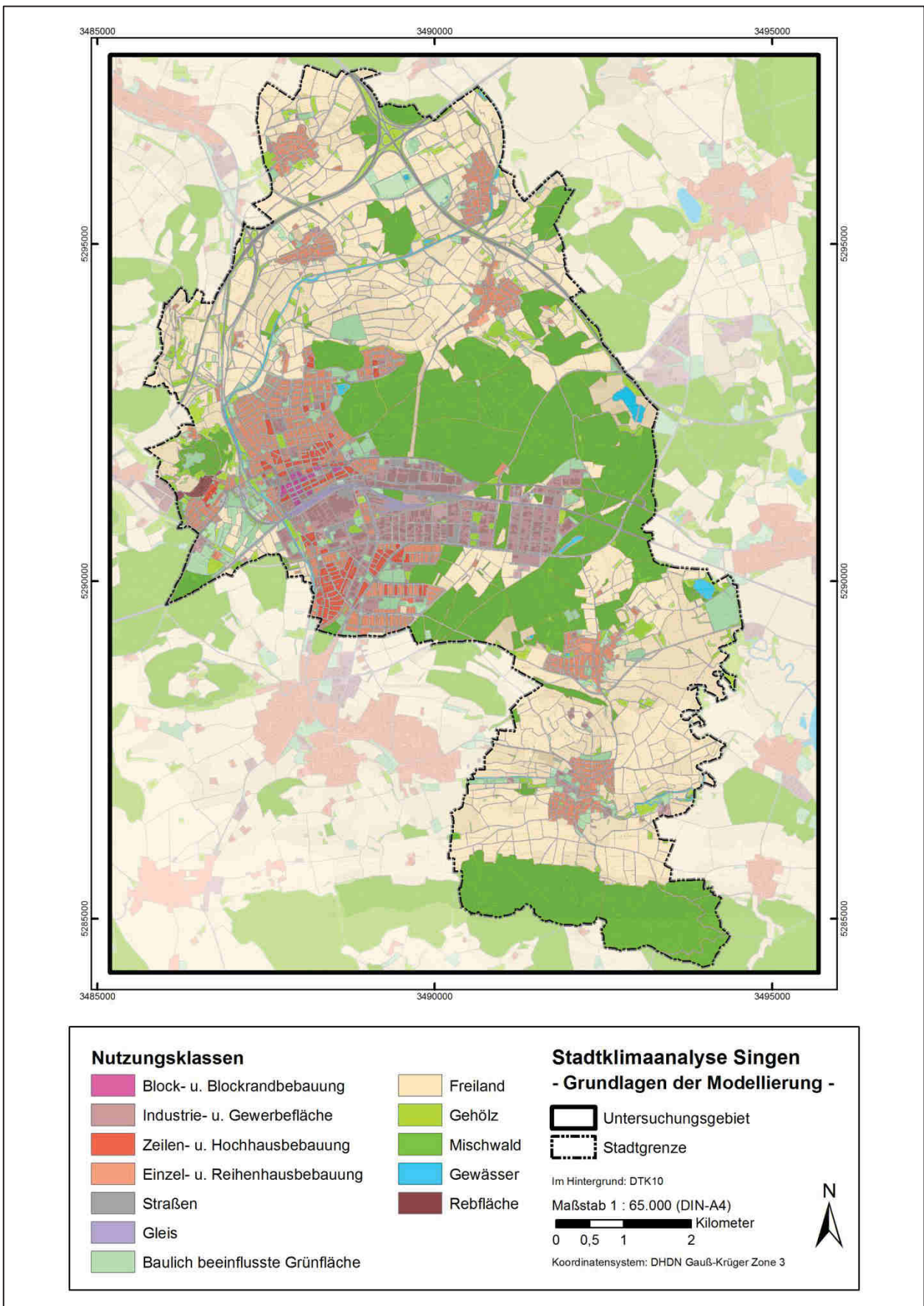


Abb. A 5: Referenzgeometrie mit Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet

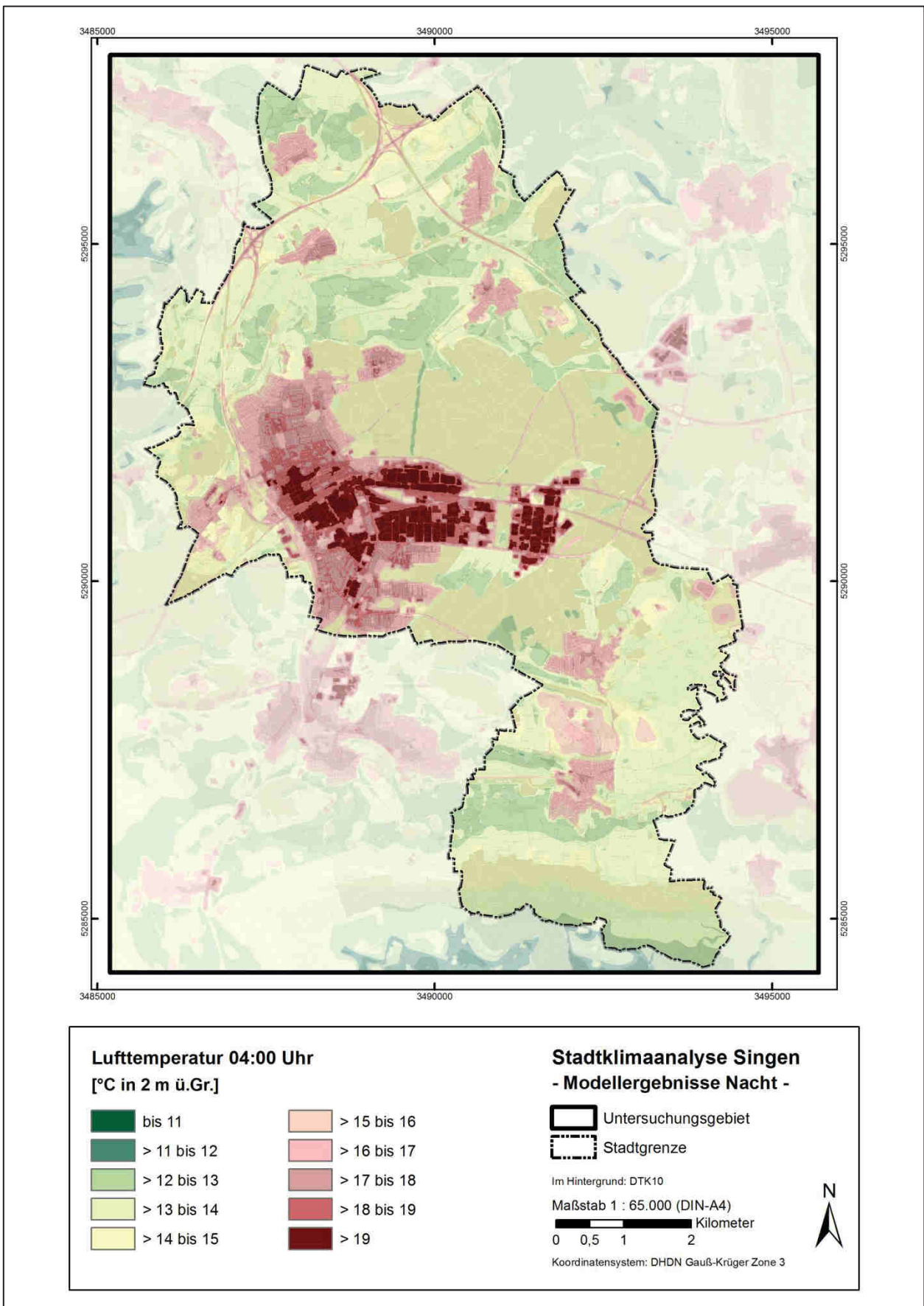


Abb. A 6: Modelliertes nächtliches Lufttemperaturfeld (20 m-Raster)

