



Offensive Grüne Infrastruktur 2030

Mensch.
Natur.
Raum.

Daten- und Analysetool

Digitale Anpassungsstrategie
Ruhr

Grüne Infrastruktur Metropole Ruhr verbindet Mensch, Natur und Raum auf dem Weg zur grünsten Industrieregion Europas.

Für zukünftige Maßnahmen und Entwicklungsszenarien sind effiziente und effektive Leistungen der Grünen Infrastruktur in den Bereichen »Anpassung an den Klimawandel« und »Luftqualität, Luftreinhaltung« notwendig. Die Beschreibung dieser Leistungen und deren Wirkungsgrad aber auch das Kosten-/Nutzenverhältnis sind wesentlicher Bestandteil einer Strategie zur Grünen Infrastruktur.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen stehen zunehmend numerische Simulationsverfahren zur Anpassung an den Klimawandel mit quantitativen Aussagen zum Mikroklima, zur Klimabelastung für den Menschen aber auch zur Schadstoffausbreitung und zu den Verkehrsbelastungen bereit. Damit können nicht nur der Status-Quo untersucht werden, sondern auch Zukunftsszenarien etwa mit Blick auf zukünftige Klimabedingungen und/oder zusammen mit zukünftigen Planungen.

Im Rahmen des Projektbausteins Daten- und Analysetool (Digitale Anpassungsstrategie Ruhr) sollen regionale, stadtweite und quartiersfeine Klimasimulationen durchgeführt werden, um die Möglichkeiten und Grenzen der Methodik aufzuzeigen. Zusätzlich soll ein Softwaretool entwickelt werden, welches die Aufbereitung der benötigten Eingangsdaten vereinfacht und weniger fehleranfällig macht.

Ziel der Offensive Grüne Infrastruktur 2030 ist es, ein durchgängiges Netz aus Grün- und Freiräumen im Ruhrgebiet zu schaffen und das Ruhrgebiet nachhaltig, resilient und zukunftsfähig zu gestalten.

Die Offensive Grüne Infrastruktur 2030 verfolgt eine langfristige Perspektive und erzielt dabei ökologische, ökonomische und soziale Wirkungen für die Städte-Landschaft der Metropole Ruhr. Die Grüne Infrastruktur baut auf vorhandene Freiraumnetze auf und wird in den nächsten Jahren weiterhin in integrierten Planungen und in einem breiten Beteiligungsprozess mit vielen Akteur*innen aus der Region entwickelt – von regionalen Plänen über kommunale Projekte bis zu lokalen Stadtteil-Initiativen – von der regionalen Haldenlandschaft bis zum insektenfreundlichen Vorgarten und Balkon. Der Regionalverband Ruhr bietet dafür die regionale Plattform.

Mit Projekten der Grünen Infrastruktur fördern wir gemeinsam die biologische Vielfalt, sorgen für Anpassungen an den Klimawandel, tragen zu Erholung, Gesundheit und Wohlbefinden bei und leisten damit einen Beitrag zu Daseinsvorsorge und hoher Lebensqualität für alle Menschen in Städten und ländlichen Räumen des Ruhrgebietes. Im Verbund mit naturbasierten Lösungen gibt Grüne Infrastruktur innovative Impulse für nachhaltiges Wirtschaften, insbesondere im Leitmarkt Umweltwirtschaft, und sie ist Ausdruck einer gemeinwohlorientierten Kultur der Stadtentwicklung und des Bauens in der Metropole Ruhr.

Die Ruhr-Konferenz ist eine umfassende Initiative der Landesregierung NRW, um das Ruhrgebiet als wirtschaftlich starke und lebenswerte Zukunftsregion für alle Menschen zu gestalten. Der Prozess zur Entwicklung der Chancenregion Ruhr ist von Beginn an auf breite Beteiligung und das Engagement von Menschen und Partnern aus allen gesellschaftlichen Bereichen angelegt. Auf fünf zentralen Handlungsfeldern sollen dabei wichtige Impulse für die Weiterentwicklung des Ruhrgebiets gesetzt werden: Vernetzte Mobilität – kurze Wege; Erfolgreiche Wirtschaft – gute Arbeit; Gelebte Vielfalt – starker Zusammenhalt; Sichere Energie – gesunde Umwelt sowie Beste Bildung – exzellente Forschung.

Die Umsetzung der 74 erarbeiteten und ausgewählten Projekte hat Anfang 2020 begonnen. In den kommenden Jahren werden weitere Vorhaben und Ideen von Partnern wie Kommunen, Industrie- und Handelskammern, Handwerkskammern oder Unternehmen unter dem Dach der Ruhr-Konferenz diese Impulse verstärken und die Entwicklung der Chancenregion Ruhr unterstützen.

Aus dem Forum Grüne Infrastruktur der Ruhr-Konferenz sind zwei Leitprojekte hervorgegangen: Die »Offensive Grüne Infrastruktur 2030« unter Federführung des Regionalverbandes Ruhr und die »Klimaresiliente Region mit internationaler Strahlkraft« unter Federführung von Emschergenossenschaft (Servicestelle Zukunftsinitiative).

Daten- und Analysetool (Klima)

Anlass und Zielsetzung

Erhalt, Ausbau und Vernetzung der Grünen Infrastruktur stellen wichtige Bausteine für eine effektive Anpassung an die Folgen des Klimawandels dar. Um die Leistung der Grünen Infrastruktur zu beschreiben oder die Auswirkungen unterschiedlicher Entwicklungsszenarien – auch im Hinblick auf ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis – zu bewerten, stehen leistungsfähige numerische Simulationsverfahren (Klimamodelle) zur Verfügung. Typisch für diese Verfahren sind die Komplexität in der Anwendung und ein hoher Anspruch an das Fachwissen des Nutzers. Dies betrifft gleichermaßen die Auswahl und Aufbereitung der Eingangsdaten, den eigentlichen Betrieb der Klimamodelle und die Interpretation der Ergebnisse. Ziel des Projektbausteins ist es, die Klimamodellierung als Planungsgrundlage und -werkzeug für einen großen Nutzerkreis in der Region zu etablieren. Neben Fachämtern, Behörden und Ingenieurbüros, die Modelle einsetzen, um die Planung der grünen Infrastruktur zu optimieren, können anwenderfreundliche Klimamodelle auch in Bildungseinrichtungen eingesetzt werden, um eine frühzeitige Sensibilisierung für das Thema Klima zu erreichen. Zur Realisierung dieses Ziels wurden mehrere Teilbausteine definiert.

- **Kaskadenmodell:** Die Möglichkeiten und Grenzen solcher Modelle für drei unterschiedliche Raumgrößen sollen stufenweise durch ein Kaskadenmodell dargestellt werden. Dafür müssen Klimasimulationen für das gesamte Verbandsgebiet des RVR, eine Beispielstadt (hier wurde Bochum ausgewählt) und ein Quartier innerhalb der Beispielstadt durchgeführt beziehungsweise die für das Gebiet vorhandenen Modelldaten ausgewertet werden. Die Ergebnisse dokumentieren den Stand der Technik und zeigen auf, welche Resultate erwartet werden können und was es zu beachten gilt. Die hochaufgelösten Simulationen für die Quartiersebene sollen außerdem für unterschiedliche Planungsvarianten durchgeführt werden und die Wirkung von Grüner Infrastruktur auf das Mikroklima darstellen.

- **Softwaretool:** Um unterschiedliche Eingangsdaten in ein Format zu konvertieren, das von Klimamodellen verarbeitet werden kann, ist die Entwicklung eines Softwaretools (Präprozessor) notwendig. Hierbei liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Benutzerführung, die für den Anwender komfortabel ist und dabei hilft, Eingabefehler zu vermeiden. Zudem sollen auch Informationen darüber gesammelt werden, welche Datengrundlage für eine erfolgreiche Klimasimulation mindestens notwendig ist und wo diese Daten abgerufen werden können.

- **Infrastruktur:** Der Aufbau einer technischen Infrastruktur versetzt den RVR sowie potentielle weitere Nutzer*innen in die Lage, selbst komplexe Klimasimulationen durchzuführen. Hierbei werden die im Projekt gewonnenen Ergebnisse genutzt und mit neuen Erkenntnissen gebündelt an interessierte Nutzer in der Region weitergegeben. Um das Projekt fachlich zu begleiten, wurde ein Entwicklerteam gegründet, das sich aus

Mitgliedern zusammensetzt, die über eine ausgewiesene Expertise im Bereich der Klimaanpassung oder -simulation verfügen.

Ergebnisse

Für das Entwicklerteam konnten Prof. Dr. Benjamin Bechtel von der Ruhr-Universität Bochum, Regierungsdirektor Guido Halbig, Leiter der Essener Niederlassung des Deutschen Wetterdienstes, sowie Antje Kruse, Fachbereichsleiterin Koordinierungsstelle Klimaschutz und Klimawandel des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV), gewonnen werden. Weitere Unterstützung erhielt die Projektgruppe durch Brigitte Spengler von der Emscher-Genossenschaft/Lippeverband und Andreas Gunkel vom Tiefbauamt Bochum, die sich beide in die Ausarbeitung der zu simulierenden Planungsvarianten auf Quartiersebene einbrachten.

Modellergebnisse für die verbandsweite Klimasimulation lagen bereits zu Projektbeginn in einer hohen Auflösung von 25 Metern vor, so dass hier direkt mit der konkreten Auswertung begonnen werden konnte. Für die noch höher aufgelösten Simulationen auf der stadtweiten und Quartiersebene sowie für die Entwicklung des Softwaretools wurden Vergabeverfahren durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen eines Kick-Off-Termins wurden konkrete Rahmenbedingungen definiert, die eine produktive Zusammenarbeit der drei beauftragten Büros sicherstellten. Von besonderer Bedeutung waren hierbei die Verständigung auf den Einsatz der gleichen Modellversion von PALM-4U sowie die Verwendung identischer Initialisierungsparameter. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Im Anschluss folgten regelmäßige Konferenzen. Beispiele für erreichte Meilensteine sind die Festlegung der endgültigen Rechengebiete und der zu betrachtenden Planungsszenarien, das Aufbereiten sämtlicher Eingangsdaten (Flächennutzung, Gebäudebestand, Vegetation, Bodentypen, etc.) und die Überführung in ein Format, das vom Klimamodell verarbeitet werden kann sowie der Start der Simulationsrechnungen oder die Auswertung erster Ergebnisse.

