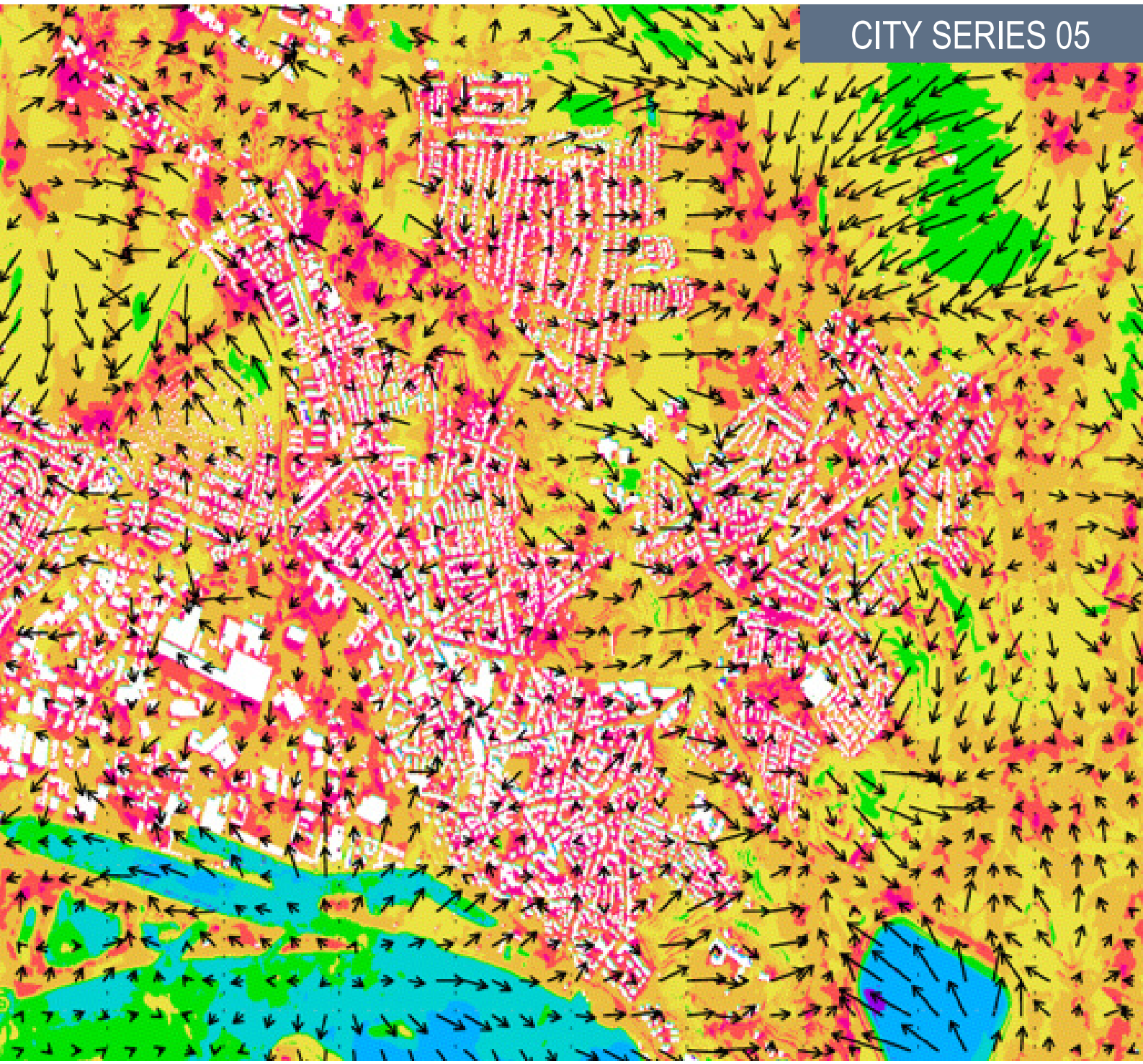


Eine Stadtklimamodellierung für zentrale Bereiche des Stadtgebiets Geesthacht unter Nutzung des Modells PALM-4U

CITY SERIES 05



Eine Stadtklimamodellierung für zentrale Bereiche des Stadtgebiets Geesthacht unter Nutzung des Modells PALM-4U

Steffen Bender, Markus Groth, Martina Schubert-Frisius, Janna-Malin Gehrke

Februar 2023

Titelbild: GERICS 2023.

Zitierhinweis: Bender, S., Groth, M., Schubert-Frisius, M. & Gehrke, J.-M (2023): Eine Stadtklimamodellierung für zentrale Bereiche des Stadtgebiets Geesthacht unter Nutzung des Modells PALM-4U, Climate Service Center Germany (GERICS), Hamburg.

Erscheinungsdatum: Februar 2023.

Dieser Report ist auch online unter www.climate-service-center.de erhältlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Methodik	6
2.1. Stadtklimamodellierung	6
2.2. Das Simulations-Setup „Stadt Geesthacht“	7
2.3. Beurteilung des thermischen Komforts.....	8
3. Die Modellgebiete	10
4. Das Modellgebiet „Stadt Geesthacht“ – Ergebnisse	13
4.1. Oberflächentemperatur	13
4.2. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe.....	14
4.3. Universal Thermal Climate Index (UTCI).....	15
4.4. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)	16
5. Das Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“ – Ergebnisse	17
5.1. Lage	17
5.2. Oberflächentemperatur	17
5.3. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe.....	19
5.4. Universal Thermal Climate Index (UTCI).....	20
5.5. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)	21
6. Das Modellteilgebiet „Hansastraße“ – Ergebnisse	22
6.1. Lage	22
6.2. Oberflächentemperatur	23
6.3. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe.....	24
6.4. Universal Thermal Climate index (UTCI).....	25
6.5. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)	26
7. Ergebnisse auf einen Blick	27
8. Literatur	29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Geometrie des Modellgebiets.....	7
Abb. 2: Modell-Eingangsgröße: Temperaturverlauf des verwendeten Sommertags.....	7
Abb. 3: Die Komponenten zur Berechnung des thermischen Komforts (eigene Darstellung).....	9
Abb. 4: PALM-4U-Modellgebiet „Stadt Geesthacht“ im Luftbild (Aufnahme von 2018; Stadt Geesthacht und Landkreis Herzogtum Lauenburg).....	10
Abb. 5: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellgebiet „Stadt Geesthacht“.....	11
Abb. 6: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.....	12
Abb. 7: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellteilgebiet „Hansastraße“.....	12
Abb. 8: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.....	13
Abb. 9: Temperatur in 2 m Höhe und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.....	14
Abb. 10: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.....	15
Abb. 11: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.....	16
Abb. 12: Lage im Modellgebiet (oben links) und Landnutzung (rechts) des Modellteilgebiets „Geesthachter Straße“.....	17
Abb. 13: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.....	18
Abb. 14: Temperatur (in 2 m Höhe) und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.....	19
Abb. 15: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.....	20
Abb. 16: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.....	21
Abb. 17: Lage im Modellgebiet (oben links), Landnutzung (rechts) des Modellteilgebietes „Hansastraße“.....	22
Abb. 18: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.....	23
Abb. 19: Temperatur (in 2 m Höhe) und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.....	24
Abb. 20: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.....	25
Abb. 21: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.....	26

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Gegenüberstellung von Klassifikationsmethoden zur Beschreibung der thermischen Wahrnehmung.....	9
---	---

1. Einleitung

Der vom Menschen verursachte Klimawandel hat weitreichende Auswirkungen. So treten auch in Europa häufiger Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Waldbrände, Überschwemmungen und Dürren mit zunehmender Intensität auf (IPCC 2022). Eine große Bedeutung kommt im Zuge dessen den steigenden Hitzebelastungen zu, die auch in Europa und Deutschland immer spürbarer werden. Im direkten Vergleich erwärmt sich Europa beispielsweise schneller als der globale Durchschnitt, wobei 2020 das bislang wärmste Jahr war (EEA 2021). Und auch deutschlandweit verschieben sich in Folge des Klimawandels die Temperaturverteilungen hin zu höheren Werten, wodurch die Eintrittswahrscheinlichkeit von extremer Hitze steigt (Deutschländer & Mächel 2017). Für Geesthacht zeigen regionale Klimaänderungsinformationen beispielsweise eine zukünftig zu erwartende Zunahme bei der Anzahl der Sommertage (Tageshöchsttemperatur über 25°C), der heißen Tage (Tageshöchsttemperatur über 30°C) und der Tropennächte (Tagesmindesttemperatur über 20°C) (Pfeifer et al. 2021).

Generell variieren die Auswirkungen der zunehmenden Hitze je nachdem, wie anfällig die betroffenen Menschen, Stadtteile oder Regionen sind (IPCC 2014). So sind beispielsweise ältere Menschen, Kinder, Gruppen mit niedrigem sozioökonomischem Status und Menschen mit gesundheitlichen Problemen tendenziell anfälliger für die Auswirkungen des Klimawandels als die allgemeine Bevölkerung (GERICS 2020). Die Gesundheit von Menschen mit bestimmten Krankheiten (z.B. Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen oder Diabetes) wird ebenfalls stärker durch Hitze beeinträchtigt, womit oft ein höheres Risiko eines hitzebedingten Todes einhergeht (European Climate and Health Observatory 2022, EEA 2018). Auch schwangere Frauen sind anfälliger für Hitzebelastungen, wobei Überhitzung und Dehydrierung zu frühzeitigen Wehen führen können (WHO Europe 2021). Von großer Bedeutung ist auch, dass die Kombination aus einer steigenden Zahl von Menschen über 65 Jahren und höheren Sommertemperaturen dazu geführt hat, dass die Gesamtexposition älterer Menschen gegenüber Hitzewellen seit 1980 zugenommen hat (European Climate and Health Observatory 2021).

Insgesamt sind die negativen Auswirkungen von Hitze auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen also klar belegt (GERICS 2020; Hanefeld et al. 2019, Muthers et al 2017), wobei vor allem sehr warme Nächte dazu führen können, dass sich der Körper nicht mehr richtig regenerieren kann, wodurch das allgemeine Erkrankungsrisiko steigt. Insgesamt führt Hitze somit nachweislich nicht nur zu einer sinkenden Arbeitsproduktivität, sondern auch zu weiteren und mitunter gravierenden ökonomischen Konsequenzen, wobei sich die entsprechenden Kosten oft nur langsam entwickeln und sie oft wenig sichtbar sind. Doch zusammengefasst gehen auf Hitzeereignisse rund 99 Prozent der mindestens über 30.000 extremwetterbedingten Todesfälle in Deutschland seit dem Jahr 2000 zurück (Trenczek et al. 2022a; Trenczek et al. 2022b).

Nicht zuletzt aufgrund dieser gravierenden Auswirkungen, sind immer häufiger auch rechtliche Fragen (Groth et al. 2021) sowie Belange des Denkmalschutzes (Groth et al. 2022) in die praktische Diskussion und Abwägung des zukünftigen Umgangs mit zunehmenden klimawandelbedingten Hitzebelastungen einzubeziehen. Aus stadtplanerischer Perspektive sind vor diesem Hintergrund beispielsweise Regelungen des Baugesetzbuchs relevant und zu berücksichtigen. So bestimmt § 1 Abs. 5 BauGB, dass die Bauleitpläne dazu beitragen sollen, den Klimaschutz und die Anpassung an die Folgen des Klimawandels – insbesondere auch in der Stadtentwicklung – zu fördern. § 136 Abs. 2 BauGB lautet

sogar wie folgt: »Städtebauliche Missstände liegen vor, wenn das Gebiet [...] den Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse [...] auch unter Berücksichtigung der Belange [...] der Klimaanpassung nicht entspricht«. Somit kann mit vielerorts bereits spür- und messbaren Hitzebelastungen (Bender et al. 2022) auch ein städtebaulicher Missstand einhergehen, den es zu erkennen und durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels zu überwinden gilt (Groth et al. 2022).

Insbesondere in Städten erhöhen langanhaltende Hitzewellen die Wärmebelastung, da diese nur langsam wieder abkühlen. Dies gilt nicht nur für große, sondern auch für kleinere Städte. Gründe dafür sind beispielsweise die verwendeten Baumaterialien, die viel Wärme speichern können, ein hoher Versiegelungsgrad, der für eine geringere Verdunstungskühlung sorgt sowie die Abwärme aus technischen Anlagen oder dem Verkehr. Durch die Zunahme der Bevölkerung in den Städten und den damit verbundenen Bauaktivitäten erhöht sich zudem das Risiko der weiteren Überhitzung (Offermann et al. 2022).

Generell reagieren viele Systeme einer Stadt sensibel auf die Veränderungen des Klimas. Um den Folgen des Klimawandels durch bauliche Maßnahmen entgegen zu wirken, müssen längere Zeiträume betrachtet werden. Dies ist einerseits dadurch begründet, dass die Schritte von der Planung zur Umsetzung oft mehrere Jahre in Anspruch nehmen und andererseits dadurch, dass die Gebäude und Bauwerke mehrere Dekaden – auch unter den sich verändernden klimatischen Rahmenbedingungen – ihre Funktionalität erhalten sollen. Daher müssen aus Sicht der Stadtplanung schon heute die zu erwartenden Klimaveränderungen in Planungen miteinbezogen werden, um sich an die Folgen des Klimawandels anpassen zu können (Bender et al. 2022).

Im Hinblick auf Fragen zu möglichen Hitzebelastungen bilden Stadtklimamodelle eine wichtige Grundlage für planerische Entscheidungen. Mit ihnen kann ein digitales Modell der Kommune erstellt werden, um das aktuelle oder das zukünftige Stadtklima einschließlich potentiell besonders betroffener Bereiche (Hot-Spots) zu simulieren. Das mit den Modellen berechnete Stadtklima beschreibt die klimatische Situation unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit Freiflächen, bebauten Flächen, Gebäuden, Gewässern, Verkehr und urbanem Grün (Matzarakis 2018). So geben beispielsweise über den Tagesverlauf aufgeheizte Gebäude ihre Wärme nachts ab, wodurch die nächtliche Abkühlung in der Stadt vermindert wird. Je höher der Gebäudeanteil und der Versiegelungsgrad in einer Stadt sind, desto größer wird dieser Effekt. Darüber hinaus beeinflussen die Baustruktur, die Bauhöhe sowie die Anordnung und Dichte von Bauwerken die Zufuhr und Zirkulation von Kaltluft.