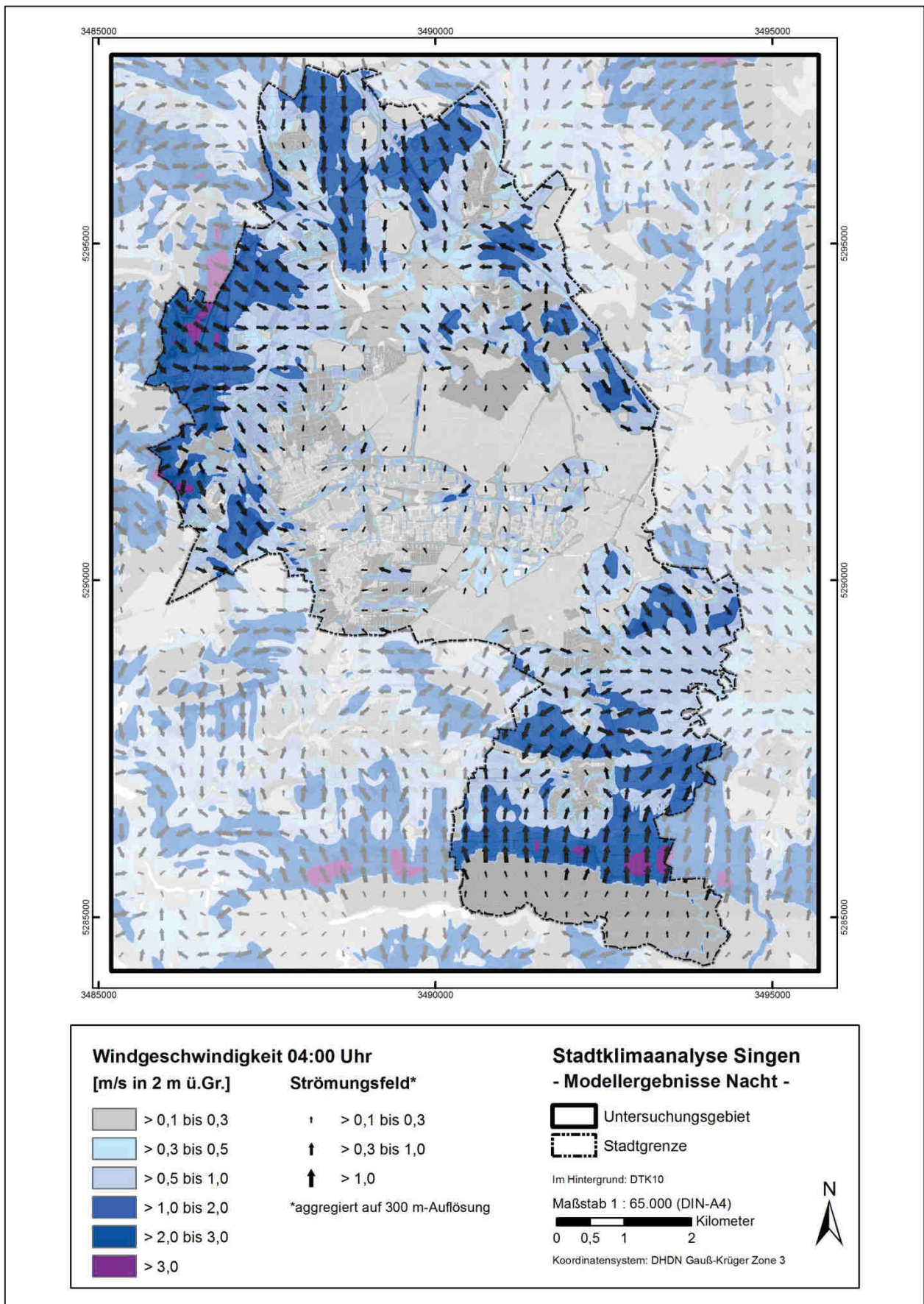


Abb. A 7: Modelliertes bodennahe nächtliches Strömungsfeld (20 m-Raster)

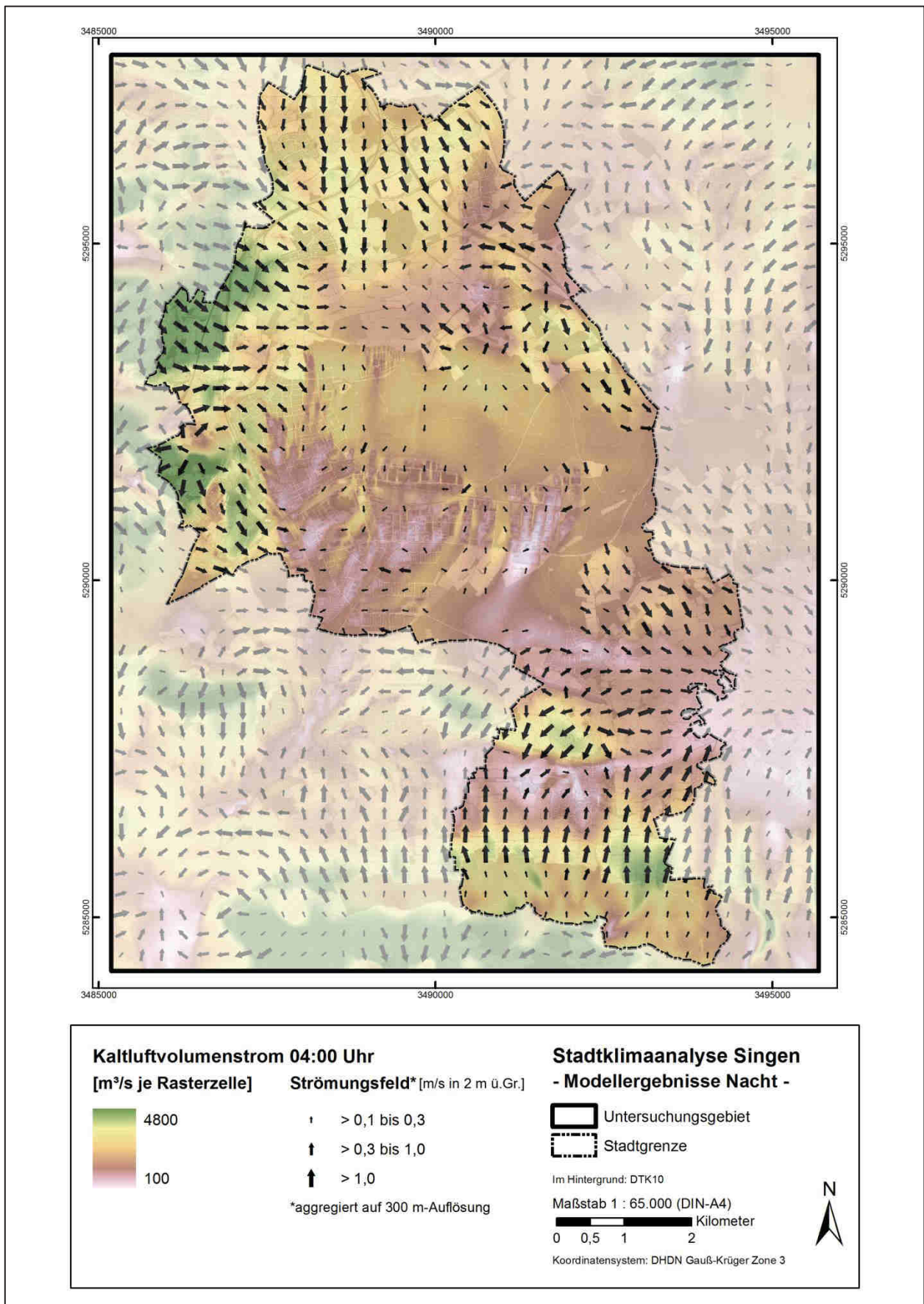


Abb. A 8: Modellierter Kaltluftvolumenstrom in der Nacht (20 m-Raster)

