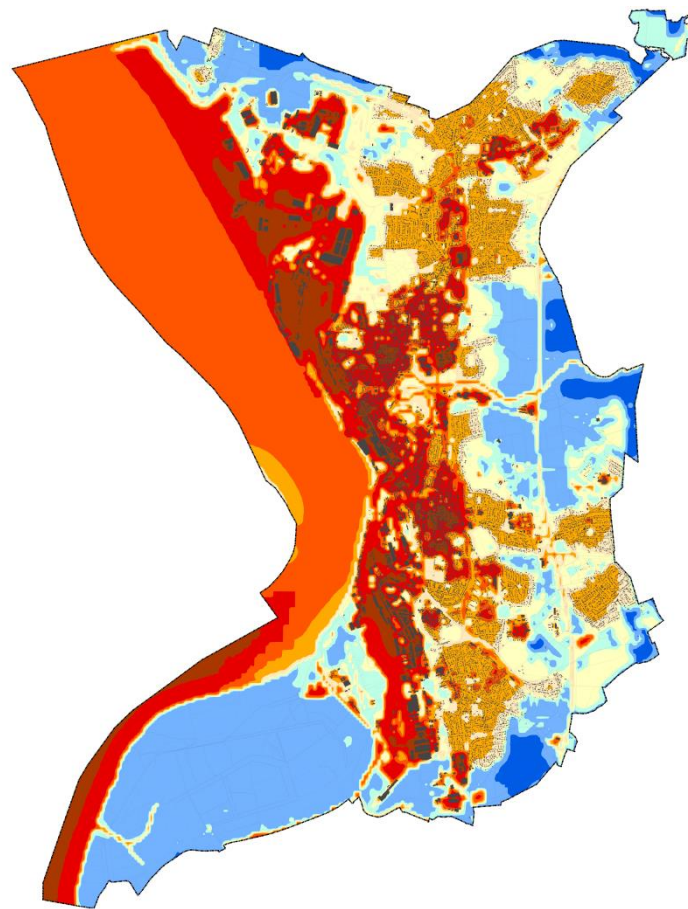




Stadtklimaanalyse Bremerhaven 2019



**Freie Hansestadt Bremen
Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Referat 31 - Naturschutz und Landschaftspflege**

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

März 2020



Inhaltsverzeichnis

Glossar	-----	III
1 Einleitung	-----	1
2 Fachliche Grundlagen	-----	2
2.1 Der Stadtklimaeffekt	-----	2
2.2 Meteorologische und geographische Bedingungen im Untersuchungsraum	-----	3
2.2.1 Geographische Lage des Untersuchungsgebiets	-----	3
2.2.2 Klimatische Bedingungen	-----	4
2.3 Bisherige Klimauntersuchungen	-----	8
2.4 Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	-----	9
3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	-----	11
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	-----	11
3.2 Betrachtete Wetterlage	-----	12
3.3 Eingangsdaten	-----	13
3.4 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung	-----	15
4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter	-----	18
4.1 Vorgehensweise	-----	18
4.2 Nächtliches Temperaturfeld	-----	18
4.3 Kaltluftströmungsfeld	-----	22
4.4 Kaltluftvolumenstrom	-----	25
4.5 Lufthygienische Belastung durch die Quellgruppe Verkehr	-----	28
5 Klimaanalysekarte	-----	30
5.1 Vorgehensweise	-----	30
5.2 Ergebnisse	-----	30
6 Planungshinweiskarte	-----	35
6.1 Vorgehensweise	-----	35
6.2 Ergebnisse	-----	38
7 Zusammenfassung und Ausblick	-----	45
Quellenverzeichnis	-----	47
Anhang	-----	49



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: PRINZIPIKIZZE FLURWIND.....	2
Abb. 2: GELÄNDEHÖHEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET (DGM 25 M). DARGESTELLT IST HIER DAS EU-DEM25 (2011). FÜR DAS STADTGEBIET SELBST WURDEN VON DER STADT DATEN MIT EINER HÖHEREN AUFLÖSUNG ZUR VERFÜGUNG GESTELLT.	4
Abb. 3: KLIMADIAGRAMM FÜR BREMERHAVEN BASIEREND AUF DEN WERTEN DER DWD-STATION VON 1981-2010 (DWD 2017b).	5
Abb. 4: JAHRESMITTELTEMPERATUR BASIEREND AUF DEN WERTEN DER BREMERHAVENER DWD-STATION VON 1981-2016 (DWD 2017b).6	6
Abb. 5: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN PROZENT DER JAHRESSTUNDEN FÜR DEN ZEITRAUM 2006 - 2015 FÜR DIE MESSSTATION IN BREMERHAVEN. DABEI ENTSPRICHT DIE LÄNGE DER EINZELNEN FARBSTUFEN DER PROZENTUALEN HÄUFIGKEIT, MIT DER DIE JEWEILIGE WINDGESCHWINDIGKEIT AUS DER ANGEgebenEN WINDRICHTUNG AUFTRITT (STADT BREMERHAVEN 2018b).	7
Abb. 6: HÄUFIGKEITEN VON WINDGESCHWINDIGKEITEN IN DEN SOMMERMONATEN JUNI, JULI UND AUGUST FÜR DEN ZEITRAUM 1980 BIS 2010 AN DER BREMERHAVENER DWD-STATION (DWD 2017b).	8
Abb. 7: TEMPERATURVERLAUF UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT VERSCHIEDENER LANDNUTZUNGEN. ...	13
Abb. 8: BEISPIELHAFTHE DARSTELLUNG DER AUSWIRKUNGEN VON AUTOBAHNDÄMMEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET BREMERHAVEN.....	14
Abb. 9: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION	15
Abb. 10: DAS LUFTHYGIENISCH ANALYSIERTE VERKEHRSSTRABENNETZ MIT DEN BERECHNETEN WERKTAGESDURCHSCHNITTlichen NO _x -EMISSIONEN, WIE SIE IN DIE MODELLRECHNUNG EINGEGANGEN SIND.....	17
Abb. 11: NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD (2 M Ü. GRUND) IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETES BREMERHAVEN MIT DEN DURCHSCHNITTlichen TEMPERATUR-WERTEN FÜR VERSCHIEDENE NUTZUNGSSTRUKTUREN. DAS GESAMTE STADTGEBIET IST DEM ANHANG ZU ENTNEHMEN (SIEHE Abb. 21).	20
Abb. 12: VERGLEICH DER LUFTTEMPERATUR (2 M Ü. GR.) VON MODELLRECHNUNG (LINKS) UND DER MESSFAHRT (SÜDRUTE) DES DWD AM 25.08.2016 (03:10 UHR BIS 03:57 UHR UTC).	21
Abb. 13: NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN BREMERHAVEN (WINDPFEILE AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 300 M).	24
Abb. 14: PRINZIPIKIZZE DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS.....	25
Abb. 15: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IN BREMERHAVEN (WINDPFEILE AUS Abb. 13 ÜBERNOMMEN).	27
Abb. 16: VERTEILUNG DER NO ₂ -IMMISSION ZUR TEMPORÄREN VERKEHRSBELASTUNGSSPITZE UM 8 UHR MORGENS.....	29
Abb. 17: KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE NACHTSITUATION FÜR DAS BREMERHAVENER STADTGEBIET.	34
Abb. 18: VERANSCHAULICHUNG DER STANDARDISIERUNG ZUR VERGLEICHENDEN BEWERTUNG VON PARAMETERN (z-TRANSFORMATION) ..	35
Abb. 19: AUFTeilUNG DER BIOKLIMATISCH BELASTETEN SIEDLUNGSFLÄCHEN IN GEWERBE- UND WOHNNUTZFLÄCHE.	39
Abb. 20: PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DIE NACHTSITUATION FÜR DAS BREMERHAVENER STADTGEBIET.....	44
Abb. 21: TEMPERATURFELD UM 04 UHR MORGENS FÜR DAS BREMERHAVENER STADTGEBIET (GROßFORMAT).	49
Abb. 22: KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE NACHTSITUATION FÜR DAS BREMERHAVENER STADTGEBIET (GROßFORMAT).	50
Abb. 23: PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DIE NACHTSITUATION FÜR DAS BREMERHAVENER STADTGEBIET (GROßFORMAT).	50

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: FLÄCHENANTEILE DER NÄCHTLICHEN ÜBERWÄRMUNG IM SIEDLUNGS- UND GEWERBERAUM (INKL. STRABEN).	31
TABELLE 2: EINORDNUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM IN DER NACHT (LUFTTEMPERATUR T _a). FLÄCHENMITTELWERT SOWIE STANDARDABWEICHUNG (SD) DES METEOROLOGISCHEN PARAMETERS FÜR DIE ENTSPRECHENDEN FLÄCHEN IM STADTGEBIET BREMERHAVEN.....	36
TABELLE 3: EINORDNUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS FÜR DIE FREI- UND GRÜNFLÄCHEN DES STADTGEBIETES (z-TRANSFORMATION). ..	37
TABELLE 4: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BELASTETER SIEDLUNGSGEBIETES IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	40
TABELLE 5: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BEDEUTENDER GRÜNAREALE IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.....	42



Glossar

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

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, welche die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, 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).

Eigenbürtige Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

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.



Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom $> 105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom, die \rightarrow Kaltluftleitbahnen speisen (\rightarrow Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Kaltluftaustauschbereich: Kaltluftaustauschbereiche verbinden \rightarrow Kaltluftentstehungsgebiete (\rightarrow Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (\rightarrow Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichströmungen sowie reliefbedingte \rightarrow Kaltluftabflüsse.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow Kaltluftleitbahn fließt. Anders als das \rightarrow 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 ($^{\circ}\text{C}$) interpretiert werden.

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

Landwind: Wind, der vom Land zum Gewässer hin weht (Nachtsituation der Land-Seewind-Zirkulation). Dies geht auf die schnellere Abkühlung der Luft über einer Freifläche im Vergleich zur Wasseroberfläche zurück. Dadurch resultiert ein Luftdruckgefälle vom Land (relatives Hoch) zum Meer (relatives Tief) und es bildet sich ein seewärts gerichtete und ausgleichende Luftströmung, der Landwind, aus. Am Tag kehren sich die Verhältnisse um (Seewind).

Orographie: Die Orographie beschreibt die Höhenstrukturen der natürlichen Erdoberfläche. Über die Orographie wird der Einfluss des Geländes auf das lokale Wettergeschehen berücksichtigt.

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

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten 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 \rightarrow Autochthone Wetterlage

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

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen \rightarrow 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 Einleitung

ZIELE UND ANALYSEANSATZ

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung (vgl. Kapitel 2.4) und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Angesichts der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen besteht hier Handlungsbedarf. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Als Grundlage für die Analyse und Bewertung der siedlungsklimatischen Zusammenhänge dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Methodischer Ausgangspunkt für die Analyse der klimaökologischen Funktionen ist die Gliederung der Stadtfläche in drei Raumkategorien:

- größtenteils bioklimatisch belastete Siedlungsräume (**Wirkräume**)
- Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen (**Ausgleichsräume**)
- Luftaustauschprozesse, welche allein thermisch („Flurwindssystem“, „Land-Seewind“) oder thermisch-orographisch angetrieben (Kaltluftabfluss, „Berg-Talwindssystem“) sein können und teils erhebliche Entfernungen überbrückend Wirk- und Ausgleichsräumen miteinander verbinden (**Kaltluftaustauschbereiche**).

Aus dieser Untergliederung in Wirk- und Ausgleichsräume sowie verbindende Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, welches kartographisch in Form der **Klimaanalysekarte** abgebildet ist. Anschließend wurden in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen/Räume gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form von einer **Planungshinweiskarte** dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klimaökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Durch konkrete Zuordnung planungsrelevanter Aussagen zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z. B. Kaltluftentstehungsflächen können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden sollen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung identifiziert, welche mithin sanierungsbedürftig sind. Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten - und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden - statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird (VDI 2015). Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode bietet den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Somit liegt eine räumlich hochauflösende Information und Bewertung der klimaökologischen Gegebenheiten für die Nachtsituation vor, welche für die verschiedenen Planungsebenen/-träger bereitgestellt werden. Die Klimaanalysekarte sowie die Planungshinweiskarte sind im Format DIN A0 jeweils für das gesamte Stadtgebiet (Maßstab 1: 21.000) in der Auflösung 400 dpi erstellt worden. Außerdem sind sie im Anhang im verkleinerten Format DIN A3 zu finden.

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.

Solch belastende 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 bebaute 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- bzw. Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der bodennahe Zustrom mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse erfolgen, insb. über sogenannten Kaltluftleitbahnen.

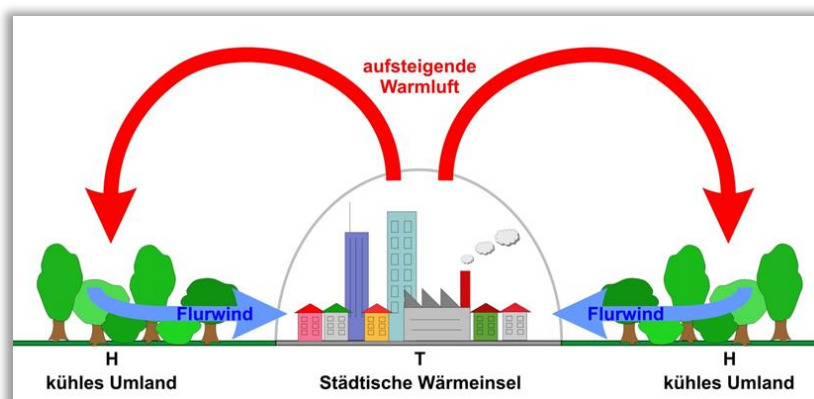


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind



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 METEOROLOGISCHE UND GEOGRAPHISCHE BEDINGUNGEN IM UNTERSUCHUNGSRAUM

2.2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS

Bremerhaven besitzt bei einer Fläche von 93,77km² eine Einwohnerzahl von ca. 120 000 Menschen (Stand 30.09.2017; Seestadt Bremerhaven 2017). Diese verteilen sich auf 9 Stadtteile mit insgesamt 24 Ortsteilen (Seestadt Bremerhaven o.J.). Als kreisfreie Stadt ist sie dem Stadtstaat Bremen angehörig und befindet sich am östlichen Ufer der Unterweser, welche in die Nordsee mündet. Landseitig wird es von Niedersachsen umschlossen. Für die Klimaanalyse von Bremerhaven wurde nicht nur das Stadtgebiet selbst, sondern auch das nähere Umland betrachtet. Insgesamt hat das Untersuchungsgebiet eine Größe von etwa 419,25 km² bei einer Ausdehnung von ca. 19,5 x 21,5 km (siehe Abb. 2).

Etwa ein Viertel der Gesamtfläche Bremerhavens ist wasserbedeckt (vor allem durch die Weser und Häfen). Über ein Drittel der Fläche sind den Geestbereichen zuzuordnen (z.B. Hohe Lieth). Die weiteren Flächen werden von Marschen und Niederungen der Weser und Ihren Nebenflüssen eingenommen. Größere zusammenhängende Grünlandflächen sind noch im Süden und Osten des Stadtgebietes vorzufinden. Im Norden liegen Teilflächen ehemals ausgedehnter Grünland-Graben-Areale, welche sich im niedersächsischen Umland fortsetzen. Der Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche liegt bei ca. 20,1 % (Stand 2017; Seestadt Bremerhaven 2018).

Markante Hangkanten, wie beispielsweise in Bremen-Nord, sind in Bremerhaven nicht anzutreffen, wenngleich Höhenunterschiede vorhanden sind. Die Reliefunterschiede betragen häufig jedoch nur wenige Meter. Im Stadtgebiet selbst können Geländehöhen von unter -2 m ü. NN im Bereich der Nordseewatten und maximal bis zu 11 m ü. NN in der Geestlandschaft der Hohen Lieth im Norden Bremerhavens erreicht werden (Stadt Bremen 1992). Die Reliefunterschiede im gesamten Untersuchungsgebiet reichen von 31,0 m ü. NN im Nordosten bis -5,8 m ü. NN im Süden. Das Untersuchungsgebiet weist somit eher eine geringe Reliefenergie auf.

¹ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

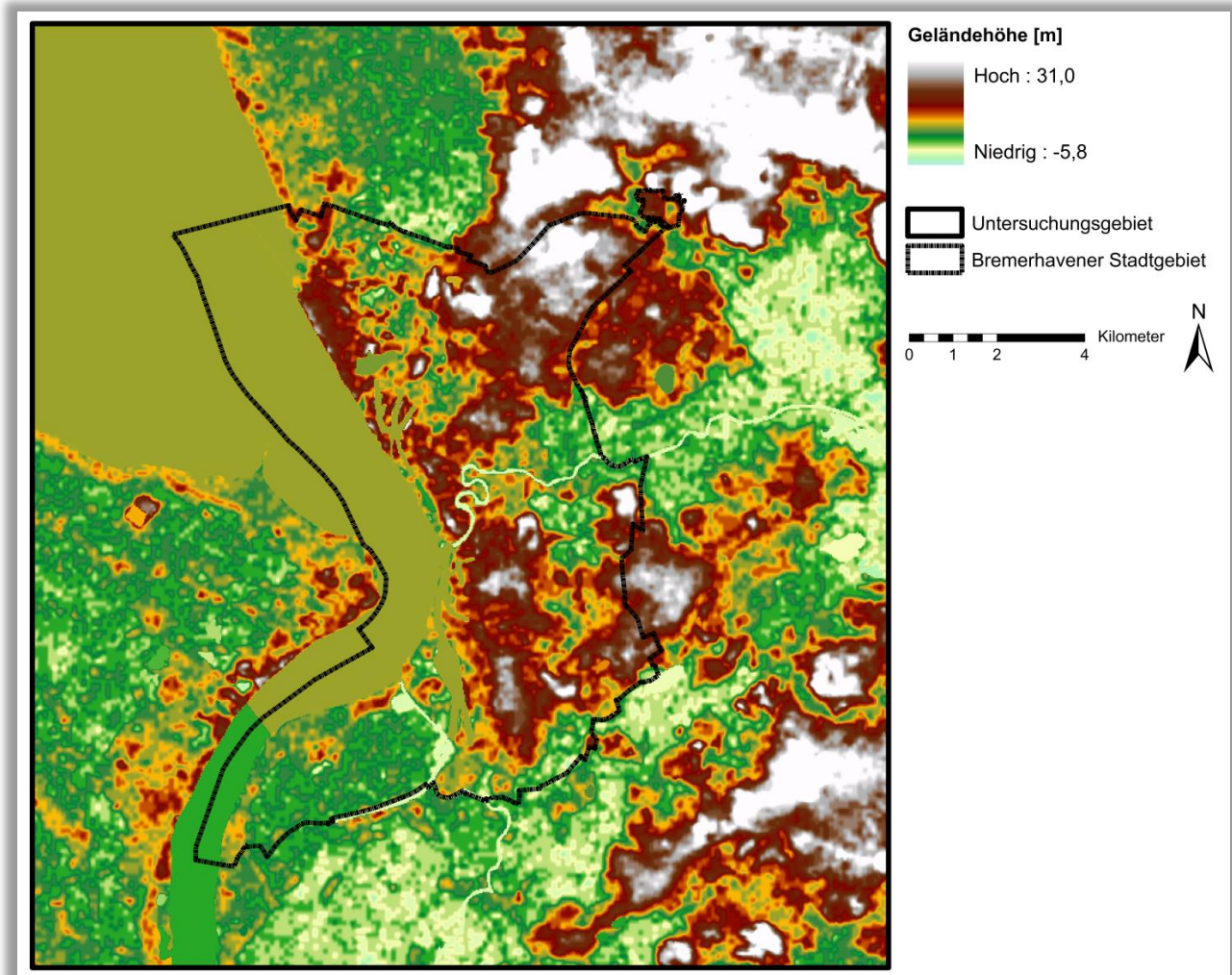


Abb. 2: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (DGM 25 m). Dargestellt ist hier das EU-DEM25 (2011). Für das Stadtgebiet selbst wurden von der Stadt Daten mit einer höheren Auflösung zur Verfügung gestellt.

2.2.2 KLIMATISCHE BEDINGUNGEN

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt. So wurde z.B. die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD 2017a). Im Folgenden werden die wichtigsten meteorologischen Parameter für die Periode 1981-2010 und damit einen aktuelleren Bezugszeitraum dargestellt (dabei handelt es sich um den momentan aktuellsten Referenzzeitraum der Weltorganisation für Meteorologie (WMO)). Sie beziehen sich auf den Standort der DWD-Station in Bremerhaven, für welche Messwerte seit 1913 vorliegen. Innerhalb des Stadtgebiets kann es nutzungs- und reliefbedingt deutliche Abweichungen von den Messwerten an dieser Wetterstation geben.