Nach Abschluss der Simulationsrechnungen wurden die Resultate in zwei Abschlussberichten („Stadtweite Klimasimulationen Bochum“¹ und „Digitale Klimaanpassung – Klimasimulationen für ein Untersuchungsgebiet im Bochumer Stadtteil Gleisdreieck“²) zusammengefasst.

Parallel zur Durchführung der Klimasimulationen erfolgte die Entwicklung des Präprozessors. Nachdem verschiedene Zwischenziele -wie die Fertigstellung eines lauffähigen Rechenkerns, der die Eingangsdaten korrekt konvertiert, das Design, die Abstimmung der grafischen Benutzeroberfläche und die Zusammenführung dieser Komponenten zur ersten Produktivversion des Präprozessors- abgeschlossen waren, wurde das Tool von verschiedenen Projektbeteiligten getestet. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form eines ersten Updates umgesetzt und in die Dokumentation

¹ Lohmeyer GmbH: Stadtweite Klimasimulationen Bochum. Dorsten, 2021

² GEO-NET Umweltconsulting GmbH: Digitale Klimaanpassung – Klimasimulationen für ein Untersuchungsgebiet im Bochumer Stadtteil Gleisdreieck. Hannover, 2021

(„Palm-4U Präprozessor – Bedienungshandbuch“³) aufgenommen. Die aktuelle Version des Präprozessors kann hier heruntergeladen werden:

<https://geodaten.metropoleruhr.de/owncloud/s/HfNNxSSWJd5S0GT>

(Passwort: PPP_RVR#12).

Neben den beschriebenen Projektbestandteilen wurde auch der Auf- und Ausbau der technischen Infrastruktur durch den RVR umgesetzt. Bei der Anschaffung der Hardware konnte auf die Erfahrungen der übrigen Projektbeteiligten zurückgegriffen werden, so dass nun eine leistungsstarke Umgebung für die Durchführung weiterer Projekte zur Verfügung steht.

Bei der Klimasimulation auf Quartiersebene stellte sich heraus, dass die Größe des Rechengebietes nicht ausreichte, um sämtliche Parameter physikalisch richtig abzubilden. Diese Tatsache stellt ein wichtiges Ergebnis dar, da das eingesetzte Modell (PALM-4U) hier sehr spezielle Anforderungen an den Anwender stellt, welche noch nicht in umfassender Form dokumentiert sind. Das vorliegende Projekt erweitert die Informationsbasis in dieser Hinsicht deutlich. Nichts desto trotz wurde eines der Projektziele, nämlich die Bewertung unterschiedlicher Planungsvarianten aus mikroklimatischer Sicht, nicht in vollem Umfang erreicht. Um dies zu korrigieren, hat sich das ausführende Ingenieurbüro bereiterklärt, kostenlos zusätzliche Simulationsrechnungen durchzuführen. Die Ergebnisse aus diesen Rechenläufen werden in Form eines eigenständigen Berichtes zur Verfügung gestellt.

Um die Ergebnisse in der Region zu kommunizieren, werden in den nächsten Wochen verschiedene Verbreitungswege genutzt. Neben Informationsmailings innerhalb der bestehenden Netzwerke sind auch Veranstaltungen und Workshops geplant, welche die digitale Anpassungsstrategie Ruhr zum Thema haben werden.

Ausblick und Projektplanung

Die Ergebnisse des Projektbausteins haben gezeigt, dass aktuelle Klimamodelle wertvolle Erkenntnisse zur klimatischen Situation in Regionen, Städten und Quartieren liefern können. Die Lokalisierung von thermischen Hotspots oder Bereichen, die schlecht durchlüftet sind, bietet eine gute Basis für die effiziente Planung von Grüner Infrastruktur und anderen Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und die Betrachtung unterschiedlicher Szenarien hilft dabei das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu optimieren.

Es wurde jedoch auch deutlich, dass bei der Anwendung von numerischen Modellen, wie z. B. PALM-4U, zum heutigen Zeitpunkt noch eine umfassende Fachkenntnis erforderlich ist. Dies gilt nicht nur im Hinblick auf die Bewertung der Modellergebnisse aus stadtklimatischer Sicht, sondern auch in starkem Maße für die technische Anwendung der Modelle. Fehler bei der Aufbereitung der Eingangsdaten oder in der Bedienung der Simulationssoftware können zu mangelhaften Ergebnissen führen, die im ungünstigsten Fall eine nicht zielführende Maßnahmenplanung zur Folge haben. Im Fokus einer möglichen zweiten Förderphase der digitalen Anpassungsstrategie Ruhr, soll daher die Optimierung einer fehlerfreien Eingangsdatenaufbereitung und die Schaffung einer

³ chromgruen Planungs- und Beratungs-GmbH & Co. KG: Palm-4U Präprozessor – Bedienungshandbuch. Velbert, 2021

soliden Informationsbasis für die korrekte Anwendung von Klimamodellen stehen. Um diese Ziele umzusetzen, sollen zwei Teilbausteine bearbeitet werden:

1. Weiterentwicklung des Präprozessors

Um ein fehlerfreies Zusammenspiel mit dem Modell PALM-4U zu gewährleisten, wird der Präprozessor gemäß den Nebenbestimmungen der ersten Förderphase, in den nächsten Jahren kontinuierlich mit Updates versorgt. Darüber hinaus soll die zweite Förderphase genutzt werden, um den Funktionsumfang des Tools zu erweitern. Hierbei sollen die folgenden Features umgesetzt werden:

- Ausweitung der Datengrundlage: Import von Daten zu Realnutzung und Gebäuden, Bodendaten (auch im Hinblick auf Bodenwasser, Dürre), etc. aus diversen Quellen. So können die Leistungen des Präprozessors durch die Datenübernahme aus ALKIS z. B. gut für eine landesweite Nutzung des Modellverfahrens erweitert werden.
- Verbesserung der Datenqualität durch die Nutzung hochaufgelöster Eingangsdaten (z. B. LOD3-Gebäudemodelle) oder die automatische Verknüpfung mehrerer Datenquellen (z. B. um Informationen zu Form, Baujahr und Nutzungsart von Gebäuden abzuleiten).
- Ausbau der Benutzerführung durch eine Unterstützung bei der Auswahl von Daten und Einstellungen in Abhängigkeit von der gewählten Modellauflösung und -parameter (hierdurch kann die Gefahr von fehlerhaften Modellergebnissen reduziert werden).
- Entwicklung eines GIS-Plugin zur effizienten Nachbearbeitung der erzeugten Eingangsdaten.

2. Entwicklung eines Leitfadens zum Modelleinsatz

Der Einsatz von numerischen Klimamodellen erfordert ein fundiertes Hintergrundwissen. Insbesondere das Modell PALM-4U nutzt komplexe physikalische Ansätze, die bei der Auswahl der Eingangsdaten und der Anwendung der Software berücksichtigt werden müssen. Um den Nutzer bei der zielführenden Bedienung zu unterstützen, soll ein Leitfaden entwickelt werden, der wichtige Informationen zu den Grundlagen der Modellierung, typischen Anwendungsfällen und möglichen Fehlerquellen (z. B. falsch gewählten Rechengebietsgrößen) beinhaltet. Hierdurch kann die ein Rollout von Klimasimulationen in die Fläche begünstigt werden, da ein Leitfaden die Erstanwendung von Modellen deutlich erleichtert und gleichzeitig die Produktion von fachlich korrekten und in der Region vergleichbaren Ergebnissen begünstigt. Neben einem Textdokument im Sinne eines Grundlagen- und Nachschlagewerkes sollten auch verschiedene Testdatensätze und Tutorials, die mit diesen Daten bearbeitet werden können, bereitgestellt werden.

Palm-4U Präprozessor

Bedienungshandbuch

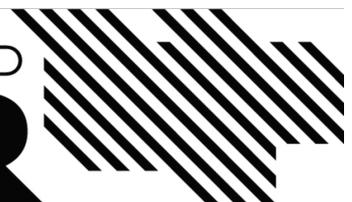
chromgruen Planungs- und Beratungs-GmbH & Co. KG

chromgruen

im Auftrag des

REGIONALVERBAND

RUHR



Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| Impressum | 1 |
| 1. Einleitung | 2 |
| 1.1. Was ist PALM? | 2 |
| 1.2. Was ist PALM-4U? | 2 |
| 1.3. Was ist der PALM-4U Präprozessor? | 2 |
| 1.4. Systemvoraussetzungen | 2 |
| 2. Hintergrund | 4 |
| 2.1. Das NetCDF Format | 4 |
| 2.2. Der Palm Input Data Standard (PIDS) | 5 |
| 2.3. Daten des static driver | 5 |
| 3. Installation und Inbetriebnahme | 8 |
| 3.1. Lieferumfang | 8 |
| 3.2. Installation unter MS Windows | 8 |
| 3.3. Installation unter Linux oder Mac OS | 17 |
| 4. Validierung | 19 |
| 5. Benutzung des <i>PALM-4U Präprozessor</i> | 20 |
| 5.1. Programmstart | 20 |
| 5.2. Programmstruktur und -bedienung | 24 |
| 6. Unterstützung | 34 |
| 7. Nutzungsbedingungen | 35 |
| 7.1. Geltungsbereich | 35 |
| 7.2. Nutzungsrechte und -beschränkungen | 35 |
| 7.3. Eigentumsrecht, Urheberrecht, Schutzrechte | 35 |
| 7.4. Haftungsausschluss | 36 |
| 7.5. Schlussbestimmungen | 36 |
| 8. Anhang | 37 |
| 8.1. Erläuterung der Prüfkriterien | 37 |
| 8.2. Baumdaten gemäß PALM-4U | 40 |

Impressum

| | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Herausgeber | Regionalverband Ruhr Kronprinzenstraße 35, D-45128 Essen Telefon +49 (0)201.2069-0, Telefax +49 (0)201.2069-500 E-Mail: info@rvr.ruhr |
| Autoren | Dr. Andreas Müller, Andreas Franzen chromgruen Planungs- und Beratungs- GmbH & Co. KG, Velbert |
| Projektleitung RVR | Thorsten Stock, Dr. Wolfgang Beckröge |
| Version | 1.0 |
| Stand | 12. April 2021 |
| Bildnachweis | |

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

1. Einleitung

1.1. Was ist PALM?

PALM steht für "PARallelized Large-eddy simulation Model".