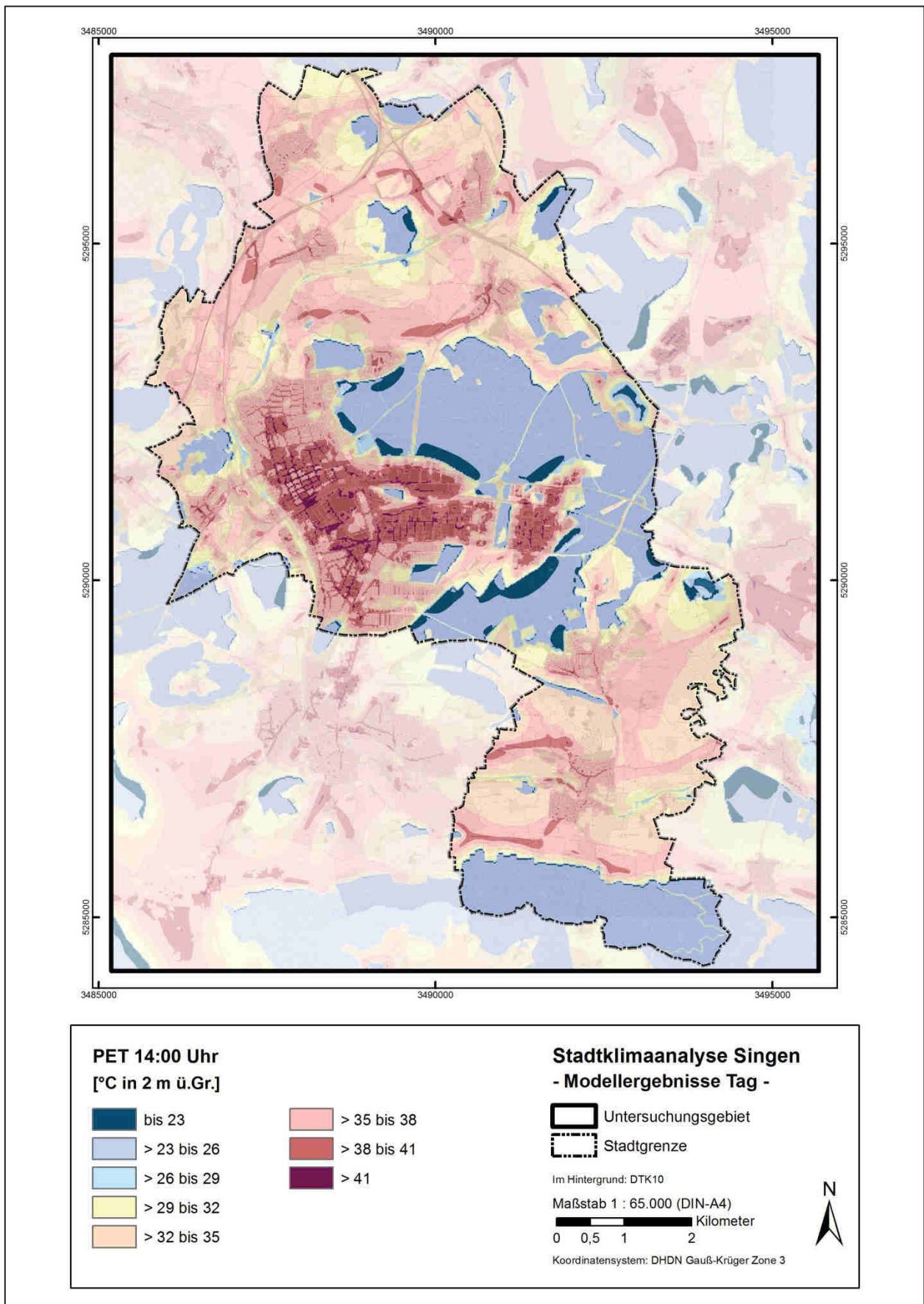


Abb. A 9: Modellierte Wärmebelastung am Tage (PET; 20 m-Raster)