In Bremerhaven herrscht ein maritim geprägtes Klima. Charakteristisch für dieses Küstenklima sind kühle, niederschlagsreiche Sommer und milde Winter. Die kühlen Sommer und milden Winter in Bremerhaven werden aufgrund der Nähe zur Nordsee und ihrer Wärmespeicherkapazität verursacht (Stadt Bremen 1992). Die Witterung wird vornehmlich von Tiefdruckgebieten mit eingelagerten Zwischenhochs bestimmt, sodass wechselnde Wetterlagen auftreten und längere Hochdruckperioden mit beständigem Wetter eher



selten sind. Die Lufttemperatur zeigt einen ausgeprägten Jahresgang, auch für den Niederschlag ist ein charakteristischer Jahresverlauf zu erkennen (siehe Abb. 3). Im Jahresmittel erreicht die Temperatur 10,0 °C (DWD-Station Bremerhaven für den Zeitraum 1981-2010). Die Höchstwerte treten im Juli/August mit etwa 18,0 °C und die geringsten Werte im Januar (3,2 °C) auf. Die mittlere Niederschlagsmenge in Bremerhaven liegt bei 755 mm pro Jahr. Im Mittel treten die höchsten Werte, bedingt durch Schauer und Gewitter, in den Sommermonaten Juni bis August auf (DWD 2017b).

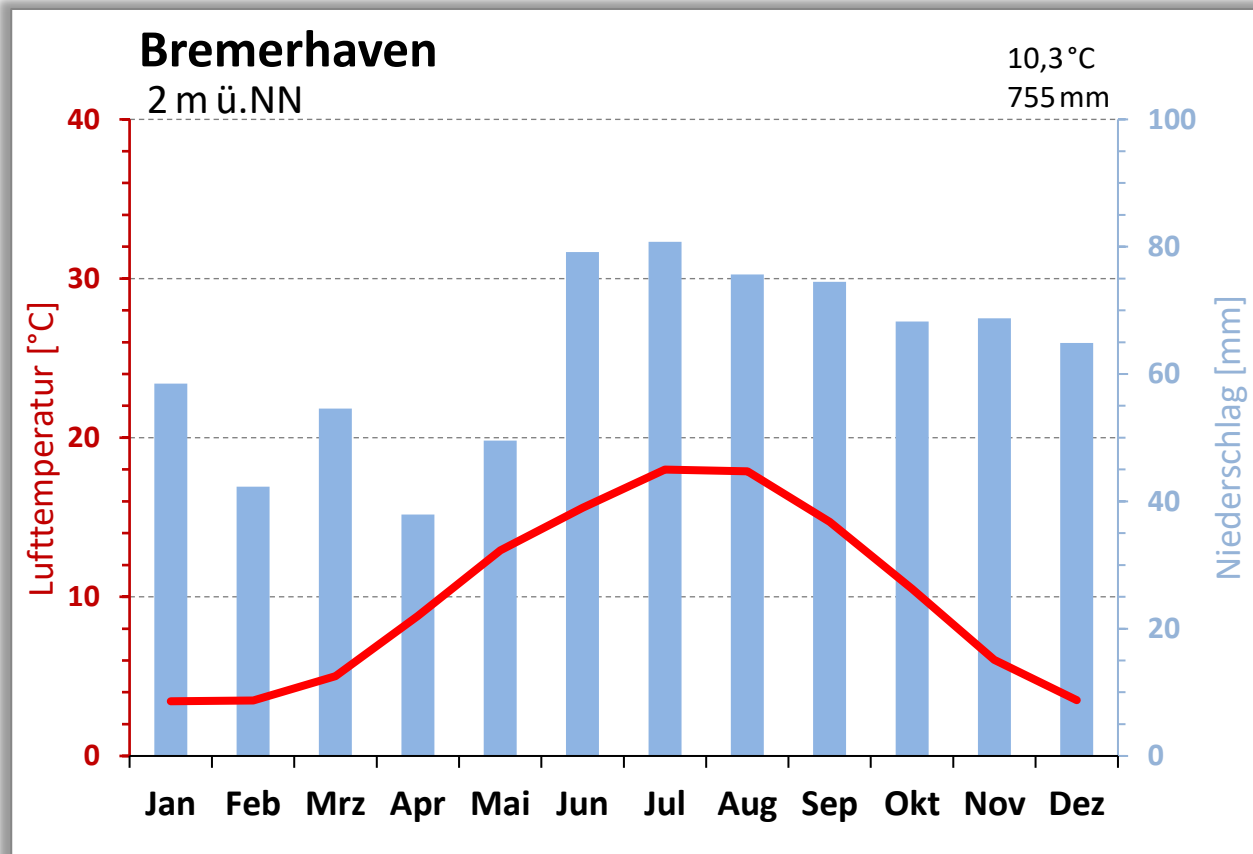


Abb. 3: Klimadiagramm für Bremerhaven basierend auf den Werten der DWD-Station von 1981-2010 (DWD 2017b).

Mit Blick auf die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur zwischen 1980 und 2010 wird deutlich, dass eine steigende Tendenz erkennbar ist. In den nachfolgenden Jahren ist diese Entwicklung nicht mehr dermaßen prägnant (siehe Abb. 4). Hervorzuheben ist das Jahr 2010, welches mit einer Jahresmitteltemperatur von nahezu 12 °C das wärmste des betrachteten Zeitraums ist. Dagegen war das Jahr 2003 trotz des Hitzesommers im August im Jahresmittel etwas kühler, lag jedoch auch etwa 1 °C über dem Durchschnitt.

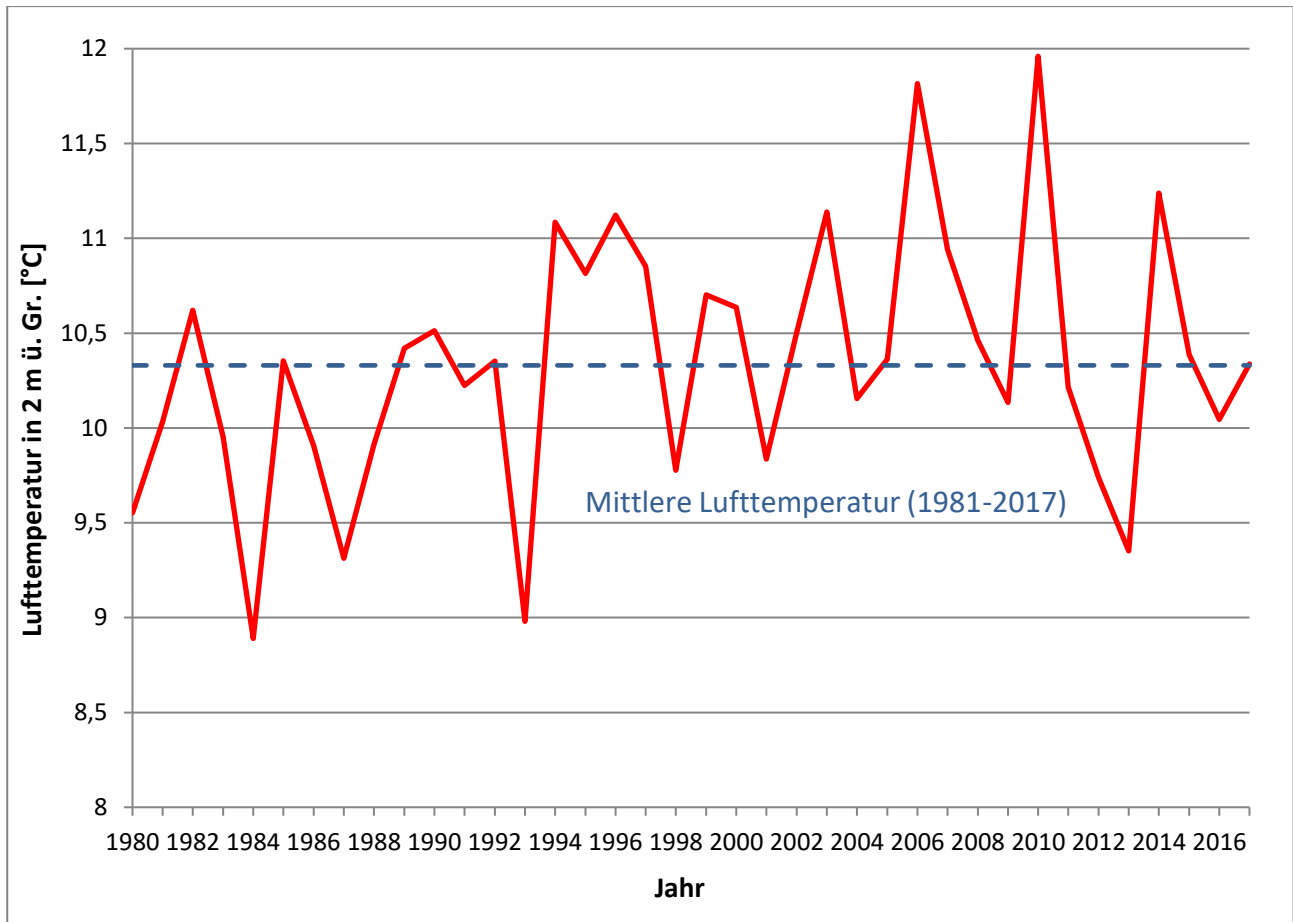


Abb. 4: Jahresmitteltemperatur basierend auf den Werten der Bremerhavener DWD-Station von 1981-2016 (DWD 2017b).

Die Hauptwindrichtungen kommen zu 13,7 % aus Westsüdwest und zu 13,1 % aus Südsüdwest (siehe Abb. 5). Windgeschwindigkeiten in der Höhe von Sturmstärken (ab $20,8 \text{ m s}^{-1}$) werden an durchschnittlich 10 Tagen pro Jahr erreicht. Häufiger sind Sturmböen (Wind erreicht für wenige Sekunden Sturmstärke) mit an durchschnittlich 75 Tagen pro Jahr, die meist im Herbst und Winter auftreten. In der Nähe der Weser und ihrer Nebenflüsse sind verstärkte Nebelbildung und erhöhte Luftfeuchtigkeit zu verzeichnen (Stadt Bremen 1992, Stadt Bremen 2018b). Bedingt durch die Hinderniswirkung insbesondere von Gebäuden, herrschen im Stadtgebiet modifizierte Strömungsverhältnisse vor.

Das vorliegende Gutachten untersucht die Strömungsverhältnisse einer autochthonen Sommernacht. Diese ist mit der *stark stabilen* Schichtung zu vergleichen, jedoch wird kein übergeordneter Wind berücksichtigt, d.h. das Strömungsfeld wird ausschließlich durch die lokalen Gegebenheiten hervorgerufen (Flurwinde, Kaltluftabflüsse, Land-Seewind-Zirkulation). Stadtplanerische Maßnahmen vermögen am ehesten das Prozessgeschehen während autochthoner Wetterlagen zu beeinflussen, sodass deren Kaltlufthaushalt Grundlage für die Ausweisung von Kaltluftleitbahnen ist. Übergeordnete Strömungen verhindern die Ausbildung eines autochthonen Klimas, wirken aber ebenfalls auf das Stadtklima und können in Bezug auf die Luftreinhaltung eine wichtige Rolle bei der Durchlüftung einer Stadt spielen. Planerisch lassen sich diese weniger beeinflussen, doch sollte dafür gesorgt werden, dass Belüftungsachsen aus den Hauptanströmungsrichtungen – in Bremerhaven insbesondere aus Südwesten – in das Stadtgebiet bestehen bleiben.

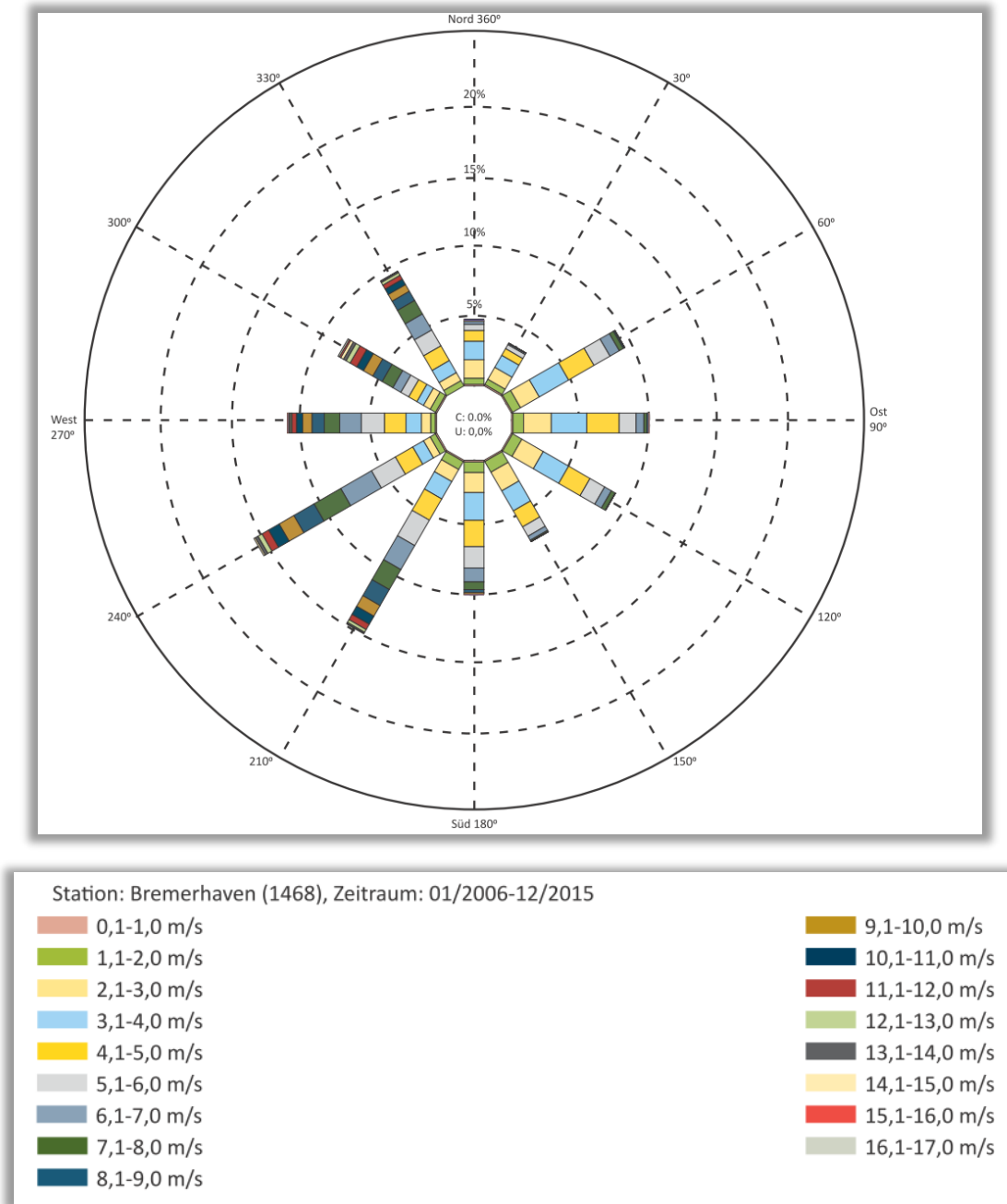


Abb. 5: Windrichtungsverteilung in Prozent der Jahresstunden für den Zeitraum 2006 - 2015 für die Messstation in Bremerhaven. Dabei entspricht die Länge der einzelnen Farbstufen der prozentualen Häufigkeit, mit der die jeweilige Windgeschwindigkeit aus der angegebenen Windrichtung auftritt (Stadt Bremerhaven 2018b).

Da vor dem Hintergrund der Hitzebelastung in Städten insbesondere die Sommersituation von Relevanz ist, wurde in der Abb. 6 die Windsituation in den Monaten Juni, Juli und August untersucht. Allgemein sind die Winde im Winter stärker und im Sommer schwächer ausgeprägt. Extreme Schwachwindlagen ($< 0,5 \text{ m s}^{-1}$) kommen während der Sommermonate in Bremerhaven lediglich an ca. 0,5 % der Stunden vor. Dies ist vor allem in der Küstennähe Bremerhavens begründet. Windgeschwindigkeiten unter 3 m s^{-1} sind in etwa 24,4 % der Jahresstunden vorherrschend. Je langsamer sich die Luft bewegt, desto geringer ist der Austausch der Luftmassen und zusätzlich steigt die Feinstaubkonzentration an (DWD o.J.). Dafür wird als Grenze eine Windgeschwindigkeit von weniger als 3 m s^{-1} angenommen.



Starkwindereignisse mit über 4 m s^{-1} treten somit in Bremerhaven oft auf (über 55 % der Stunden). Aus diesem Grund ist bei der Städteplanung auch die Hauptwindrichtung zu beachten.

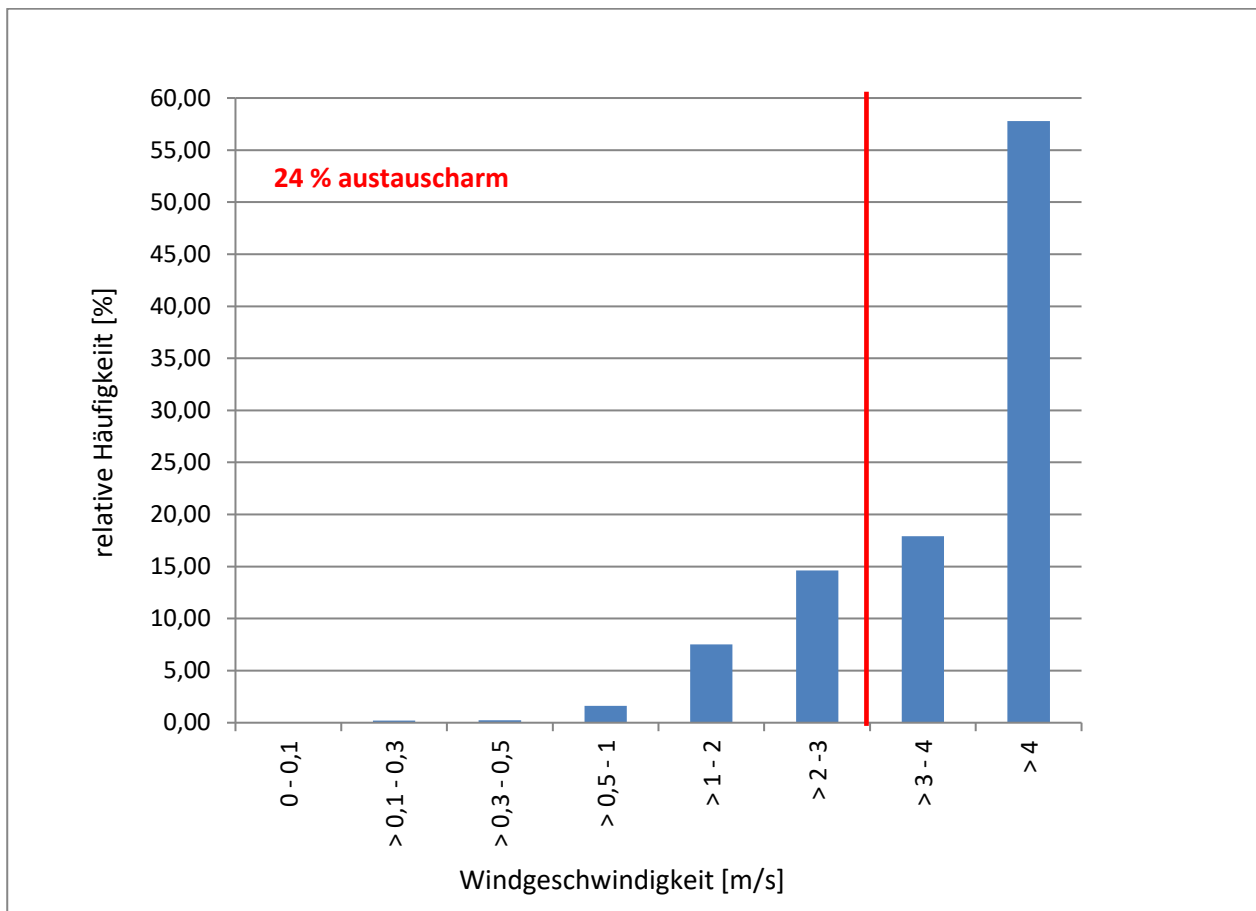


Abb. 6: Häufigkeiten von Windgeschwindigkeiten in den Sommermonaten Juni, Juli und August für den Zeitraum 1980 bis 2010 an der Bremerhavener DWD-Station (DWD 2017b).