1.2. Was ist PALM-4U?

PALM-4U steht für "PALM for urban applications" (ausgesprochen: PALM for you).

1.3. Was ist der PALM-4U Präprozessor?

Der *PALM-4U Präprozessor* erzeugt die für PALM-4U benötigten Eingabedaten aus weit verfügbaren Geodaten.

Der *PALM-4U Präprozessor* unterstützt Sie bei nachfolgenden Arbeiten und Arbeitsschritten:

- Auswählen der Grundlagendaten für ein Modellgebiet.
- Konvertieren von DGM-Daten.
- Konvertieren von Realnutzungsdaten.
- Konvertieren von Bodendaten.
- Konvertieren von Daten des Baumbestandes.
- Konvertieren von City-GML Gebäudedaten.

Die Daten werden aus den vorliegenden Standard-GIS-Formaten in das von *PALM-4U* benötigte Format (NetCDF) und die benötigte Struktur konvertiert..

1.4. Systemvoraussetzungen

Das Programm ist frei von Lizenzkosten.

1.4.1. Softwareanforderungen

Java Version 8 mit Java FX

Es wird eine Java™-Laufzeitumgebung der Version Java 8 mit integrierten JavaFX-Bibliotheken benötigt. Die Anwendung wurde mit der Open Source Version Amazon Corretto 8 von OpenJDK 8 implementiert.

Der *PALM-4U Präprozessor* wird mit einer lizenzkostenfreien Java™-Laufzeitumgebung für MS Windows ausgeliefert. Hier sind keine weiteren Anpassungen notwendig.

Für MacOS und Linux müssen die entsprechenden Laufzeitumgebungen installiert werden. Hinweise dazu finden sich im Abschnitt "Installation und Inbetriebnahme".

Python

Für Windows wird außerdem die für einige Konvertierungsschritte benötigte lizenzkostenfreie Python-Umgebung mitgeliefert. Außerdem wird die Bibliothek NetCDF 4 benötigt. Entsprechende Installationsdateien für Windows sind beigefügt.

Für MacOS und Linux müssen ggf. die entsprechenden Pakete installiert werden. Auch hierzu finden sich Erläuterungen im Abschnitt "Installation und Inbetriebnahme".

1.4.2. Hardwareanforderungen

Das Programm benötigt – insbesondere für die Konvertierung des digitalen Geländemodells – einen Arbeitsspeicher von mindestens 8 Gigabyte.

2. Hintergrund

2.1. Das NetCDF Format

Das Network Common Data Form (NetCDF) wurde von UCAR entwickelt. UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) ist ein gemeinnütziges Konsortium von mehr als 115 nordamerikanischen Hochschulen und Universitäten, die sich auf Forschung und Ausbildung in den Erdsystemwissenschaften konzentrieren.

NetCDF besteht aus einer Reihe von Softwarebibliotheken und maschinenunabhängigen Datenformaten, die die Erstellung, den Zugriff und die gemeinsame Nutzung von Array-orientierten wissenschaftlichen Daten unterstützen. Es ist auch ein Community-Standard für den Austausch wissenschaftlicher Daten.

Daten im NetCDF-Format sind:

- Selbstbeschreibend.
Eine NetCDF-Datei enthält Informationen zu den darin enthaltenen Daten.
- Portabel.
Auf eine NetCDF-Datei können Computer mit unterschiedlichen Möglichkeiten zum Speichern von Ganzzahlen, Zeichen und Gleitkommazahlen zugreifen.
- Skalierbar.
Auf kleine Teilmengen großer Datenmengen in verschiedenen Formaten kann über NetCDF-Schnittstellen auch von Remoteservern effizient zugegriffen werden.
- Erweiterbar.
Daten können an eine ordnungsgemäß strukturierte NetCDF-Datei angehängt werden, ohne den Datensatz zu kopieren oder seine Struktur neu zu definieren.
- Gemeinsam nutzbar.
Ein Schreiber und mehrere Leser können gleichzeitig auf dieselbe NetCDF-Datei zugreifen.
- Archivierbar.
Der Zugriff auf alle früheren Formen von NetCDF-Daten wird von aktuellen und zukünftigen Versionen der Software unterstützt.

Es existieren NetCDF-Programmierschnittstellen für C, Java und Fortran. Programmierschnittstellen sind außerdem für Python, IDL, MATLAB, R, C ++, Ruby und Perl verfügbar.

NetCDF wird aktiv entwickelt und gepflegt. Zu den jüngsten Entwicklungen gehören:

- Die NetCDF-Java-Bibliothek zum Schreiben und Lesen von NetCDF-Daten sowie zum Lesen von Daten in anderen Formen über eine NetCDF-Schnittstelle.
- Die Bibliotheken NetCDF C und Fortran bieten eine einfache NetCDF-Schnittstelle zu Daten, die mit dem Hierarchical Data Format Version 5 gespeichert wurden, und bieten NetCDF-Benutzer*innen einige erweiterte HDF5-Funktionen.
- Ein CMake-basierter Build-Prozess, der einfachere Builds auf einer Vielzahl von Plattformen ermöglicht.

- Laufende Verbesserungen der DAP-Fernzugriffsmechanismen.

NetCDF wird unter Linux, OSX, Windows und verschiedenen anderen Plattformen getestet.

2.2. Der Palm Input Data Standard (PIDS)

PIDS definiert alle möglichen Eingabeparameter für PALM, die für ein Modell bereitgestellt werden müssen. Die Daten müssen grundsätzlich im NetCDF-Format (Version 4 oder höher) bereitgestellt werden.

Anzahl und Auswahl der Parameter hängen dabei vom jeweiligen Job ab.

Die Eingabedaten werden in sogenannten "driver"-Dateien bereitgestellt. Dabei werden vier verschiedene Arten von "driver" unterschieden:

- static driver
enthält alle statischen Informationen wie Orographie, Gebäude und Oberflächenklassifizierung.
- dynamic driver
enthält dynamische Informationen für den Lauf, wie z. B. zeitabhängige Randbedingungen und den Anfangszustand der Atmosphäre.
- radiation driver
enthält statische und dynamische Informationen zu Strahlungseigenschaften (Spurengasprofile, Himmelsansichtsfaktoren).
- chemistry driver
enthält alle Informationen zu chemischen Spezies und Emissionen.

Für ihre Benennung besteht folgende Konvention: <NAME DES JOBS>_<DRIVER_NAME>.nc

Für einen Job mit dem Namen "my_test_setup" ergeben sich also folgende Input-Dateien:

- my_test_setup_static_driver.nc
- my_test_setup_dynamic_driver.nc
- my_test_setup_radiation_driver.nc
- my_test_setup_chemistry_driver.nc



Der *PALM-4U* Präprozessor verarbeitet in der aktuellen Version lediglich Daten für den *static driver*.

2.3. Daten des static driver

Der static driver enthält folgende Informationen:

- Globale Daten — Metainformationen und Vorgabewerte zum jeweiligen Projekt
- ...

Die folgende Übersicht basiert auf den Inhalten einer im PALM-4U-Projekt dokumentierten Beispieldatei (<http://palm.muk.uni-hannover.de/trac/browser/palm/trunk/SCRIPTS/.csd.config.default>).

2.3.1. Globale Daten

Unter globalen Daten verstehen wir in diesem Zusammenhang insbesondere Metainformationen und Vorgabewerte zum jeweiligen Projekt.

| Bezeichnung | Erläuterung, Beispiel |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conventions | „CF-1.7“ - NetCDF-Konvention. |
| data_content | Text (max. 16 Zeichen, siehe Tabellen A1, A2) |
| source | Text |
| version | Text (1-999) |
| dependencies | Text |
| history | Informationen zur Datenverarbeitung, Trennung durch Komma, z. B. „2016-04-22 11:45: aktualisierte Vegetation“ |
| keywords | Liste, Komma-Trennung (Text max. 12 Zeichen) |
| campaign | Dateierstellungsdatum (Universal Time Coordinated, UTC), |
| creation_time | Format: JJJJ-MM-TT hh:mm:ss +00 |
| title | Kurze Beschreibung, z. B. „PALM Input File“ oder „Szenario 1b“ |
| acronym | Abkürzung der Institution (gemäß Tabelle A3 max. 12 Zeichen), z. B. „LUHimuk“ |
| institution | Name der Einrichtung, z. B. „Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie“ |
| author | Vorname, Nachname, E-Mail-Adresse |
| contact_person | Vorname, Nachname, E-Mail-Adresse |
| license | Lizenzinformationen |
| origin_time | Referenzzeitpunkt (UTC), Format: „JJJJ-MM-TT hh: mm: ss +00“ |
| location | Name der Stadt oder Region, z. B. „Berlin“, |
| site | Name der Modelldomäne |
| origin_x | Referenz-Ostwert in m (UTM), z. B. „549020.0“ |
| origin_y | Referenznordwert in m (UTM), z. B. „5802436.0“ |
| origin_z | Referenzhöhe in m über dem Meeresspiegel gemäß DHHN2016, z. B. „57.f“ |
| origin_lat | Untere linke Ecke (y, x) der Modelldomäne in Grad Nord, z. B. „52.37f“ |

| Bezeichnung | Erläuterung, Beispiel |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| origin_lon | Vordere linke Ecke (y, x) der Modelldomäne in Grad Ost, z. B. „9.72f“ |
| rotation_angle | Drehwinkel im Uhrzeigersinn in Grad zwischen der positiven y-Achse Nord und der y-Achse in den Daten, z. B. „0.0f“ |
| references | Zitate, falls erforderlich und nützlich, Trennung durch Komma |
| comment | Verschiedene Informationen zu den Daten oder Methoden zu ihrer Erstellung |
| palm_version | z.B. „5.0“, um Kompatibilitätsprüfungen zu ermöglichen |

3. Installation und Inbetriebnahme

3.1. Lieferumfang

Der Palm-4U Präprozessor wird als zip-Archiv ausgeliefert.