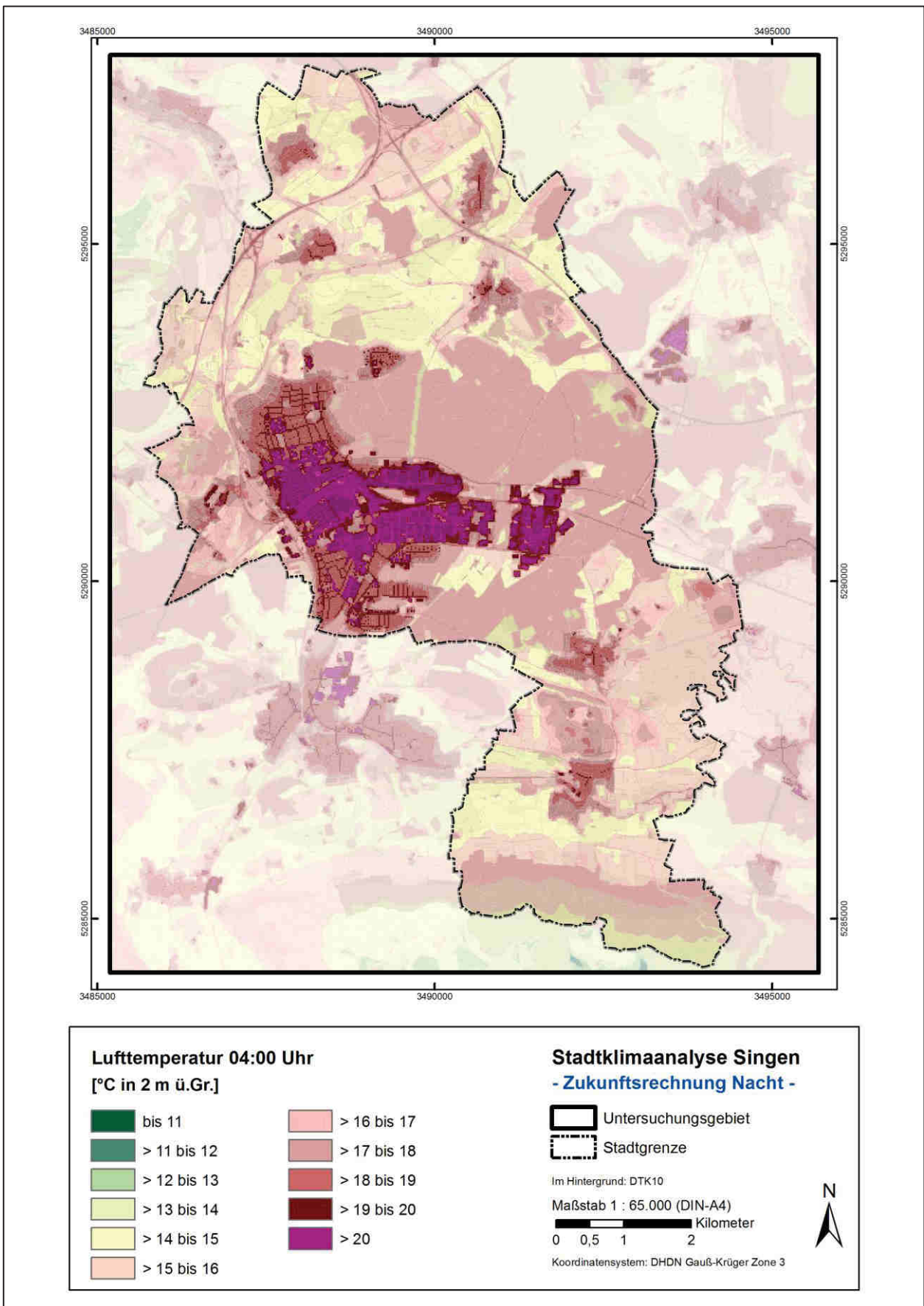


Abb. A 10: Modelliertes nächtliches Lufttemperaturfeld in der Zukunftsrechnung 2050 (20 m-Raster)

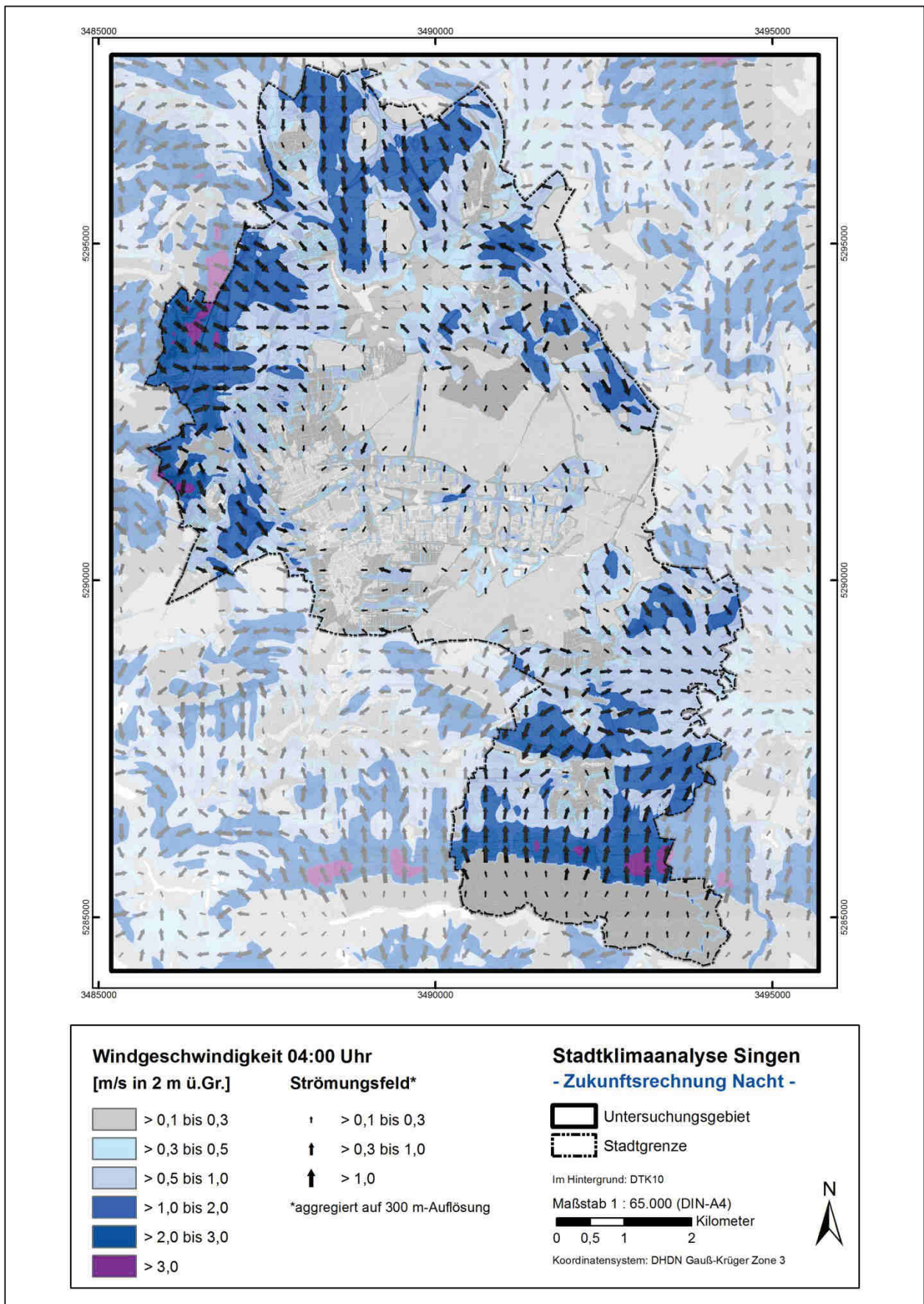


Abb. A 11: Modelliertes bodennahes nächtliches Strömungsfeld in der Zukunftsrechnung 2050 (20 m-Raster)