Vor diesem Hintergrund wird es für Kommunen immer wichtiger, die zukünftigen klimatischen Herausforderungen und Anpassungsmaßnahmen zur Minderung oder Vermeidung der negativen Auswirkungen der Klimaveränderungen zu kennen. Um Kommunen hierbei zu unterstützen, werden im Rahmen einer prototypischen Produktentwicklung bedarfsgerecht neue Module für den GERICS-Stadtbaukasten (Bender et al. 2017)¹ in Zusammenarbeit mit der Stadt Geesthacht entwickelt und angewendet. Ziel ist es, kleineren Kommunen zu zeigen, dass digitale Modelle einer Kommune gute Planungswerkzeuge sein können, um mögliche Folgen des Klimawandels abzuschätzen. Zur

¹ Weitere Informationen und Publikationen zum GERICS-Stadtbaukasten sind online verfügbar: https://www.gerics.de/products_and_publications/toolkits/stadtbaukasten/index.php.de.

Beantwortung von Fragen aus dem Bereich „Hitzebelastung und thermischer Komfort“ – einer häufig als zentral erachteten kommunalen Herausforderung (Bender et al. 2022) – wird exemplarisch das frei zugängliche und kostenlos verfügbare Stadtklimamodell PALM-4U verwendet. In Absprache mit dem Fachbereich Umwelt und Bauen der Stadt Geesthacht wird die aktuelle Situation der Hitzebelastung für den zentralen Bereich der Stadt mit einem Fokus auf die Modellteilgebiete „Geesthachter Straße“ und „Hansastraße“ betrachtet.

Mit der Stadtklimamodellierung sollen vor allem folgende Fragen beantwortet werden:

- In welchen Bereichen der Stadt tritt schon heute eine große Hitzebelastung auf?
- Gibt es Stadtstrukturen, die einen günstigeren thermischen Komfort aufweisen?
- Welcher Einfluss ist durch eine mögliche Nachverdichtung in den betrachteten Modellteilgebieten zu erwarten und wie könnten dort Anpassungsmaßnahmen ausgestaltet sein?

2. Methodik

2.1. Stadtklimamodellierung

Zur Simulation des derzeitigen thermischen Komforts und der Hitzebelastung in der Stadt Geesthacht wurde das an der Leibniz Universität Hannover entwickelte, hochauflösende Stadtklimamodell PALM-4U (**P**arallelized **L**arge-eddy Simulation **M**odel **f**or **U**rban Applications) angewendet (Maronga et al. 2020, Steuri et al. 2019). PALM-4U ist die Weiterentwicklung des Basis-Modells PALM (Raasch & Schröder 2001), das bereits häufig für Stadtklimaanalysen eingesetzt wurde (Knoop et al. 2014, Letzel et al. 2012, Park & Baik 2012).

Mit dem Modell Palm-4U können sowohl ganze Städte als auch einzelne Stadtquartiere bis hin zu einer Auflösung von 1 bis 2 m simuliert werden. Als externer Antrieb für die Berechnungen werden exemplarische Wettersituationen vorgegeben. Als weitere Eingangsgrößen benötigt das Modell geobasierte Informationen über Gelände, Gebäude, Vegetation, versiegelte Flächen und Wasserflächen (Heldens et al. 2020). Als Ergebnis liefert das Modell räumliche Informationen zu Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind (Geschwindigkeit und Richtung) sowie zu biometeorologischen Parametern. Diese Parameter beziehen sich immer auf den Menschen und geben Auskunft über das menschliche Wohlbefinden beziehungsweise über die physiologische Wärmebelastung (Fröhlich & Matzarakis 2019, Kuttler 2009). PALM-4U verwendet dazu die beiden gebräuchlichen thermischen Kennziffern Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) (Matzarakis et al. 1999) und den Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Błażejczyk et al. 2013).

Für die hier durchgeführte Stadtklimamodellierung wurde die PALM-4U Version 21.10-rc1 mit den folgenden Eingangsdaten (Angabe der Quelle) verwendet:

- Luftbilder (sichtbar): Auflösung 0,2 m (Stadtverwaltung Geesthacht)
- Luftbilder (Infrarot) (Kreis Herzogtum Lauenburg)
- Oberflächenmodell als Rasterdaten mit der Gitterweite 1 m (Digitales Geländemodell: DGM1) (Stadtverwaltung Geesthacht)
- Digitales Landschaftsmodell (DLM) zur Beschreibung der Topographie der Landschaft und des Reliefs der Erdoberfläche im Vektorformat beziehungsweise Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit der Gitterweite 1 m (Stadtverwaltung Geesthacht). Die Höhengenaugigkeit beträgt für feste Flächen ohne Bewuchs $\leq 0,3$ m
- Landnutzungsdaten als Shape-File oder Feature Class (Grünflächen, Bäume, Verkehrsflächen) basierend auf Daten von Corine Land Cover (CLC) sowie der Stadtverwaltung Geesthacht
- Gebäudeinformationen des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems (ALKIS): Beispielsweise Angaben zur Geometrie, Lage und Form von Flurstücken und Gebäuden, Nutzungsart, Geländeform (Stadtverwaltung Geesthacht)
- Digitale 3D-Gebäudemodelle; „Level of Detail“ (LOD2): standardisierte Dachformen, Gebäudegrundrisse auf Basis der amtlichen Liegenschaftskarte; die Höhengenaugigkeit beträgt überwiegend 1 m, Angaben zur Gebäudefunktion (Kreis Herzogtum Lauenburg)

- OpenStreetMap-Daten (OSM) in 1 m Auflösung als Eingangsgrößen zur Bestimmung der Versiegelung und der Lage von Brücken und Wasserflächen (Flüsse, Kanäle und Teiche). Diese Informationen stammen aus dem Jahr 2020.

2.2. Das Simulations-Setup „Stadt Geesthacht“

Die stadtklimatische Modellierung mit dem Anwendungsfall „Thermischer Komfort“ wird für das Stadtgebiet Geesthacht in einer Auflösung von 5 m x 5 m (Large Eddy Simulation; LES) mit dem PALM-4U-Modell gerechnet. Insgesamt gehen 1.000 x 800 x 320 Gitterpunkte in x-, y-, und z-Richtung in die Modellrechnung ein. Sie beschreiben ein Gebiet mit einer Fläche von 20 km² und einer Höhe von 1.600 m (Abb. 1).

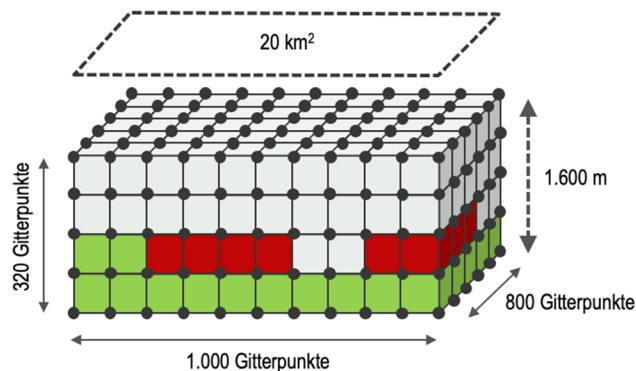


Abb. 1: Die Geometrie des Modellgebiets.

Als meteorologische Randbedingung wird eine autochthone Wetterlage angenommen, da sich hier lokalklimatische Besonderheiten einer Landschaft besonders gut ausprägen können und die städtische Wärmeinsel – also die thermische Belastung – am stärksten ausgebildet wird.

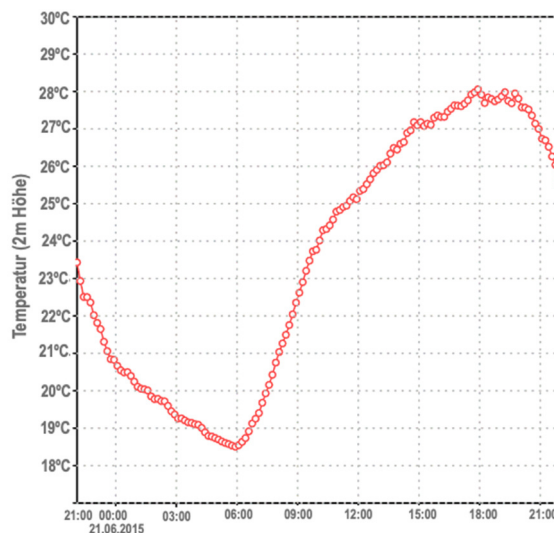


Abb. 2: Modell-Eingangsgröße: Temperaturverlauf des verwendeten Sommertags.

Diese Wetterlage ist durch eine ungehinderte Sonneneinstrahlung bei geringer Bewölkung und sehr schwachem Wind gekennzeichnet. Für die Berechnung wird zur Initialisierung ein räumlich konstantes Temperaturprofil eines Sommertages (hier der 20.06.2015) – mit einer Anfangstemperatur von 23,4°C (296,5 K) am Boden für die Startzeit 21 Uhr CET (Central European Time) – vorgegeben (Abb. 2).

Als Ausgabegrößen werden für diesen Bericht die Oberflächentemperatur, die Lufttemperatur in 2 m Höhe, der biometeorologische Index „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET), der „Universelle Thermische Klimaindex“ (UTCI) sowie die Windgeschwindigkeitskomponenten u , v , w gewählt und für einen Tagesgang mit einer Zeitspanne von 24 Stunden in Minutenzeitschritten ausgegeben.

In den Kartendarstellungen der Ergebnisse zeigt jede Karte neben der räumlichen Verteilung eines Klimaparameters oder Indizes zusätzlich die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe. Bei allen Betrachtungen werden die Kartendarstellungen – Screenshots aus einer Videosequenz – für 04:00 Uhr (Zeitpunkt maximaler Abkühlung) und 16:00 Uhr (Zeitpunkt der höchsten Lufttemperatur) gegenübergestellt. Als räumliche Auflösung wird als Kompromiss von Rechenzeit und Aussagequalität ein 5 m Raster verwendet. Für die detailliertere Betrachtung der Modellteilgebiete wird jeweils für die Bereiche Geesthachter Straße und HansasträÙe in die modellierten Karten der „Stadt Geesthacht“ hineingezoomt.

2.3. Beurteilung des thermischen Komforts

Der thermische Komfort in öffentlichen Räumen ist von großer Bedeutung für die Art ihrer Nutzung sowie ihre Attraktivität. Eine hohe mikro- und bioklimatische Qualität fördert gesunde Umweltbedingungen und das Wohlbefinden. Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels und der damit verbundenen weiteren Erwärmung von Städten, wächst die Bedeutung der Klimaanpassung auf Stadtebene, um die Lebensqualität für die Bewohner:innen erhalten oder verbessern zu können.

Hier gilt es zu beachten, dass das Wärmeempfinden eines Menschen nicht nur von der Lufttemperatur bestimmt wird. Vielmehr sind für das thermische Wohlbefinden das komplexe Zusammenspiel meteorologischer (Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlungseinflüsse) und nicht-meteorologischer (Schweißrate, Arbeitsenergieumsatz, Kleidung) Faktoren verantwortlich. Zur Abschätzung des thermischen Empfindens wurden verschiedene Indizes entwickelt. Bei dem hier genutzten Ansatz kommen dazu der „Universal Thermal Climate Index (UTCI)“ und die „Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)“ zur Anwendung (Box 1).

Box 1: Berechnung des thermischen Komforts.

Der **UTCI** folgt dem Konzept einer Äquivalenttemperatur, wobei eine Referenzumgebung mit folgenden Bedingungen verwendet wird: 50% relative Luftfeuchte, Windstille und die mittlere Strahlungstemperatur wird der Lufttemperatur gleichgesetzt (Jendritzky et al. 2012). Diese Referenzumgebung wird mit der aktuellen Umgebung und deren physiologischer Wirkung auf den menschlichen Körper verglichen. Die Berechnung des UTCI basiert auf einem komplexen Energietransportmodell (Fiala et al. 2012) und beschreibt vereinfacht gesagt, wie der menschliche Körper Wind, Strahlung, Lufttemperatur und -feuchtigkeit erlebt. Er berücksichtigt dabei auch die Verwendung unterschiedlicher Kleidung als Reaktion auf die tatsächliche Umgebungstemperatur (Havenith et al. 2012) (Abb. 3). Die Bewertung der Belastung erfolgt über eine 10-stufige Skala (siehe Tab 1).

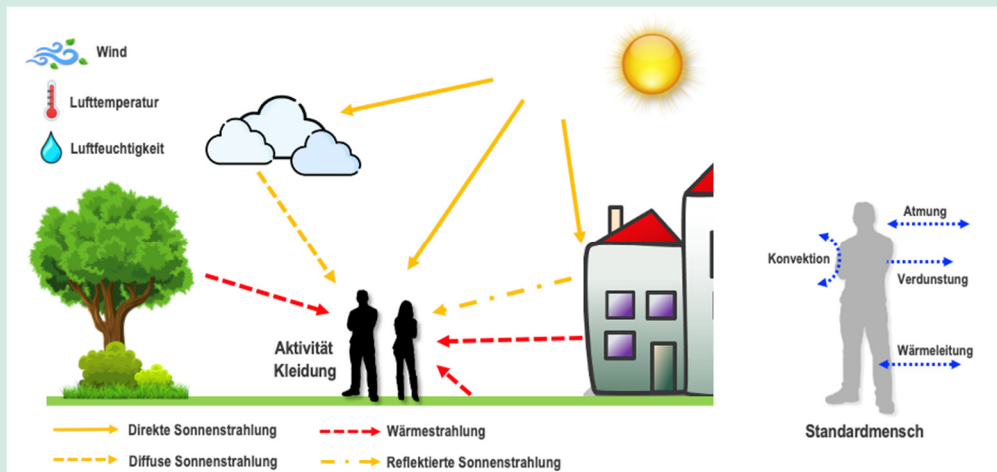


Abb. 3: Die Komponenten zur Berechnung des thermischen Komforts.