Das Archiv enthält:

- dieses Bedienungshandbuch
- das Programmverzeichnis pppalm4u
- Installationsdateien für Python 3.9 (python-3.9.1-amd64.exe für 64-bit-Systeme, python-3.9.1.exe für 32-bit-Systeme)
- eine Installationsdatei für NetCDF (netCDF4.7.2-NC4-64.exe für 64-bit-Systeme, netCDF4.7.2-NC4-32.exe für 32-bit-Systeme)

Das Programmverzeichnis enthält:

- die Programmdatei PPP4U.exe (für MS Windows)
- ein Shellskript ppp4u.sh (für das Ausführen unter Linux oder Mac OS)
- ein ausführbares Java-Archiv ppp4u.jar
- ein Verzeichnis mit den benötigten Java-Bibliotheken (pppalm4u_lib)
- ein Verzeichnis mit einer Java-Laufzeitumgebung (jre8)
- ein Verzeichnis mit Python-Skripten von PALM-4U (palm)

3.2. Installation unter MS Windows

Das Archiv ist in einem Verzeichnis zu entpacken, in dem für den/die Benutzer/in vollumfängliche Schreibrechte bestehen.

3.2.1. Installation von Python

Falls noch nicht geschehen, ist Python 3.9 zu installieren. Dazu ist die Datei python-3.9.1-amd64.exe (bei 64-bit-Systemen) oder python-3.9.1.exe (bei 32-bit-Systemen) auszuführen.



Abbildung 1. Installation von Python 3.9.1.

Wählen Sie die Option "Add Python 3.9 to PATH" und klicken Sie dann auf "Customize installation".

Folgen Sie dem Assistenten wie in den folgenden Abbildungen dargestellt.

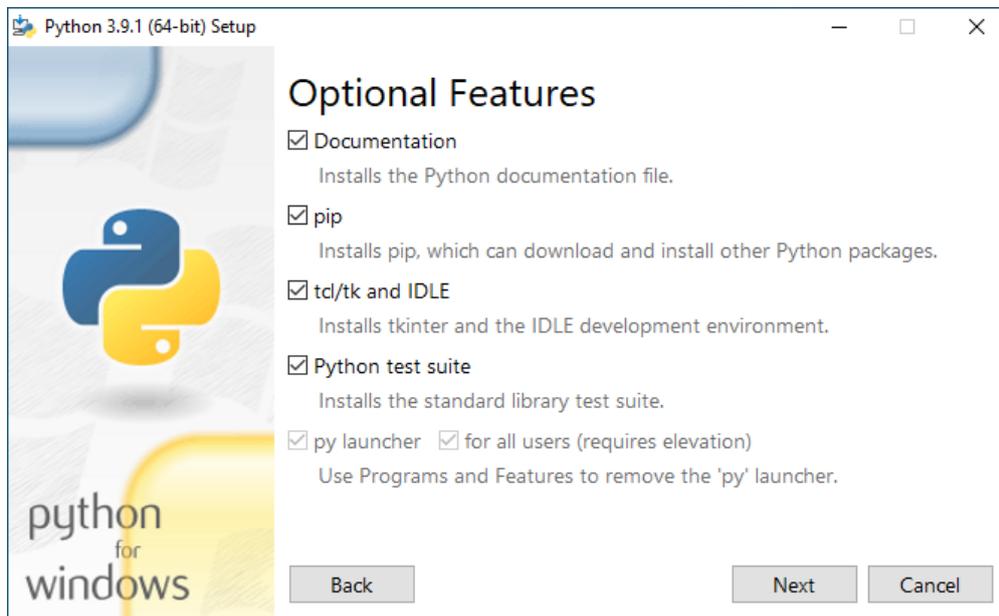


Abbildung 2. Optionale Features von Python 3.9.1.

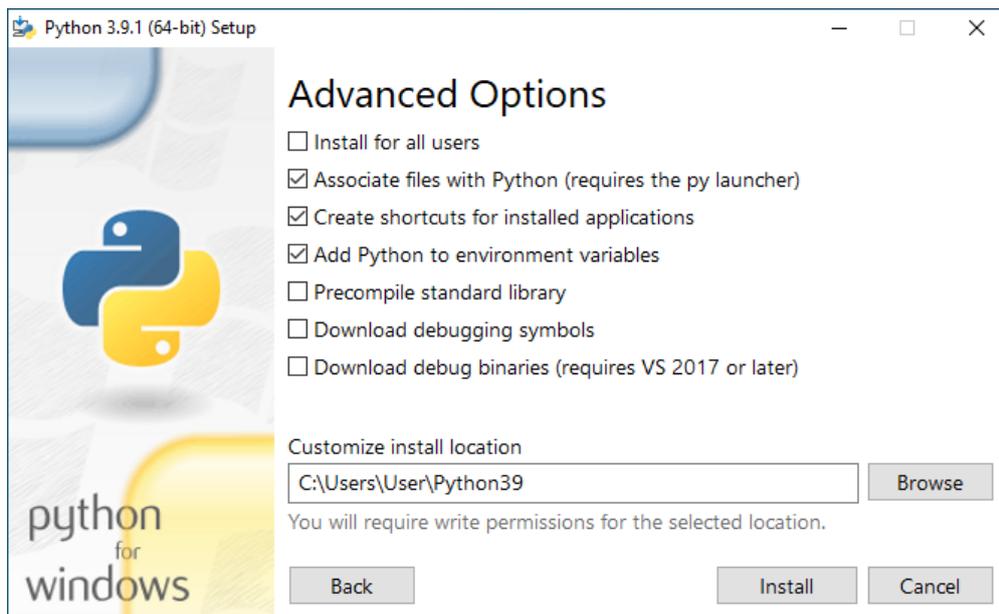
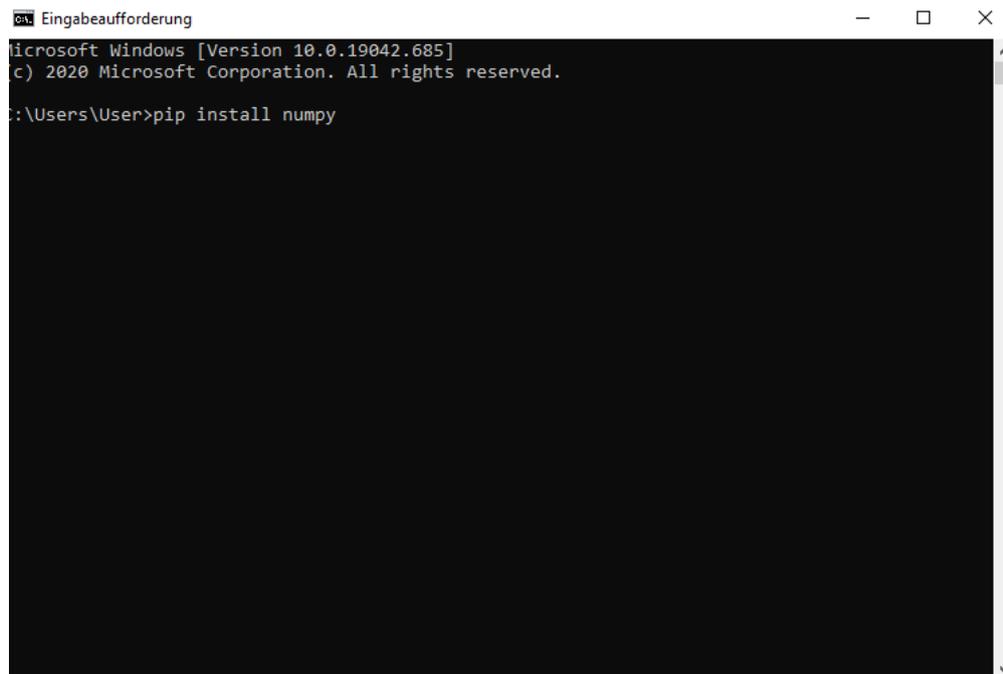


Abbildung 3. Weitere Optionen von Python 3.9.1.

Merken Sie sich das Verzeichnis, in dem Python 3.9.1 installiert wird. Diesen Pfad müssen Sie später einmalig in den Palm-4U Präprozessor Einstellungen eintragen.

Öffnen Sie nun die Eingabeaufforderung Ihres PCs und geben dort folgenden Befehl ein:
`pip install numpy`

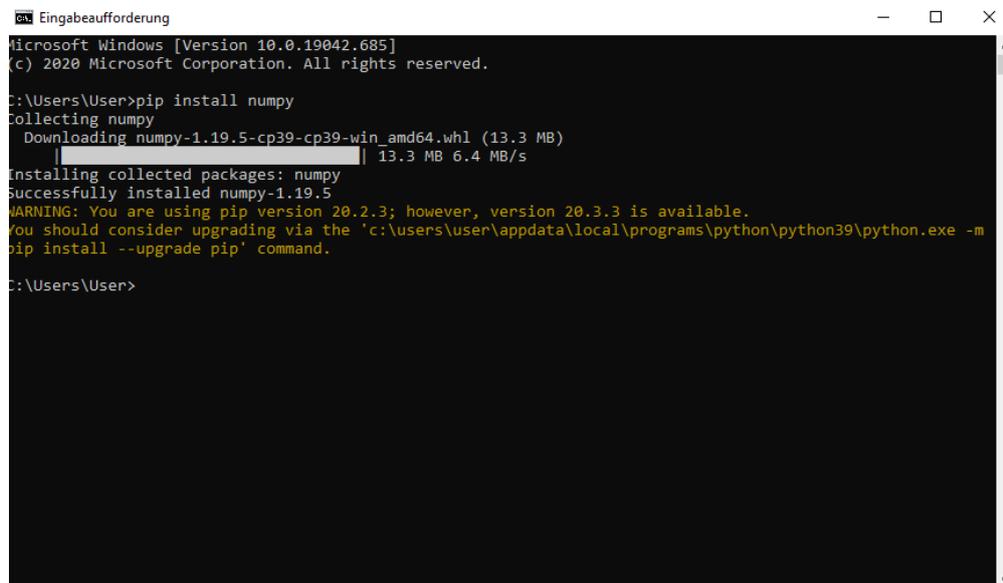


```
Microsoft Windows [Version 10.0.19042.685]
(c) 2020 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\User>pip install numpy
```

Abbildung 4. Installation von *numpy*.