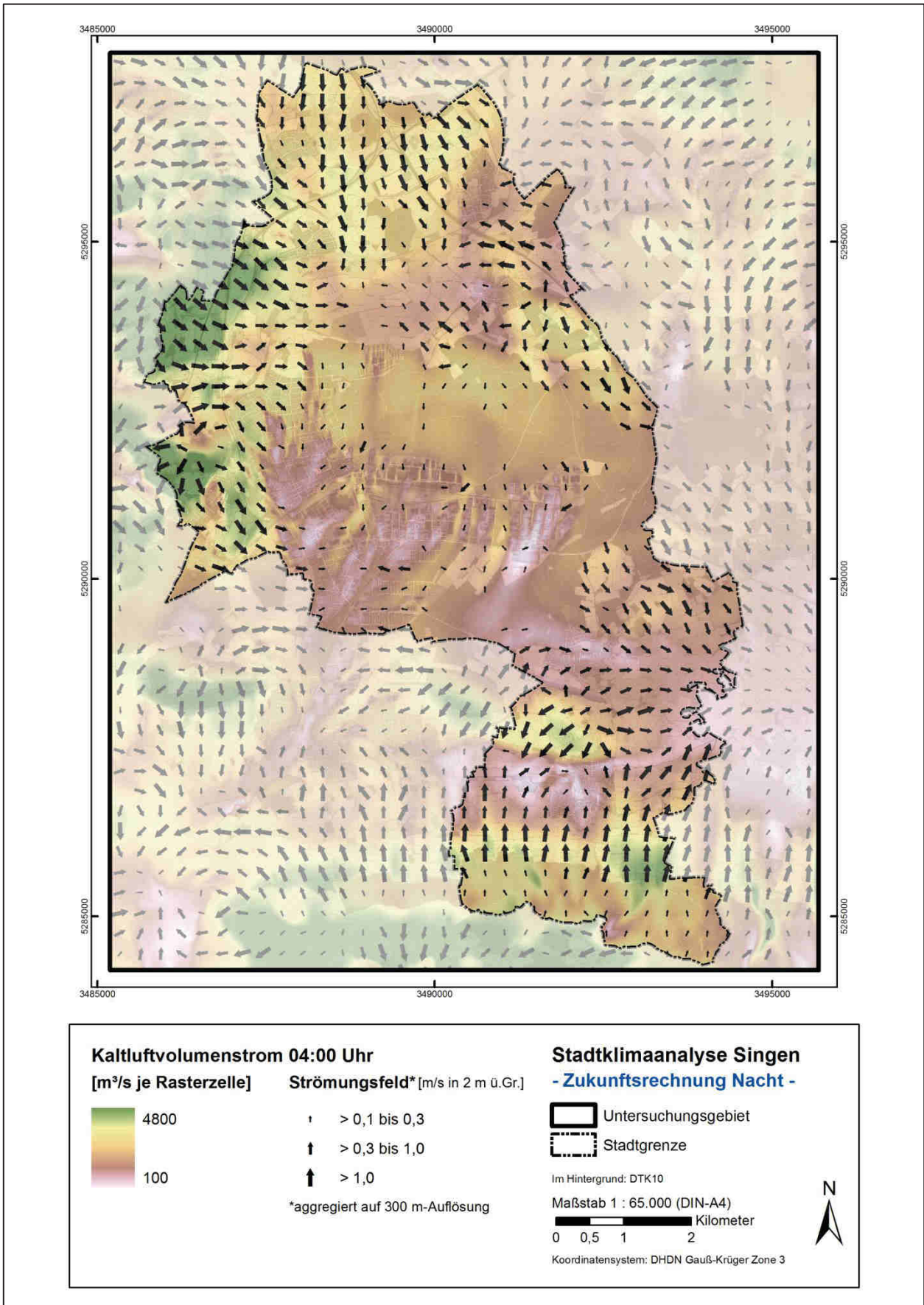


Abb. A 12: Modellierter Kaltluftvolumenstrom in der Nacht in der Zukunftsrechnung 2050 (20 m-Raster)

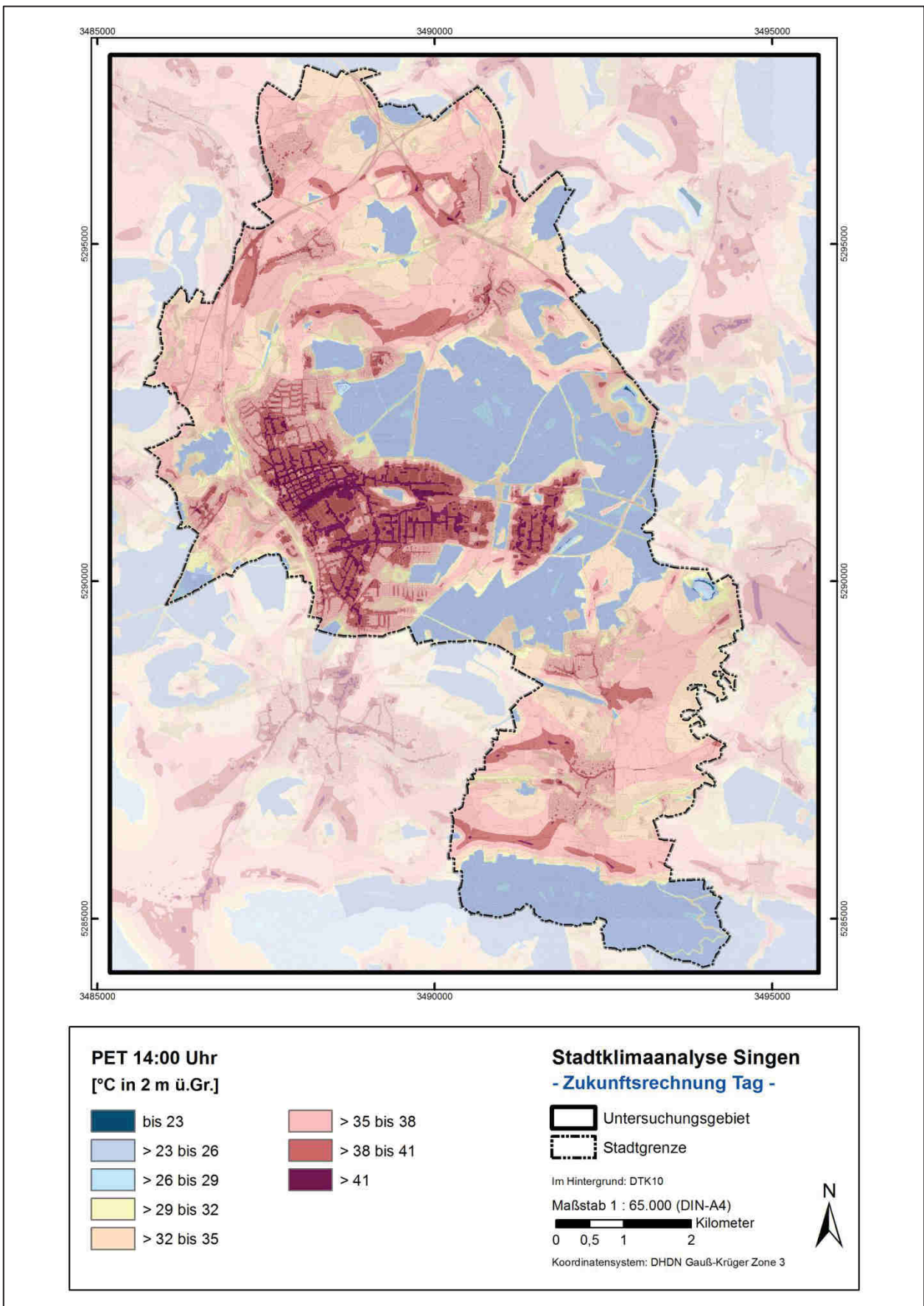
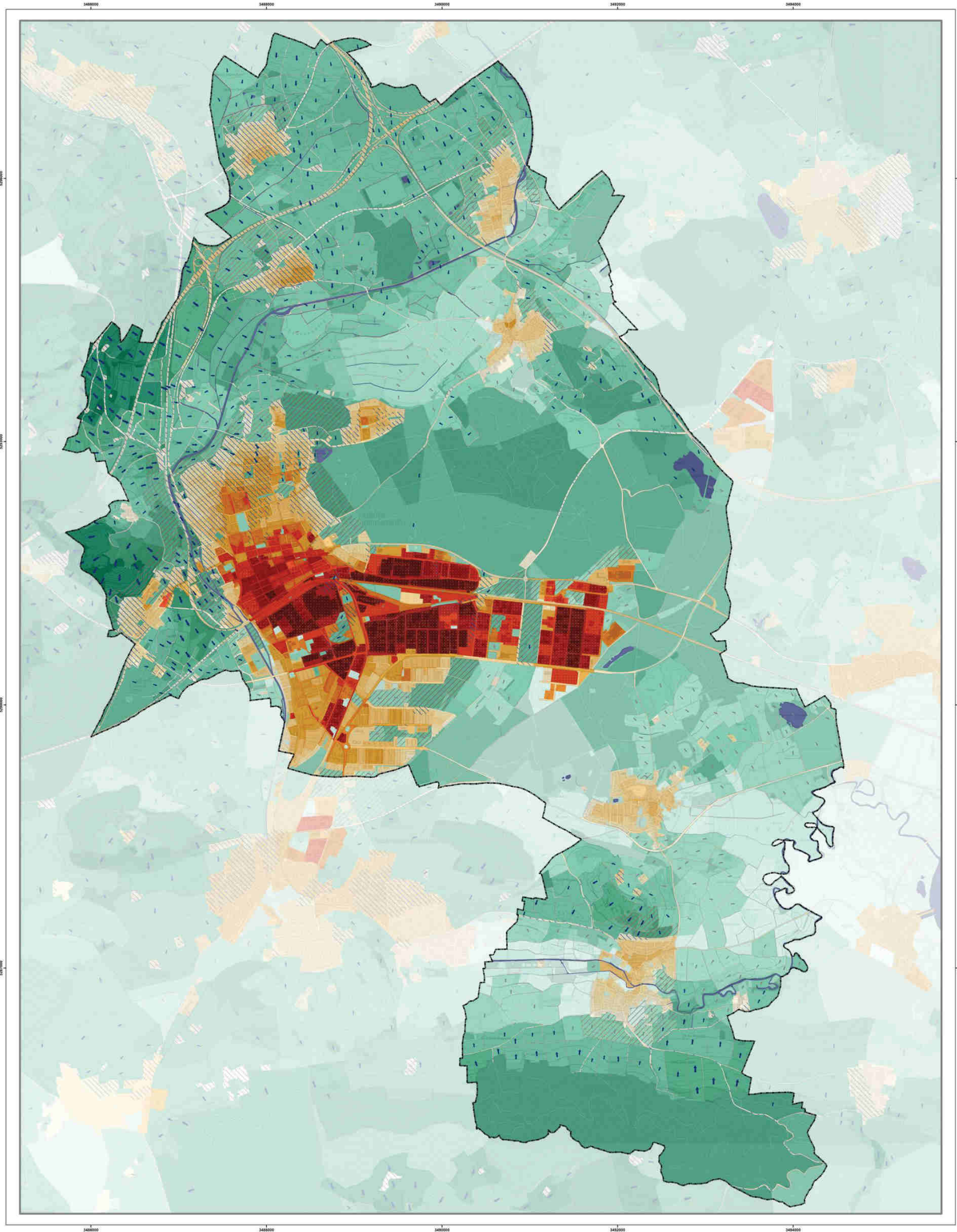