2.3 BISHERIGE KLIMAUNTERSUCHUNGEN

Als eines der ersten Bundesländer hat die Freie Hansestadt Bremen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels mit dem Beschluss des Klimaschutz- und Energiegesetzes einen gesetzlichen Rahmen geschaffen. Dazu wurde die Entwicklung einer Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels der Bremischen Bürgerschaft im Jahr 2015 im Bremer Senat beauftragt. Dafür wurde in einer, unter anderem in Kooperation mit Geo-Net, entwickelten Anpassungsstrategie konkrete Handlungsrahmen für Politik und Verwaltung entwickelt. Dies sollte das Land Bremen gegenüber Klimafolgen stärken (Stadt Bremen 2018a). Zuletzt wurde im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie vom Deutschen Wetterdienst das vergangene, gegenwärtige und zukünftige Klima von Bremen und Bremerhaven untersucht. Dazu fanden auch Messfahrten in den Stadtgebieten statt. Diese zeigen, dass auch in Bremerhaven ein ausgeprägter städtischer Wärmeinseleffekt zu verzeichnen ist. Unter Mitwirkung des Klimawandels führt dies zukünftig zu einem Anstieg wärmebelastender Situationen in den städtischen Siedlungsräumen (Stadt Bremen 2018b). Aus diesem Grund ist es wichtig Belastungsräume aufzuzeigen, sodass diese in der Städteplanung berücksichtigt werden können. Dies geschah bereits in einem Gutachten von Geo-Net im Jahr 2013 für die Stadt Bremen (Geo-Net 2013). Nun soll die kreisfreie Stadt Bremerhaven in der vorliegenden Untersuchung folgen.



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 Frischluftbahnen und Ventilationsbahnen (Belüftungsachsen; vgl. Stadt Karlsruhe 2014). In FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten ca. 25 m bis 100 m), während in **Bebauungsplänen** (B-Plan; verbindliche Bauleitplanung) das Mikroklima in den Vordergrund rückt (ca. 2 m bis 10 m; VDI 2014). Nach § 8 (2) 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 Belüftungsachsen zu sichern
- Öffentliche und private Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten, Sport-, Spielplätze, Friedhöfe, etc.)
- Begrünung von Straßenzügen, Parkplätzen und Gleistrassen
- Anpflanzen bzw. Erhalt von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen
- Dach- und Fassadenbegrünung

Ergänzend zur Flächennutzungsplanung bietet das **Landschaftsprogramm** (LaPro) ein strategisches Planungsinstrument zur Regelung der Erfordernisse und Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege auf Ebene der räumlichen Planung. Im Bundesland Bremen werden im Landschaftsprogramm gleichzeitig die örtlichen Erfordernisse und Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege dargestellt und damit die Ebenen der Landschaftsrahmenpläne sowie Landschaftspläne in das Landschaftsprogramm integriert. Die für die örtliche Ebene konkretisierten Ziele, Erfordernisse und Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege sind u.a. in der Abwägung bei der Aufstellung von Bauleitplänen (Flächennutzungspläne und Bebauungspläne) zu berücksichtigen und können, z.B. entsprechend der zuvor genannten Möglichkeiten, als Darstellungen bzw. Festsetzungen in die Bauleitpläne aufgenommen werden.

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



lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen [...]“ (§ 1 (3) 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 Novellierung des *Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung* (UVPG) vom 29.09.2017 finden die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung verstärkt Eingang in die **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) als übergeordnetes umweltpolitisches Instrument.



3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 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 Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen).

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 dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil 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.

Sofern ausreichend detaillierte Eingangsdaten zur Verfügung stehen, ist das Modell FITNAH 3D in der Lage, räumlich hoch aufgelöste Berechnungen in einem 10 x 10 m-Raster durchzuführen und ermöglicht damit mikroskalige Stadtklimaanalysen.

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 einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume ist selten möglich. Stadtklimamodelle 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 50 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 z.B. in Höhen von 2, 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 ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die durchgeführte numerische Simulation mit FITNAH 3D legt eine autochthone Wetterlage an einem Sommertag 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:

- ◆ Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- ◆ Bedeckungsgrad 0/8
- ◆ Kein überlagernder geostrophischer Wind

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*-Szenarios). 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. 7 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.

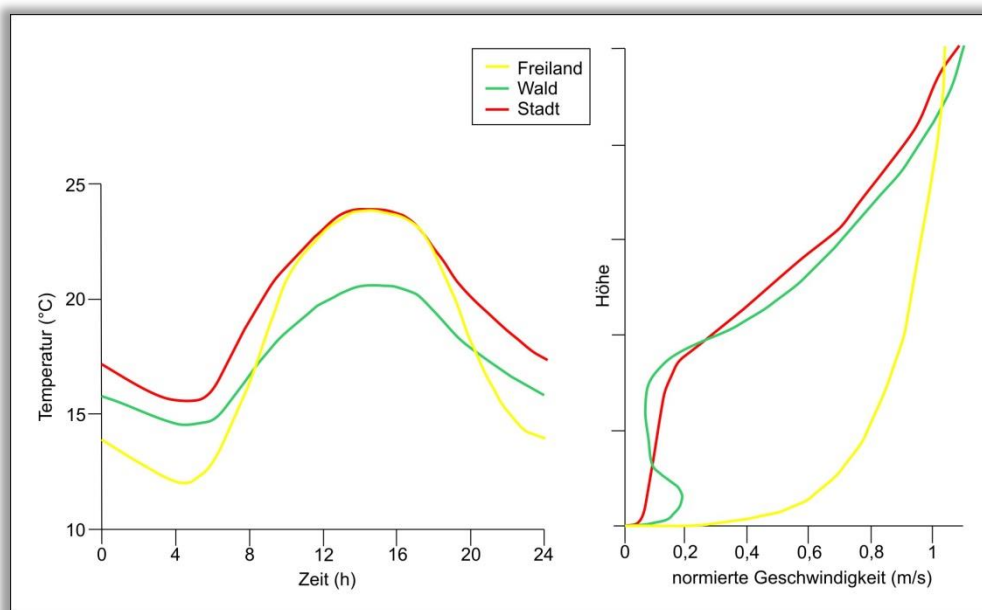


Abb. 7: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen.

3.3 EINGANGSDATEN

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- ◆ Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- ◆ Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Digitales Landschaftsmodell)

Um flächendeckende Informationen für das gesamte Rechengebiet zu erhalten, wurden verschiedene Digitale Geländemodelle (DGM) verwendet. Vom Vermessungs- und Katasteramt Bremerhaven wurde ein DGM1 (2015) für das Stadtgebiet zur Verfügung gestellt. Für den umliegenden, niedersächsischen Bereich wurde auf das EU-DEM25 (2011) zurückgegriffen.

Für die Nutzung standen zum einen Daten des Katasteramt Bremerhavens (ALKIS 2018) sowie für das Umland Daten des *Urban Atlas* (2012) zur Verfügung. Die Landnutzung wurde anhand aktueller Luftbilder (Bezugsjahr 2016 für Bremerhaven) abgeglichen und auf Plausibilität geprüft.



Die Strukturhöhe von Flächen im Untersuchungsgebiet wurde in Abhängigkeit der Landnutzung (z.B. Acker, Wald) parametrisiert. Einzelne Bäume konnten in dem 50 m x 50 m breiten Rechengitter jedoch nicht separat ausgewiesen werden. Bei Brücken wurde die Strukturhöhe vereinfacht auf 0 m gesetzt, da ein Unter- oder Überströmen bei solchen Bauten in der Regel möglich ist. Würde hier die Strukturhöhe berücksichtigt werden, fungiert die Brücke als Strömungshindernis. Eine separate Ausweisung der Brücken ist möglich, wurde im Rahmen dieser Analyse jedoch nicht durchgeführt, da dies kaum Mehrinformationen liefert und sich die Nullsetzung bewährt hat. Autobahn- und Bahndämme bzw. Wälle sind über die Geländeinformationen (DGM) berücksichtigt (siehe dazu Abb. 8). In Abb. 8 links ist die Geländehöhe dargestellt. Es zeigt sich, dass im Bereich der Autobahn eine Höhe über 2 m vorliegt. In Ab. 8 rechts ist die Windgeschwindigkeit dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Windgeschwindigkeit aufgrund der Hinderniswirkung des Autobahndammes sowie der in der Regel angepflanzten Vegetation abnimmt. Insgesamt ist die Abnahme aufgrund des Autobahndammes als eher gering (um $0,1 \text{ m s}^{-1}$ in der Umgebung der Autobahn) einzuschätzen. Auf eine Berücksichtigung der Lärmschutzwände wurde im Rahmen dieser Analyse verzichtet, da die beauftragte räumliche Auflösung von 50 m zu gering ist um valide Aussagen darüber zu treffen.

Generell kann es durch Dämme und Lärmschutzwände und auch durch Gebäude zu einer Abschwächung oder Verzögerung des Luftaustausches kommen. Dies ist jedoch immer von spezifischen Faktoren wie Struktur und Ausrichtung der Hindernisbauten sowie Geschwindigkeit und Mächtigkeit der Kaltluftströmung abhängig. Die Ausprägung der Kaltluftströmung wiederum wird von weiteren Faktoren wie beispielsweise Hangneigung, Lufttemperatur und Oberflächenrauigkeit bestimmt. Angesichts der Vielzahl an beeinflussenden Parametern kann keine eindeutige Aussage bezüglich der Hinderniswirkung getroffen werden. Diese bedarf einer einzelfallabhängigen Betrachtung.

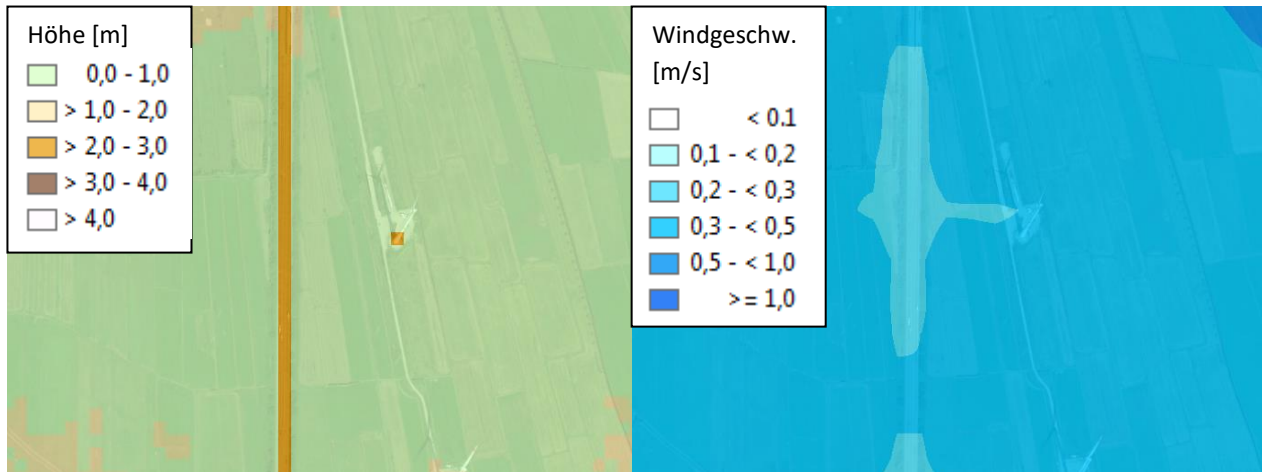


Abb. 8: Beispielhafte Darstellung der Auswirkungen von Autobahndämmen im Untersuchungsgebiet Bremerhaven.

Neben der Strukturhöhe ging auch der Versiegelungsgrad der verschiedenen Oberflächen in die Modellrechnung mit ein, welcher in Abhängigkeit der Landnutzung parametrisiert wurde.

ABGRENZUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAÖKOLOGISCH WIRKSAMEN NUTZUNGSSTRUKTUREN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 50 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 9). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen



beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kapitel 4), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kapitel 5 und 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

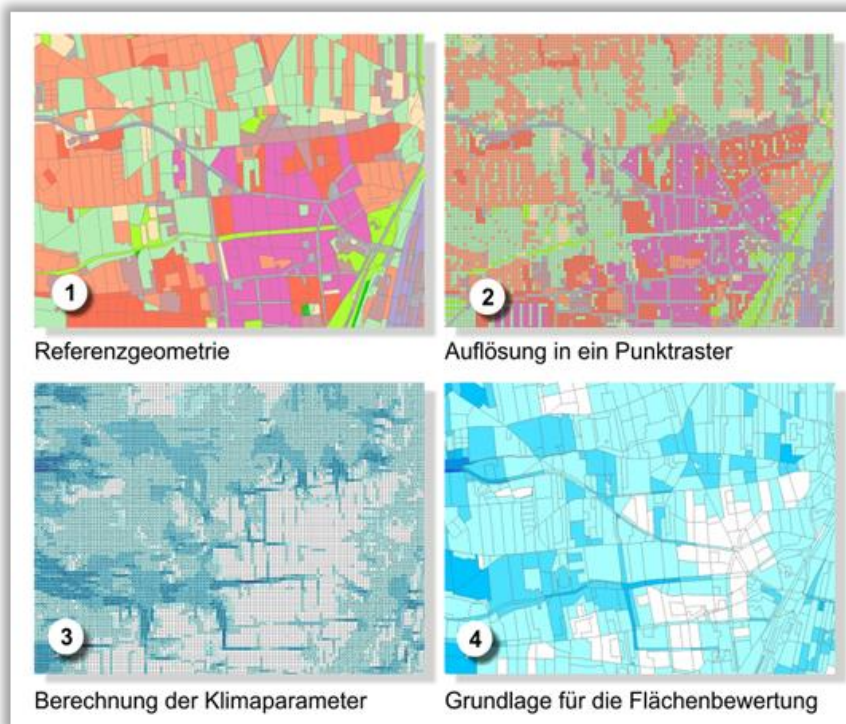


Abb. 9: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation.

3.4 MODELLIERUNG DER VERKEHRSBEDINGTEN LUFTSCHADSTOFFAUSBREITUNG

Ziel der Modellierung ist es eine qualitative Aussage über die Schadstoffverteilung zu einer temporären Verkehrsbelastungsspitze. Diese Belastungsspitze wird zum morgendlichen Berufsverkehr um 8 Uhr morgens gewählt, da die Wetterlage zu diesem Zeitpunkt noch von der autochthonen nächtlichen Wetterlage beeinflusst wird und noch keinen allzu großen Turbulenzen unterliegt.



Als Indikator für die Schadstoffbelastung der Luft wird in der vorliegenden Untersuchung die Ausbreitung von Stickstoffoxid (NO_x)-Emissionen im Windströmungsfeld, bzw. die daraus resultierende theoretische Immissionskonzentration von Stickstoffdioxid (NO₂) verwendet. NO₂ ist neben Feinstaub (PM10) die wichtigste, maßgeblich durch den Straßenverkehr induzierte Luftschadstoffkomponente. Zwar können die komplexen Reaktionen der NO₂-Ozonchemie keine detaillierte Berücksichtigung finden, jedoch ist die PM10-Konzentration wesentlich stärker abhängig von verschiedenen, nicht straßenverkehrsbedingten Gegebenheiten als die des NO₂. Hierzu gehören unter anderem der kleinräumig wechselnde Anteil an Feststoffheizungen, die Verteilung industrieller und landwirtschaftlicher Produktionsanlagen, die großräumigen Witterungsverhältnisse sowie die veränderlichen Ferntransporte aus Quellen außerhalb des Untersuchungsgebietes.

Die hier beschriebenen Immissionsfelder beziehen sich – anders als die übrigen modellierten Parameter – ganz explizit auf eine Ausbreitungssituation, die nur unter Annahme eines Windfeldes, wie es an einem strahlungsintensiven Sommertag morgens zwischen 7 und 8 Uhr typischerweise vorherrscht, auftritt. Dies bedeutet, dass die Windströmung zwar immer noch durch die autochthone nächtliche Wetterlage geprägt ist, aber auch bereits durch die aufgehende Sonne und dadurch erwärmte Oberflächen beeinflusst wird.

Die Schadstoffbelastung wird im Rahmen der hier eingesetzten Methodik hauptsächlich durch die Emissionsmenge und die modellierte Strömung sowie die vertikale Verteilung und lokale Diffusion bestimmt. Sie ist damit nicht geeignet, grenzwertrelevante Aussagen zu treffen, sondern dient lediglich dazu, Siedlungsbereiche zu identifizieren, in denen während dieser Belastungsspitze mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist (Indikatorfunktion).

Zur Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung ist vor allem das Straßennetz Bremerhavens relevant. Aufgrund ihrer Küstenlage ist die Stadt hauptsächlich durch die Bundesautobahn A27 im östlichen Stadtgebiet mit dem überregionalen Umland verbunden. Eine weitere Hauptverkehrsader ist im westlichen Stadtgebiet die B6 / *Stresemannstraße*. Die Hauptquerverbindungen sind die B71 in Wulsdorf, die Straßen *An der Mühle* und *Schiffdorfer Chaussee* in Geestemünde, die *Grimbsbystraße (B212)* in Mitte und die *Cherbourger Straße* in Lehe und Leher Heide.

Anhand der vom Auftraggeber bereitgestellten Verkehrsdaten wurden mit Hilfe des Handbuchs Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes HBEFA 3.3 die NO_x-Emissionsfaktoren für das Jahr 2017 (Stand der Verkehrsdaten aus Bremerhaven) ermittelt. Dabei wurden die Fahrzeugkategorien PKW, SNF (Schwere Nutzfahrzeuge) und Linienbusse unterschieden. Da zur Beschaffenheit der Fahrzeugflotten keine detaillierten Angaben vorlagen, wurde ein Flottenmix (hinsichtlich Fahrzeuggröße und -antriebsart) angenommen, der im HBEFA als „*Business-As-Usual*“-Szenario der Verkehrsentwicklung bezeichnet wird. Des Weiteren wurde das Straßennetz in die Obergruppen „*Erschließungsstraße*“, „*Sammelstraße*“, „*Hauptverkehrsstraße*“ und „*Autobahn*“ unterteilt. Da in der Modellierung der Verkehr während einer temporären Belastungsspitze betrachtet werden soll, wurde als Verkehrssituation auf der A27 zwischen *Bremerhaven-Überseehäfen* und *Bremerhaven-Zentrum* gesättigter Verkehr angenommen und auf allen weiteren Straßen dichter Verkehr. Weiterhin wurden die aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzungen berücksichtigt. Aus diesen Informationen leitet das HBEFA unterschiedliche Verkehrsmuster ab, die in die Berechnung der Emissionsfaktoren mit einfließen. Auf Grundlage der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Verkehrsmengen wurden daraus tatsächliche werktagesdurchschnittliche Emissionen errechnet



(siehe Abb. 10), welche anschließend mit dem FITNAH-Strömungsfeld verdriftet und modellintern so verrechnet wurden, dass sie die NO₂-Immission zur morgendlichen Belastungsspitze repräsentieren.