Bestätigen Sie die Eingabe mit der Enter-Taste. Sie sehen nun in der Eingabeaufforderung, wie die Installation durchgeführt wird:



```
Microsoft Windows [Version 10.0.19042.685]
(c) 2020 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\User>pip install numpy
Collecting numpy
  Downloading numpy-1.19.5-cp39-cp39-win_amd64.whl (13.3 MB)
    | 13.3 MB 6.4 MB/s
Installing collected packages: numpy
Successfully installed numpy-1.19.5
WARNING: You are using pip version 20.2.3; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\python.exe -m
pip install --upgrade pip' command.

C:\Users\User>
```

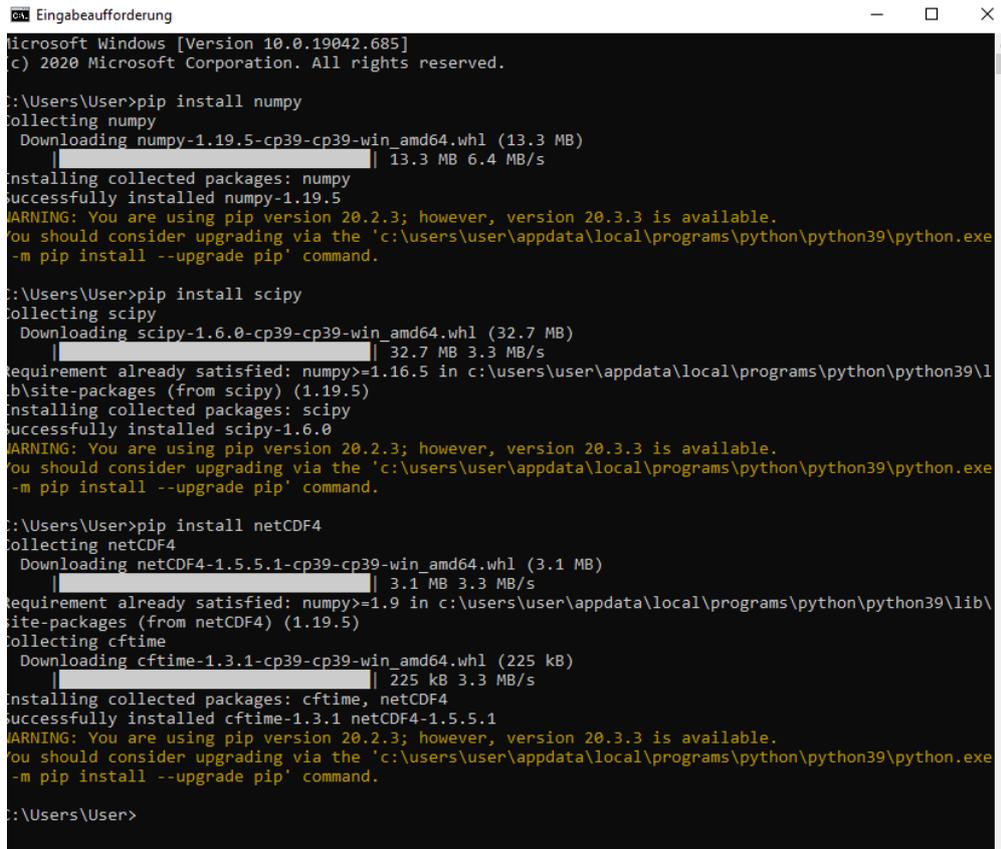
Abbildung 5. Installation von *numpy* abgeschlossen.

Geben Sie nun weitere folgende Befehle ein und bestätigen Sie diese jeweils mit der Enter-Taste:

```
pip install scipy
```

```
pip install netCDF4
```

Nachdem Sie *numpy*, *scipy* und *netCDF4* installiert haben, sollte Ihre Eingabeaufforderung folgendes zeigen:



```
Microsoft Windows [Version 10.0.19042.685]
(c) 2020 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\User>pip install numpy
Collecting numpy
  Downloading numpy-1.19.5-cp39-cp39-win_amd64.whl (13.3 MB)
    |#####| 13.3 MB 6.4 MB/s
Installing collected packages: numpy
Successfully installed numpy-1.19.5
WARNING: You are using pip version 20.2.3; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\python.exe
-m pip install --upgrade pip' command.

C:\Users\User>pip install scipy
Collecting scipy
  Downloading scipy-1.6.0-cp39-cp39-win_amd64.whl (32.7 MB)
    |#####| 32.7 MB 3.3 MB/s
Requirement already satisfied: numpy>=1.16.5 in c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\lib
\site-packages (from scipy) (1.19.5)
Installing collected packages: scipy
Successfully installed scipy-1.6.0
WARNING: You are using pip version 20.2.3; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\python.exe
-m pip install --upgrade pip' command.

C:\Users\User>pip install netCDF4
Collecting netCDF4
  Downloading netCDF4-1.5.5.1-cp39-cp39-win_amd64.whl (3.1 MB)
    |#####| 3.1 MB 3.3 MB/s
Requirement already satisfied: numpy>=1.9 in c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\lib
\site-packages (from netCDF4) (1.19.5)
Collecting cftime
  Downloading cftime-1.3.1-cp39-cp39-win_amd64.whl (225 kB)
    |#####| 225 kB 3.3 MB/s
Installing collected packages: cftime, netCDF4
Successfully installed cftime-1.3.1 netCDF4-1.5.5.1
WARNING: You are using pip version 20.2.3; however, version 20.3.3 is available.
You should consider upgrading via the 'c:\users\user\appdata\local\programs\python\python39\python.exe
-m pip install --upgrade pip' command.

C:\Users\User>
```

Abbildung 6. Installation der Bibliotheken abgeschlossen.

3.2.2. Installation von netCDF

Bevor Sie Palm-4U Präprozessor zum ersten Mal starten, müssen Sie noch die Datei netCDF4.7.2-NC4-64.exe (bei einem 32 Bit Betriebssystem: netCDF4.7.2-NC4-32.exe) ausführen. Doppelklicken Sie dazu im Explorer auf die entsprechende Datei.

Wenn die folgende Meldung erscheint, klicken Sie auf „Weitere Informationen“ und dann auf die Schaltfläche „Trotzdem ausführen“.



Abbildung 7. Warnmeldung von MS Defender.



Abbildung 8. netCDF Installation zulassen.

Folgen Sie anschließend den Anweisungen des Assistenten wie in den folgenden Abbildungen dargestellt.

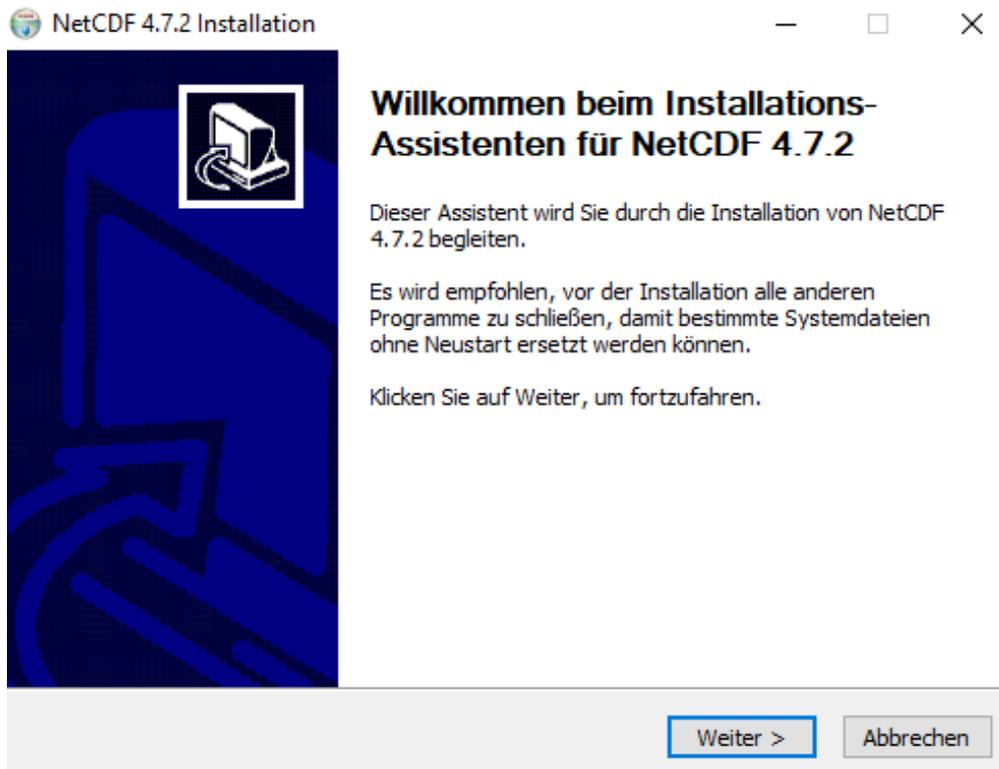


Abbildung 9. Beginn der netCDF Installation.