Die **PET** ist im Bereich der Human-Biometeorologie ein häufig eingesetzter Index. Er basiert auf dem Münchner Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI), welches die thermischen bioklimatischen Bedingungen in einer physiologisch relevanten Weise beschreibt (Nastos & Matzarakis 2013). Die PET ist definiert als diejenige Lufttemperatur, bei der ein Mensch unter identischer Schweißverdunstung und Hautoberflächen- und Kerntemperatur, wie sie die gegebenen Bedingungen verursachen, eine ausgeglichene Energiebilanz aufweist (Höppe 1999, Matzarakis et al. 1999). Zur Interpretation werden neun thermische Belastungsklassen verwendet. Tabelle 1 zeigt die Einteilung basierend auf der Klassifikation von Matzarakis & Mayer (1996) für Mitteleuropa.

Tab. 1: Gegenüberstellung von Klassifikationsmethoden zur Beschreibung der thermischen Wahrnehmung.

Thermische Wahrnehmung	Grad des physiologischen Stresses	UTCI (°C)	PET (°C)	PMV
Sehr kalt	Extremer Kältestress	< -40	< 4	< 3,5
	Sehr starker Kältestress	-40 bis -27		
Kalt	Starker Kältestress	-27 bis -13	4 bis 8	-3,5 bis -2,5
Kühl	Mäßiger Kältestress	-13 bis 0	8 bis 13	-2,5 bis -1,5
Leicht kühl	Leichter Kältestress	0 bis 9	13 bis 18	-1,5 bis -0,5
Angenehm	Kein thermischer Stress	9 bis 26	18 bis 23	-0,5 bis 0,5
Leicht warm	Leichter Hitzestress		23 bis 29	0,5 bis 1,5
Warm	Mäßiger Hitzestress	26 bis 32	29 bis 35	1,5 bis 2,5
Heiß	Starker Hitzestress	32 bis 38	35 bis 41	2,5 bis 3,5
	Sehr starker Hitzestress	38 bis 46		
Sehr heiß	Extremer Hitzestress	> 46	> 41	> 3,5

3. Die Modellgebiete

Das Modellgebiet „Stadt Geesthacht“

Das PALM-4U-Modellgebiet für den zentralen Teil des Stadtgebiets Geesthacht ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Südgrenze verläuft in Höhe des Marschacher Hafens, die Westgrenze liegt in etwa auf der Linie „Kreuzung Hegeler Straße/Spandauer Str. – Landhof Buhk“. Die Nordgrenze verläuft in Höhe des Kreisverkehrs Mercatorstraße-B404-Wilhelm-Holert Straße. Die Ostgrenze liegt etwas östlich des Staubeckens (Berliner Straße).



Abb. 4: PALM-4U-Modellgebiet „Stadt Geesthacht“ im Luftbild (Aufnahme von 2018; Stadt Geesthacht und Landkreis Herzogtum Lauenburg).

Eine wichtige Komponente für die nachfolgenden Berechnungen sind die geobasierten Informationen zur Landnutzung, zur Art der Flächenversiegelung und zur Bebauung. Abbildung 5 gibt einen Überblick der verwendeten Eingangsgrößen für die nachfolgende Stadtklimamodellierung. Aus der Karte werden besonders die Stadtbereiche mit Bürogebäuden sowie das durch Landwirtschaft und Wälder geprägte Umland ersichtlich. In weiten Teilen der Stadt zeigt sich ein heterogenes Bild, das neben einigen begrünten Flächen zum Teil großflächige Areale mit wenig Vegetation (hier als kahler Boden angenommen) zeigt.

Für die Detailbetrachtungen werden zwei Modellteilgebiete mit einer stärkeren Vergrößerung betrachtet, um lokale Hitze Hot-Spots besser visualisieren zu können. Die Berechnungen basieren in allen Fällen auf der Modellierung des gesamten Stadtgebiets.

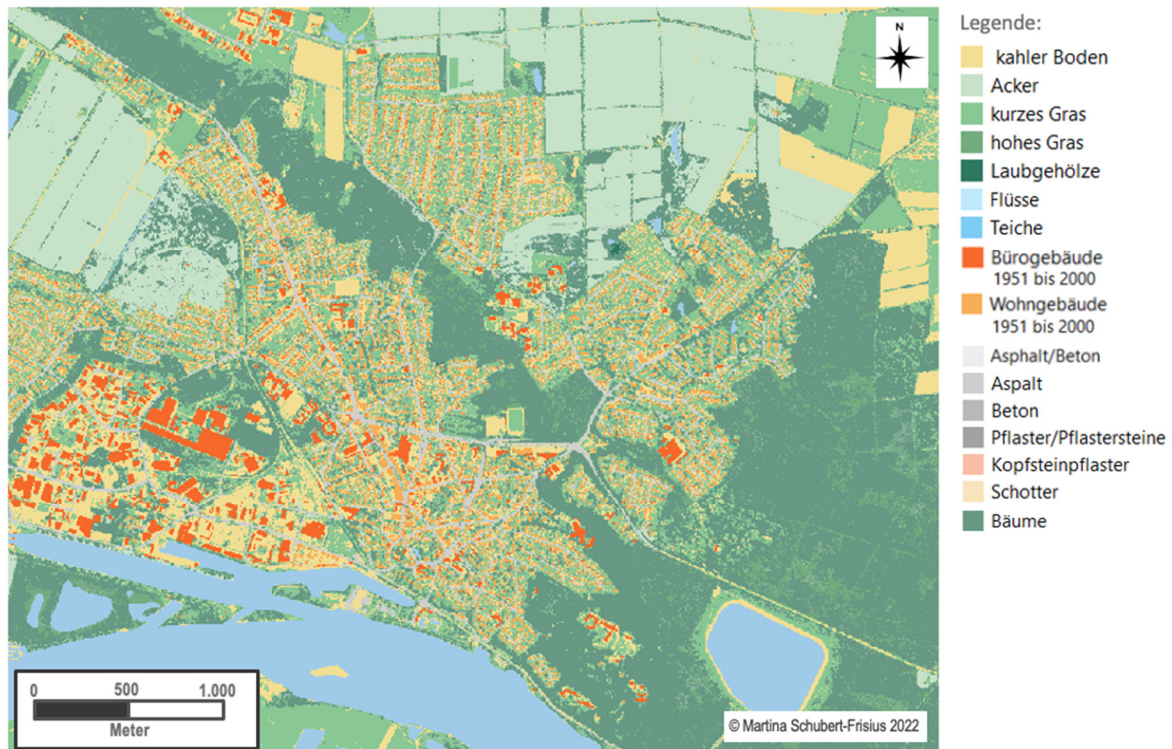


Abb. 5: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellgebiet „Stadt Geesthacht“ (Maßstab: 1:30.000).

Das Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“

Dieses Modellteilgebiet fokussiert sich auf den Bereich nördlich der Alfred-Nobel-Schule. Es wird im Westen von der ehemaligen alten Bahnstrecke und im Osten vom Richtweg begrenzt. Das Gebiet reicht in nördlicher Ausdehnung bis zur Höhe des Timm-Kröger-Weges (Abb. 6). Markante Bereiche bilden die Geesthachter Straße, die durch das gesamte Gebiet verläuft, der Sportplatz am Silberberg, der eine große Freifläche bildet und im zentralen Bereich die Gebäude der Grundschule am Silberberg.

Das Modellteilgebiet „Hansastraße“

Dieses Modellteilgebiet fokussiert sich auf den oberen Teil der Hansastraße ab der Kreuzung „Dösselbuschberg und Am Spakenberg“ bis zum Kreisverkehr am Übergang zur Landstraße. Begrenzt wird das Gebiet im Nordwesten durch den Uhrbrookring und dessen Verlängerung (Luftlinie durch die Kleingartenanlage) sowie im Südosten durch den Barmbeker Ring (Abb. 7). Markante Bereiche bilden die beiden wassergefüllten Senken in den Verlängerungen zu den Straßen Immental und Farmsener Weg.

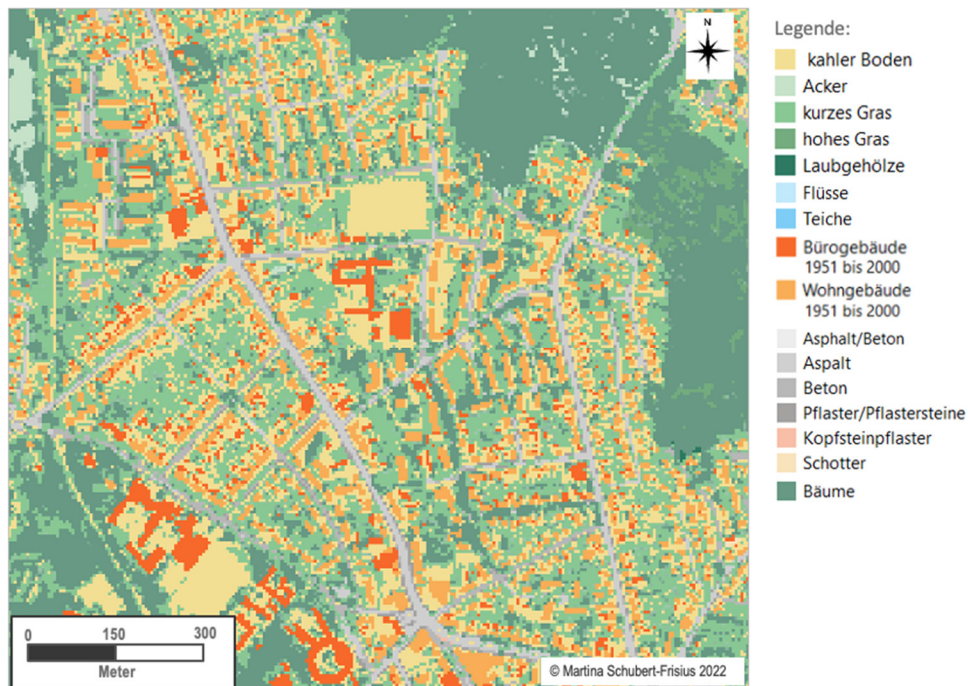


Abb. 6: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“ (Maßstab: 1:7.500).

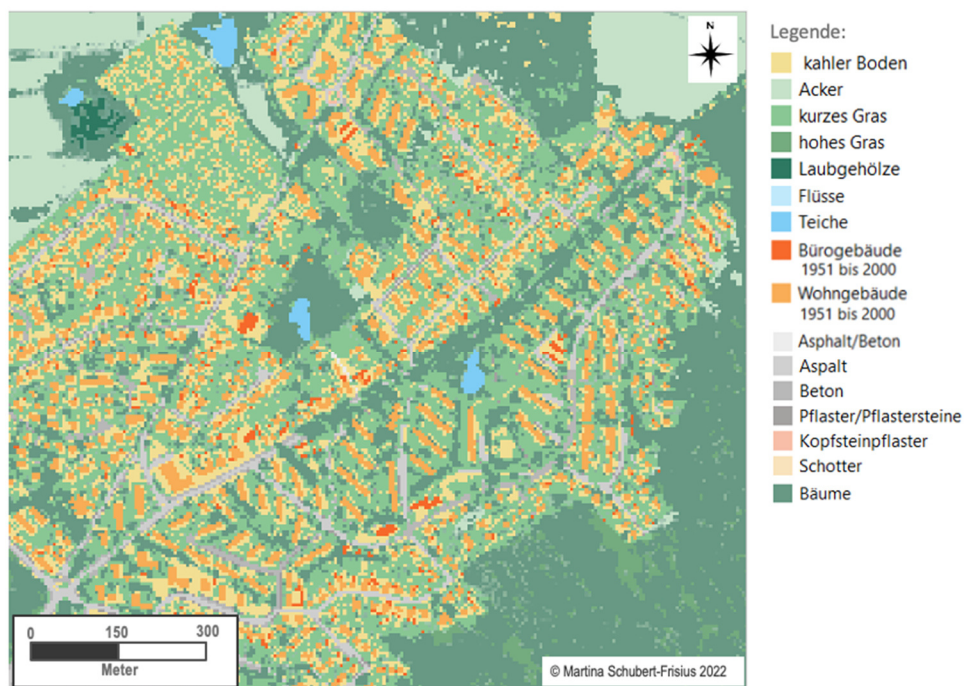


Abb. 7: Überblick der Eingangsdaten für die Landnutzung der Ist-Situation im Modellteilgebiet „Hansastrasse“ (Maßstab: 1:7.500).

4. Das Modellgebiet „Stadt Geesthacht“ – Ergebnisse

4.1. Oberflächentemperatur

Das Stadtklima unterscheidet sich mitunter deutlich vom Klima des Umlands, was sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit, die Strahlung und den Wind betrifft. Die Gründe für die höheren Temperaturen in Stadtgebieten liegen vor allem a) in der Speicherung von Wärme durch Gebäude, Plätze sowie Verkehrs- und andere Infrastrukturanlagen, die nachts wieder abgegeben wird, und b) der geringeren Durchlüftung bedingt durch eine Vielzahl von Strömungshindernissen wie Gebäude, Schallschutzwände, Bäume und Hecken. Die städtische Wärmeinsel (SWI) ist nicht nur auf die Lufttemperatur beschränkt, sondern auch anhand der Oberflächentemperaturen (Kottmeier et al. 2007) und teilweise im Grundwasser (Benz et al. 2016) messbar. Generell ist die SWI in der Nacht am stärksten ausgeprägt (Arnfield 2003). Die Oberflächentemperatur darf jedoch keineswegs mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden. Vielmehr kann sie als ein Anhaltspunkt dafür dienen, wieviel Energie tagsüber gespeichert und nachts wieder abgegeben werden kann.