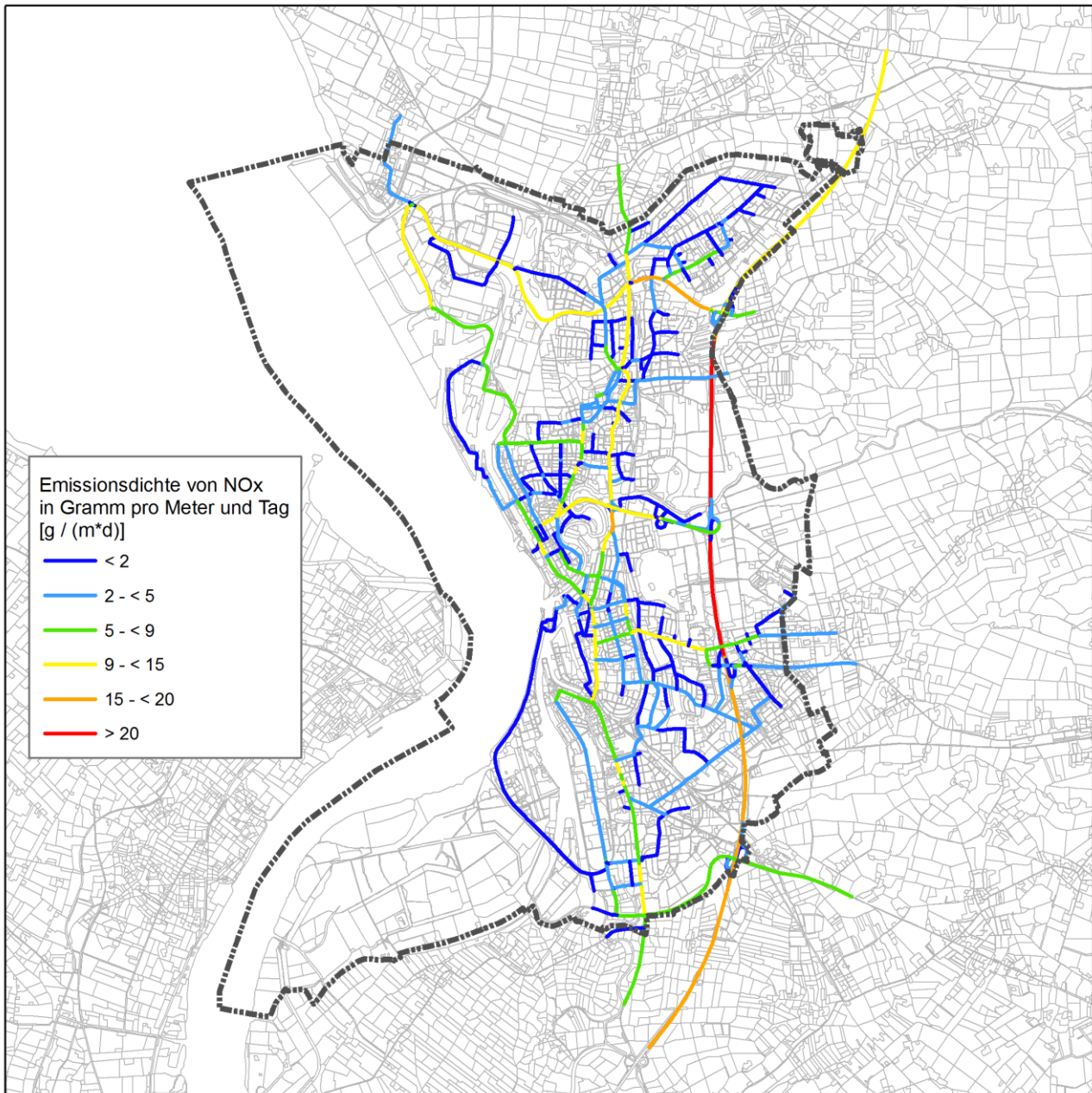


Abb. 10: Das lufthygienisch analysierte Verkehrsstraßennetz mit den berechneten werktagesdurchschnittlichen NO_x-Emissionen, wie sie in die Modellrechnung eingegangen sind.



4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

4.1 VORGEHENSWEISE

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 50 m (pro Rasterzelle ein Wert) und gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (in 2 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 3.2). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftaustauschbereichen).

4.2 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. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Die nächtliche Abkühlung ist wichtig für die Bevölkerung um sich von der Hitzebelastung am Tage während sommerlicher strahlungsintensiver Wetterlagen zu erholen. Dies gilt insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen wie Kleinkinder, Kranke und Senioren. Sogenannte Tropennächte, in denen die Temperatur 20 °C nicht unterschreitet, gelten als besonders belastend.

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 vergleichsweise 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 bebauten Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen 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. Kapitel 6).

ERGEBNISSE TEMPERATURFELD

Das sich um 04 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst bei Minimalwerten von 11,0 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten von 20,4 °C im Stadtkern eine Spannweite von 9,4 K. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,0 °C. Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Einzelhaus- oder Zentrumsbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (siehe Abb. 11 und für das gesamte Untersuchungsgebiet Abb. 21 im Anhang). Darüber hinaus wird anhand der Abb. 21 im Anhang ersichtlich, dass der nordöstliche Teil der Weser aufgrund des Nordsee-Einflusses etwas kühler ist als der Bereich südlich von Einswarden. Hier ist hervorzuheben, dass die Weser aufgrund der Wärmespeicherkapazität des Wassers dämpfend auf die nächtliche Temperaturabnahme der angrenzenden Flächen wirkt (im Vergleich zu Freiflächen). Dennoch ist hier auch hervorzuheben, dass durch die rauigkeitsarmen Wasserflächen ein Transport der Frischluft aus den westseitig gelegenen Freiflächen möglich ist (siehe dazu Strömungsfeld in 4.3 bzw. 4.4).

Die höchsten Temperaturen treten kleinräumig mit über 20 °C in den Kernbereichen der Innenstadt beim Columbus Center und im Stadtbremischen Überseehafengebiet auf. Dies resultiert aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad. Auch die Industrie- und Hafensflächen weisen über 4 K höhere Werte im Vergleich zum Gebietsmittel auf. Dazu zählen unter anderem die großflächig versiegelten Flächen im Norden des Stadtbremischen Überseehafengebietes, in Weddewarden und im Süden westlich des Fischereihafens (Am Lunedeich). Große Teile der Richtung Stadtrand gelegenen Siedlungsflächen sind durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung geprägt (u.a. Fehrmoor, Schierholz und Surheide). Diese weisen unter den bebauten Flächen mit durchschnittlich 16,1 °C das geringste Temperaturniveau auf, Werte über 18 °C treten nicht auf. Die durch Abstandsflächen geprägte Zeilen- und Hochhausbebauung, wie sie z.B. in der *Boschstraße* (Ortsteil Grünhöfe) auftritt, liegt mit durchschnittlich 18,1 °C zwischen den übrigen Strukturtypen. Im Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit etwa 11 °C am Stadtrand und über den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen außerhalb von Bremerhaven zu verzeichnen. 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 die 14 °C erreicht werden (z.B. Naturschutzgebiet Düllham und die umliegenden baumbestandenen Flächen). Verglichen mit den weitläufigen Freiräumen des Umlandes weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 13 - 17 °C ein höheres Wertespektrum auf (z.B. Bürgerpark



Bremerhaven, Am Holzhafen, Geestemünder Friedhof), wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 15 °C, da sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Stadtpark Lehe, Bürgermeister-Martin-Donandt-Platz). Größere vegetationsgeprägte Areale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar (z.B. Speckenbüttler Park, Bürgerpark, Grünzug Neue Aue mit dem Grabeland Twischkamp).

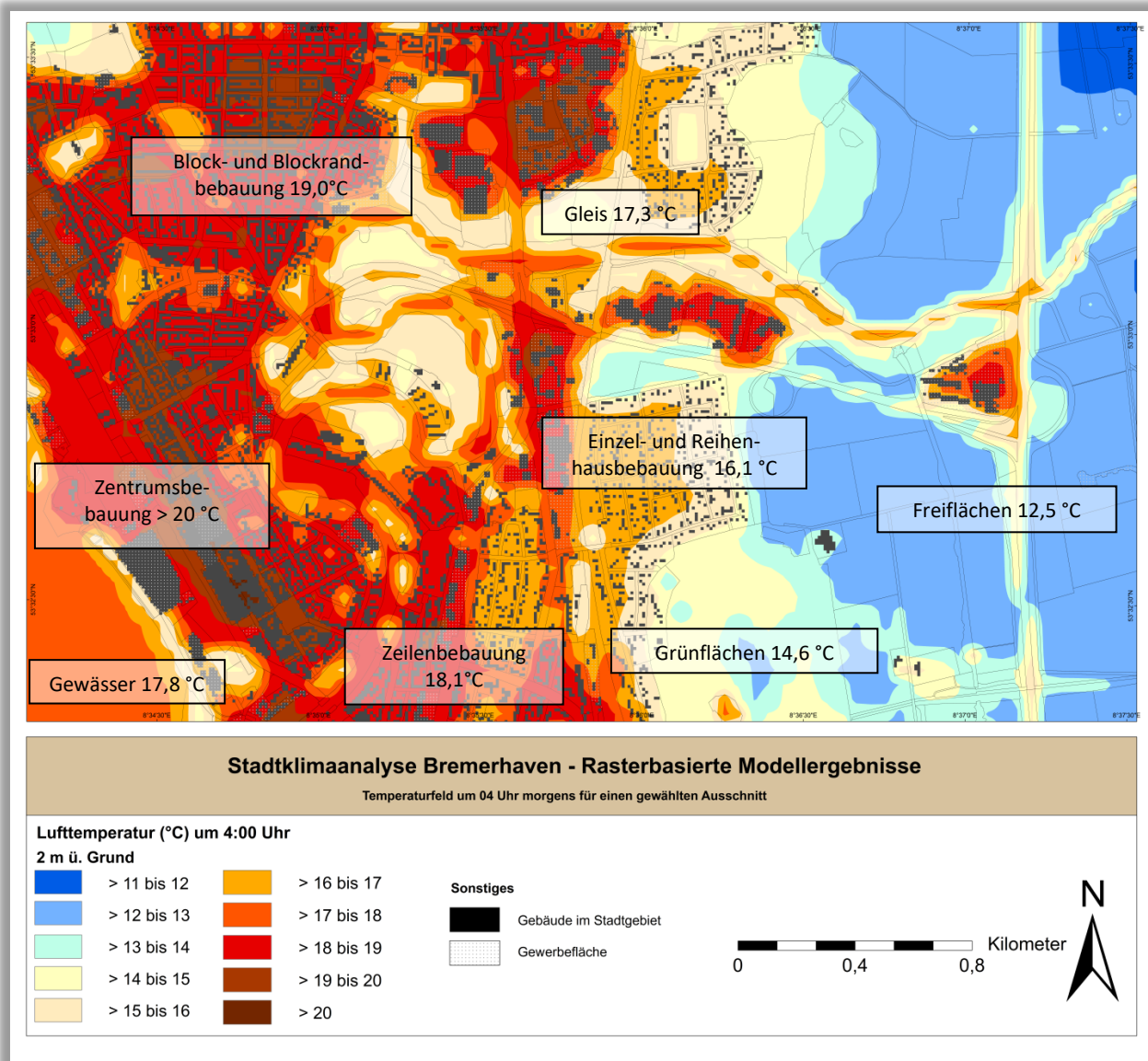


Abb. 11: Nächtliches Temperaturfeld (2 m ü. Grund) in einem Ausschnitt des Stadtgebietes Bremerhaven mit den durchschnittlichen Temperatur-Werten für verschiedene Nutzungsstrukturen. Das gesamte Stadtgebiet ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Abb. 21).

VERGLEICH DER MODELLERGEBNISSE MIT DEN MESSUNGEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES

Die vom Deutschen Wetterdienst erarbeitete Begleitstudie zur Klimaanpassungsstrategie des Landes Bremen (siehe Stadt Bremen 2018a) beinhaltet auch stadtklimatische Untersuchungen mit Messfahrten in Bremerhaven. Im Sommer 2015 wurden in Bremerhaven mehrmonatige Messkampagnen durchgeführt, die Ende August 2016 durch Profilmessfahrten ergänzt wurden.



Für die Untersuchung wurden im Bremerhavener Stadtgebiet von Juni bis September 2015 an zwei stationären Wetterstationen (Stadtstation bei der Lutherstraße im Stadtteil Lehe und Umlandstation in den Schiffdorfer Wiesen, wenige hundert Meter östlich der A2) meteorologische Parameter gemessen und diese auch mit der DWD-Station am Weserufer verglichen. Zunächst wurde in den Messergebnissen ein deutlicher Wärmeinseleffekt nachgewiesen. Der Unterschied der Stadtstation in Lehe und der Umlandstation östlich der A2 beträgt nach der Messung etwa 1,7 K. Die Messergebnisse liefern einen ähnlichen Unterschied (Stadtstation um die 17-18 °C; Umlandstation etwa 14-16 °C (genauer Aufstellungsort ist hier unbekannt)). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Temperaturen der DWD-Station am Weserufer geringfügig über denen der Stadtstation liegen. Vor allem bei schwachwindigen Wetterlagen ist dies nach den Messwerten besonders ausgeprägt. In den Modellergebnissen ist diese Abweichung jedoch nicht erkennbar. Hier liegt der Modellwert im Bereich der Weserstation etwa 2 K unter dem Wert der Stadtstation. Ein Grund dafür ist möglicherweise, dass in der Modellrechnung eine feste Wassertemperatur (um die 17-18 °C) angenommen wurde. Da die Nordsee Einfluss u. a. auf die Wassertemperatur der Außenweser hat und diese deutlich variieren kann, kann dies zu einer Abweichung der Modellrechnung zur Messung führen. Darüber hinaus fand für die Messung lediglich eine Auswertung für einige ausgewählte Monate statt. Ein Vergleich der Messfahrt mit der Modellrechnung zeigt ebenfalls Unterschiede in der absoluten Temperatur. Das Modell ist dabei geringfügig kühler. Dennoch zeigt sich, dass die räumliche Änderung der Temperatur große Ähnlichkeiten aufweist (siehe Abb. 12). Stellenweise können Unterschiede auftreten (z.B. *Am Geestebogen*), da u. a. nur eine Messfahrt zur gegebenen Uhrzeit vorliegt und die Zeitpunkte zwischen Modell und Messfahrt nicht identisch sind. Trotz der im Vergleich zu anderen Gegenden Deutschlands grundsätzlich sehr günstigen Durchlüftungsbedingungen Bremerhavens zeigte sich anhand der Messungen des DWD ein ausgeprägter städtischer Wärmeinseleffekt. Dieser kann anhand der Modellrechnungen bestätigt werden (siehe Kapitel 5.2).

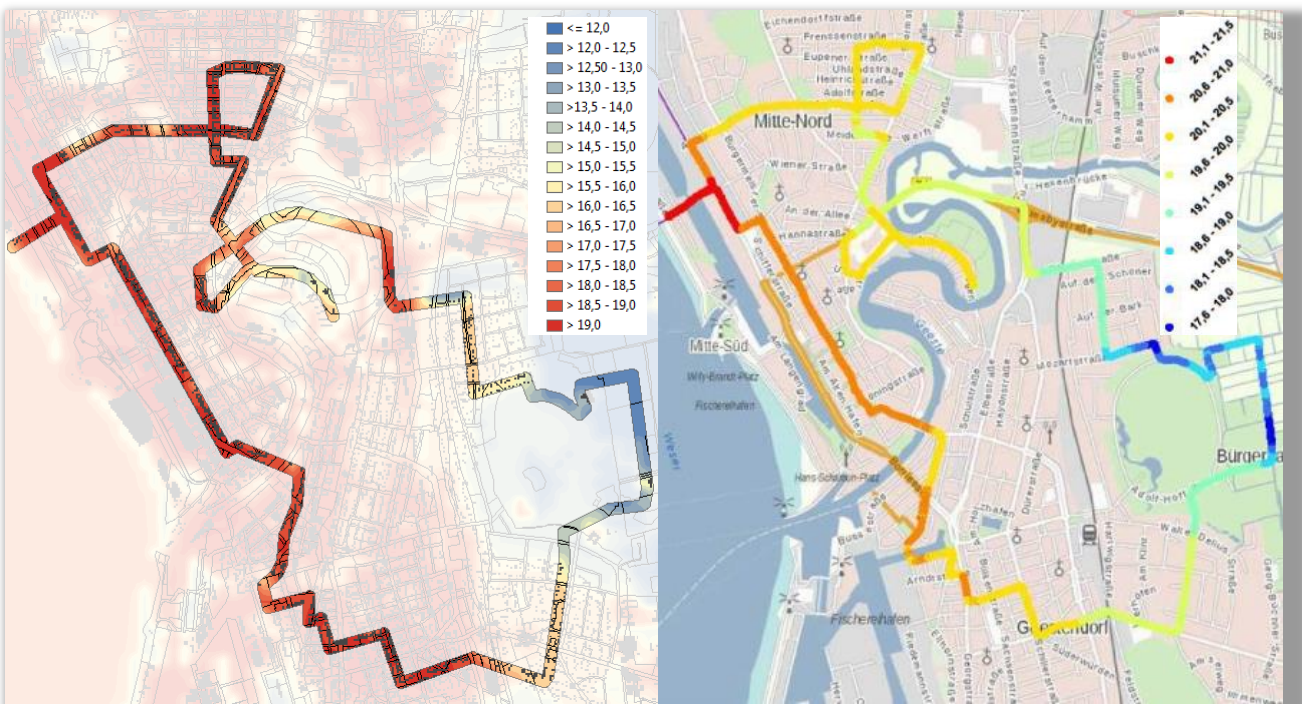


Abb. 12: Vergleich der Lufttemperatur (2 m ü. Gr.) von Modellrechnung (links) und der Messfahrt (Südroute) des DWD am 25.08.2016 (03:10 Uhr bis 03:57 Uhr UTC).



4.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

ALLGEMEINES

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. In Bremerhaven sind die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art Landwinde und Flurwinde (thermisch bedingte Ausgleichsströmung).

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. In der Stadt Bremerhaven spielt vor allem die **Land-Seewind-Zirkulation** eine wichtige Rolle, welches auf die unterschiedlichen Wärmeeigenschaften von Land und Wasser zurückzuführen ist. Aufgrund der nachlassenden Sonneneinstrahlung ab dem späten Nachmittag kühlt sich die Landoberfläche stärker ab als die Wasseroberfläche. Dadurch resultiert ein Luftdruckgefälle vom Land (relatives Hoch) zum Meer (relatives Tief) und es bildet sich eine seewärts gerichtete und ausgleichende Luftströmung, der Landwind, aus. Am Tag kehren sich die Verhältnisse um (Seewind; DWD 2017a).

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 schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten 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.

Abb. 13 zeigt das modellierte Strömungsfeld um 04 Uhr morgens für das Bremerhavener Stadtgebiet, das sich während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetternacht ausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt. Die unterlegten Farben stellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft dar. Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens $0,1 \text{ m s}^{-1}$, für die unter



Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Anhand Abb. 13 ist im Strömungsfeld die Hinderniswirkung der Gebäude und die daraus resultierende Umlenkung oder Abschwächung der Strömung gut zu erkennen. Darüber hinaus ist auch der Landwind erkennbar, welcher sich in der Nacht eingestellt hat. Deutlich zeigt sich dies zum Beispiel bei der Luneplate oder im Bereich westlich der Weser. Weiterhin wird deutlich, dass die kühle Luft der Freiflächen von Nordenham aufgrund der einstellenden Zirkulation über die Weser in Richtung des Bremerhavener Stadtgebietes transportiert wird. Im Bereich der Stadt kann sich aufgrund des Temperaturunterschiedes (in der Stadt ist die Temperatur höher als über dem Gewässer) und der Hinderniswirkung kein Landwind ausbilden.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von ca. $1,2 \text{ m s}^{-1}$ über den Wasserflächen der Weser nördlich der Luneplate. Insgesamt liegen die Werte vergleichsweise niedrig, da während der angenommenen autochthonen Wetterlage die thermisch induzierten Flurwinde kaum durch die geringen Reliefunterschiede verstärkt werden können. Zum Vergleich: In der Stadt Ulm werden beispielsweise aufgrund der hohen Reliefenergie Windgeschwindigkeiten bis zu 3 m s^{-1} erreicht.

Windgeschwindigkeiten über 1 m s^{-1} treten im bebauten Stadtgebiet Bremerhavens aufgrund der Hinderniswirkung nicht auf. In Richtung des dicht bebauten Zentrums nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche (z.B. Schierholz) werden noch wirksam durchlüftet ($> 0,1 \text{ m s}^{-1}$), während in weiten Teilen der Stadtmitte keine wirksame Strömung mehr erreicht wird. Ausnahmen bilden größere rauigkeitsarme Grün- und Freiflächen, welche einen Weitertransport der Frischluft aus der Umgebung in die umliegenden Siedlungsgebiete ermöglichen (z.B. Geeste, Friedhof Wulsdorf und angrenzende Gleisflächen). Breite Straßenzüge, wie z.B. die *Stresemannstraße* begünstigen den Luftaustausch zwischen innerstädtischen Grünflächen und den angrenzenden bebauten Arealen.

Während allochthoner Wetterlagen nimmt die Weser und die resultierende Land-Seewind-Zirkulation eine wichtige Rolle ein. Die geringen Reliefunterschiede und somit mögliche Kaltluftabflüsse spielen für das Strömungsfeld des Bremerhavener Stadtgebietes eine untergeordnete Rolle.