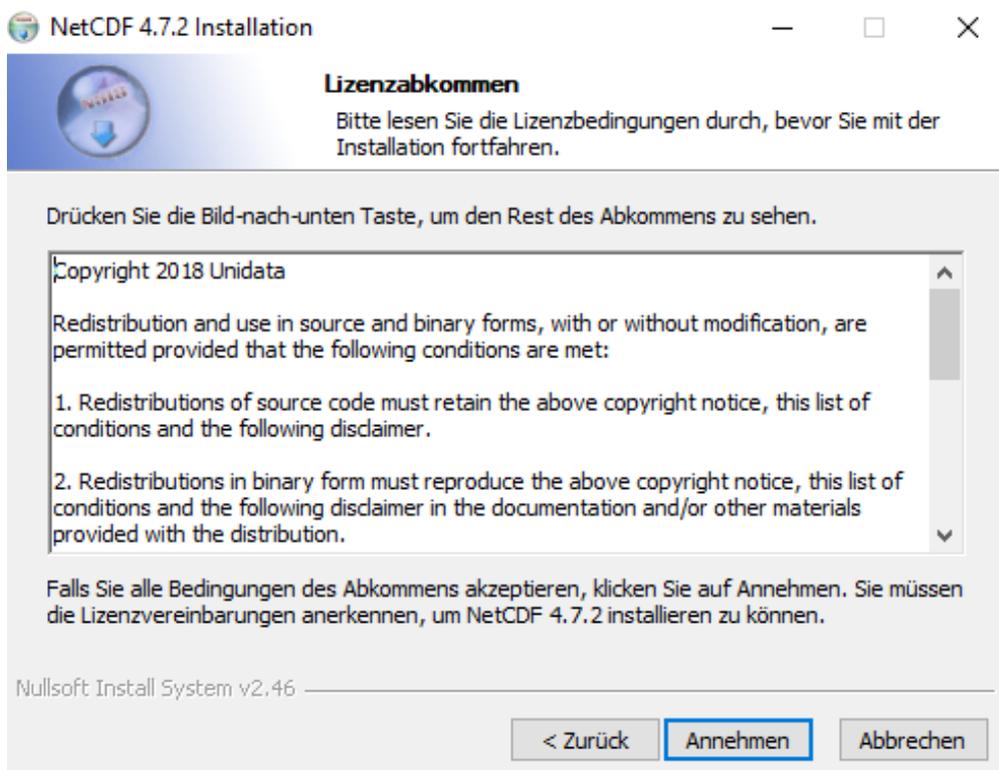


Abbildung 10. Annahme der netCDF Lizenz.

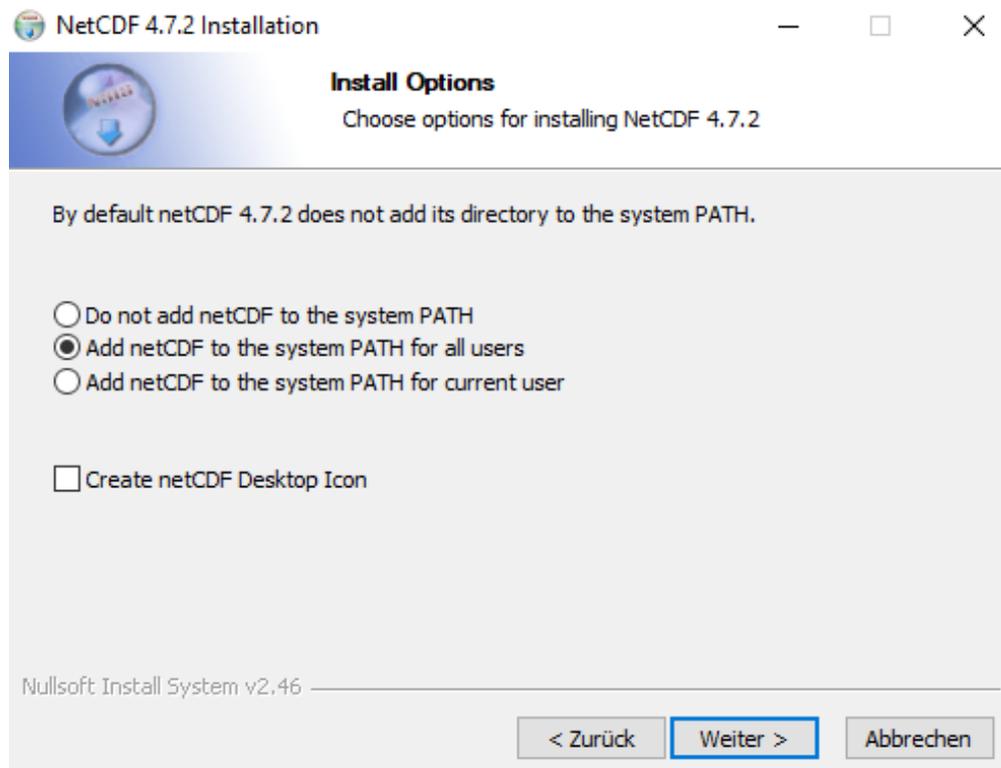


Abbildung 11. Optionen der netCDF Installation.

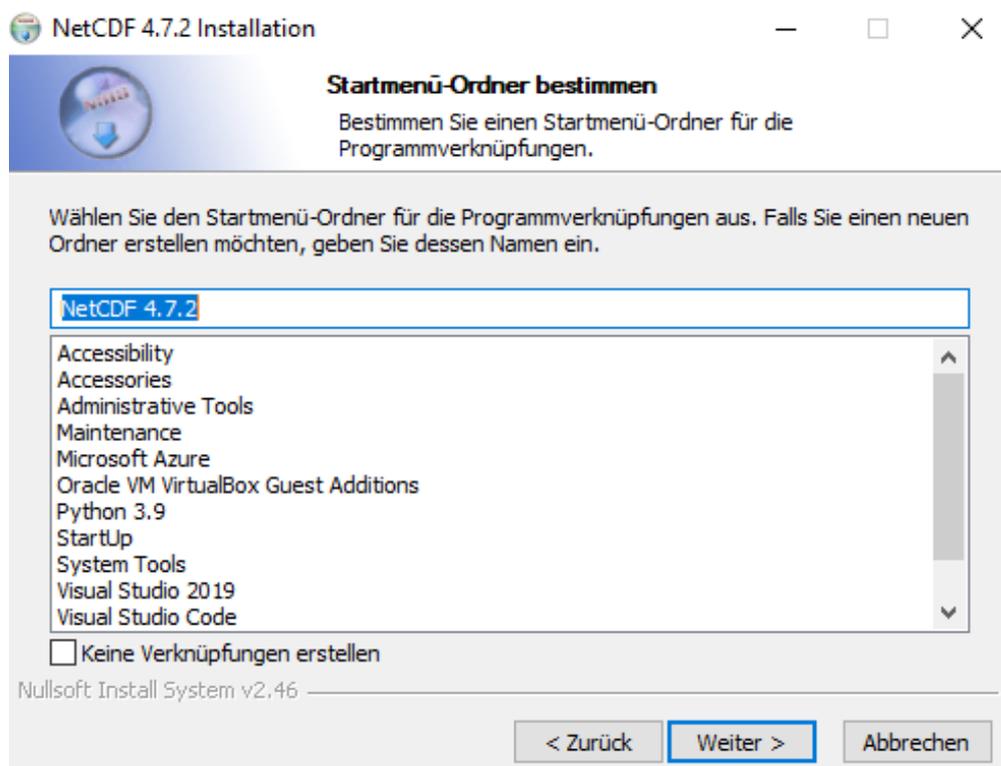


Abbildung 12. Startmenü-Ordner bestimmen.

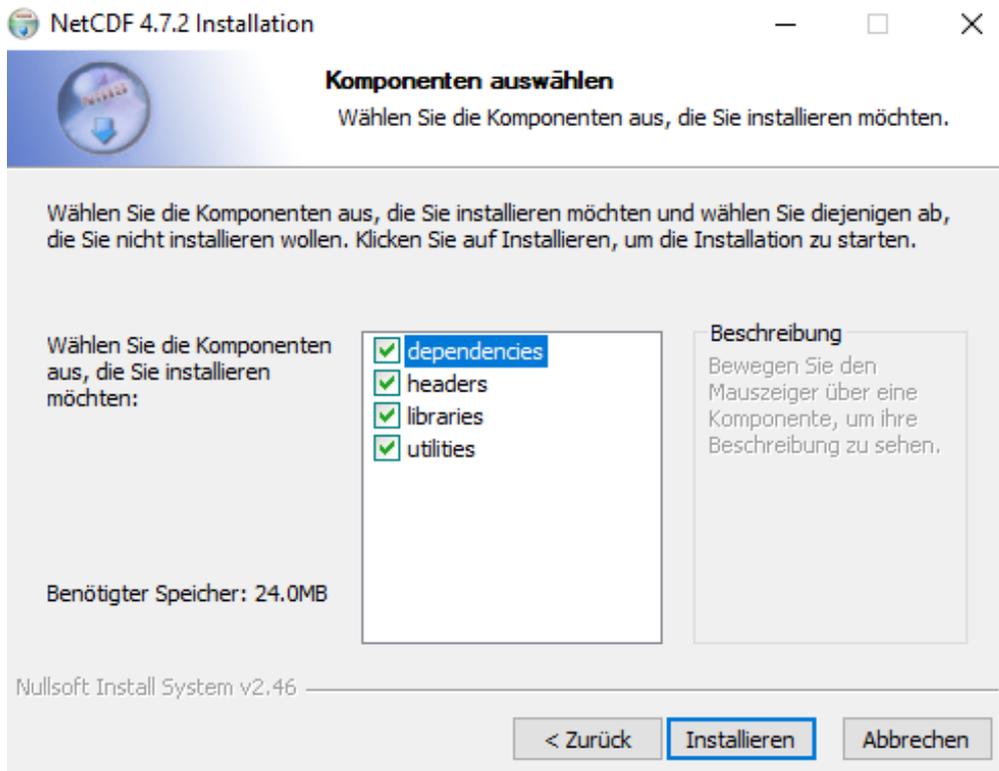


Abbildung 13. Auswahl der netCDF-Komponenten.