Betrachtet man die Simulationsergebnisse für die „Stadt Geesthacht“, so zeigen sich bei der räumlichen Verteilung der Oberflächentemperatur um 04:00 Uhr die niedrigsten Werte (unter 16°C) bei den Wasserflächen (Elbe und Staubecken) sowie auf den unbebauten Flächen an der Düneberger Straße. Während die Temperatur im Umland 18°C nicht überschreitet, werden in den Stadtbereichen zum Teil Werte bis 22°C simuliert. Am Tag (16:00 Uhr) zeigt sich ein differenzierteres Bild. Die niedrigsten Oberflächentemperaturen (unter 30°C) berechnet das Modell für die Wasserflächen. Im Umland steigen die Werte bis zu 42°C an und erreichen im Stadtgebiet – insbesondere bei den hochversiegelten Flächen – Oberflächentemperaturen bis 60°C (Abb. 8).

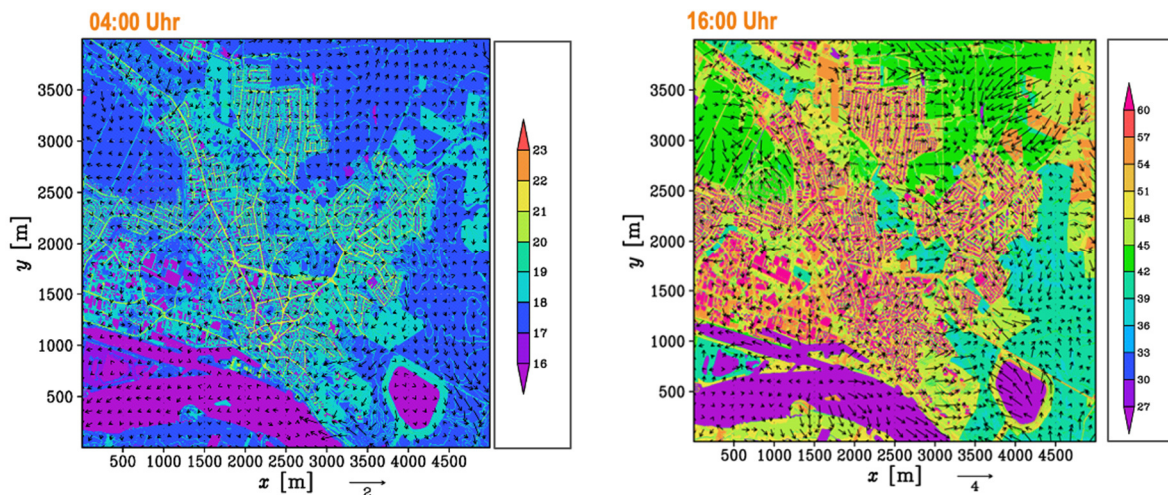


Abb. 8: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Oberflächen in der Stadt – insbesondere die Verkehrsflächen – nachts mehr Wärme abgeben können als Flächen im Umland. Die Temperaturunterschiede liegen maximal bei 4°C, zum größten Teil aber um 1°C bis 2°C. Am Tag erwärmen sich die Oberflächen in der Stadt deutlich stärker als das Umland. Hier zeigt das Modell maximale Unterschiede von bis zu 15°C.

4.2. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe

Betrachtet man den prinzipiellen Aufenthaltsbereich des Menschen (in der Regel verwendet man dazu das Niveau einer Höhe von 2 m), so zeigt die Verteilung der Lufttemperatur im Vergleich zur Oberflächentemperatur deutlich geringere Maximalwerte (Abb. 9). Bei der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur auf einem Niveau von 2 m ist um 04:00 Uhr keine ausgeprägte Städtische Wärmeinsel zu erkennen. Die niedrigsten Temperaturen von unter 18°C werden im Bereich der Elbe und über Freiflächen im Bereich der Steglitzer Straße beziehungsweise am Bauernvogtsweg modelliert. Innerhalb des Stadtgebiets ist eine Zweiteilung erkennbar: mit niedrigeren Temperaturen im westlichen Teil (unter 19°C) und höheren Temperaturen (bis zu 23°C) in den nördlich und östlich gelegenen Stadtvierteln. Als trennendes Element zeigt sich hierbei der Stadtwald, der im Modellgebiet von Nordwest nach Südost verläuft. Um 16:00 Uhr ist die Lufttemperatur sowohl in der Stadt als auch im Umland deutlich angestiegen. Die niedrigsten Temperaturen treten über der Elbe (21 bis 25°C) und über dem Stausee (25 bis 26°C) auf. Im Stadtgebiet zeigen sich über fast allen Verkehrsflächen Temperaturen von bis zu 30°C. Im nordöstlich gelegenen Umland variieren die Temperaturen zwischen 27 und 29°C.

Vergleicht man die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe so sind diese am Tag deutlich höher als in der Nacht. Der Wind weht dabei von der Elbe und von den Freiflächen im nordwestlich und nordöstlich gelegenen Umland in Richtung der Stadt, wobei im Stadtzentrum nur sehr geringe Windgeschwindigkeiten zu erkennen sind.

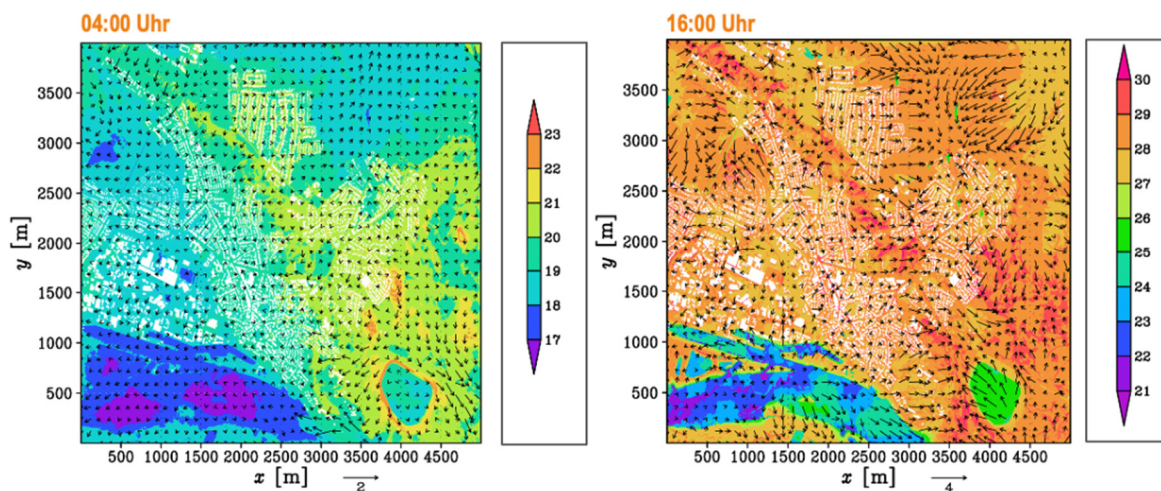


Abb. 9: Temperatur in 2 m Höhe und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.

Zusammenfassend zeigt die Lufttemperatur in 2 m Höhe keinen eindeutigen Unterschied zwischen dem Stadtgebiet und dem Umland. Vielmehr tritt nachts ein genereller Temperaturgradient auf, mit geringer Lufttemperatur im Süden und Westen (bis 19°C) und höheren Werten im Osten (bis 23°C). Auch am Tag (16:00 Uhr) zeigen sich keine größeren Unterschiede zwischen dem Stadtgebiet und dem Umland (beide 27°C bis 29°C). Ausnahmen bilden die Gewässer mit geringeren (22°C bis 26°C) und einige Straßenräume sowie Waldbereiche (zentraler Teil und im Osten) mit höheren Temperaturen (bis 30°C).

4.3. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Der universelle thermische Klimaindex (UTCI) ist ein Parameter der Humanbiometeorologie, der einen Zusammenhang zwischen der Außenumgebung und dem menschlichen Wohlbefinden herstellt (Box 1). Der Begriff „universell“ verdeutlicht, dass der Index für viele Anwendungen basierend auf den thermischen Umweltbedingungen im Freien geeignet ist – wie für Vorhersagen, Warnungen, Bioklimakarten oder für die Klimawirkungsforschung.

Betrachtet man die Modellergebnisse zum Zeitpunkt 04:00 Uhr, so zeigen die UTCI-Werte ausschließlich Temperaturen zwischen 18°C und 22°C, die im Bereich „kein thermischer Stress“ liegen (Abb. 10). Die geringsten Werte treten im Bereich der Elbe, in der Freifläche am Bauernvogtsweg und am nördlichen Rand des Modellgebiets auf. Zum Zeitpunkt 16:00 Uhr hat die thermische Belastung in allen Teilbereichen des Modells zugenommen und die Einwohner:innen Geesthachts sind überall Hitzestress – mit unterschiedlicher Intensität – ausgesetzt. Die geringste Belastung (mäßiger Hitzestress) zeigt sich im Bereich der Elbe und über dem Stausee. Im Gegensatz dazu ist für fast das gesamte bebaute Stadtgebiet (vor allem im Umfeld der Verkehrsflächen) ein starker bis sehr starker Hitzestress (37°C bis 39°C) zu erkennen. Leicht geringere Werte (33°C bis 35°C), die aber immer noch einem starken Hitzestress entsprechen, finden sich im nordöstlich gelegenen Umland, aus dem sich der Wind in Richtung des nördlichen Stadtrands bewegt.

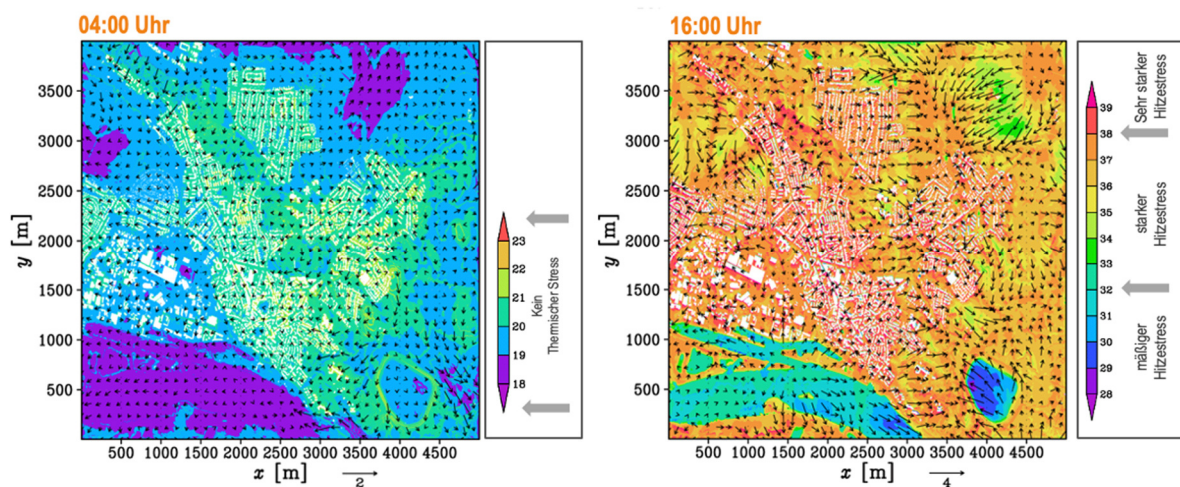


Abb. 10: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung, dass auf Basis der UTCI-Werte nachts im Stadtgebiet kein thermischer Stress zu erwarten ist. Tagsüber nehmen die Werte jedoch deutlich zu und die Einwohner:innen Geesthachts sind im gesamten Modellgebiet Hitzestress ausgesetzt, wobei die bebauten Bereiche die höchsten Belastungen aufweisen.

4.4. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) ist ein weiterer universeller thermischer Index, der häufig für stadtklimatologische Untersuchungen herangezogen wird (Matzarakis et al. 2010). Nachfolgend wird er zur Beschreibung der Wärmebelastung angewendet (Box 1). Die Höhe der PET-Werte korreliert stark mit der kurzwelligen Sonneneinstrahlung. Entsprechend tritt eine starke Wärmebelastung nicht nur in Städten – bevorzugt auf großen versiegelten Flächen ohne Abschattung – sondern auch auf Freiflächen im Umland auf.

Die Verteilung der PET-Werte zeigt, wie bei den UTCI-Werten, dass um 04:00 Uhr innerhalb des Modellgebiets kein thermischer Stress zu erwarten ist. Vielmehr werden in den Randbereichen der Stadt, über der Elbe und dem Stausee sowie im Bereich der Düneberger Straße und des Schäferbergs PET-Werte unter 18°C erreicht, was in der Klassifikation einem leichten Kältestress entspricht (Abb. 11). Zum Zeitpunkt 16:00 Uhr hat der thermische Stress in allen Teilen des Modellgebiets zum Teil deutlich zugenommen. Mäßiger Hitzestress tritt nur noch im Bereich der Elbe und über dem Stausee auf. Innerhalb des Stadtgebiets steigen die PET-Werte in vielen Bereichen über 42°C, was einem extremen Hitzestress entspricht.

Wie schon bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe, so zeigt sich auch hier der Stadtwald als trennendes Element, mit PET-Werten zwischen 39°C und 45°C. Die niedrigsten PET-Werte (zwischen 36°C und 39°C = starker Hitzestress) sind südlich der Elbe – in kleineren Waldgebieten am östlichen Stadtrand, über den Freiflächen nördlich des Narzissenweges, im nordöstlich gelegenen Umland und im Bereich des Börmweges – zu erkennen.