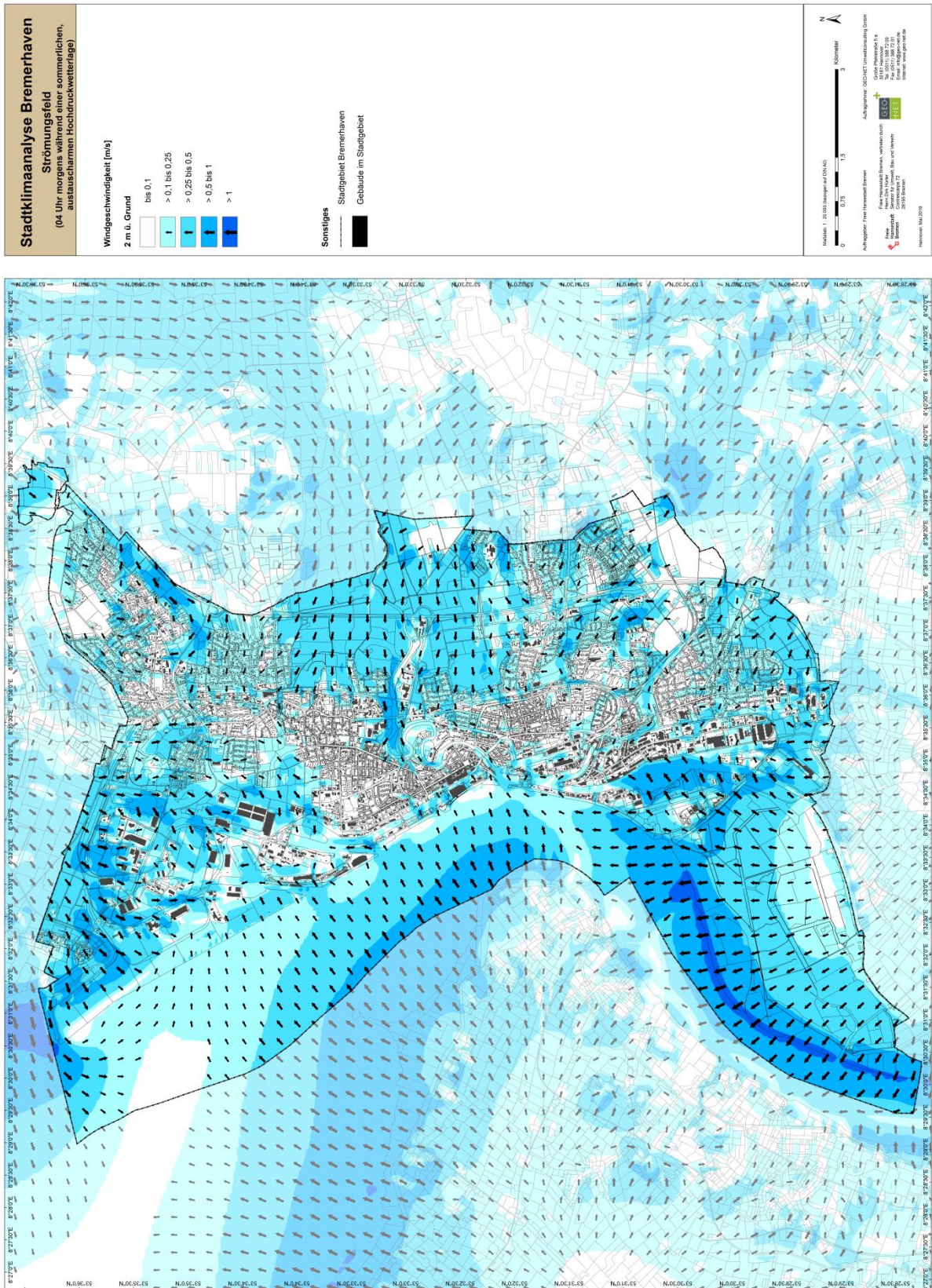


Abb. 13: Nächtliches Strömungsfeld in Bremerhaven (Windpfeile aggregiert auf eine Auflösung von 300 m).

4.4 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 potenzielle 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. 14). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 1 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als Volumenstrom-*Dichte* aufzufassen.

Dieser Wert kann über ein 1 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 Volumenstrom-Dichte mit 50 multipliziert, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom der 50 m x 50 m breiten Rasterzelle. Um Modellergebnisse verschiedener Gitterauflösungen (z.B. 10 m, 25 m und 50 m) direkt miteinander vergleichen zu können, empfiehlt es sich, die Kaltluftvolumenstromdichte (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$) anstelle des Kaltluftvolumenstroms (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) als Größe zu verwenden.²

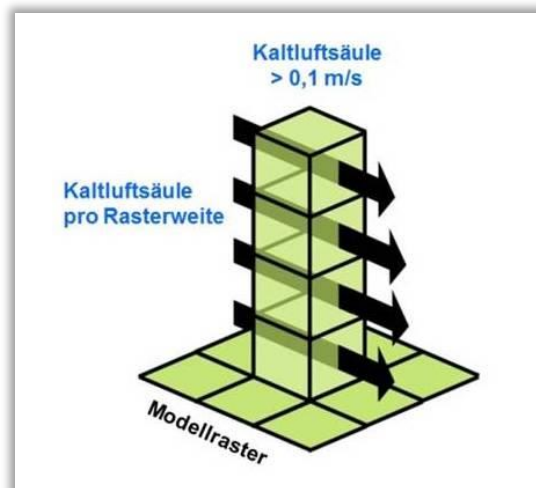


Abb. 14: Prinzipskizze des Kaltluftvolumenstroms.

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

² Im nachstehenden Text ist mit Kaltluftvolumenstrom streng genommen immer die Kaltluftvolumenstromdichte in $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ gemeint.



Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftammelgebiet 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.

Gebäude, Mauern oder Straßendämme können als Strömungshindernisse wirken und 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 bebauten Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab.

ERGEBNISSE KALTLUFTVOLUMENSTROM

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

Die geringsten Werte finden sich in der Stadtmitte, in welcher nur wenige Grünflächen mit hohem Kaltluftentstehungspotenzial vorhanden sind und welche aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur beschränkt durchlüftet wird (Abb. 15). Die über Freiflächen mit Siedlungsbezug entstehende Kaltluft strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt für die höchsten Werte. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt die Kaltluft auch 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 können auch geringere Kaltluftvolumenströme auftreten, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen (z.B. baumbestandene Flächen nördlich des Bahnhofs Wulsdorf).

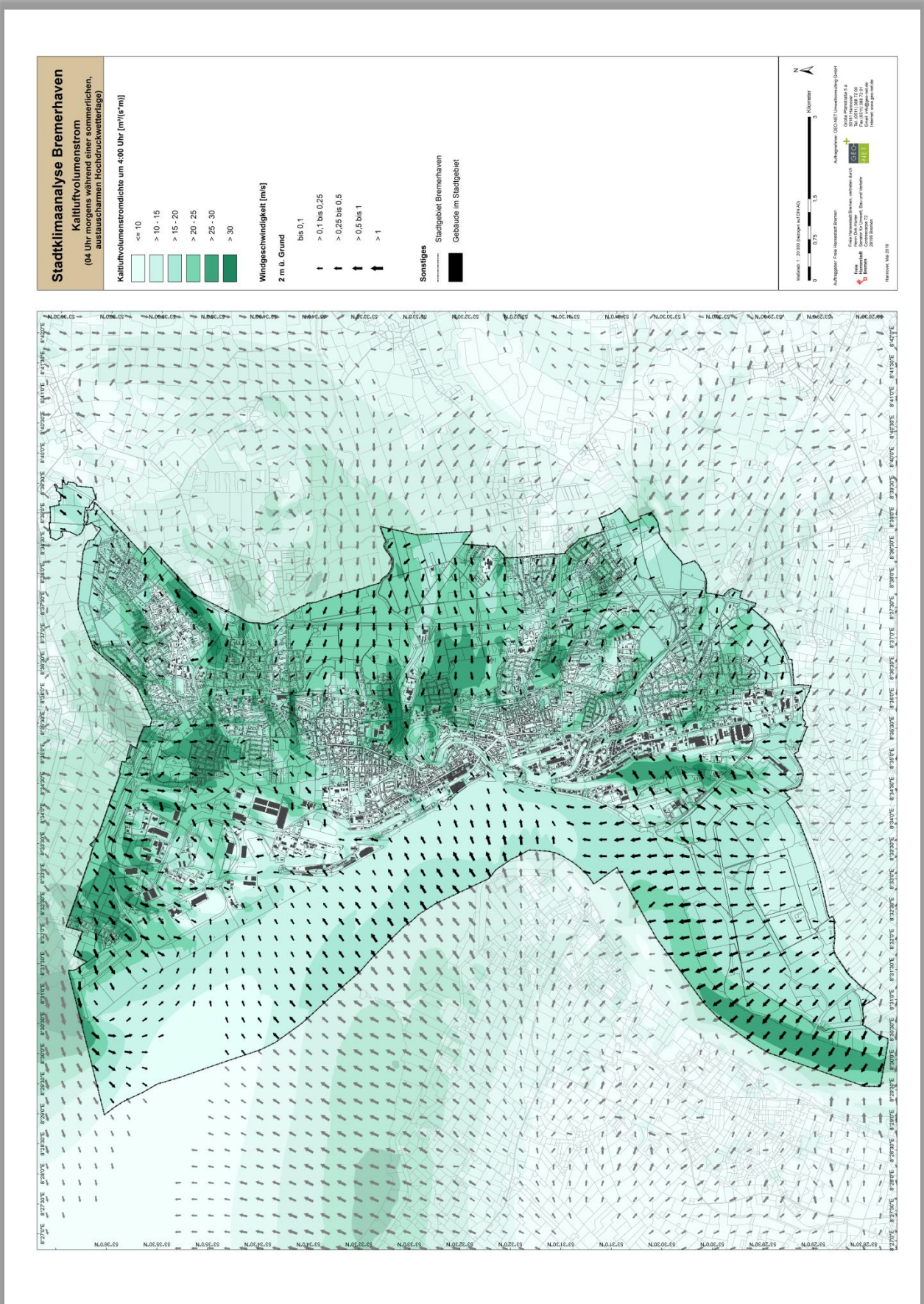


Abb. 15: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in Bremerhaven (Windpfeile aus Abb. 13 übernommen).



4.5 LUFTHYGIENISCHE BELASTUNG DURCH DIE QUELLGRUPPE VERKEHR

Bei der Interpretation der Modellergebnisse muss berücksichtigt werden, dass größere Strömungshindernisse wie Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst werden. Sie gehen entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle lediglich über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. Wie bereits erläutert, wird hier eine rein qualitative Betrachtung vorgenommen.

Abb. 16 zeigt feldhaft die NO₂-Luftschadstoffkonzentration, die sich bei gegebener Verkehrsstärke zwischen 7 und 8 Uhr einstellt. Die Verteilung wird dabei bestimmt durch den Herantransport aus der Umgebung, der vertikalen Verteilung und der lokalen Diffusion. Da hier keine grenzwertrelevanten Angaben gemacht werden können, wurde eine prozentuale Einteilung der Belastungsstufen gewählt. Dabei entspricht die Klasse „*sehr hohe Belastung*“ dem Belastungsmaximum von 50 % bis ≤ 100 %. Die weitere Klassenaufteilung erfolgt bei 25 % bis < 50 % (*hohe Belastung*), 13,3 % bis < 25 % (*erhöhte Belastung*), 6,7 % bis $< 13,3$ % (*mittlere Belastung*), 1,7 % bis $< 6,7$ % (*geringe Belastung*) und > 0 % bis $< 1,7$ % (*sehr geringe Belastung*). 0 % entspricht *keiner Belastung* bzw. waren für diese Bereiche keine Verkehrsdaten vorhanden. Diese Einteilung basiert auf der natürlichen Gruppierung innerhalb der Daten. Es wurden Grenzen an den Stellen gesetzt, wo die Daten relativ große Unterschiede aufweisen um die grafische Darstellung der Schadstoffausbreitung zu optimieren.

Ausgehend von der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen ergeben sich im Stadtgebiet Bremerhavens verschiedene Belastungsschwerpunkte. Die strömungsparallele Ausrichtung der *Grimsbystraße*, der *Cherbourger Straße* und der Straßen *An der Mühle* und *Schiffdorfer Chaussee* führt zu *hohen bis sehr hohen Belastungen* im straßennahen Bereich. Im Vergleich dazu sorgen die quer zur Straße fließenden Strömungen an der relativ stark befahrenen Autobahn A27 zwischen *Bremerhaven-Überseehäfen* und *Bremerhaven-Geestemünde* dafür, dass die Luftschadstoffe stark in Richtung Westen verdriftet und dadurch verdünnt werden, so dass hier lediglich eine *erhöhte Belastung* auftritt, die dafür allerdings flächiger ausgeprägt ist.

Aufgrund der bebauungsbedingt verminderten Durchmischung der Luftmassen treten vor allem im Stadtgebiet kleinräumige Bereiche mit einer *sehr hohen Belastung* auf. Dies betrifft beispielsweise die *Rickmersstraße* und die *Hafenstraße* in Goethestraße/Klushof, die *Stresemannstraße* in Klushof sowie die *Columbusstraße* und *Barkhausenstraße* in Mitte-Süd, Mitte und Mitte-Nord. Gleiches gilt südlich der Innenstadt entlang der B6 in Geestendorf und Geestemünde-Nord.

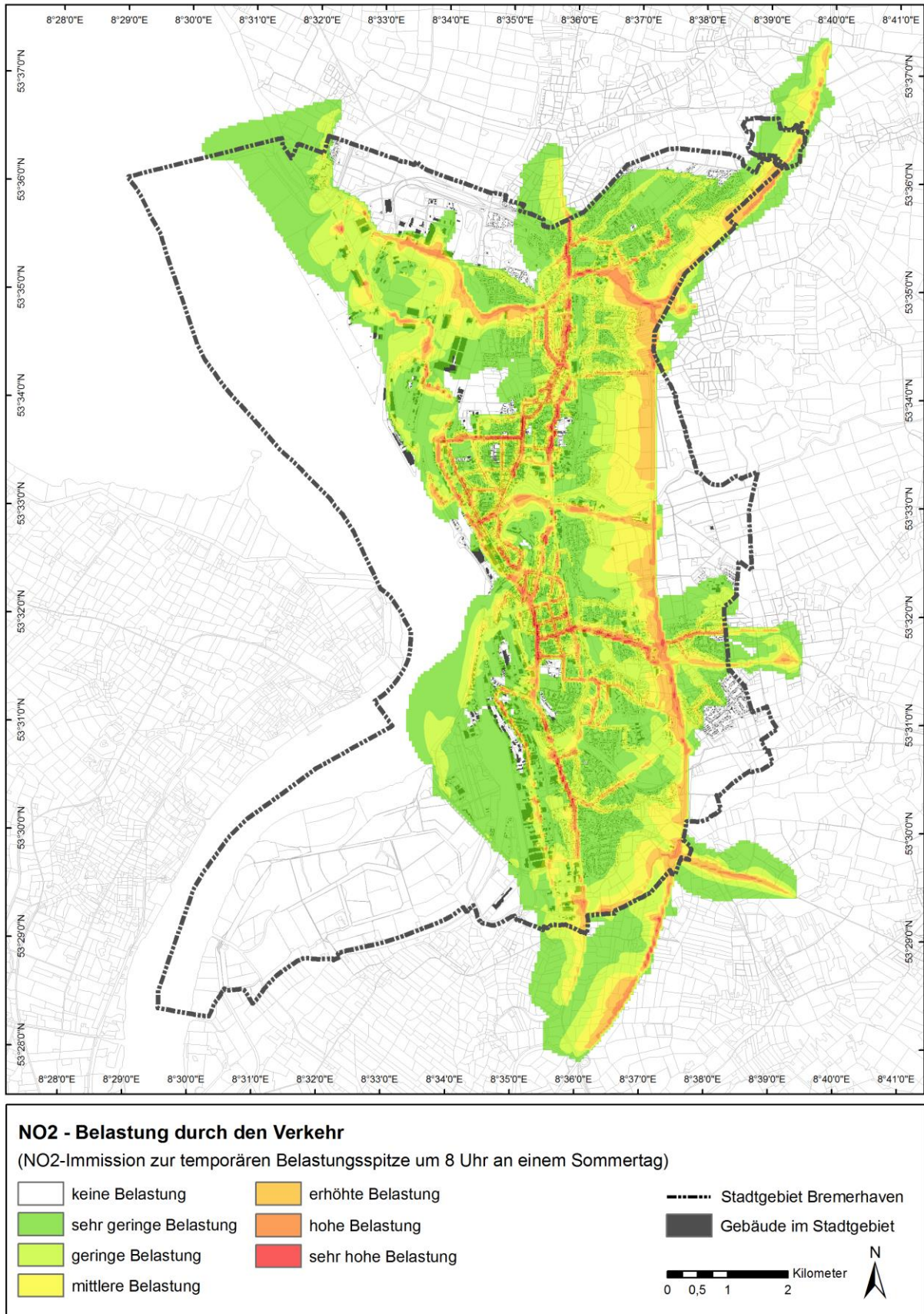


Abb. 16: Verteilung der NO₂-Immission zur temporären Verkehrsbelastungsspitze um 8 Uhr morgens.



5 Klimaanalysekarte

5.1 VORGEHENSWEISE

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 einer Klimaanalyse- bzw. Planungshinweiskarte darstellen zu können, wurden Blockflächen anhand ihrer Nutzungsinformationen unterschieden und ihnen jeweils die Ergebnisse der Klimaparameter aus der Modellrechnung zugeordnet (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom).

Die Klimaanalysekarte³ bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04 Uhr morgens. 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).

5.2 ERGEBNISSE

BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu den Grünflächen der Stadt Bremerhaven, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 14,4 °C aufweisen. Der **Wärmeinseleffekt** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und stellt somit eine geeignetere Kenngröße zur Erfassung des Stadtklimaeffekts dar als absolute Temperaturwerte. Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 16,8 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile⁴ zeigt sich, dass gut ein Drittel der bebauten Flächen (37,2 %) eine Überwärmung von weniger 2 K aufweisen (Tabelle 1). Dies betrifft vor allem die Randbereiche des Stadtgebietes. Diese weisen in der Regel eine lockere Bebauung mit einem geringen Versiegelungsgrad auf und werden noch ausreichend von der Frischluftzufuhr aus dem Umland versorgt (z.B. Einzel- und Reihenhausbebauung im südlichen Wulsdorf). Etwa 27,8 % der Flächen weisen einen Wärmeinseleffekt über 4 K und 0,8% der Flächen einen Wärmeinseleffekt über 5 K auf. Die vom Wärmeinseleffekt besonders betroffenen Gebiete sind dabei die Ortsteile Mitte-Nord, Mitte-Süd, Goethestraße, Klushof, sowie einige Siedlungsbereiche in Geestemünde-Nord und Geestendorf. Vor allem die Ortsteile Goethestraße, Geestendorf und Klushof weisen für Bremerhaven eine vergleichsweise hohe Bevölkerungsdichte auf (Stand 2017; Seestadt Bremerhaven 2018). Bei zukünftigen Planungen und städtebaulichen Entwicklungen ist vor allem in diesen Ortsteilen darauf zu achten, dass sich die Situation nicht verschlechtert bzw. im Allgemeinen ist hier eine Verbesserung durch angemessene Maßnahmen anzustreben (siehe Kapitel 6). Der zwar flächenmäßig geringe Anteil an bioklimatisch belasteten Flächen sollte aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte in den betroffenen Gebieten somit nicht unterschätzt werden.

³ Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte (VDI 2014).

⁴ Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets



Insgesamt zeigt sich, dass aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbauung tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen sowie Zentrums- und Hochhausbebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind.

KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkbereich** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkbereich sind Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom von mindestens $16,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Grünflächen im Stadtgebiet) oder durch eine Windgeschwindigkeit von mind. $0,2 \text{ m s}^{-1}$ gekennzeichnet sind. Dies beruht auf den für eine Fläche (Auflösung 50 m) gemittelten Werten.

Tabelle 1: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbebaum (inkl. Straßen).

Nächtlicher Wärmeinseleffekt [K]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 2	37,2
> 2 bis 3	17,6
> 3 bis 4	17,4
> 4 bis 5	27,0
> 5 bis 6	0,8
> 6	0

Innerhalb des Stadtgebiets gelten 28,0 % der Siedlungs- und Gewerbeflächen als Kaltlufteinwirkbereich. Mehrheitlich handelt es sich dabei um Flächen in den Randbereichen – in der Innenstadt treten sie nur vereinzelt auf.