Abb. A 13: Modellierter Wärmebelastung am Tage in der Zukunftsrechnung 2050 (PET; 20 m-Raster)



Stadtklimaanalyse Singen: Klimaanalysekarte Nachtsituation

Grün- und Freiflächen
Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen¹
Kaltluftvolumenstrom um 04:00 Uhr [m³/(s·m²)]

bis 40	> 100 bis 140
> 40 bis 60	> 140 bis 180
> 60 bis 80	> 180
> 80 bis 100	

Modelliertes Kaltluftströmungsfeld²
Klimaustauschflächen³

Hauptströmungsrichtung der Flurwinde⁴
Kaltluftvolumenstrom um 04:00 Uhr [m³/(s·m²)]

↑ > 60 bis 90	↑ > 120 bis 150
↑ > 90 bis 120	↑ > 150

Siedlungs- und Verkehrsflächen
Wärmeineffekt im Siedlungsraum⁵
Temperaturabweichung zu Freiflächen um 04:00 Uhr [K]

bis 2,0	> 4,0 bis 4,5
> 2,0 bis 2,5	> 4,5 bis 5,0
> 2,5 bis 3,0	> 5,0 bis 5,5
> 3,0 bis 3,5	> 5,5 bis 6,0
> 3,5 bis 4,0	> 6,0

Kaltluftfeinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung⁶

- Sonstiges**
- Untersuchungsgebiet
 - Stadtgebiet Singen
 - Gewässer
 - ▨ Gewerbliche Nutzung
- Im Hintergrund: DTK10

Maßstab: 1 : 15.000 (bezogen auf DIN A0)

Koordinatensystem: Gauß-Krüger Zone 3 (DHDN)



Auftraggeber: Stadt Singen

SINGEN

Fachbereich Bauamt - Umweltschutz
Julius-Bühler-Straße 2
78224 Singen

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH



Größe Pfahstraße 5 a
30161 Hannover
www.geo-net.de

Hannover, Januar 2018

1. Die Analyse der klimatologischen Funktionen bezieht sich auf eine austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlage, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Dabei tritt häufig eine überdurchschnittlich hohe Wärmebelastung in den Siedlungsräumen auf, die zugleich mit lufttechnischen Belastungen einher gehen kann. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland bzw. aus innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.
2. Der Kaltluftvolumenstrom charakterisiert den Zustrom von Kaltluft und wird vor allem durch den Temperaturunterschied zwischen kühlen Grünflächen und erwärmten Siedlungsarealen "angetrieben". Dabei bestimmt die Größe einer Kaltluft produzierenden Fläche auch die Menge des insgesamt zur Verfügung stehenden Kaltluftvolumens. Darüber hinaus wird die Bildung von Kaltluft durch weitere Eigenschaften wie Bewuchs, Bodenfeuchte und Geländeneigung beeinflusst.
3. Auf Grundlage der Kaltluftmodellierung ausgewiesene Flächen, die für das Siedlungsgebiet eine Durchlüftungsfunktion aufweisen. Dies gilt insb. für autochthone Wetterlagen (überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstrom bzw. -produktion), aber auch bei übergeordneter Strömung (Ventilation).
4. Höhe des Kaltluftvolumenstroms sowie Strömungsrichtung von Flurwinden über Grün- bzw. Freiflächen sowie Gieß- und Gewässerflächen ab 1 ha Größe mit einer bodennahen Windgeschwindigkeit von mindestens 0,3 m/s (innerhalb des Stadtgebiets sind auch kleinere Flächen dargestellt).
5. Der nächtliche Wärmeineffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen Siedlungs- und Gewerbeflächen zu unversiegelten Freiflächen im Untersuchungsgebiet. Unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen weisen diese eine mittlere Lufttemperatur von 13,4 °C auf (in 2 m über Grund). Dargestellt ist die Abweichung der Lufttemperatur in Siedlungsräumen von diesem Bezugswert. Nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 kann näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden, sodass die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe für die Bewertung der Nachtsituation darstellt.
6. Siedlungs- und Verkehrsflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 92 m³/(s·m²) durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Abb. A 14: Klimaanalysekarte Nachtsituation für das Ist-Szenario