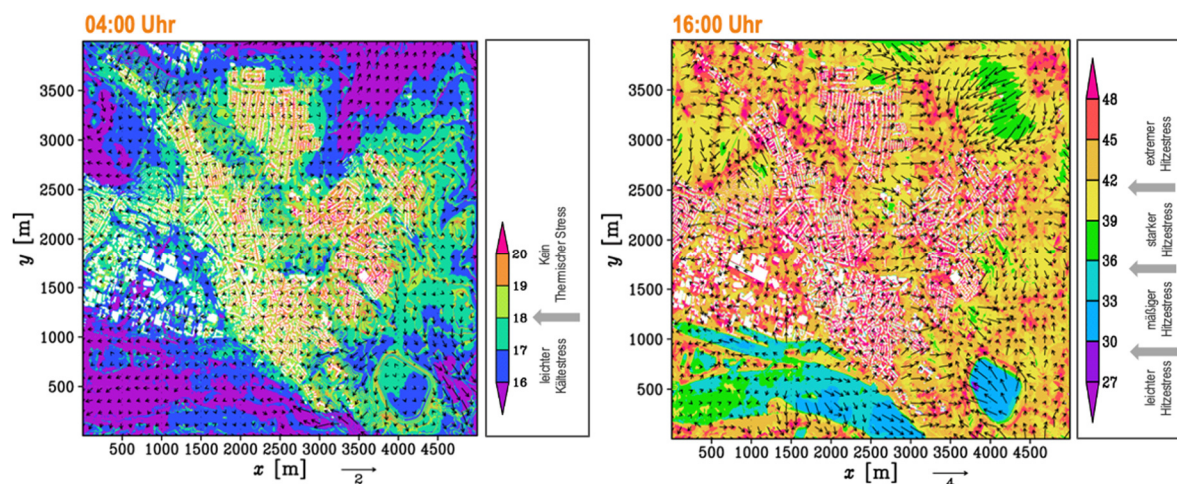


Abb. 11: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modell „Stadt Geesthacht“.

Zusammenfassend zeigt die Bewertung auf Basis der PET-Werte, dass nachts im gesamten Stadtgebiet kein thermischer Stress auftritt. Dagegen finden sich am Tag innerhalb des bebauten Stadtgebiets überwiegend Bereiche mit extremem Hitzestress. Auch wenn der Hitzestress im Umland und im Bereich von Freiflächen sinkt, so ist er auch dort noch immer stark ausgeprägt.

5. Das Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“ – Ergebnisse

5.1. Lage

Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auf dem Bereich der Geesthachter Straße zwischen den Straßen Silberberg und Gerstenblöcken (kurz: Stadtquartier „Geesthachter Straße“) (Abb. 12). Hier plant die Stadt Geesthacht im Rahmen der Innenraumentwicklung den Umbau des Stadtquartiers inklusive des Baus weiterer Gebäude. Während aktuell die Landnutzung im zentralen Teil dieses Modellteilgebiets durch Wohngebäude geprägt wird, bildet der Stadtwald die dominierende Landnutzung im nordöstlichen Bereich. Weitere charakteristische Flächen sind die Sportplätze an den Straßen Silberberg und Neuer Krug.

Da in Geesthacht und Umgebung zukünftig eine Zunahme der Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte zu erwarten ist (Pfeifer et al. 2021), soll durch die Stadtklimamodellierung untersucht werden, ob bereits aktuell in diesem Bereich der Stadt Wärme-Hot-Spots auftreten. Da durch die fortschreitende Erwärmung davon auszugehen ist, dass diese auch zukünftig bestehen oder sich noch stärker ausprägen werden, müssen sie in weiteren Planungen berücksichtigt werden, um die Hitzesituation in der Zukunft nicht noch weiter zu verschärfen. Die nachfolgenden Detailkarten für das Modellteilgebiet sind jeweils vergrößerte Ausschnitte der Stadtklimamodellierung, die für das gesamte Stadtgebiet durchgeführt wurde.

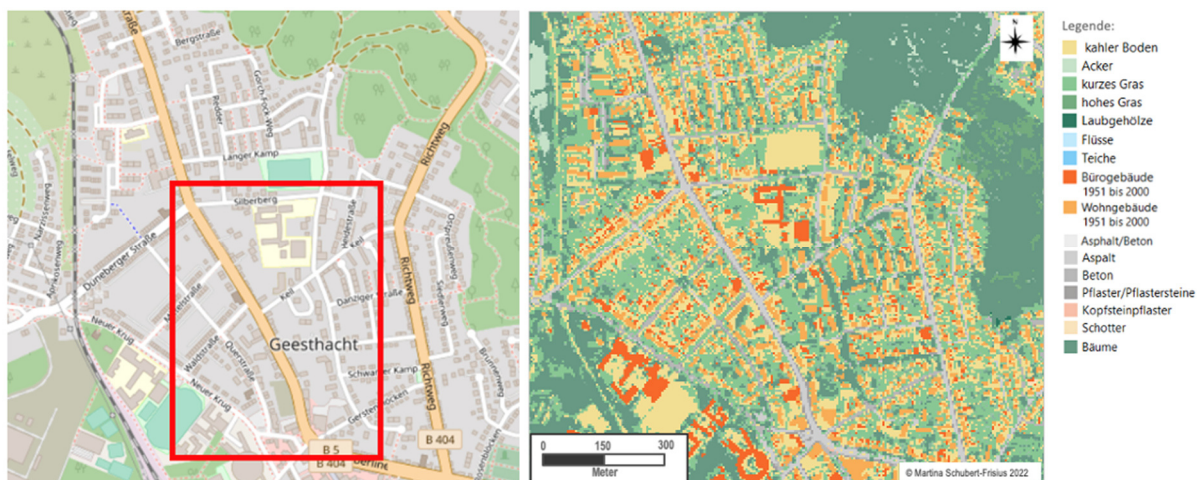


Abb. 12: Lage im Modellgebiet (oben links) und Landnutzung (rechts) des Modellteilgebiets „Geesthachter Straße“.

5.2. Oberflächentemperatur

Betrachtet man die Oberflächentemperatur für den Bereich Geesthachter Straße (5 m Auflösung) mit einem größeren Zoomfaktor, so heben sich im Modellergebnis für 04:00 Uhr einerseits die Gebäude mit sehr geringen (unter 17°C) und andererseits die Verkehrsflächen mit sehr hohen Oberflächentemperaturen (bis 22°C) ab. Die Freiflächen zwischen den Gebäuden liegen in einem Temperaturbereich zwischen 17 und 19°C. Innerhalb des Stadtquartiers „Geesthachter Straße“ zeigt sich

an der Westseite der etwas kältere Bereich. Zusätzlich ist ein größeres kühleres Gebiet im Südteil zu erkennen (Abb.13).

Für den Zeitpunkt 16:00 Uhr zeigt die Modellierung deutlich erhöhte Temperaturen, wobei Maximalwerte von über 60°C auf den Gebäudeoberflächen simuliert werden. Da diese Temperaturen stark von den Oberflächenmaterialien abhängen, sind dort Unterschiede vor Ort möglich, wo die Modellannahmen von den real verwendeten Materialien abweichen. Auch Straßen und Freiflächen ohne Schatten weisen sehr hohe Oberflächentemperaturen zwischen 48°C und 57°C auf. Lediglich an der Nord- und Ostseite der Gebäude sorgt der Schattenwurf für eine Abkühlung, so dass dort Temperaturen zwischen 33°C und 39°C modelliert werden.

Betrachtet man das Windströmungsfeld in 10 m Höhe um 16:00 Uhr, so zeigt sich, dass der aktuelle Gebäudebestand an der Geesthacher Straße als Strömungshindernis fungiert, so dass im zentralen Teil des Quartiers ein Windwirbel ansteht beziehungsweise im Südteil die Strömung nach Süden abgelenkt wird. Im Norden des Modellgebiets dient die Straße Silberberg als eine wichtige Lüftungsbahn, die Wind in den nördlichen Teil des Quartiers leitet. Im Südwesten hat die Straße Neuer Krug grundsätzlich ebenfalls eine wichtige Bedeutung für die Durchlüftung, wobei das Stadtquartier „Geesthacher Straße“ dadurch nicht beeinflusst wird.

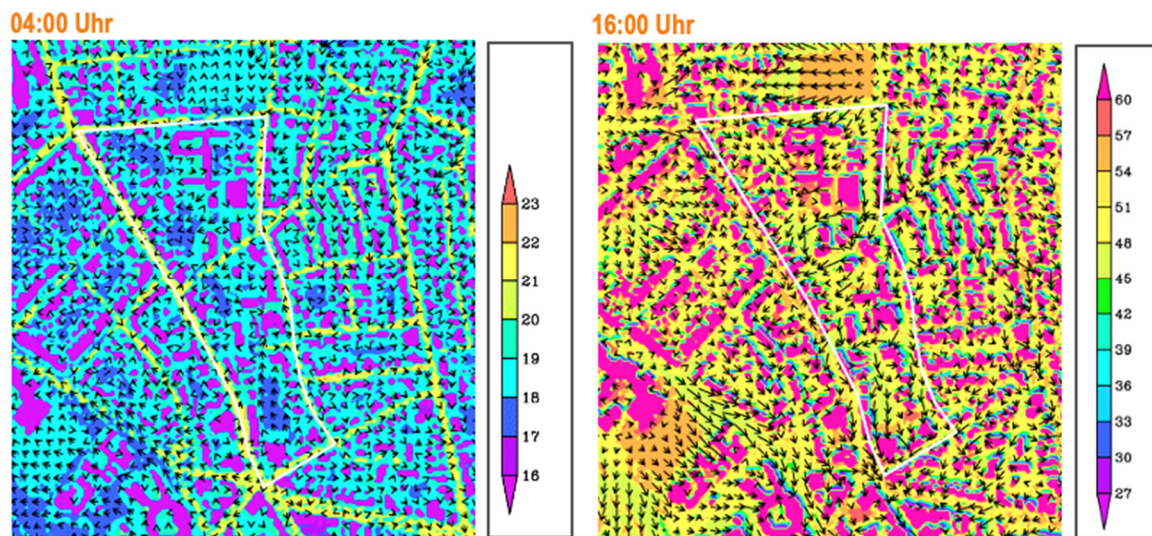


Abb. 13: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthacher Straße“.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung den kühlenden Einfluss unversiegelter Flächen in der Nacht im Vergleich zu den wärmeren Verkehrsflächen. Auch wenn die Gebäude im Modell sehr kühl erscheinen, so zeigt sich am Tag, dass dort die höchsten Temperaturen auftreten und diese somit einen deutlichen Beitrag zur Erwärmung leisten. Um den Effekt im Detail zu betrachten, müssten die Materialeigenschaften der einzelnen Gebäude kleinskaliger und genauer in das Modell integriert werden. Tagsüber zeigt sich insbesondere an den Gebäuden der positive Einfluss der Beschattung.

5.3. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe

Betrachtet man die räumliche Verteilung der modellierten Lufttemperatur in 2 m Höhe, so fallen um 04:00 Uhr mehrere kühlere Bereiche auf, die Temperaturen unter 19°C aufweisen. Ein kühlerer Bereich tritt an der Westseite des Quartiers auf (1 und 2 in Abb. 14), wobei die Bebauung scheinbar ein Abfließen der kühleren Luft verhindert. Westlich davon befinden sich weitere kühlere Bereiche, wie über den großen Grünflächen (Gärten) an der Querstraße (3) und über den Freiflächen zwischen den Straßen Neuer Krug und Grenzstraße (4). Auffallend ist der generelle Gradient mit geringen Temperaturen im Südwesten und höheren Temperaturen im Nordosten.

Um 16:00 Uhr zeigt sich ein einheitlicheres Bild mit Temperaturen zwischen 27°C und 30°C. Auffallend sind die geringsten Temperaturen über und im Umfeld der Sportplätze (Silberberg und Neuer Krug) (6, 8) sowie über den Grünflächen an der Querstraße (9). Dies ist ein Indiz dafür, dass sich in dichter bebauten Bereichen aufgrund des Fehlens einer wirksamen Durchströmung die wärmere Luft vermehrt staut. Im Bereich des Stadtquartiers „Geesthachter Straße“ zeigt das Modell die höchsten Temperaturen (um 30°C) südlich von Gebäuden. Im Vergleich zu angrenzenden Straßenzügen zeigen sich allerdings keine stadtklimatischen Unterschiede. Betrachtet man die Windrichtung und -geschwindigkeit in 10 m Höhe, so strömt Wind von außen über den nördlichen Bereich (6, 7) und im Südteil fließt die kältere Luft in die angrenzenden, wärmeren Straßenzüge (5).

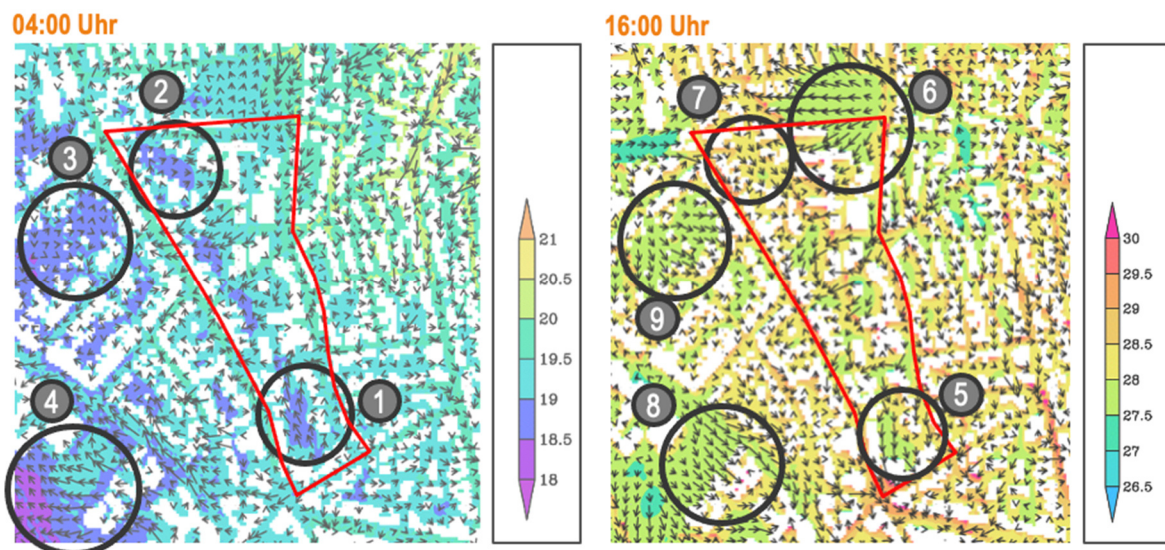


Abb. 14: Temperatur (in 2 m Höhe) und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.