In Bremerhaven ist vor allem deshalb ein im Vergleich zu anderen Großstädten Deutschlands eher geringer Wärmeinseleffekt festzustellen, da aufgrund der vielen freien Flächen im niedersächsischen Bereich und der aufgelockerten Bebauung eine ausreichende Zufuhr von Frischluft, insbesondere in den städtischen Randbereichen, gegeben ist. Darüber hinaus sind viele der Industrieflächen und der verdichteten Siedlungsflächen an der Weser ansässig. Am Tag kann dies kühlend auf die Flächen wirken, während in der Nacht die Abkühlungsrate der Flächen aufgrund der Wärmespeicherkapazität des Wassers verringert wird. Dennoch findet während der Nacht gleichzeitig ein Transport von Frischluft von den Freiflächen nördlich von *Einswarden* über die rauigkeitsarme Weser statt (auch, wenn nur vergleichsweise wenige Flächen als Kaltlufteinwirkbereich gekennzeichnet sind). Vor allem auch während anderer Wetterlagen (Hauptwindrichtung Südwesten in Bremerhaven) ist diese geringe Hinderniswirkung der Weser relevant für den Transport von Frischluft in den Hafen-/Innenstadtbereich von Bremerhaven.

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. Wiesen, Weiden und 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. Kapitel 4.4).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltfluthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen (Abb. 17). Zudem werden **Flurwinde** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen. Der Übersichtlichkeit halber wurde das Windfeld in eine Auflösung von 300 m aggregiert.

Kaltluftaustauschbereiche verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander oder erfüllen eine wichtige Durchlüftungsfunktion und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Bereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Da Kaltluftaustauschbereiche selbst ebenfalls Kaltluft produzieren können, lassen sich Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf abgrenzen von den Flächen, die als mehr oder weniger reine „Transportwege“ fungieren. Die ausgewiesenen Bereiche sind vorwiegend thermisch induzierte und auf das Siedlungsgebiet ausgerichtete besonders relevante linienhafte oder flächenhafte Strukturen mit einer für das Stadtgebiet außergewöhnlichen Breite bzw. Länge, die Flurwinde in das Stadtgebiet hineinragen. Anzumerken ist, dass die thermisch induzierten Winde durch die geringe Reliefenergie im Untersuchungsgebiet kaum verstärkt werden. Für das Bremerhavener Stadtgebiet spielen flächenhafte Kaltluftabflüsse dementsprechend keine Rolle.

Insgesamt sind fünf Kaltluftaustauschbereiche für Bremerhaven ausgewiesen, die aufgrund ihrer Lage und Charakteristika als besonders wichtig für die großräumige Durchlüftung des Stadtgebiets gesehen werden. Sie verteilen sich rund um das Stadtgebiet (Stadtteile Leherheide, Lehe, Geestemünde und Wulsdorf) und sind an weitläufige Grünflächen (landwirtschaftliche Freiflächen im Ortsteil Buschkämpfen) und/oder Flussläufe (Geeste) angebunden.

Grünflächen wie der Speckenbüttler Park oder auch der Bürgerpark erfüllen eine wichtige klimatische Funktion, weil sie die angrenzende Bebauung mit Kaltluft speisen. Diese wird zum Teil auf den Flächen selbst produziert oder auch von den angrenzenden Freiflächen herantransportiert. Dennoch sind hier keine separaten Kaltluftaustauschbereiche ausgewiesen. Beispielsweise erfüllt der Ostteil des Speckenbüttler Parks nicht mehr die Weiterleitungsfunktion des im Westen eingezeichneten Kaltluftaustauschbereiches (Änderung der Strömungsrichtung). Darüber hinaus bremsen die nördlich gelegenen Siedlungsflächen die Strömungsgeschwindigkeit ab. Unabhängig von der Ausweisung als Kaltluftaustauschbereich ist die Relevanz dieser Grünflächen dennoch besonders hoch (siehe Kap. 6).

Das in der Klimaanalysekarte beschriebene Kaltluftprozessgeschehen und damit auch die ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen basieren auf der Annahme einer autochthonen Wetterlage. Während allochthoner Wetterlagen mit übergeordneten Windfeldern treten stadtklimatische Belastungssituationen i.d.R. weniger häufig in Erscheinung, doch gibt es auch unter diesen Bedingungen Bereiche, die als wichtige Strömungsachsen für das Stadtgebiet fungieren (Ventilationsbahnen). Da in knapp 27 % die Hauptströmungsrichtung Südwesten (Stadt Bremen 2018b) vorliegt, kann die Geeste und ihr umliegender Bereich als Ventilationsbahn dienen. Auch die Freiflächen der Luneplate sind wichtige Kaltluftentstehungsflächen, deren Frischluft teilweise Richtung Siedlung (Am Lunedeich) transportiert wird.



Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer deutlich überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate und speisen die Kaltluftaustauschbereiche bzw. reichen auch über diese hinaus. Die Kaltluftproduktionsrate der Bremerhavener Kaltluftentstehungsgebiete beträgt mindestens $8,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Mittelwert des Untersuchungsgebietes).

Kleinere Grünflächen und Parkareale bilden aufgrund ihrer geringen Ausdehnung kein eigenes Kaltluftprozessgeschehen aus. Daher spielen sie bei der nächtlichen Abkühlung angrenzender Siedlungsbereiche nur eine untergeordnete Rolle. Jedoch können sie tagsüber während sommerlicher Hochdrucklagen mit intensiver Sonneneinstrahlung und Wärmebelastung als „Klimaoase“ wirken und für kurzfristige Erholung für die Bevölkerung in klimatisch ungünstigen Siedlungsräumen sorgen. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie durch Schattenräume und Wasserflächen unterschiedliche Mikroklimata aufweisen.

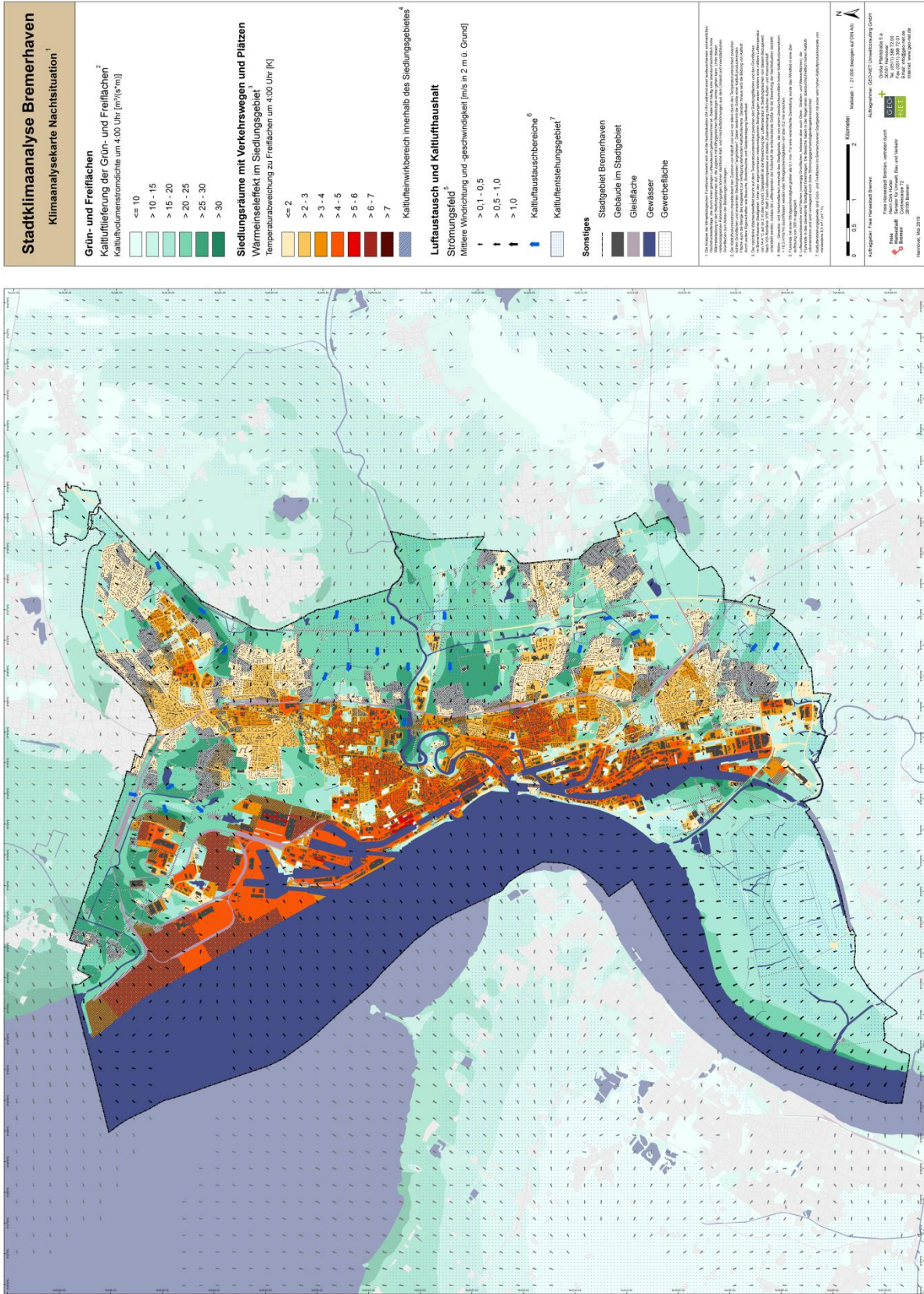


Abb. 17: Klimaanalysekarte für die Nachtsituation für das Bremerhavener Stadtgebiet.



6 Planungshinweiskarte

6.1 VORGEHENSWEISE

Neben der Klimaanalysekarte wurde eine Planungshinweiskarte (PHK) für die Nachtsituation (04 Uhr) während einer austauscharmen, sommerlichen Hochdruckwetterlage erstellt, die sich nur auf das Stadtgebiet Bremerhaven bezieht (Abb. 20). In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

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 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_1) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; Abb. 18).

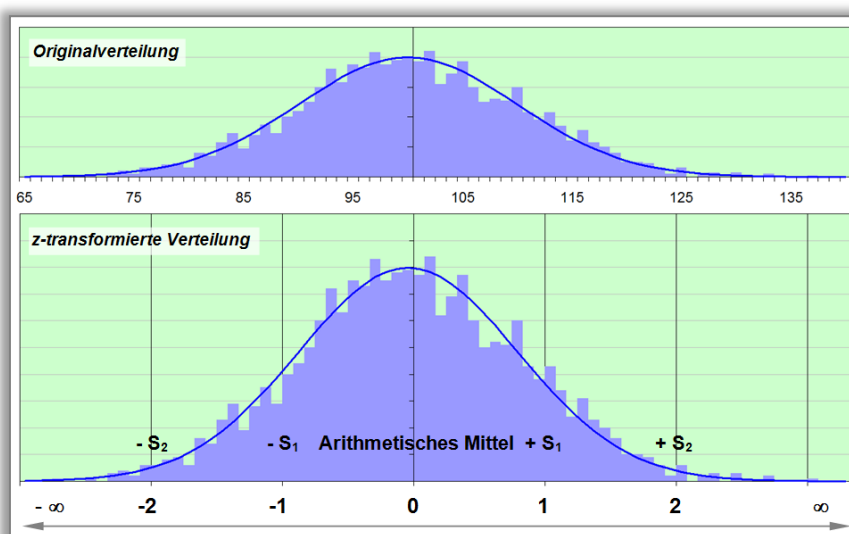


Abb. 18: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern (z-Transformation).



Tabelle 2: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Wirkungsraum in der Nacht (Lufttemperatur T_a). Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) des meteorologischen Parameters für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Bremerhaven.

Mittlerer z-Wert T_a	T_a [°C] (04:00 Uhr)	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 15,9	1 = Sehr günstig
> -1 bis 0	> 15,9 bis 17,3	2 = Günstig
> 0 bis 1	> 17,3 bis 18,7	3 = Mittel
> 1	> 18,7	4 = Ungünstig
Mittelwert (\pm sd)	17,3 (\pm 1,4)	

BEWERTUNG DER SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

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

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.

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 vier Klassen von *Sehr günstig* bis *Ungünstig* eingeteilt (Tabelle 2). 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. Da einige Fenster auch zur Straßenseite ausgerichtet sind, wurde zusätzlich der Straßenraum mitbewertet. Für den Straßenraum gilt in der Nachtsituation das gleiche Bewertungsschema wie für die Siedlungs- und Gewerbeflächen. Aufgrund der Modell-Auflösung von 50 m kann die Bewertung für den Straßenraum jedoch nur ein erster Anhaltspunkt sein. Ein (sehr) günstiges Siedlungsklima besteht, wenn die nächtliche Lufttemperatur von 17,3 °C nicht überschritten wird. Eine mittlere Bewertung liegt bei Temperaturen zwischen 17,3 und 18,7 °C vor. Bei Temperaturen über 18,7 °C besteht ein erhöhtes Risiko für Tropennächte, sodass in dem Falle von einer ungünstigen bioklimatischen Situation ausgegangen wird.

BEWERTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSPACE)

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 in 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 werden 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 bewertet.⁵ **Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.**

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltfluthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftentstehungsgebiete bzw. Grünflächen als Teil einer Kaltluftleitbahn 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* eingeteilt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms für die Frei- und Grünflächen des Stadtgebietes (z-Transformation).

Mittlerer z-Wert	Kaltluftvolumenstrom (04:00 Uhr) [m ³ s ⁻¹ m ⁻¹]	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 15,1	Gering
> -1 bis 0	> 15,1 bis 19,5	Mittel
> 0 bis 1	> 19,5 bis 23,9	Hoch
> 1	> 23,9	Sehr hoch

Zusätzlich wurde die Entfernung zu belasteten Siedlungsräumen berücksichtigt – da in der Nachtsituation die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht, wurden dabei der Bewertung nur Siedlungsflächen ohne Gewerbe zugrunde gelegt.

Im Einzelnen wurde folgender Bewertungsschlüssel verwendet:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

a) Grünflächen, die Teil einer Kaltluftaustauschfläche bzw. *Kaltluftentstehungsgebiet* sind.

Die Kaltluftaustauschflächen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Bereiche erfolgte manuell und orientierte sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation. Auch Grünflächen, die als Kaltluftentstehungsgebiete auf das Stadtgebiet ausgerichtete Kaltluftaustauschflächen speisen, sind von besonderer Bedeutung.

b) Freiflächen bzw. ≥ 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittlerer Situation* (bis 100 m).

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

⁵ 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.



Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünflächen, die direkt an Kaltluftaustauschflächen angrenzen.
- d) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittlerem Kaltluftvolumenstrom (KVS)* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* (bis 100 m).
- e) Mindestens 1 ha große Grünflächen im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* (bis 250 m).
- f) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Sehr hohem* bzw. Freiflächen mit mindestens *Hohem KVS* und Siedlungsbezug (außerhalb des in e) genannten Entfernungsbereichs, jedoch in maximal 1 km Entfernung zu Siedlungsgebieten).

Auch ohne Leitbahn-Funktion während autochthoner Sommernächte und direkten Siedlungsbezug können Grünflächen, darunter insb. Freiflächen, während anderer Wetterlagen eine wichtige Rolle für die Durchlüftung einer Stadt einnehmen.

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- g) Grünflächen < 1 ha mit *Geringem KVS* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* (bis 100 m).
Innerhalb vom Belastungsräumen sind auch Grünflächen ohne Funktion für den Kaltlufthaushalt wertvoll, da sie sich am Tage weniger stark aufheizen und entsprechend in der Nacht weniger Wärme abgeben.
- h) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittlerem KVS* im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* (bis 250 m).
- i) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit mindestens *Hohem KVS* bzw. übrige Freiflächen mit Siedlungsbezug (vgl. f)).
- j) Übrige Grünflächen mit mindestens *Hohem Kaltluftvolumenstrom*.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

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

6.2 ERGEBNISSE

SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Bei der Betrachtung der bioklimatischen Situation wird bei den Siedlungsflächen in „Wohnen“ und „Gewerbe“ unterschieden. Insbesondere die Kategorie „Wohnen“ ist für die bioklimatische Situation in der Nacht relevant, da sich die Bevölkerung nachts eher in ihrem privaten Wohnraum aufhält. Mischgebiete, in denen beide Varianten vorkommen, gelten in der Regel als Wohnflächen und nicht als Gewerbeflächen.

In der Planungshinweiskarte werden zum Gewerbe auch weitläufige versiegelte Flächen, wie beispielsweise die Hafentflächen gezählt. Abb. 19 gibt einen Überblick über die Aufteilung zwischen Gewerbe- und Wohnflächen.

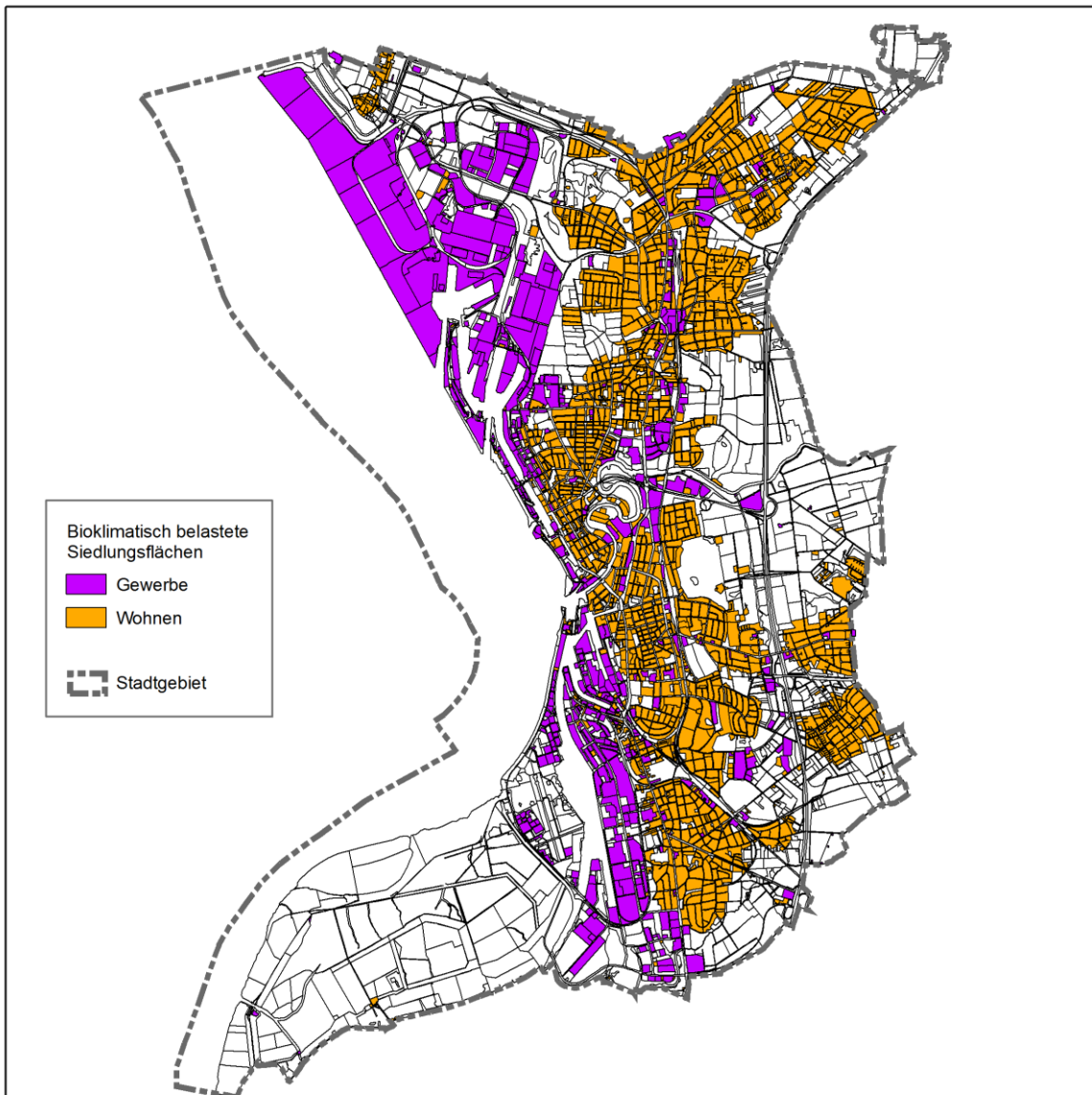


Abb. 19: Aufteilung der bioklimatisch belasteten Siedlungsflächen in Gewerbe- und Wohnnutzfläche.