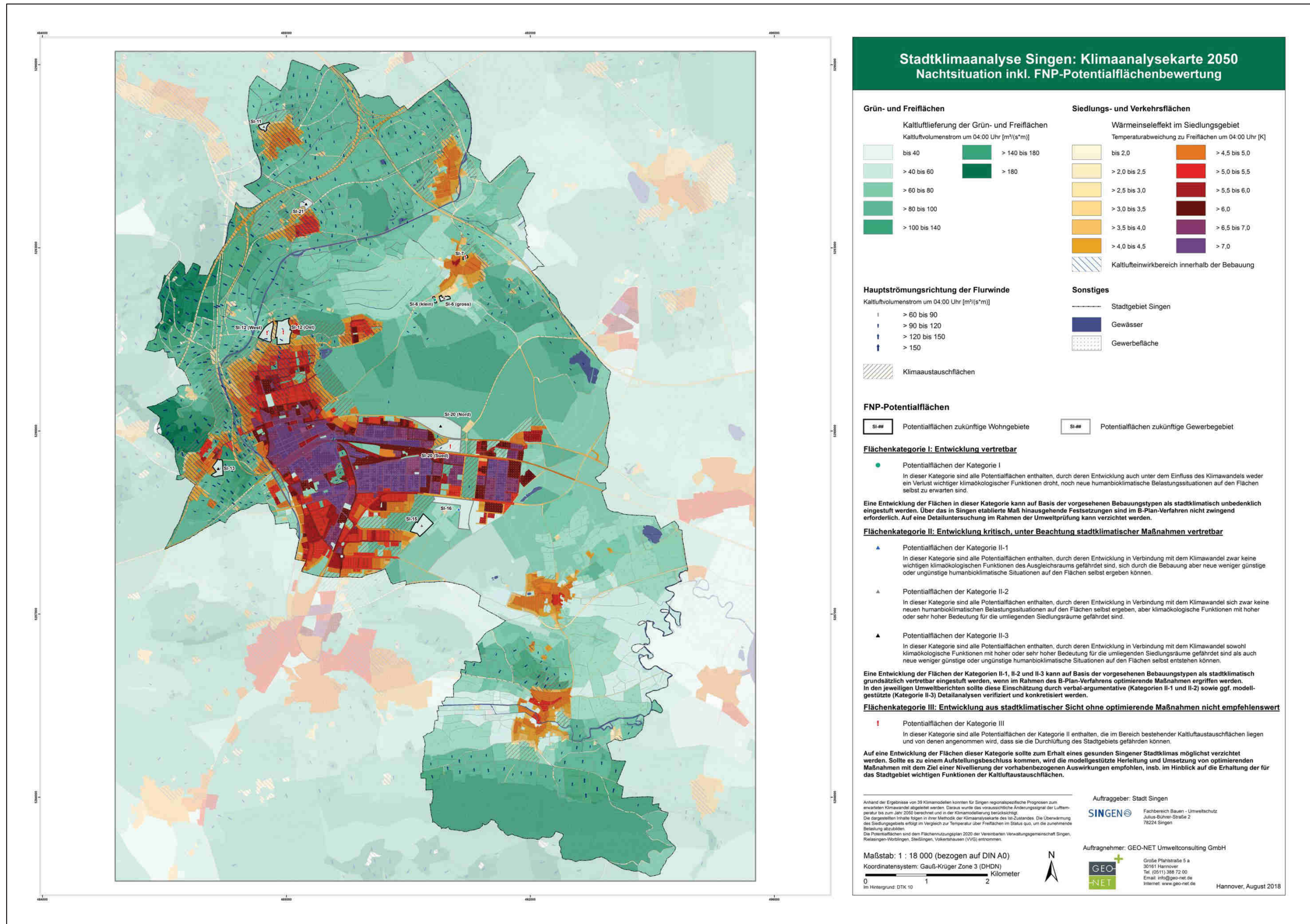
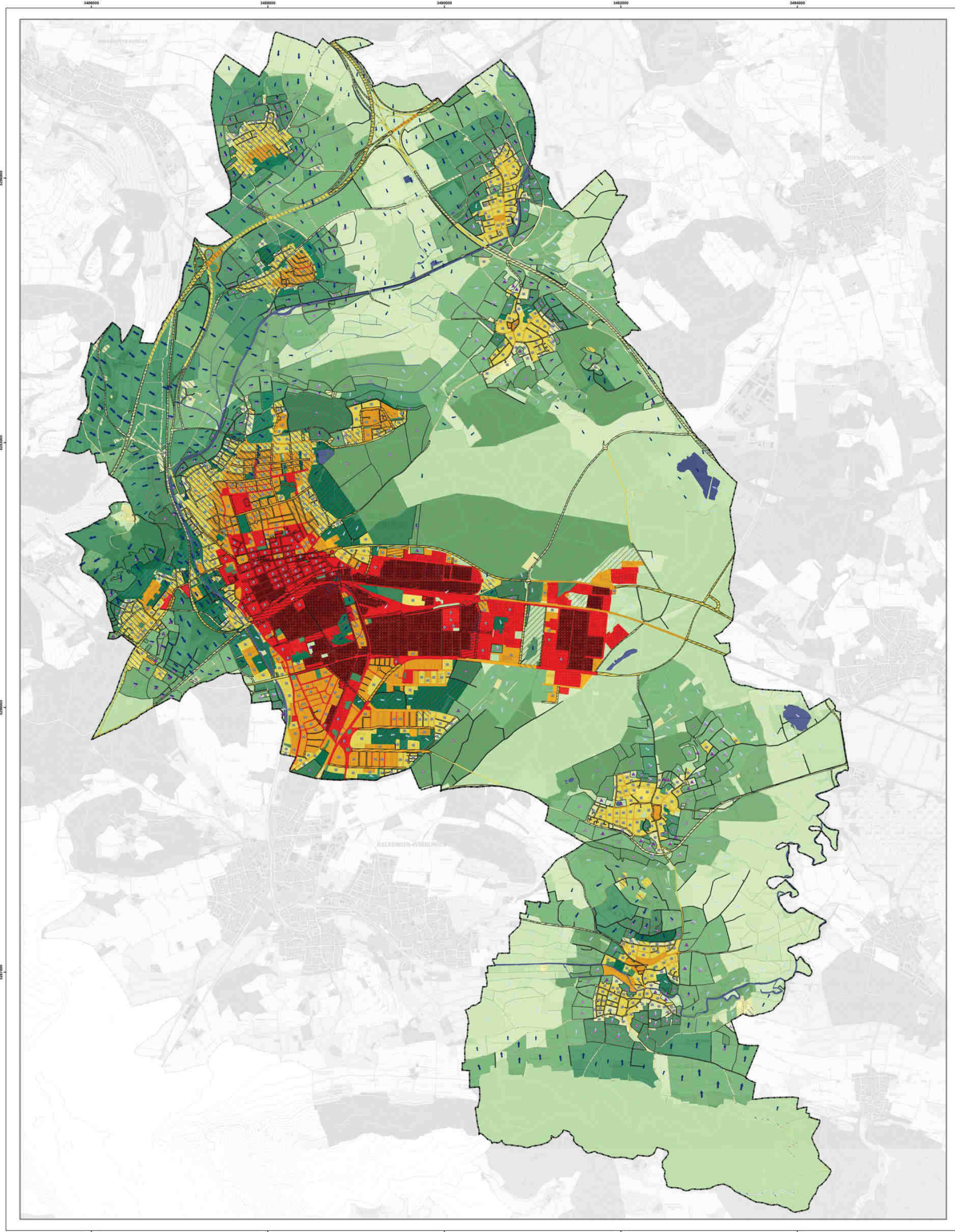


Abb. A 15: Klimaanalysekarte Nachtsituation für das Zukunftsszenario 2050 inkl. Bewertung der FNP-Potentialflächen



Stadtklimaanalyse Singen: Planungshinweiskarte Nachtsituation (Ist- und Zukunftsszenario)

Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden.