Zusammenfassend belegt die Modellierung die Bedeutung unbebauter Flächen für das Stadtklima, da über diesen sowohl am Tag als auch in der Nacht geringere Temperaturen auftreten. Zwischen enger stehenden Gebäuden – also dort, wo die Durchströmung stark eingeschränkt ist – kann sich dagegen die Luft stärker erwärmen.

5.4. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Die modellierten UTCI-Werte liegen in diesem Modellteilgebiet zum Zeitpunkt 04:00 Uhr zwischen 19 und 22°C. Gemäß der Klassifikation liegt somit kein thermischer Stress vor (Abb. 15). Wie schon bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe, zeigen sich auch hier die geringsten Temperaturen im Südwesten des Modellgebiets (Sportplatz, Neuer Krug). Innerhalb des Stadtquartiers „Geesthachter Straße“ treten in einem von Nordwest nach Südost verlaufenden Streifen vier kühlere Bereiche auf (blaue Bereiche mit unter 20°C).

Gegen 16:00 Uhr haben sich das Quartier und die Umgebung deutlich aufgeheizt, wodurch der Hitzestress entsprechend angestiegen ist (UTCI-Werte von 36°C bis 39°C). An den Nordost-Ecken der Gebäude sinkt der Hitzestress – wenn auch kleinräumig – spürbar ab (30°C; mäßiger Hitzestress), was vermutlich auf die verschattende Wirkung der Gebäude zurückgeführt werden kann. Vergleicht man das Stadtquartier „Geesthachter Straße“ mit seiner Umgebung, so treten lediglich in den Bereichen um die beiden Sportplätze gewisse Hitzeminderungen auf (UTCI: 35°C bis 37°C), wobei der Hitzestress dort immer noch als stark einzustufen ist.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung für das Stadtquartier „Geesthachter Straße“, dass basierend auf dem UTCI aktuell kein thermischer Stress in der Nacht auftritt und dass im Bereich der Gärten kühlere Zonen zu finden sind. Allerdings heizen sich diese Zonen am Tag sehr stark auf, was auf die fehlende Verschattung zurückgeführt werden kann.

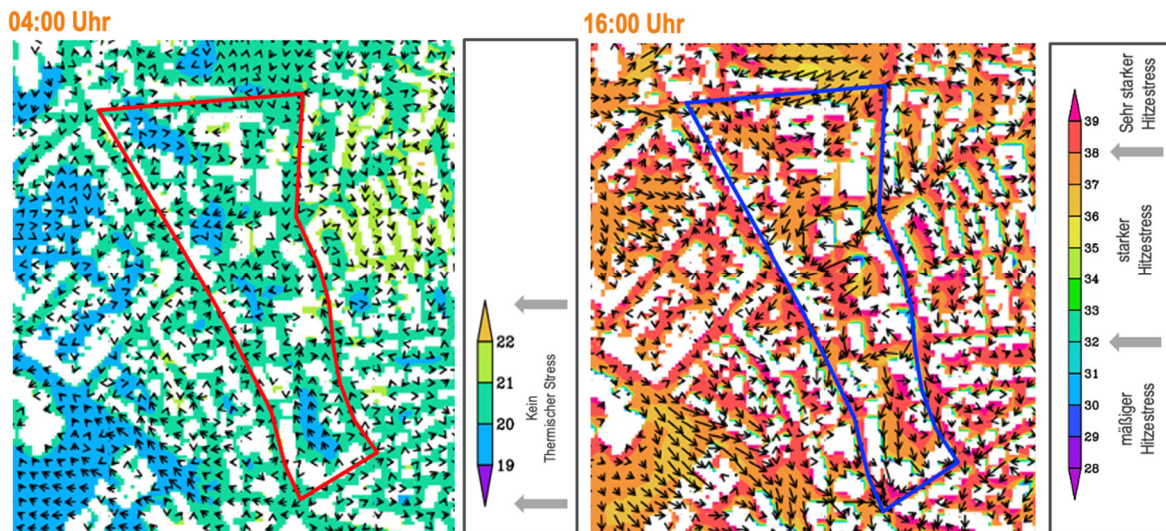


Abb. 15: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.

5.5. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Verwendet man zur Beschreibung des thermischen Wohlbefindens die PET, so ergibt sich im Vergleich zum UTCI ein differenzierteres Bild. Zum Zeitpunkt 04:00 Uhr berechnet das Modell im zentralen Teil des Quartiers und über dem Sportplatz (Neuer Krug) Bereiche mit einem leichten Kältestress (PET-Werte unter 18°C) (Abb. 16). An der Ostseite der Geesthachter Straße und östlich des Stadtquartiers sind Bereiche über 19°C zu erkennen, was aber immer noch keinem thermischen Stress entspricht. Innerhalb des Stadtquartiers „Geesthachter Straße“ treten die geringsten PET-Werte (16°C bis 17°C) über der großen Freifläche im Süden (1) und über den unbebauten Flächen südlich der Grundschule Silberberg (2) auf. Vergleicht man die PET-Werte mit dem benachbarten Bereich entlang der Danziger Straße (A) (bis über 20°C), so zeigt sich der kühlende Einfluss von Freiflächen und einer wirksamen Durchlüftung.

Am Tag ist dieser Unterschied deutlich geringer ausgeprägt. So hat zum Zeitpunkt 16:00 Uhr durch die fortgeschrittene großflächige Erwärmung der Hitzestress im gesamten Modellteilgebiet zugenommen. Die geringsten Temperaturen treten an der Nordostecke von Gebäuden auf (PET-Werte: 35°C bis 30°C; mäßiger Hitzestress). Sowohl im Bereich der meisten Verkehrsflächen als auch im mittleren Bereich des Stadtquartiers (4, 5) zeigen sich die höchsten Hitzebelastungen (PET-Werte über 45°C). Etwas kühlere, aber immer noch durch Hitzestress geprägte Bereiche (PET-Werte: 39°C bis 45°C) befinden sich über den beiden Sportplätzen (3, 6). Im Nordteil wird die Luft vom Sportplatz am Silberberg in das Stadtquartier geleitet (3), was aber keinen entscheidenden Abkühlungseffekt zeigt. Auch die im Südostteil berechnete Luftströmung in 10 m Höhe hat keinen Einfluss auf das Windfeld im Stadtquartier (6), was vermutlich durch die geschlossene Häuserfront zu begründen ist.

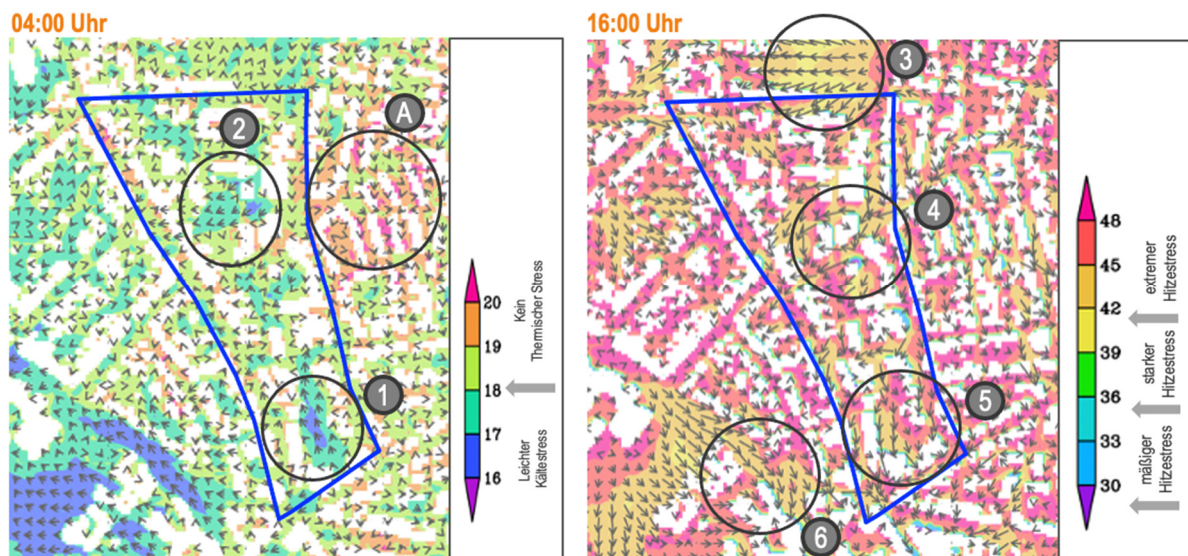


Abb. 16: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Geesthachter Straße“.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung für das Stadtquartier „Geesthachter Straße“, dass aktuell basierend auf dem PET nachts kein thermischer Stress auftritt. Durch die Gärten entstehen im Vergleich zu benachbarten Straßenzügen ohne Freiräume kühlere Bereiche. Durch die fehlende Beschattung erwärmen sich die Flächen am Tag jedoch deutlich.

6. Das Modellteilgebiet „Hansastraße“ – Ergebnisse

6.1. Lage

Das Modellteilgebiet im Bereich des Stadtquartiers „Hansastraße“ lässt sich in verschiedene Zonen unterteilen, die unterschiedliche Landnutzungsvarianten aufweisen, die für die Interpretation genereller Auswirkungen von Landnutzung, Bebauungsdichte und Art der Bebauung auf das thermische Wohlbefinden in der Stadt Geesthacht relevant sind. Südöstlich der Hansastraße liegt das Stadtviertel „Hansastraße“, das durch eine Bebauung mit mehrstöckigen Häusern im Zeilen- und Gruppenbau charakterisiert ist. Ihr schließen sich Einfamilienhäuser und eine ausgedehnte Waldfläche an (Abb. 17). Nordöstlich der Hansastraße befinden sich neben der Bebauung mit Ein- und Mehrfamilienhäusern auch zwei bewaldete Flächen, die über unbebaute Flächen miteinander und mit dem Umland verbunden sind.

Die nachfolgenden Detailkarten für das Modellteilgebiet sind jeweils vergrößerte Ausschnitte der Stadtklimamodellierung, die für das gesamte Stadtgebiet durchgeführt wurde.



Abb. 17: Lage im Modellgebiet (oben links), Landnutzung (rechts) des Modellteilgebietes „Hansastraße“.

6.2. Oberflächentemperatur

Für die nächtliche Oberflächentemperatur (04:00 Uhr), zeigen sich die höchsten Temperaturen über Verkehrsflächen (bis 22°C). Grünflächen (überwiegend Gärten) weisen Temperaturen zwischen 18°C und 20°C auf (Abb. 18). Im Modellteilgebiet fallen vier kühle Bereiche unter 18°C auf: Waldflächen südöstlich des Barmbeker Rings, das Teichgebiet an der Hansastrasse (Höhe Einfahrt Hanseatenweg), die bewaldete Fläche in Verlängerung der Straße Immental und die Freifläche im Nordwesten. Zum Zeitpunkt 16:00 Uhr hat die Oberflächentemperatur im gesamten Stadtgebiet deutlich zugenommen, wobei sich die Gebäude am stärksten aufgeheizt haben (bis 60°C). Vergleicht man den Bereich nordwestlich und südöstlich der Hansastrasse, so fällt auf, dass im südöstlichen Teil zwischen den Gebäudezeilen aufgrund größerer Windgeschwindigkeiten geringere Temperaturen zu erkennen sind (unter 48°C). Auch der Schattenwurf der Gebäude ist dort stärker ausgeprägt und reduziert die Temperatur im nordöstlichen Bereich der Gebäude auf unter 33°C.

Nordwestlich der Hansastrasse dominieren höhere Temperaturen. Dies gilt auch für die Freiflächen des Kleingartenvereins Geesthacht Oberstadt e.V., da hier keine oder nur eine geringe Verschattung durch Bäume vorhanden ist. Die kühlende Wirkung von Wasserflächen zeigt sich im Bereich Immental und beim Teichgebiet (Hansastrasse) mit Temperaturen unter 30°C. Bewaldete Flächen führen ebenfalls zu einer Verringerung der Temperatur (33°C bis 45°C).

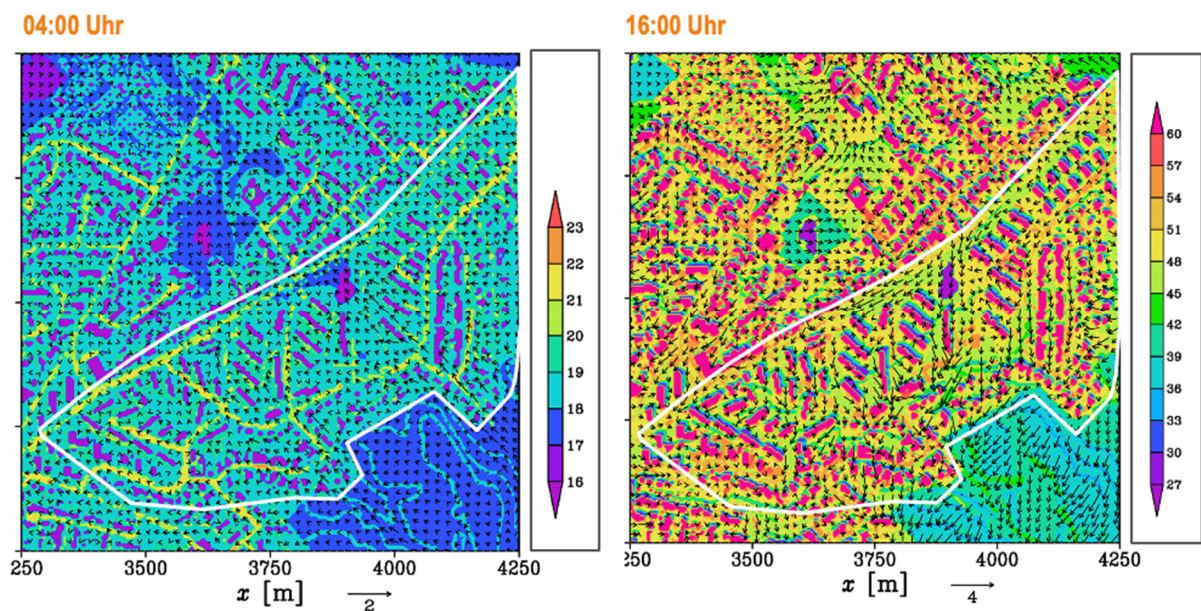


Abb. 18: Oberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastrasse“.