Flächen mit einer *Ungünstigen bioklimatischen Situation* machen in der Kategorie „Wohnen“ den geringsten Anteil von 6,5 % aus (siehe Tabelle 4), betreffen allerdings große Bereiche der Innenstadt sowie des Ortsteils Goethestraße und teilweise der Ortsteile Geestemünde-Nord und Geestendorf. In den Gebieten nahe der Innenstadt ist ebenfalls eine erhöhte nächtliche Überwärmung vorzufinden (gesamstädtisch etwa 17 % Anteil *mittel* bewerteter Flächen), während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert (mehr als die Hälfte der Wohnflächen weist eine *Günstige bioklimatische Situation* auf). Im gering besiedelten und durch einen höheren Grünanteil geprägten Rand- und Außenbereich herrschen überwiegend *Sehr günstige* Verhältnisse vor (knapp 24 % der Gesamtfläche).

Die *mittel* und *ungünstig* bewerteten (Wohn-)Siedlungen machen zwar nur einen relativ geringen Flächenanteil aus, jedoch ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte in diesen Bereichen eine größere Bevölkerungsanzahl betroffen ist, als der Flächenanteil zunächst vermuten lässt.



Tabelle 4: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Wohnen	Gewerbe	
1 = Sehr günstig	23,8	5,2	<p>Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer aus bioklimatischer Sicht geringen Empfindlichkeit gegenüber moderaten 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 sowie die Bauhöhen gering gehalten werden. Für Siedlungsflächen mit einer besonderen klimatischen Funktion für angrenzende schlechter bewertete Siedlungsgebiete sind diese Hinweise besonders relevant. Die Bebauungsränder in Richtung angrenzender Siedlungen sollten offen gestaltet bleiben.</p>
2 = Günstig	52,6	9,2	<p>Aus bioklimatischer Sicht mittlere Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung ist im Hinblick auf die Kaltluftströmungen zu beachten, quer zur Strömungsrichtung ausgerichtete Gebäude sowie natürliche Hindernisse wie Baumgruppen quer zur Strömungsrichtung sind für eine Durchlüftung und Durchströmung hinderlich. Bestehende Gehölze sollten aber erhalten werden, auch in Hinblick auf ihre Bedeutung für die Tagsituation. Die Bauhöhe sollte gering gehalten werden. Bebauungsränder sollten geöffnet und dadurch eine Grünflächenvernetzung zum Freiland geschaffen werden. Vorhandene Freiflächen sollten erhalten und vernetzt werden und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden. Für Siedlungsflächen mit einer besonderen klimatischen Funktion für angrenzende schlechter bewertete Siedlungsgebiete sind diese Hinweise besonders relevant. Wie bei den mit <i>Sehr günstig</i> bewerteten Siedlungsflächen sollten die Bebauungsränder in Richtung angrenzender Siedlungen offen gestaltet bleiben bzw. vergrößert werden.</p>
3 = Mittel	17,1	45,9	<p>Aus bioklimatischer Sicht 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, beispielsweise durch Öffnung von Belüftungskorridoren und Vernetzung von Grün- und Freiflächen. Die Baukörperstellung ist im Hinblick auf die Kaltluftströmungen zu beachten, quer zur Strömungsrichtung ausgerichtete Gebäude sowie natürliche Hindernisse wie Baumgruppen quer zur Strömungsrichtung sind für eine Durchlüftung und Durchströmung hinderlich. Bestehende Gehölze sollten aber erhalten werden, auch in Hinblick auf ihre Bedeutung für die Tagsituation. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (Entsiegelung, ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen). Eine Entwicklung von Dach- und Fassadenbegrünung kann das Mikroklima ebenfalls begünstigen.</p>
4 = Ungünstig	6,5	39,7	<p>Aus bioklimatischer Sicht 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. Quer zur Strömungsrichtung ausgerichtete Gebäude sowie natürliche Hindernisse wie Baumgruppen quer zur Strömungsrichtung sind für eine Durchlüftung und Durchströmung hinderlich. Bestehende Gehölze sollten aber erhalten werden, auch in Hinblick auf ihre Bedeutung für die Tagsituation. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Entwicklung von Pocket-Parks, die als kleine „Klimaoasen“ dienen können, Begrünung von Blockinnenhöfen). Eine Entwicklung von Dach- und Fassadenbegrünung kann das Mikroklima auch auf kleinem Raum begünstigen.</p>



Um innerhalb der bioklimatisch ungünstigen Siedlungsgebiete besondere Problembereiche abgrenzen zu können, wurden in der Planungshinweiskarte Bevölkerungszahlen eingearbeitet. Der Datensatz wurde vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und beinhaltet Informationen zur Einwohnerzahl auf Basis der Baublockebene (Stand Januar 2019). Aus dem Datensatz wurde das 75%-Quantil der Bevölkerungsdichte (78,3 Einwohner/ha) berechnet, um das obere Viertel der Daten zu ermitteln. Dieses wurde mit den bioklimatisch ungünstigen Siedlungsflächen verschnitten. Dadurch werden ungünstige Siedlungsgebiete mit einer hohen Einwohnerzahl herausgestellt. Mithilfe dieser Selektion wird innerhalb der bioklimatisch ungünstigen Siedlungsgebiete eine weitere Einstufung vorgenommen, die besonders kritische Bereiche mit dem größten Handlungsbedarf auf Grundlage der dort lebenden Bevölkerung aufzeigt.

Tabelle 4 zeigt, dass sich bei den Gewerbeflächen die Flächenanteile deutlich verschieben. Der typischerweise hohe Versiegelungsgrad und geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, sodass etwa 85 % der Gewerbeflächen eine *Mittlere* oder *Ungünstige* und nur etwa 5 % eine *Sehr günstige bioklimatische Situation* aufweisen. 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.

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Mehr als der Hälfte der Grünflächen im Bremerhavener Stadtgebiet kommt eine *Hohe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (19,4 % bzw. 36,6 %, siehe Tabelle 5). Diese gilt in Bezug auf das derzeit vorhandene Siedlungsgebiet. 27,3 % der Frei- und Grünflächen weisen eine *Geringe Bedeutung* auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Ackerflächen bzw. Straßenbegleitgrün. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

Nicht nur im Bereich der Luftaustauschflächen liegen Grünflächen mit einer *Hohen* bis *Sehr hohen bioklimatischen Bedeutung* vor. So nimmt beispielsweise der Bürgerpark eine wichtige Ausgleichsfunktion für die angrenzenden Siedlungsflächen ein. Auch die Grünflächen am Stadtpark Speckenbüttel und entlang der Neuen Aue ermöglichen den Transport von Frischluft weit in das Stadtgebiet hinein.



Tabelle 5: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	27,3	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen aus bioklimatischer Sicht eine geringe Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen auf. Nicht vermeidbare bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.*
2 = Mittlere	16,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer aus bioklimatischer Sicht mittleren Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Nicht vermeidbare bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen, eine großflächige Verringerung des Grünflächenanteils sowie eine abriegelnde Bebauung zu angrenzenden Siedlungsgebieten sollten vermieden werden.*
3 = Hohe	19,4	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer aus bioklimatischer Sicht hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Zum Erhalt des Luftaustausches in die angrenzende Bebauung sollte bei nicht vermeidbaren baulichen Eingriffen die Gebäudeausrichtung parallel zur Strömungsrichtung erfolgen sowie die Bauhöhen möglichst gering gehalten werden. Abriegelnde Randbebauung oder dichte Baumbepflanzung sollte vermieden werden, der Baumbestand sollte in Form einer lockeren Bepflanzung optimiert werden. Grünflächen sollten erhalten und untereinander vernetzt werden.*
4 = Sehr hohe	36,6	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer aus bioklimatischer Sicht sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Folgenutzungen des an die Grünfläche angrenzenden Siedlungsgebiets sollten längs zur Windströmungsrichtung ausgerichtet werden. Der Strömungsquerschnitt sollte gesichert und bauliche oder sonstige Strömungshindernisse durchlässiger gestaltet oder entfernt werden. Abriegelnde Randbebauung oder eine geschlossenen Gehölzbepflanzung sollte vermieden werden, der Baumbestand sollte in Form einer lockeren Bepflanzung optimiert werden. Zur Verbesserung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).*

* Grundsätzlich ist eine bauliche Entwicklung im Bereich bislang unversiegelter Grünflächen als negativ zu bewerten und sollte vermieden werden. Wenn die Vermeidung von Nutzungsintensivierungen oder anderen baulichen Eingriffen nicht gänzlich möglich ist, sollten diese aus bioklimatischer Sicht in den Bereichen mit geringerer Bedeutung stattfinden, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen.

TAGSITUATION

Eine Modellierung und detaillierte Analyse der Tagsituation wurde nicht durchgeführt. Für einen vollständigen Überblick über klimaanpassende Maßnahmen werden stattdessen im Folgenden einige allgemeine Hinweise gegeben. Am Tage ist die Aufenthaltsqualität auf Straßen, Wegen und Plätzen von Bedeutung. Unter der Annahme eines autochthonen Sommertages mit geringer Bewölkung und ungehinderter Sonneneinstrahlung können insbesondere nicht verschattete Freiflächen eine erhöhte Wärmebelastung aufweisen. Hier können großkronige schattenspendende Bäume als eine Erholungszone dienen. Auch kleinräumige Grünareale mit geringer stadtklimatischer Relevanz können durch Verschattungen als „Klimaoasen“ und (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie durch Schattenräume und Wasserflächen unterschiedliche Mikroklimata aufweisen.



Maßnahmen, die begünstigend für die Abschwächung der Wärmebelastung am Tag sind, können jedoch gegenläufig wirken zu denen, die nachts für eine bioklimatische Entlastung sorgen. So weisen nicht verschattete Freiflächen zwar eine geringe Aufenthaltsqualität am Tage auf, können jedoch in der Nacht für einen günstigen bioklimatischen Effekt sorgen (Abkühlung, Durchströmbarkeit). Die Entwicklung einer Fläche ist dementsprechend einzelfallabhängig zu prüfen und anzupassen.

EINFLUSS DER LUFTHYGIENISCHEN ANALYSE

Unter Berücksichtigung der lufthygienischen Analyse werden in der Planungshinweiskarte „Bereiche mit erhöhter lufthygienischer Belastung“ ausgewiesen. Hier treten *Erhöhte* bis *Sehr hohe Belastungen* hinsichtlich der NO₂-Immission durch den Verkehr um 8 Uhr morgens (temporäre Verkehrsspitzenstunde) auf. Für eine differenziertere Darstellung sei auf die Themenkarte „NO₂-Belastung durch den Verkehr“ (Abb. 16) verwiesen. In Gebieten, die einer *Erhöhten* bis *Hohen Belastung* unterliegen, ist bei Maßnahmenplanungen eine besondere Berücksichtigung von immissionsempfindlichen Nutzungen wie Kindertagesstätten, Krankenhäusern und Seniorenheimen zu empfehlen. In Bereichen mit einer *Sehr hohen Belastung* sollten auch die Wohnsiedlungen betrachtet und das Thema Lufthygiene detailliert untersucht werden.

Des Weiteren wird in der Planungshinweiskarte ein Teil der Kaltluftaustauschbereiche als „Potentiell lufthygienisch belastet“ gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um Kaltluftaustauschbereiche, in denen zur temporären Verkehrsspitzenstunde um 8 Uhr eine erhöhte bis sehr hohe NO₂-Belastung durch den Verkehr auftritt. Die Luftbeimengungen werden mitunter in quellferne Gebiete transportiert und verursachen dort eine Erhöhung der Schadstoffbelastung.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse zeigen, dass es in Bremerhaven trotz des durch die Nordsee beeinflussten Klimas (vgl. Kapitel 2.2.2) thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt. Deren bioklimatische Situation sollte mindestens erhalten, möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftaustauschbereiche bzw. kleinräumige Ausgleichsströmungen sowie die stellenweise offene Bebauung durchströmt. Dennoch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab und fällt in der Innenstadt 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 Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen und insb. die Funktion der Kaltluftaustauschbereiche erhalten, d.h. auf deren Bebauung verzichtet werden. Darüber hinaus sollte auch die Hauptanströmungsrichtung aus dem Südwesten berücksichtigt werden, da im Jahr vergleichsweise wenige Schwachwindlagen auftreten (vgl. Kapitel 2.2.2). Hier sind die Bereiche der Geeste und die östlichen Freiflächen der Luneplate freizuhalten.



7 Zusammenfassung und Ausblick

Nach der Klimaanalyse für Bremen im Jahr 2013 weitet der vorliegende Bericht die Stadtklimaanalyse auf die zugehörige kreisfreie Stadt Bremerhaven aus. Das verwendete 50 m x 50 m-Raster entspricht dabei einem mesoskaligen Ansatz, welcher bereits in der Stadt Bremen Anwendung fand. Für jede Rasterzelle des ca. 420 km² großen Untersuchungsgebietes lagen repräsentative Daten zur Landnutzung, Geländehöhe, Strukturhöhe und zum Versiegelungsgrad vor. Diese Informationen dienten als Eingangsdaten für die Klimamodellierung mit dem Modell FITNAH 3D (vgl. Kapitel 3.3).

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation berechnet (vgl. Kapitel 4). Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel; vgl. Kapitel 3.2). Zur Inwertsetzung und Erstellung der Planungshinweiskarte wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

Die Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 5) spiegelt die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulicht die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeineffekt (maximal etwa 5 K höhere Temperaturen im Stadtkern verglichen mit den Grünflächen der Stadt). Außerdem bildet sie die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Landwind) und identifiziert fünf für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftaustauschbereiche unter dieser Wetterlage.

Des Weiteren wurde eine Lufthygieneanalyse bezüglich der NO₂-Immission der Quellgruppe Verkehr zu einer temporären Verkehrsspitzenstunde durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich im inneren Stadtgebiet aufgrund der verminderten Durchmischung der Luftmassen diverse kleinräumige Belastungsschwerpunkte bilden. Weiterhin ergeben sich relativ hohe NO₂-Immissionen entlang der *Grimbsbystraße*, der *Cherbourger Straße* und der Straßen *An der Mühle* und *Schiffdorfer Chaussee* aufgrund ihrer strömungsparallelen Ausrichtung.

Die Planungshinweiskarte für die Nachtsituation (vgl. Kapitel 6) quantifiziert die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume im Stadtgebiet Bremerhavens. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung die reinen Wohngebiete im Vordergrund stehen. In der Nacht belastete Siedlungsflächen treten insb. in der Innenstadt sowie den umliegenden Ortsteilen Goethestraße, Geestendorf, Geestemünde-Nord und Klushof auf, während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert. Eine Ausnahme bilden große Gewerbeflächen in den äußeren Bereichen, welche aufgrund ihres hohen Versiegelungsgrades ähnlich stark wie die Innenstadt belastet sind. Generell zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Wohngebieten und Industrie- bzw. Gewerbeflächen. Wohngebiete zeigen nachts mehrheitlich eine günstige Belastung, Gewerbeflächen dagegen oftmals mittlere bis ungünstige bioklimatische Bedingungen. Hervorzuheben ist, dass trotz der mehrheitlich günstigen Belastung der Wohngebiete (auf Basis des Flächenanteils), dicht besiedelte Siedlungsflächen wie in dem Ortsteil Goethestraße eine weniger günstige bioklimatische Situation aufweisen.

In der Nacht weisen über 55 % der Grünflächen eine hohe bis sehr hohe Bedeutung in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen auf. Während insb. innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage in der Regel eine positive Wirkung ausüben, steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten



Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber (hohe Einstrahlung).

Anzumerken ist, dass neben der klimatischen Belastungssituation es auch wichtig ist, demographische Daten in stadtplanerische Überlegungen einzubeziehen, da u.a. ein Zusammenhang zwischen thermischen Stress und Morbidität bzw. Mortalität sowie der Leistungsfähigkeit und dem Wohlbefinden einer Stadtbevölkerung besteht. Im Rahmen dieses Berichtes wurden auf Basis von Bevölkerungszahlen besonders kritische Bereiche mit einer bioklimatisch ungünstigen Situation und einer hohen Einwohnerzahl identifiziert.

Die vorliegende Arbeit hat den Status Quo der Stadt Bremerhaven untersucht, d.h. die angenommene Flächenkulisse basiert auf den zur Verfügung gestellten Daten sowie den aktuellen Luftbildern. Für diese Landnutzung wurde das Klima von heute angenommen und mit FITNAH 3D simuliert. In der durchgeführten Klimaanalyse bleiben zukünftige Entwicklungen, wie z.B. der klimatische Zustand, die Bebauung und Einwohnersituation späterer Dekaden unberücksichtigt. Ebenso wurden keine Vertiefungsgebiete betrachtet, um genauere Aussagen zu bestimmten Stadtstrukturen treffen zu können. Bei einer mikroskaligen Untersuchung (Rasterauflösung von 5 oder 10 m) können einzelne Bäume und Gebäude im Modell berücksichtigt werden. Dies ermöglicht detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima, insbesondere das Strömungsfeld und die gefühlte Temperatur am Tage. Eine mikroskalige Modellrechnung lässt außerdem eine genauere Untersuchung des Straßenraumes zu, während das Straßenklima bei der hier vorliegenden mesoskaligen Rechnung mit 50 m Rasterauflösung nicht ausreichend detailliert untersucht werden konnte.



Quellenverzeichnis

- Berlin (2015) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Planungshinweiskarte Stadtklima 2015. Begleitdokument zur Online-Version. Online: www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db411_01.htm
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (o.J.) – Deutscher Wetterdienst, Regionale Wetterberatung Stuttgart: Feinstaub in der Luft – wie das Wetter die Luftqualität beeinflusst; Online: https://www.esslingen.de/site/Esslingen-Internet-2016/get/params_E312232250/11803169/DWD%20Kriterien%20Feinstaub.pdf
- DWD (2017a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon
- DWD (2017b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- FLL (=Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (2000): Fassadenbegrünungsrichtlinie – Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen von Kletterpflanzen.
- Geo-Net (2013): Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen
- 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.
- 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. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 1, Wirkungen. Environmental Sciences Europe 2011: 23:11.
- Kuttler, W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. Environmental Sciences Europe 2011: 23:21.
- Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- 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.
- Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- Seestadt Bremerhaven (o.J.): Geografie; Online: <https://www.bremerhaven.de/de/verwaltung-politik/zahlen-fakten/geoografie.24030.html>. (Zugriff 15.01.2019)



- Seestadt Bremerhaven (2017): Statistischer Kurzbericht Oktober und November; Bevölkerungsstand am 30.09.2017.
- Seestadt Bremerhaven (2018): Bericht 2018 über die Verwaltung und den Stand der Stadtangelegenheiten
- Stadt Bremen (1992): Landschaftsprogramm Bremen - Teil Bremerhaven; herausgegeben vom Senator für Umweltschutz und Stadtentwicklung.
- Stadt Bremen (2018a): Klimaanpassungsstrategie Bremen. Bremerhaven; Begleitstudie Wetter und Klima im Land Bremen
- Stadt Bremen (2018b): Klimaanpassungsstrategie Bremen. Bremerhaven
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.
- Steinicke & Streifeneder (2012) - Steinicke & Streifeneder Umweltuntersuchungen GbR und Richter & Röckle Immissionen Meteorologie Akustik: Stadtklimaanalyse Braunschweig. Gutachten im Auftrag der Stadt Braunschweig.
- UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur. Online: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.
- 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 Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.
- Xue, F., Xiaofeng Li, Zhiqin Zhang (2014): Numerical Study on Thermal Environment around the Fountain, Proceedings 7. Japanese-German Meeting, Hannover.