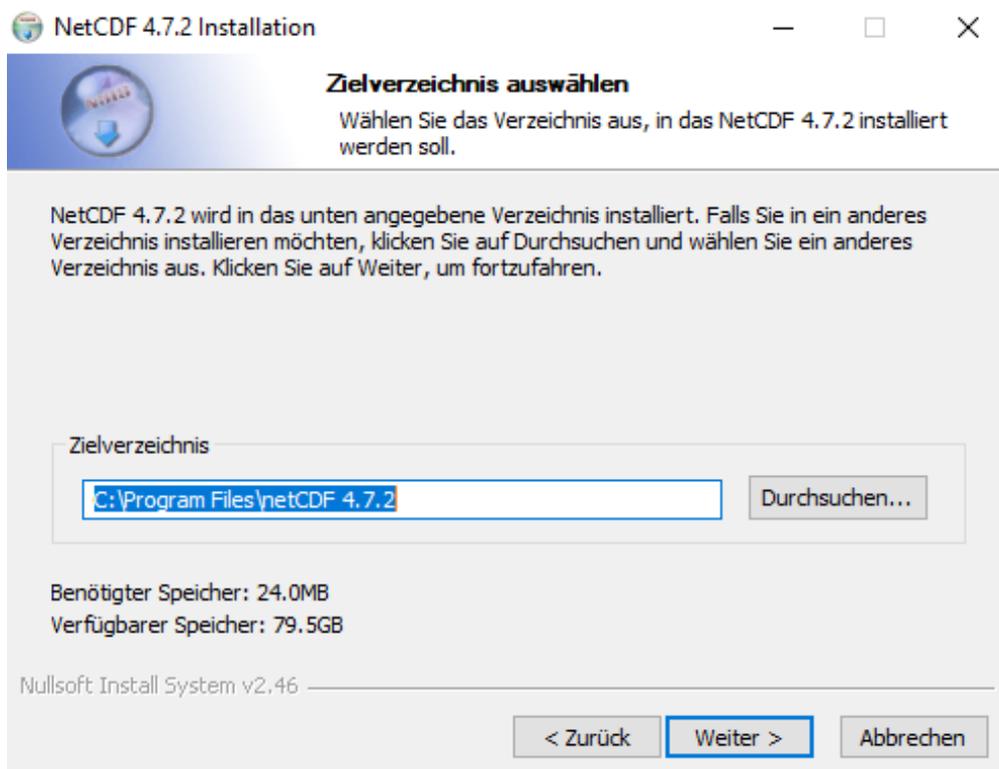


Abbildung 14. Auswahl des netCDF Installationspfades.

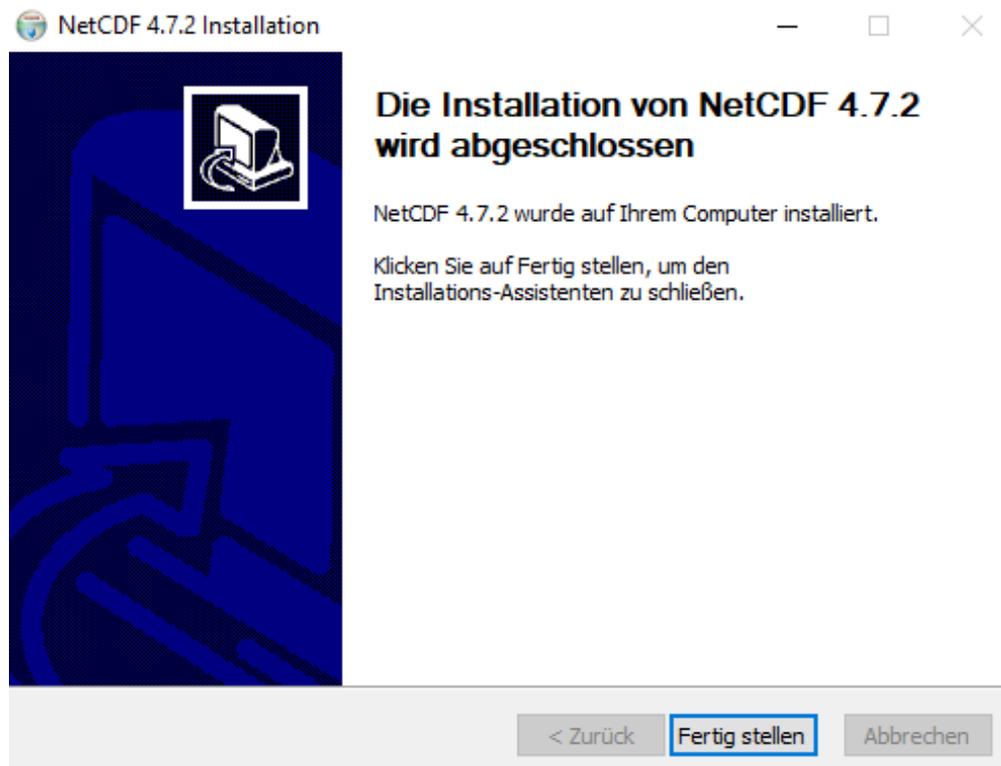


Abbildung 15. netCDF-Installation abgeschlossen.

Wenn Sie während der Installation den folgenden Fehler erhalten, müssen Sie die Umgebungsvariable „Path“ kürzen.

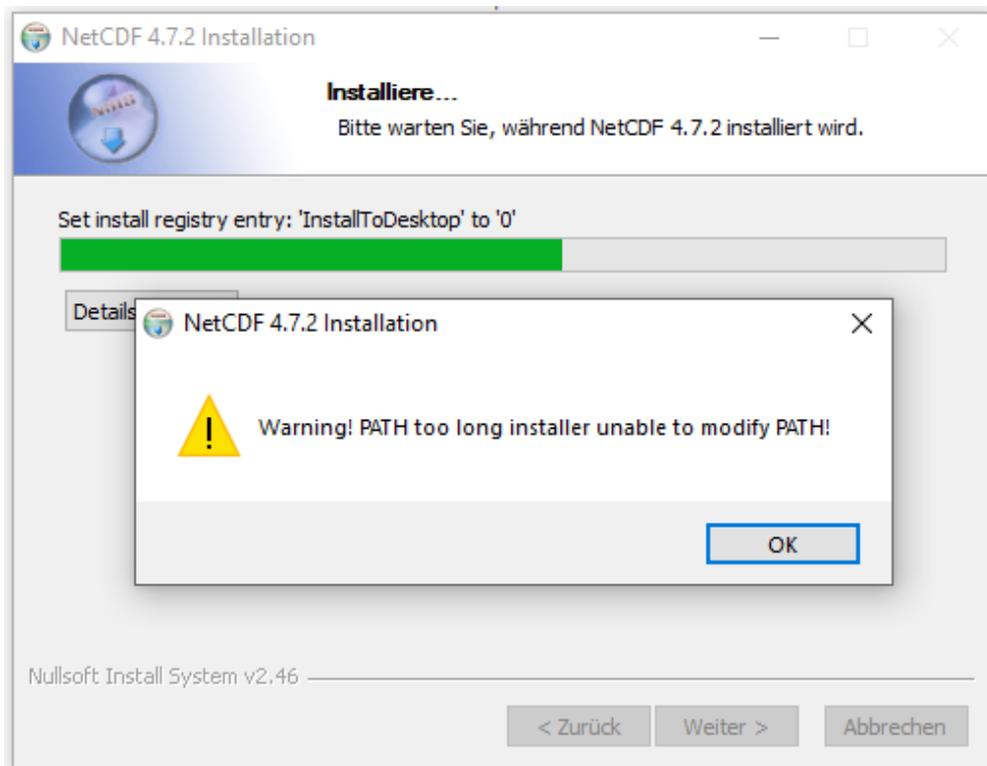


Abbildung 16. netCDF-Installationsfehler 'PATH zu lang'.

Öffnen Sie dazu die Umgebungsvariablen Ihres PCs. Wählen Sie den Eintrag „Path“ aus. Klicken

Sie nun auf „Bearbeiten“ und löschen Sie entweder nicht mehr benötigte Einträge aus der Liste der Umgebungsvariablen.



Sie sollten diese Korrekturen nur durchführen, wenn Sie sicher wissen, was Sie tun. Sollten Sie versehentlich benötigte Pfad-Einträge löschen, funktionieren möglicherweise bereits installierte Programme nicht mehr wie erwartet. Konsultieren Sie ggf. Ihren Systemadministrator.

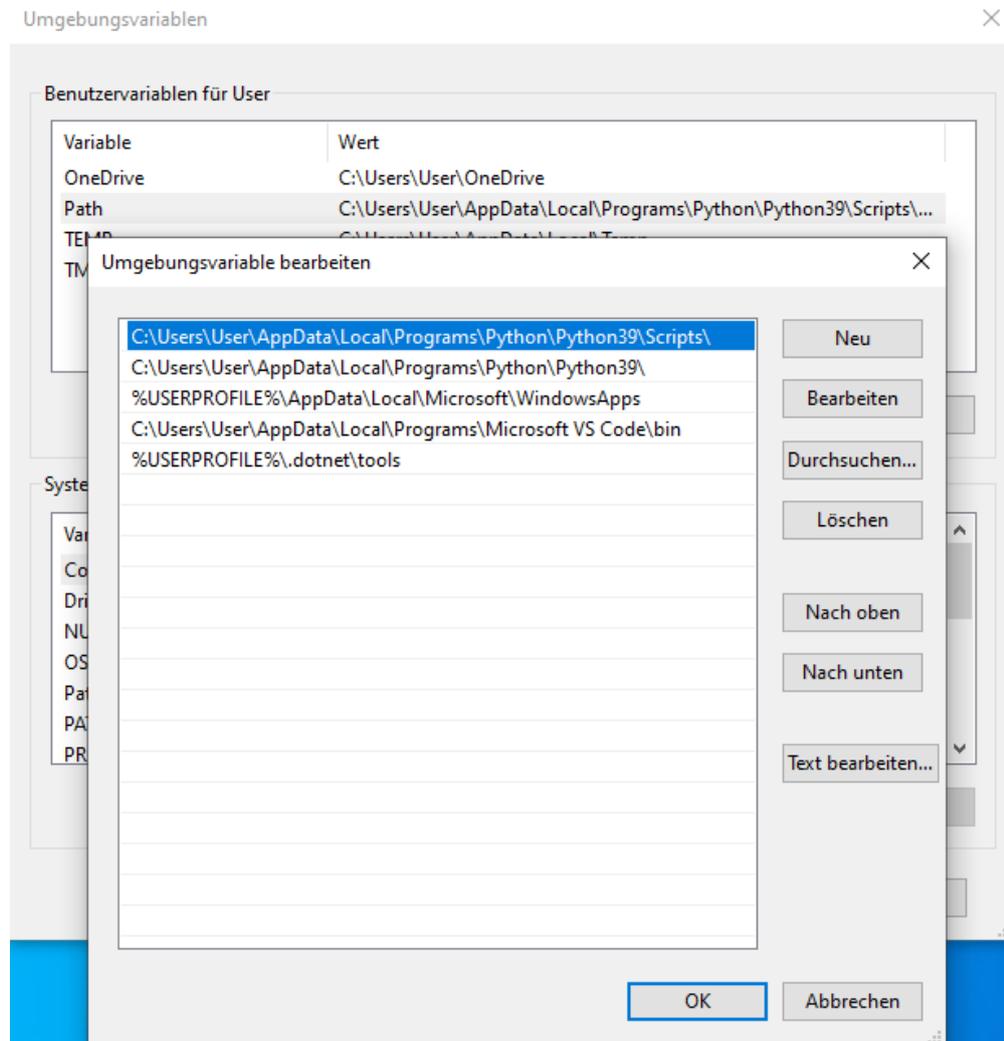


Abbildung 17. Beispiel für die Bearbeitung der Umgebungsvariablen 'Path'.