6.3. Potentielle Temperatur in 2 m Höhe

Wie bei der Oberflächentemperatur zeigen sich nachts (04:00 Uhr) die höchsten Lufttemperaturen über den Verkehrsflächen (über 21°C). Ähnlich hohe Werte zeigt das Modell zwischen den Gebäudezeilen und in den Straßenräumen südöstlich der Hansastrasse sowie in einem angrenzenden Waldstück (Bereich Wandsbeker Stieg) (4) (Abb. 19). Die geringsten Temperaturen findet man im Modell dort, wo der Entsigelungsgrad sehr hoch ist und es wenig Strömungshindernisse (Bäume) gibt. Die kühlfsten Orte mit unter 19,5°C befinden sich im Bereich der Wasserflächen (2, 3) sowie über dem Kleingartengelände und den im Norden und Nordosten angrenzenden Freiflächen (1). Zum Zeitpunkt 16:00 Uhr werden im weiteren Umfeld des Waldstücks im Südosten des Modellteilgebietes (7) die höchsten Temperaturen simuliert. Dieses für ein Waldgebiet vielleicht zunächst als überraschend anzusehende Ergebnis ist wie folgt zu erklären. Im Rahmen der Modellierung wurde der Sonnengang am Nachmittag eines Sommertags simuliert. Zu diesem Zeitpunkt werden besonders die Hänge der fast 30 bis 40 m höher gelegenen Endmoränen von der dann aus Südwesten scheinenden Sonne angestrahlt und somit aufgeheizt. Physikalisch gesehen gelangt aufgrund der exponierten Hanglage (südwest orientiert) dorthin mehr Sonnenenergie als auf eine ebene Fläche. Dies trifft auch auf einem Bereich beim Stadtwald nördlich der Straße Besenhorst zu. Zudem ist eine gebremste Durchströmung der Luftmassen in Waldgebieten relevant. Waldgebiete wirken grundsätzlich also als nächtliche Kaltluftproduzenten, wobei das sich abkühlende Luftvolumen nicht so tiefe Temperaturen wie bei Freiflächen erreicht. Die Baumkronen-Oberfläche des belaubten Waldes beziehungsweise des immergrünen Nadelholzwaldes schirmt den Waldboden zur Atmosphäre ab und reguliert den Wärmeumsatz so, dass der Stammraum tagsüber in der Regel nicht so stark aufgeheizt wird wie die bodennahe Luftschicht über Freiflächen und sich zur Nachtzeit auch nicht extrem abkühlt. Der Tagesgang der Temperatur in den Wäldern ist somit ausgeglichener.

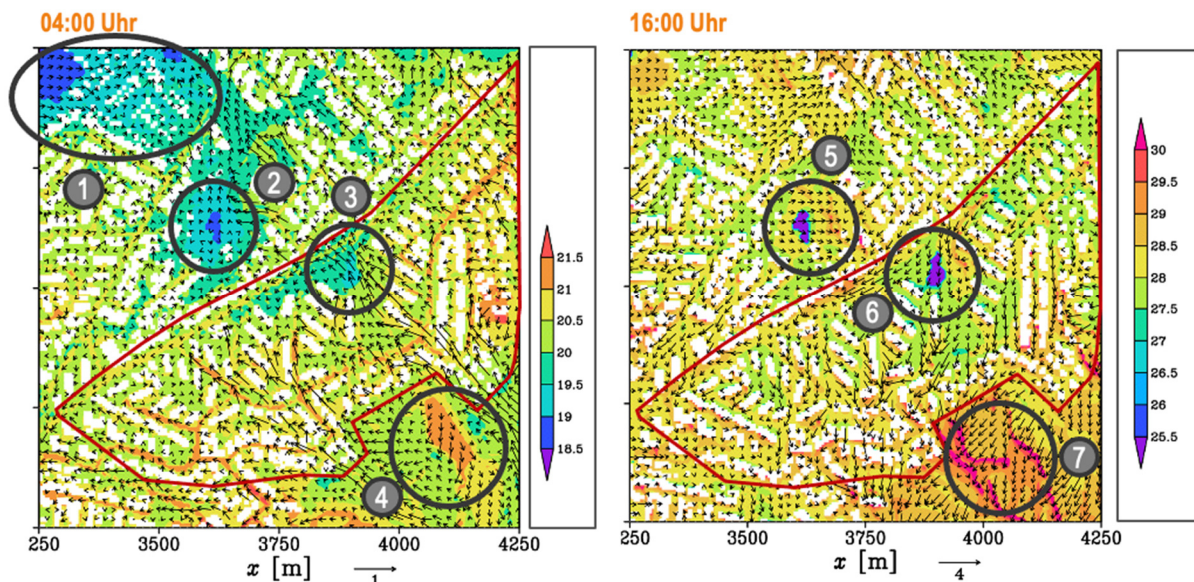


Abb. 19: Temperatur (in 2 m Höhe) und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastrasse“.

In den Wohngebieten betragen die Temperaturen – je nach Gebäudeabstand und Durchströmungsgeschwindigkeit – zwischen 27°C und 29,5°C, wobei sich die Größe der Freifläche

reduzierend auf die Temperatur auswirkt. Die niedrigste Lufttemperatur tritt mit Werten unter 25,5°C über den beiden Wasserflächen auf (5, 6). Der abkühlende Effekt besitzt allerdings nur eine geringe Reichweite.

6.4. Universal Thermal Climate index (UTCI)

Verwendet man den UTCI zur Beschreibung der Hitzebelastung, so treten zum Zeitpunkt 04:00 Uhr keine thermischen Belastungen in diesem Modellteilgebiet auf (Abb. 20). Die UTCI-Werte variieren zwischen 20°C und 22°C in den bebauten Bereichen und zwischen 19°C und 21°C über den Frei-, Wasser- und Waldflächen sowie im Bereich der Kleingartenanlage. Zum Zeitpunkt 16:00 Uhr hat sich der Hitzestress überall erhöht, jedoch mit unterschiedlichen Ausprägungen. Die höchsten UTCI-Werte (über 38°C; entspricht sehr starkem Hitzestress) treten an der Südwestseite fast aller Gebäude auf. In den Straßenabschnitten, in denen die Gebäude sehr eng beieinanderstehen, ist der Hitzestress ebenfalls stark ausgeprägt (36°C und höher). Geringere UTCI-Werte (bis 33°C), die allerdings immer noch einem starken Hitzestress entsprechen, treten über den Wasserflächen und in einigen Waldbereichen im Südosten des Gebiets auf. Einen mäßigen Hitzestress zeigen die Modellergebnisse nur in sehr kleinen Bereichen, jeweils an der Nordostecke der Gebäude.

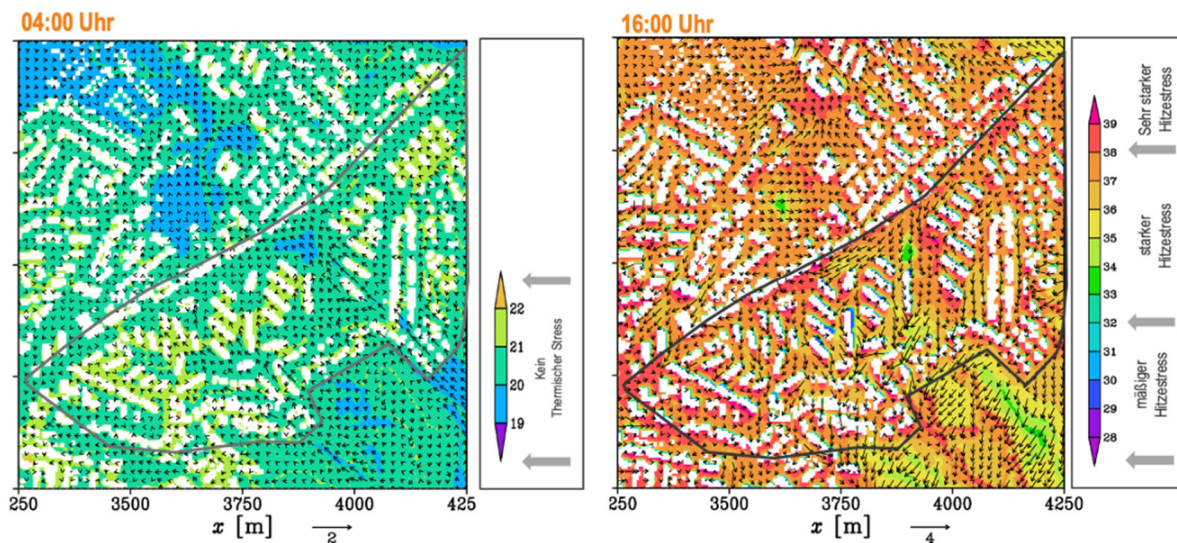


Abb. 20: Universal Thermal Climate Index und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung für das Stadtquartier „Hansastraße“, dass basierend auf dem UTCI aktuell kein thermischer Stress in der Nacht zu erkennen ist. Die kältesten Bereiche befinden sich über Wasser- und Freiflächen. Am Tag heizen sich alle Bereiche der Stadt auf und es besteht ein starker bis sehr starker Hitzestress mit Ausnahme der kleinen Schattenbereiche an den Nordostecken der Gebäude.

6.5. Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Verwendet man die PET-Werte zur Beschreibung des thermischen Wohlbefindens, so sind die kühlestn Orte (unter 18°C) in der Nacht dort zu finden, wo es keine Bebauung, sondern Frei- und Wasserflächen gibt (1, 2, 3) beziehungsweise am Rand von Waldflächen (4). Auch an den Siedlungsrändern kann die einströmende Kaltluft für Abkühlung sorgen (17°C bis 19°C). Dabei hängt die Eindringtiefe der Kaltluft in das bebaute Gebiet im Wesentlichen von der Bebauungsdichte und der Bebauungshöhe ab. Hierbei gilt es zu beachten, dass auch dichte Baum- und Strauchbestände den Zustrom bremsen können. Durch die Barrierewirkung, die das Eindringen von Kaltluft erschwert, können auch nachts Temperaturen von über 20°C auftreten (5). Generell tritt um 04:00 Uhr in den Wohngebieten kein thermischer Stress auf. Vielmehr ist in günstigen Lagen ein leichter Kältestress zu verzeichnen (Abb. 21).

Gegen 16:00 Uhr hat der Hitzestress überall zugenommen, wobei die höchsten Werte (45°C und mehr; entspricht einem extremen Hitzestress) südöstlich der Gebäude auftreten. Je nach Stellung der Gebäude können sich diese Bereiche auch zu größeren Flächen überlappen (7). Nur dort wo es größere Freiflächen gibt oder eine gute Durchströmung möglich ist, sinken die PET-Werte etwas (39°C bis 45°C), bleiben aber auf einem hohen Hitzestressniveau (starker bis extremer Hitzestress). Allerdings weist beispielsweise der Bereich der Kleingartenanlage hohe PET-Werte auf (42°C und mehr), da dort die direkte Wärmeeinstrahlung nicht durch Beschattung reduziert wird. Die kältesten – wenn auch immer noch starken Hitzestress aufweisenden – Bereiche (36°C bis 39°C) finden sich im Nahbereich der Wasserflächen (6) und in den Waldgebieten in der Südostecke des Modellteilgebiets (8).

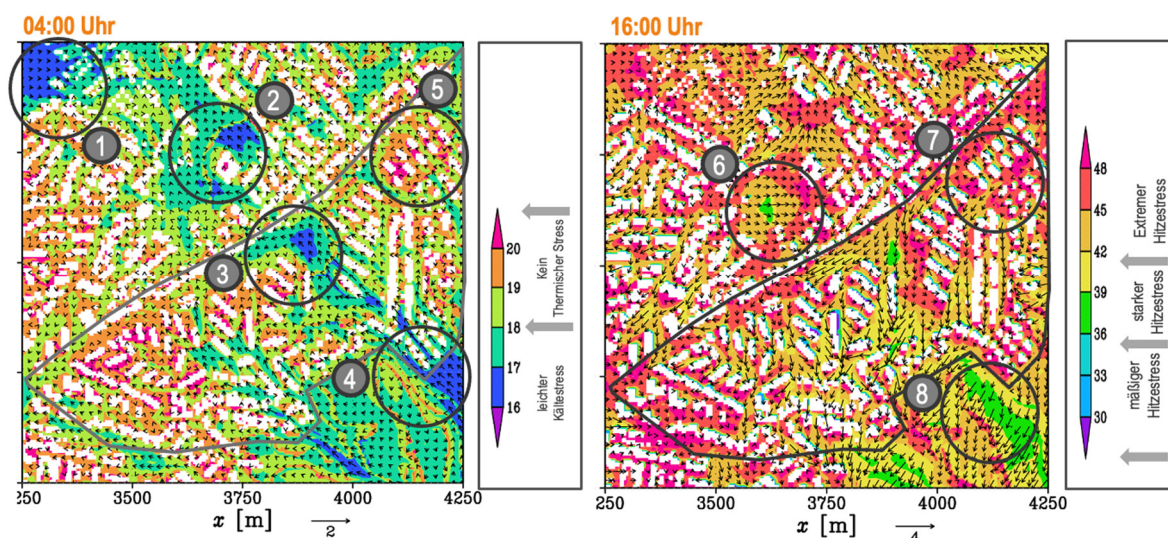


Abb. 21: Physiologische Äquivalenttemperatur und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, jeweils zum Zeitpunkt 4 Uhr (links) und 16 Uhr (rechts); Modellteilgebiet „Hansastraße“.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung für das Stadtquartier „Hansastraße“, dass basierend auf den PET-Werten, aktuell kein thermischer Stress in der Nacht auftritt. Die wärmsten Bereiche finden sich dort zwischen den Gebäuden, wo sich die Luft aufstauen kann. Am Tag steigt der Hitzestress deutlich an, wobei sich die höchsten Werte zwischen Gebäuden beziehungsweise im Südosten der Gebäude befinden. Aber auch Frei- und Waldflächen können sich deutlich aufheizen. Allerdings kann der Schattenwurf von Bäumen oder Gebäuden den PET-Wert absenken. Die dadurch entstehenden Bereiche mit nur mäßigem Hitzestress sind jedoch relativ klein.