Anhang

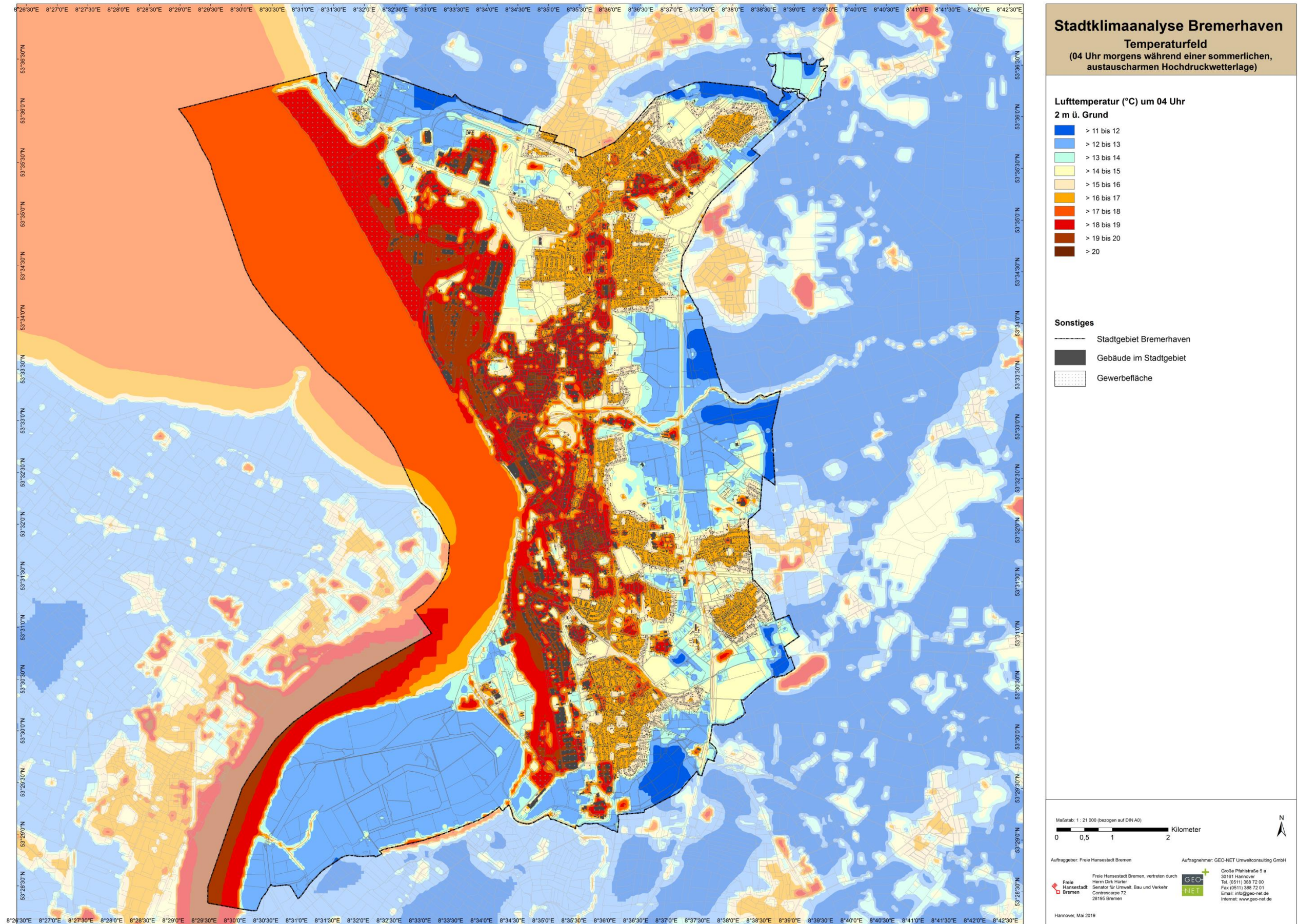
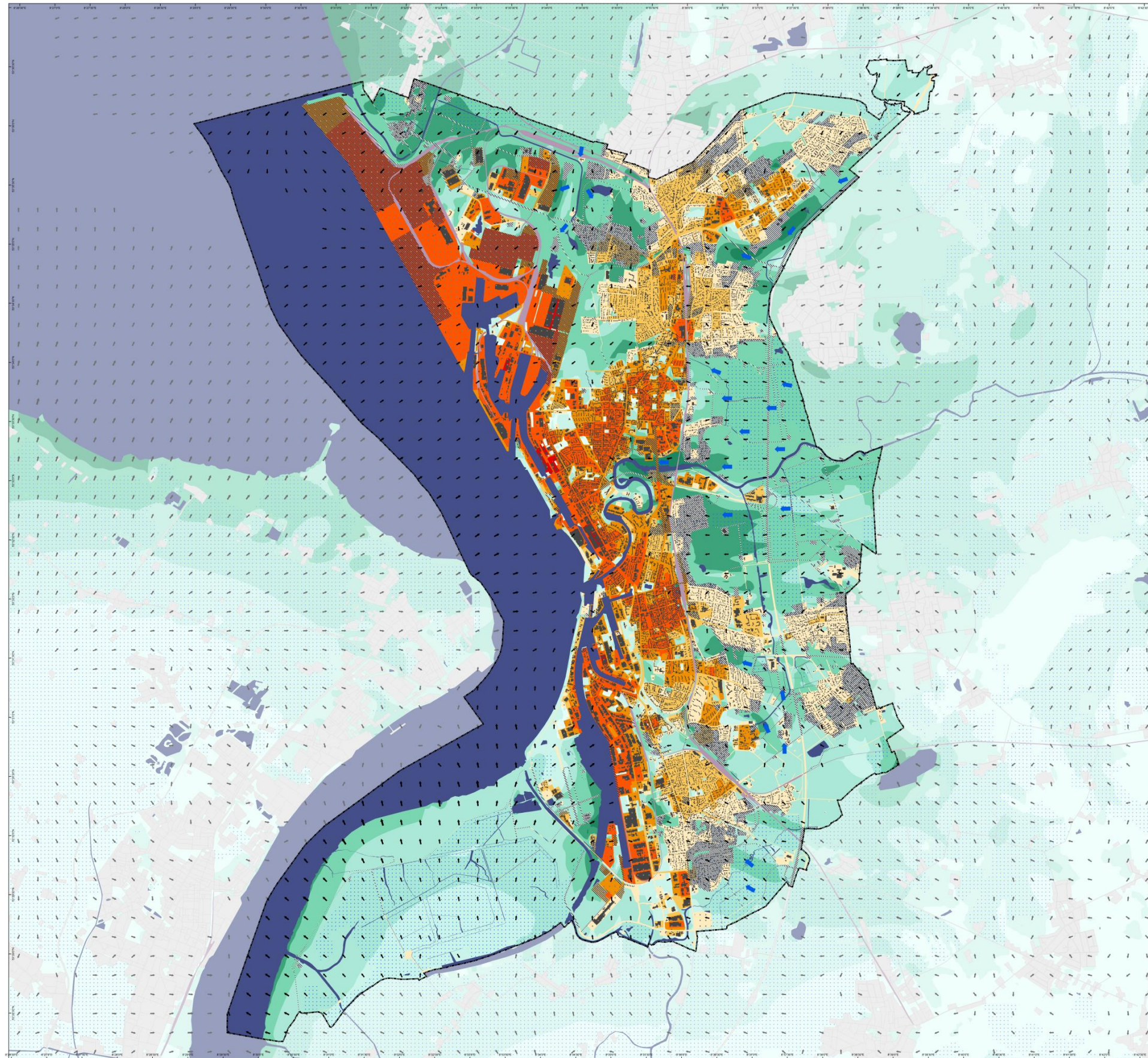


Abb. 21: Temperaturfeld um 04 Uhr morgens für das Bremerhavener Stadtgebiet.



Stadtklimaanalyse Bremerhaven

Klimaanalysekarte Nachtsituation¹

Grün- und Freiflächen
Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen²
Kaltluftvolumenstromdichte um 4:00 Uhr [m³/(s*m)]

- <= 10
- > 10 - 15
- > 15 - 20
- > 20 - 25
- > 25 - 30
- > 30

Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen
Wärmeineffekt im Siedlungsgebiet³
Temperaturabweichung zu Freiflächen um 4:00 Uhr [K]

- <= 2
- > 2 - 3
- > 3 - 4
- > 4 - 5
- > 5 - 6
- > 6 - 7
- > 7

■ Kaltluftfeinwirkungsbereich innerhalb des Siedlungsgebietes⁴

Luftaustausch und Kaltfluthaushalt
Strömungsfeld⁵
Mittlere Windrichtung und -geschwindigkeit [m/s in 2 m ü. Grund]

- > 0,1 - 0,5
- > 0,5 - 1,0
- > 1,0

↑ Kaltluftaustauschbereiche⁶
■ Kaltluftentstehungsgebiet⁷

Sonstiges

- Stadtgebiet Bremerhaven
- Gebäude im Stadtgebiet
- Gleisfläche
- Gewässer
- Gewerbefläche

1. Die Analyse der klimakologischen Funktionen bezieht sich auf die Nachtsituation (04 Uhr) während einer ausgleichsarmen sommerlichen Hochdruckwetterlage, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Dabei tritt häufig eine überdurchschnittlich hohe Wärmebelastung in den Siedlungsräumen auf, die zugleich mit kalteffizienten Belastungen einher gehen kann. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Fruchtluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.

2. Der Kaltluftvolumenstrom charakterisiert den Zustand von Kaltluft und wird vor allem durch den Temperaturunterschied zwischen kalten Grünflächen und erwärmten Siedlungsräumen "angetrieben". Dabei bestimmt die Größe einer Kaltluft produzierenden Fläche auch die Menge des insgesamt zur Verfügung stehenden Kaltluftvolumens. Darüber hinaus sind die Bildung von Kaltluft durch weitere Eigenschaften wie Bewuchs, Bodenfeuchte und Geländehöhe beeinflusst.

3. Der städtische Wärmeinseleffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen den Siedlungsflächen und den Grünflächen im Bremerhavener Stadtgebiet. Unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen weisen letztere eine mittlere Lufttemperatur von 14,4 °C auf (2 m über Grund). Dargestellt ist die Abweichung der Lufttemperatur in Siedlungsräumen von diesem Bezugswert. Nach VDI Richtlinie 2187, Blatt 2 kann näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innentemperatur festgestellt werden, sodass die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe für die Bewertung der Nachtsituation darstellt.

4. Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen innerhalb des Stadtgebietes, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 16,3 m³/(s*m) durchflossen werden oder Windgeschwindigkeiten von über 0,2 m/s erreichen.

5. Flunetze mit einer Windgeschwindigkeit größer als 0,1 m/s. Für eine vereinfachte Darstellung wurde das Windfeld in eine Zeilenaufteilung von 300 m gegliedert.

6. Luftaustauschbereiche sind Flächen (vorwiegend Grünflächen, teilweise aber auch Gleis-, Straßen- und Wasserflächen), die Flunetze in das überarme Stadtgebiet hineintragen. Die Bereiche haben in der Regel einen überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom und sind vorwiegend durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten gekennzeichnet.

7. Kaltluftentstehungsgebiete sind Grün- und Freiflächen im Bremerhavener Stadtgebiet mit einer sehr hohen Kaltluftproduktionsrate von mindestens 8,4 m³/(s*m).

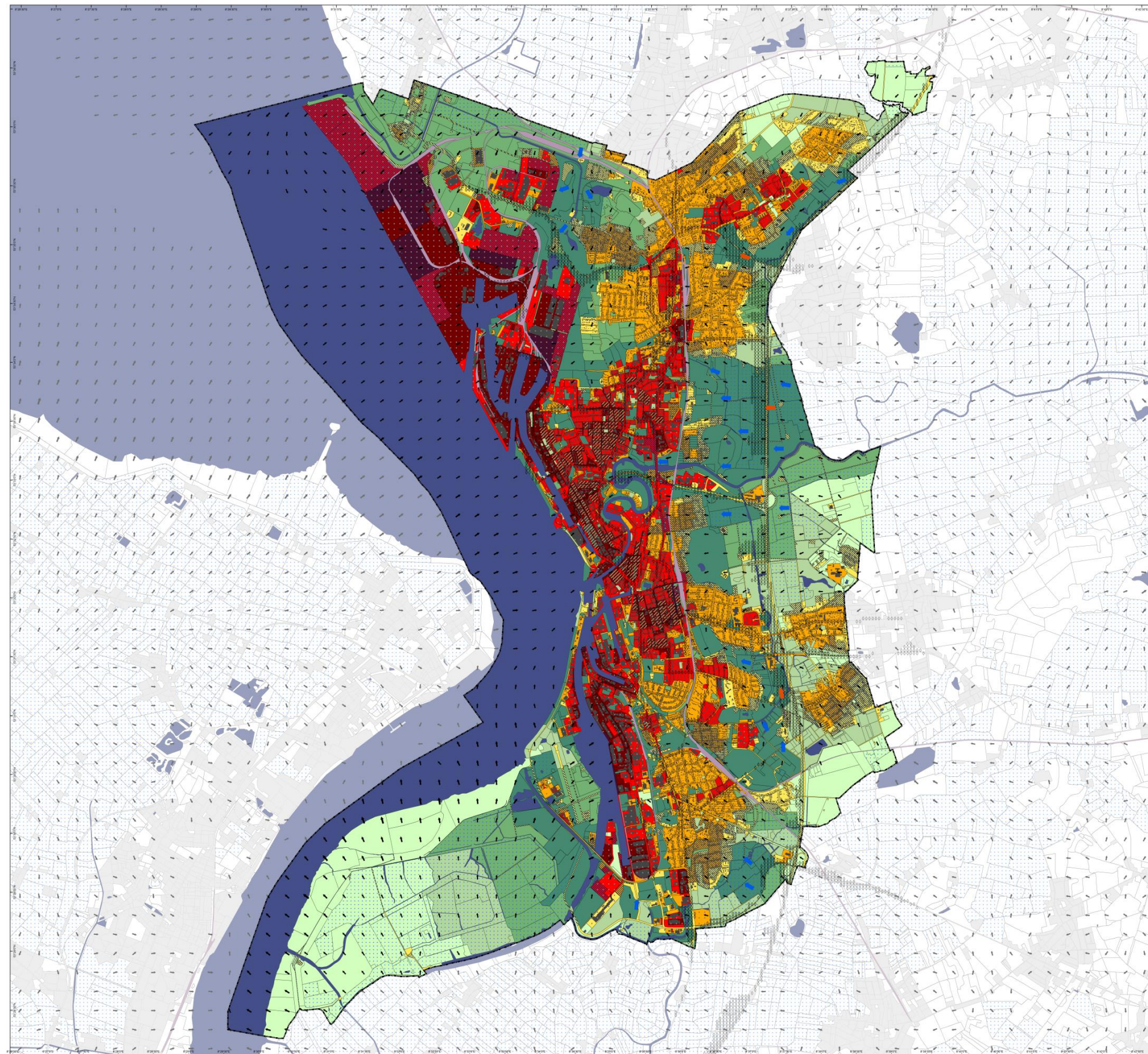
0 0,5 1 2 Kilometer Maßstab: 1 : 21 000 (bezogen auf DIN A0)

Auftraggeber: Freie Hansestadt Bremen
 Freie Hansestadt Bremen, vertreten durch
 Herrn Dirk Hüter
 Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
 Contrastcarp 72
 28195 Bremen

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
 Große Platze 5 a
 30161 Hannover
 Tel. (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 Email: info@geo-net.de
 Internet: www.geo-net.de

Hannover, Mai 2019

Abb. 22: Klimaanalysekarte für die Nachtsituation für das Bremerhavener Stadtgebiet.



Stadtklimaanalyse Bremerhaven

Planungshinweiskarte Nachtsituation¹

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 aus bioklimatischer Sicht sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die Planungshinweise für Grünflächen mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung sind zu beachten (s. Tabelle 5 im Bericht).
- **Hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer aus bioklimatischer Sicht hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die Planungshinweise für Grünflächen mit hoher bioklimatischer Bedeutung sind zu beachten (s. Tabelle 5 im Bericht).
- **Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer aus bioklimatischer Sicht mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die Planungshinweise für Grünflächen mit mittlerer bioklimatischer Bedeutung sind zu beachten (s. Tabelle 5 im Bericht).
- **Geringe bioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen aus bioklimatischer Sicht eine geringe Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen auf. Die Planungshinweise für Grünflächen mit geringer bioklimatischer Bedeutung sind zu beachten (s. Tabelle 5 im Bericht).

Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen
- 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 aus bioklimatischer Sicht geringen Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Die Planungshinweise für Siedlungsgebiete mit sehr günstiger bioklimatischer Situation sind zu beachten (s. Tabelle 4 im Bericht).
- **Günstige bioklimatische Situation**
Aus bioklimatischer Sicht mittlere Empfindlichkeit gegenüber moderaten Nutzungsintensivierungen. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Planungshinweise für Siedlungsgebiete mit günstiger bioklimatischer Situation sind zu beachten (s. Tabelle 4 im Bericht).
- **Mittlere bioklimatische Situation**
Aus bioklimatischer Sicht hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Die Planungshinweise für Siedlungsgebiete mit mittlerer bioklimatischer Situation sind zu beachten (s. Tabelle 4 im Bericht).
- **Ungünstige bioklimatische Situation**
Aus bioklimatischer Sicht sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Die Planungshinweise für Siedlungsgebiete mit ungünstiger bioklimatischer Situation sind zu beachten (s. Tabelle 4 im Bericht).

Luftaustausch und Kaltlufthaushalt
Strömungsfeld²
 Mittlere Windrichtung und -geschwindigkeit (m/s in 2 m ü. Grund)

- ↑ > 0,1 - 0,5
- ↑ > 0,5 - 1,0
- ↑ > 1,0

- ↑ **Kaltluftaustauschbereiche³**
- ↑ **Potentielle lufthygienisch belastete Kaltluftaustauschbereiche⁴**
- Kaltluftstehungsgebiet⁵**
- Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb des Siedlungsgebietes⁶**
- Siedlungsflächen mit klimarelevanter Funktion⁷**
- ◇ **Bereiche mit erhöhter lufthygienischer Belastung⁸**
- Bioklimatisch ungünstige Siedlungsgebiete mit hoher Einwohnerdichte⁹**

Sonstiges

- Stadtgebiet Bremerhaven**
- Gebäude im Stadtgebiet**
- Gleisfläche**
- Gewässer**
- Gewerbefläche**

1. Die Analyse der klimatologischen Funktionen beruht sich auf die Nachtsituation (04 Uhr) während einer austauschenden sommerlichen Hochdruckverlagerung, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Dabei tritt häufig eine überdurchschnittlich hohe Wärmelastung in den Siedlungsräumen auf, die zugleich mit Lufthygienischen Belastungen einher gehen kann. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.
 2. Flusswinde mit einer Windgeschwindigkeit größer als 0,1 m/s. Für eine vereinfachte Darstellung wurde das Windfeld in eine Zeileufteilung von 300 m aggregiert.
 3. Kaltluftaustauschbereiche sind Flächen (vorwiegend Grünflächen, teilweise aber auch Dächer, Straßen und Wasserflächen), die Fluvine in das überkritische Stadtgebiet hineinragen. Die Bereiche haben in der Regel einen überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom und sind vorwiegend durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten gekennzeichnet.
 4. Für die Strömung der Kaltluftaustauschbereiche über Luftschadstoff-Emissionsquellen hinweg, werden die Luftbewegungen in städtischen Gebieten transportiert und verursachen dort eine Erhöhung der Luftschadstoffbelastung.
 5. Kaltluftstehungsgebiete sind Grün- und Freiflächen im Bremerhavener Stadtgebiet mit einer sehr hohen Kaltluftvolumenstrom von mindestens 8,4 m³ / (m² * s).
 6. Höher-, Gewerbe- und Industriegebiete innerhalb des Stadtgebietes, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 18,3 m³/(m²*s) durchfließen werden oder Windgeschwindigkeiten von über 0,2 m/s erreichen.
 7. Siedlungsgebiete mit Kaltluftströmung in Richtung angrenzender Siedlungsgebiete über mit geringerer Wirkung für angrenzende belastete Siedlungsgebiete. Möglichst keine weitere relevante Verdichtung.
 8. Bereiche mit einer erhöhten bis sehr hohen Belastung hinsichtlich der NO2-Exposition zur typischen Verkehrssituation zum 8. Uhr. Weitere Informationen liefert die Themenkarte "NO2-Belastung durch den Verkehr".
 9. Bioklimatisch ungünstige Siedlungsflächen mit einer Einwohnerdichte von mindestens 78,3 EV/ha (70% Quartil).

0 0,5 1 2 Kilometer Maßstab: 1 : 21 000 (bezogen auf DIN A0)

Auftraggeber: Freie Hansestadt Bremen
 Freie Hansestadt Bremen, vertreten durch
 Herrn Dirk Hüter
 Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
 Contreescape 72
 28195 Bremen

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
 GEO-NET
 Große Planstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel. (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 Email: info@geo-net.de
 Internet: www.geo-net.de

Hannover, Mai 2019

Abb. 23: Planungshinweiskarte für die Nachtsituation für das Bremerhavener Stadtgebiet.