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung

Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Hohe bioklimatische Bedeutung

Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.

Mittlere bioklimatische Bedeutung

Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

Geringe bioklimatische Bedeutung

Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

Zukünftig höhere / deutlich höhere Bedeutung der Grünfläche (Bewertung 1 bzw. 2 Stufen höher in 2050; Darstellung ab 0,5 ha Flächengröße)

Luftaustausch (modelliertes Kaltluftströmungsfeld Ist-Zustand)

Hauptströmungsrichtung der Furwinde

Kaltluftvolumenstrom um 04:00 Uhr (m³/s·m)

> 60 bis 90 > 120 bis 150

> 90 bis 120 > 150

Sonstiges

Kaltluftwirkebereich innerhalb der Bebauung

Klimaustauschflächen

Stadtgebiet Singen

Gewässer

Gewerbliche Nutzung

Siedlungsraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie Straßen, Wege, Plätze und Gleisfläche) - Wirkungsräume

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

Sehr günstige bioklimatische Situation

Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.

Günstige bioklimatische Situation

Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.

Mittlere bioklimatische Situation

Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.

Ungünstige bioklimatische Situation

Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).

Sehr ungünstige bioklimatische Situation

Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte möglichst Entseidelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Zukünftig höhere Belastung im Siedlungs-/Gewerbebereich bzw. Straßenraum (Bewertung in 2050 eine Stufe ungünstiger)

Zukunfts-Szenario 2050 ohne Landnutzungswandel

Maßstab: 1 : 15.000 (bezogen auf DIN A0)

Koordinatensystem: Gauß-Krüger Zone 3 (DHDN)

0 0,5 1 Kilometer

Auftragnehmer:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Größe: Planstraße 5 a

30161 Hannover

www.geo-net.de

Auftraggeber:

Stadt Singen, Fachbereich Bauen - Umweltschutz

Julius-Bücher-Straße 2

78224 Singen

Hannover, Juli 2018

Im Hintergrund: DTK10

N

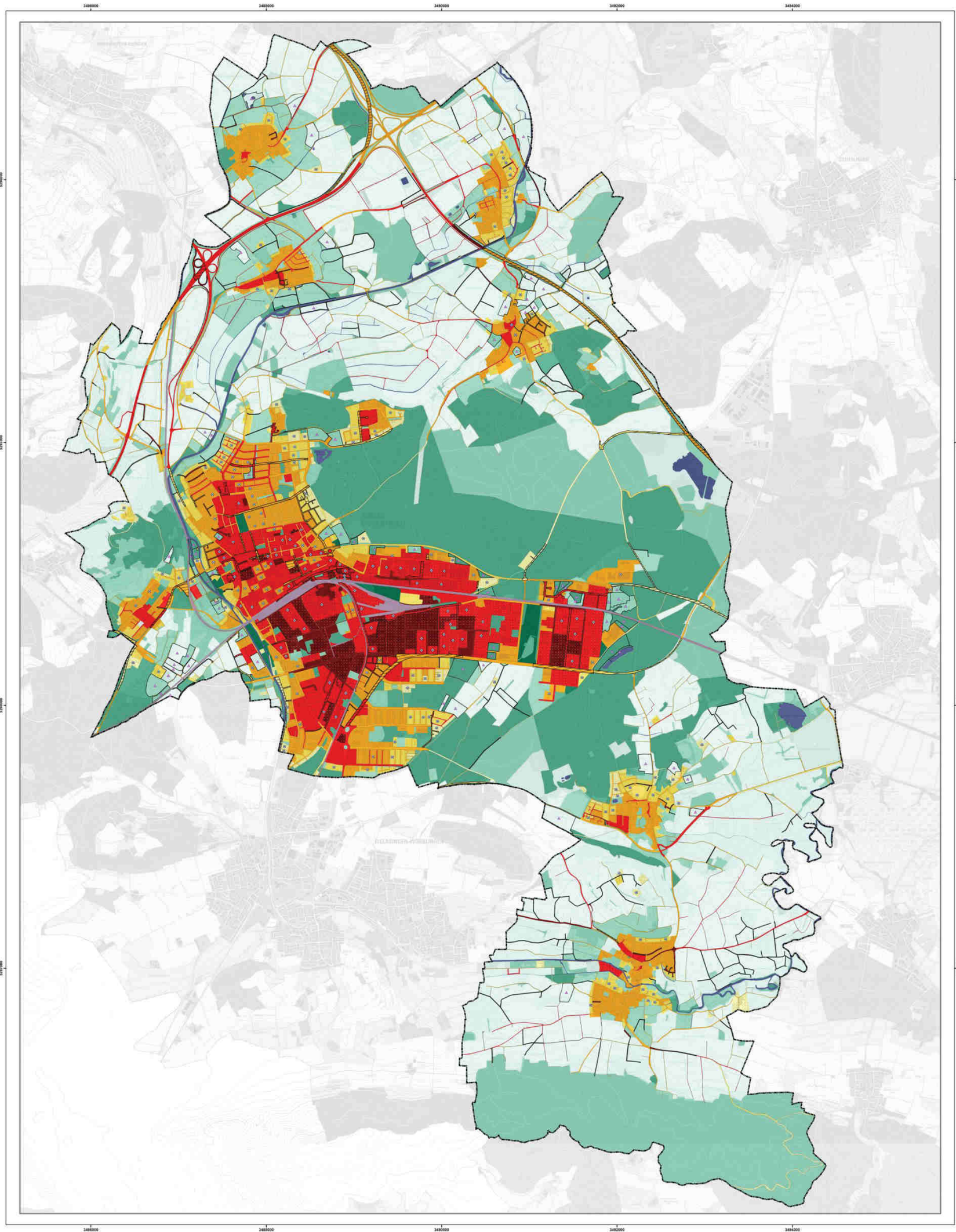
↑

↓

↔

↔

Abb. A 16: Planungshinweiskarte Nachtsituation für das Ist- und Zukunftsszenario



Stadtklimaanalyse Singen: Planungshinweiskarte Tagsituation (Ist- und Zukunftsszenario)

Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken.

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsfremde Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
- Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsgebieten (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen bzw. siedlungsfremde Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtsch. Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Zukünftig höhere Bedeutung der Grünfläche** (Bewertung mindestens 1 Stufe höher in 2050; Darstellung ab 0,5 ha Flächengröße)

Sonstiges

- Stadtgebiet Singen
- Gewässer
- Gewerbliche Nutzung
- Gleisfläche

Siedlungsraum (Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege und Plätze) - Wirkungsräume

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

- Sehr günstige bioklimatische Situation**
Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
- Günstige bioklimatische Situation**
Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entseelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entseelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Zukünftig höhere Belastung im Siedlungs-/Gewerbe- bzw. Straßenraum** (Bewertung in 2050 eine Stufe ungünstiger)

Zukunfts-Szenario 2050 ohne Landnutzungswandel

Maßstab: 1 : 15.000 (bezogen auf DIN A0)
Koordinatensystem: Gauß-Krüger Zone 3 (DHDN)

Auftragnehmer:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Planstraße 5 a
30161 Hannover
www.geo-net.de

Auftraggeber:
Stadt Singen, Fachbereich Bauen - Umweltschutz
SINGEN
Julius-Bücher-Straße 2
78224 Singen

Im Hintergrund: DTK10

Hannover, Juli 2018

Abb. A 17: Planungshinweiskarte Tagsituation für das Ist- und Zukunftsszenario