7. Ergebnisse auf einen Blick

Wie die Stadtklimamodellierung mit Palm-4U anhand unterschiedlicher Indizes zeigt, werden der Ort und das Ausmaß der Überhitzung maßgeblich von der Landnutzung, der Art und Stellung der Gebäude sowie der Durchströmbarkeit mit Kaltluft beeinflusst. Für das Stadtgebiet liefert die Modellierung folgende wesentliche Erkenntnisse:

- Städtische Verkehrsflächen heizen sich am Tag deutlich auf und geben in der Nacht Wärme ab.
- Nachts zeigt sich in Geesthacht ein Temperaturgradient, bei dem die Stadtbereiche im Süden und Westen kühler sind, als die im Osten.
- Generell ist beim Betrachten der Lufttemperatur in 2 m Höhe kein eindeutiger Unterschied zwischen der Stadt und dem Umland zu erkennen.
- Bei den Oberflächentemperaturen ist die Stadt deutlich wärmer als das Umland. Wasserflächen sind hier am kühleren und die Temperaturunterschiede insgesamt am größten.
- Betrachtet man die thermische Belastung auf Basis der PET-Werte, so ist im Modell für das nächtliche Stadtgebiet (04:00 Uhr) kein thermischer Stress zu erkennen. Am Tag überwiegen dagegen die Bereiche mit starkem und extremem Hitzestress. Die geringsten thermischen Belastungen zeigen sich unmittelbar an der Elbe. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in die Berechnung der PET-Werte viele Faktoren einfließen (siehe auch Box 1). Hier ist es so, dass das Umland in der Nacht etwas kühler ist als die Stadt. Im Tagesverlauf heizt sich der Wald schneller auf, da die Verschattung in der Stadt zunächst mehr Schutz bietet. Zwischen 10:00 Uhr und 11:00 Uhr beginnt sich die Stadt stärker zu erwärmen, da die Schatten kleiner werden (der PET-Wert steigt schneller). Zwischen 12:00 Uhr und 14:00 Uhr sind Wald und Stadt noch ähnlich erwärmt, da jetzt primär der Schatten relevant ist. Zwischen 14:00 Uhr und 18:00 Uhr wird die Stadt stärker belastet, da die Rückstrahlung von den Gebäuden den thermischen Stress erhöht. Mit dem Sonnenuntergang setzt grundsätzlich wiederum überall eine Abkühlung ein. Im Wald bleibt es jedoch angenehmer (kleinerer PET-Wert).

Basierend auf einer Detailbetrachtung der beiden Modellteilbereiche (Geesthachter Straße und HansasträÙe) lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die größten Hitzebelastungen treten nachts im Bereich der Verkehrsflächen und am Tag in der Nähe von Gebäuden auf. Die geringste thermische Belastung zeigt sich in den Gebäudeschatten. Auch wenn unversiegelte Freiflächen (Parks, Sportplätze, Kleingartenanlagen) mit guter Durchströmbarkeit nachts die kühleren Orte sind, so weisen sie am Tag – aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung – häufig eine geringe Aufenthaltsqualität (hohe PET-Werte) auf. Dieser Aufheizung am Tag sollte einerseits durch großflächige Verschattungen entgegengewirkt werden – neben einer zusätzlichen Begrünung durch großkronige Bäume, können auch technische Lösungen wie Sonnensegel angedacht werden – zum anderen gilt es auf eine ausreichende Durchströmbarkeit des Gebiets zu achten, damit die kühle Luft soweit wie möglich in die Stadt vordringen kann.
- In Bezug auf Gebäude- und Verkehrsflächen, die am Tag einen großen Anteil zur Aufheizung der Stadt beitragen, sollte geprüft werden, ob eine Verschattung durch Bepflanzung (Fassaden- oder Dachbegrünung, Straßenbäume) oder technische Lösungen (reflektierende Belege an Gebäuden oder auf Straßen) zur Minderung der Wärmespeicherung, die Aufheizung dieser Flächen verringern

könnten. Studien belegen zwar, dass die kühlende Wirkung (Minderung um 0,6°C bis 1,5 °C) von Gründächern nur direkt über den Dachflächen wirkt (Pfoser et al. 2013), allerdings lässt sich dadurch auch das Innenraumklima in den darunterliegenden Dachgeschoßwohnungen verbessern (Groß 2012). Eine Fassadenbegrünung ist besonders an West- und Südfassaden wirksam, da hier die stärkste Einstrahlung auftritt und durch die Begrünung die Wärmestrahlung am Tage reduziert werden kann.

- Wie die Betrachtungen des Aufenthaltsbereichs des Menschen (2 m Höhe) zeigen, sollte eine zu enge Bebauung vermieden werden, da sich dadurch die Hitze aufstauen kann und Freiflächen fehlen, die in der Nacht – wenn auch nur mit begrenzter Reichweite – für lokale Abkühlung sorgen können. Aus diesem Grund sollte bei der Neuplanung eines Stadtquartiers eine ausreichende Durchströmbarkeit mit Kaltluft gewährleistet werden.
- Elemente, die das Eindringen von Kaltluft erleichtern, sind vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und breite Straßenräume. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass ein zu dichter Baumbestand auch als natürliches Hindernis wirken kann. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist eine geringe Wärmebelastung, was auch auf kleinstem Raum durch Entsiegelung, Verschattung und Begrünung erreicht werden.
- Wald- und Wasserflächen haben auch am Tag eine positive Wirkung auf direkt angrenzende Siedlungsräume. Sie bieten wichtige Ausgleichsleistungen als Kaltluftquelle und Erholungsraum.

8. Literatur

Arnfield, A.J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. In: *International Journal of Climatology*, 23(1), S. 1-26.

Bender, S., Groth, M., Seipold, P. & Gehrke, J.M. (2022): Klimaschutz und Anpassung an die Folgen des Klimawandels – Synergien und Zielkonflikte im Rahmen kommunaler Konzepte und Strategien. Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon. Helmholtz-Klima-Initiative (HI-CAM): https://www.gerics.de/imperia/md/assets/net_zero/dokumente/gerics_netto-null_report_anpassung_klimaschutz-final-screen.pdf.

Benz, S.A., Bayer, P., Goettsche, F.M., Olesen, F.S. & Blum, P. (2016): Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures. In: *Environmental Science & Technology*, 50(1), S. 70-78.

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A. & Kampmann, B. (2013): An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). In: *Geographia Polonica* 2013, 86, 1, S. 5-10.

GERICS (2020): Gesundheit und Klimawandel. 2. Überarbeitete Auflage. Climate Service Center Germany (GERICS):

https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/gerics/gerics_broschuere_gesundheit_und_klimawandel_2020_1.pdf.

Deuschländer, T & Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G. P., D. Jacob, S. Schuck-Zöller (2017): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, S. 48-56.

EEA (2021): Global and European temperatures, European Environment Agency: www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-temperatures.

EEA (2018): Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe, EEA Report No 22/2018, European Environment Agency.

European Climate and Health Observatory (2022): Exposure of vulnerable groups and facilities to flooding and heat: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/observatory>.

European Climate and Health Observatory (2021): Vulnerability to extremes of heat in Europe: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/observatory>.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. & Jendritzky, G. (2012): UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. In: *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, S. 429-441.

Fröhlich, D. & Matzarakis, A. (2019): Calculating human thermal comfort and thermal stress in the PALM model system 6.0. In: *Geosci. Model Dev.*, 13, 3055-3065: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3055-2020>.

Groth, M., Bender, S., Jacob, D. & John, B. (2022): Denkmalschutz und Anpassung an den Klimawandel – Stadtplanerische Herausforderungen am Beispiel zunehmender Hitzebelastungen in Boizenburg/Elbe. In: *RaumPlanung* 218, 5, S. 55-60.

Groth, M., Bender, S. & Groth, B.J. (2021): Rechtlicher Rahmen der Anpassung an die Folgen des Klimawandels im urbanen Raum. In: *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht (ZfU)*, ZfU 4/2021, S. 385-414.

Groß, G. (2012): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. In: *Meteorologische Zeitschrift*, 21, S. 399-412.

- Hanefeld, C., Klaassen-Mielke, R., Miebach, J., Muthers, S., Haschemi, A., Trampisch, H., Kloppe, C., Matzarakis, A., Krogias, C. & Schröder, C. (2019): Einfluss von Wetterextrema auf Einsatzzahlen im Notarzteinsatzdienst. *Medizinische Klinik – Intensivmedizin und Notfallmedizin*, 116, S. 154-160: <https://doi.org/10.1007/s00063-019-00641-7>.
- Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richrds, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benschabat, Y. & Jendritzky, G. (2012): The UTCI-clothing model. In: *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, S. 461-470.
- Heldens, W., Burmeister, C., Kanani-Sühning, F., Maronga, B., Pavlik, D., Sühning, M., Zeidler, J. & Esch, T. (2020): Geospatial input data for the PALM model system 6.0: model requirements, data sources, and processing. In: *Geoscientific Model Development – Discussions*: <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-355>.
- Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: *International Journal of Biometeorology*, 43, S. 71-75.
- IPCC (2022): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC WGII Sixth Assessment Report*. Verfügbar unter: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Summary for policymakers. – Cont. of WG I, II and III to AR5 on the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Pauchari, R.K. & Meyer, L.A. (eds.)).
- Jendritzky, G., De Dear, R. & Havenith, G. (2012): UTCI – why another thermal index? In: *International Journal of Biometeorology*, 56-3, S. 421-428.
- Knoop, H., Keck, M. & Raasch, S. (2014): Urban large-eddy simulation – influence of a densely build-up artificial island on the turbulent flow in the city of Macau. *Computer animation, TIV AV-portal*, doi:10.5446/14368.
- Kottmeier, C., Biegert C. & Corsmeier U. (2007): Effects of Urban Land Use on Surface Temperature in Berlin: Case Study. In: *Journal of Urban Planning and Development*, 133(2), S. 128-137.
- Kuttler, W. (2009): Zum Klima im urbanen Raum. In: *Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2009): Klimastatusbericht 2008*, S. 6-12.
- Letzel, M. O., Helmke, C., Ng, E., An, X., Lai, A. & Raasch, S. (2012): LES case study on pedestrian level ventilation in two neighbourhoods in Hong Kong. In: *Meteorol. Z.*, 21, S. 575-589.
- Maronga, B., Banzhaf, S. & Burmeister, C. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. In: *Geosci. Model Dev.*, 13, S. 1335-1372.
- Matzarakis, A. (2018): Das Stadtklima – Herausforderung heute und für die Zukunft. In: *Architekt 5/18*, S. 36-39.
- Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. (2010): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the rayMan model. In: *International Journal of Biometeorology*, 54, S. 131-139.
- Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, M.G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. In: *International Journal of Biometeorology*, 43, S. 76-84.
- Matzarakis, A. & Mayer, H. (1996): Another kind of environmental stress: thermal stress. In: *WHO Newsletter*, 18, S. 7-10.
- Muthers, S., Laschewski, G. & Matzarakis, A. (2017): The summers 2003 and 2015 in south-west Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. In: *Atmosphere* 8, S. 1-13.

- Nastos, P.T. & Matzarakis, A. (2013): Human Bioclimatic Conditions, Trends, and Variability in the Athens University Campus, Greece. In: *Advances in Meteorology*, Volume 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/976510>.
- Offermann, M., Lindner, S., Reiser, M., Braungardt, S., Bürger, V., Kocher, D., Bruse, M. & Cramer, L. (2022): Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa – Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima. Umweltbundesamt, *Climate Change* 30/2022, 252 S. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_30-2022_nachhaltige_gebaeudeklimatisierung_in_europa.pdf.
- Park, S.B. & Baik, J. (2013): A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulence coherent structures in and above a building array. In: *J. Appl. Meteorol.*, 52, S. 1348-1365.
- Pfeifer, S., Bathiany, S. & Rechid, D. (2021): Klimaausblick Geesthacht - Boizenburg. 19 S, Version 1.0 (Juni 2021). Unveröffentlichter Report. Climate Service Center Germany (GERICS).
- Pfoser, N., Jenner, N., Henrich, J., Heusinger, J. & Weber, S. (2013): Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlußbericht Technische Universität Darmstadt, 305 S.
- Raasch, S. & Schröter, M. (2001): PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. In: *Meteorol. Z.*, 10, S. 363-372.
- Steuri, B., Winkler, M., Stadler, S., Heese, I., Pavlik, D., Fehrenbach, U., Scherer, D., Wiesner, S. & Ament, F. (2019): Handbuch PALM-4U für die Praxis. 69 S.
- Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L., Sandhövel, M. & Leuschner, V. (2022a): Übersicht vergangener Extremwitterschäden in Deutschland. Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“: https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_%C3%9Cbersicht%20vergangener%20Extremwittersch%C3%A4den_AP2_1.pdf.
- Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L. & Leuschner, V. (2022b): Schadenswirkungen von Überschwemmungen und Sturzfluten sowie Hitze und Dürre. Ein Vergleich der Extremereignistypen. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“: https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_Vergleich%20Flut%20und%20Hitze_AP2_3c.pdf.
- WHO Europe (2021): Heat and health in the WHO European region: updated evidence for effective prevention. World Health Organization Regional Office for Europe, 176 p.

Kontakt:

Climate Service Center Germany (GERICS)
Chilehaus, Eingang B
Fischertwiete 1
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-0
Fax. 040-226 338-163

www.climate-service-center.de

ISSN 2625-7408

Eine Einrichtung des