Sie können nun Palm-4U Präprozessor durch Doppelklick auf PPP4U.exe starten.

3.3. Installation unter Linux oder Mac OS

3.3.1. Java Laufzeitumgebung

Zur Installation von Amazon Corretto 8 folgen Sie den Erläuterungen im Amazon Corretto 8 User Guide (<https://docs.aws.amazon.com/corretto/latest/corretto-8-ug/what-is-corretto-8.html>).

3.3.2. Python

Verwenden Sie zur Installation von Python 3.9 (falls noch nicht geschehen) den entsprechenden Paketmanager Ihrer Linux-Distribution bzw. unter Mac OS laden Sie die entsprechende Distribution von der Python-Homepage (<https://www.python.org>).

Installieren Sie die Bibliotheken *numpy*, *scipy* und *netCDF4* mittels pip (oder pip3 je nach Art der Installation).

Stellen Sie sicher, dass mindestens die folgenden Versionen installiert wurden:

numpy: 1.19.4

scipy: 1.5.4

netCDF4: 1.5.5

3.3.3. NetCDF4

Die Installation von NetCDF4 kann mit einem der üblichen Paketmanager (rpm, yum, homebrew, macports) erfolgen. Die genaue Vorgehensweise hängt von Ihrem Betriebssystem ab.

Alternativ können Sie auch die Quellcodes verwenden und die Binaries selbst compilieren (https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/getting_and_building_netcdf.html) .

4. Validierung

Die beschriebene Installation wurde getestet mit:

MS Windows 10 (64-bit) bzw. Mac OS 10.14 (64-bit) bzw. Ubuntu Linux 18.04 LTS (64-bit)

Java : 1.8 (Amazon Corretto 8)

Python : 3.9.1

numpy : 1.19.4

netCDF4 : 1.5.5

5. Benutzung des *PALM-4U Präprozessor*

Dieses Kapitel enthält allgemeine Hinweise zur Arbeit mit dem *PALM-4U Präprozessor*.

5.1. Programmstart

Unter MS Windows starten Sie das Programm durch Doppelklick auf P3alm4U.exe.

Unter Linux oder Mac OS öffnen Sie ein Terminal und führen das Shellskript "p3alm4u.sh" aus.



Starten Sie das Programm nicht durch Doppelklick auf das jar-File, da sowohl in der .exe-Datei (unter MS Windows) als auch im Shellskript (unter Linux oder MacOS) wichtige Umgebungsvariablen gesetzt werden, ohne die das Programm nicht korrekt abläuft.

Beim ersten Programmstart erscheint das folgende Fenster ([Abbildung 18](#)).

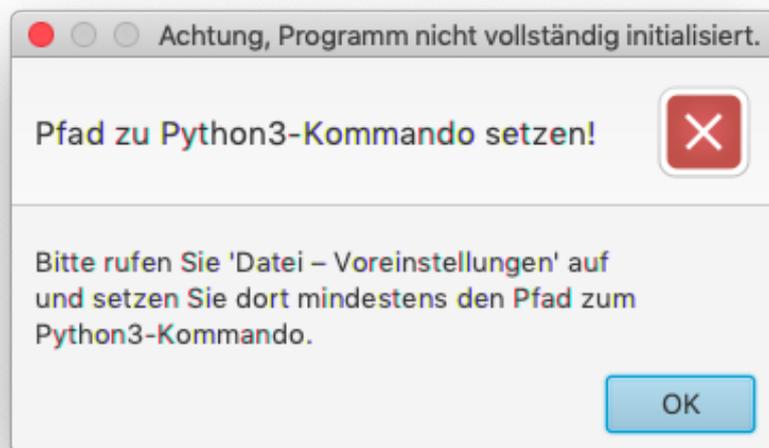


Abbildung 18. Programm nach dem ersten Start.

Nachdem Sie auf *OK* geklickt haben, schließt sich der Dialog und Sie gelangen zum eigentlichen Programmfenster ([Abbildung 19](#)).

Palm-4U Präprozessor -- 1.0

Datei Hilfe

Allgemeine Daten Modellgebiet Orographie Realnutzung Boden Baumbestand Gebäude

Autor*in:

E-Mail:

Institution:

Acronym:

Projekt:

Kampagne:

Gemeinde(n):

Ortsangabe:

Kommentar:

Pixelgröße:

Jahreszeit: Sommer Winter

Ausgabepfad

Eingabedatei für Palm-4U erzeugen Abbruch

Abbildung 19. Programmfenster mit ausgewählten ersten Reiter

Klicken sie auf das Menü "Datei" und den Eintrag "Voreinstellungen". Es öffnet sich ein Dialog zur Eingabe von Voreinstellungen ([Abbildung 20](#)).

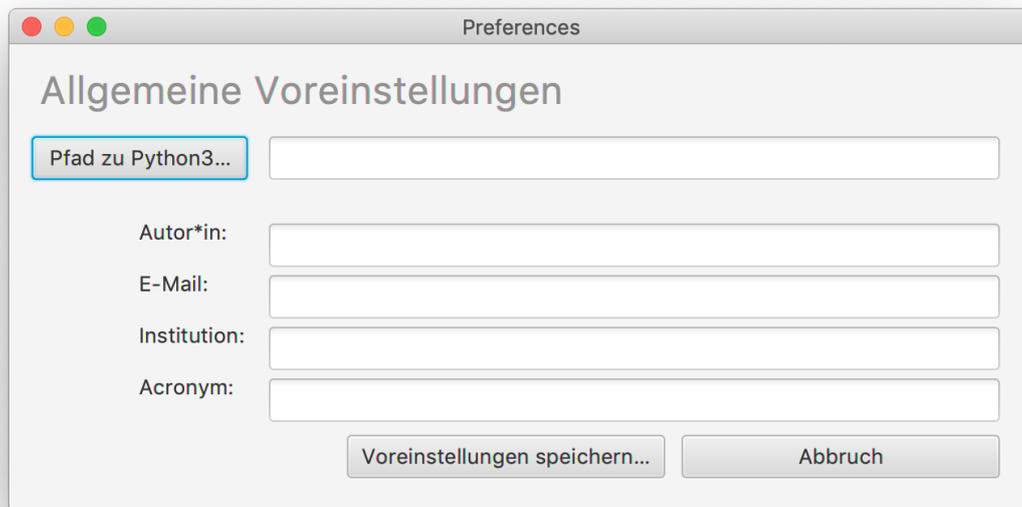


Abbildung 20. Dialog zur Eingabe von Voreinstellungen.



Setzen Sie hier insbesondere den Pfad zu python — entweder durch direkte Eingabe in das Textfeld oder mit Hilfe des über die die Schaltfläche aufzurufenden Dateidialogs.

In die anderen Felder können Sie Informationen eintragen, die immer wieder verwendet werden, z.B. Ihren Namen, Ihre E-Mail-Adresse usw. Sie können diese Daten jederzeit ändern.

Wenn Sie die Voreinstellungen gespeichert haben, wird der Dialog geschlossen. Die Informationen stehen dann im Programm zur Verfügung (siehe [Abbildung 21](#)).

Palm-4U Präprozessor -- 1.0

Datei Hilfe

Allgemeines Modellgebiet Orographie Realnutzung Boden Baumbestand Gebäudebesta

Autor*in: Andreas Müller

E-Mail: am@chromgruen.com

Institution: chromgruen GmbH & Co. KG

Acronym: chromgruen

Projekt:

Kampagne:

Gemeinde(n):

Ortsangabe:

Kommentar:

Pixelgröße: 1 50 100

Jahreszeit: Sommer Winter

Ausgabepfad

Ende

Abbildung 21. Reiter mit allgemeinen Daten zum Projekt und übernommenen Voreinstellungen

5.2. Programmstruktur und -bedienung

5.2.1. Übersicht

Das Eingabeformular ist mittels mehrerer Reiter gegliedert, die in den folgenden Abschnitten genauer erläutert werden:

| Reiter | Erläuterung |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Allgemeines | Allgemeine Daten des/der Benutzers/in und des Projektes. |
| Modellgebiet | Abgrenzung des Modellgebiets mittels eines Shapefiles oder mittels Eckkoordinaten. |
| Orographie | Einlesen digitaler Höhendaten (Geo-Tiff). |
| Realnutzung | Einlesen digitaler Realnutzungsdaten (FNK, Shapefile). |
| Boden | Einlesen digitaler Bodenkarten. (BK50, Shapefile) |
| Baumbestand | Einlesen von Daten zum Baumbestand. (Shapefile) |
| Gebäudebestand | Einlesen digitaler Gebäudedaten (City-GML) |

Das Datei-Menü verfügt über folgende Einträge, die in den folgenden Abschnitten genauer erläutert werden:

| Eintrag | Erläuterung |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Öffnen... | Ruft einen Dateidialog zum Öffnen einer Projektdatei auf. |
| Speichern unter... | Ruft einen Dateidialog zum Speichern der Eingaben in einer Projektdatei auf. |
| Voreinstellungen | Ruft den Dialog zum Festlegung von Vorgabedaten auf. |
| ... | |
| Ende | Beendet das Programm. |

Das Hilfe-Menü verfügt zur Zeit nur über einen noch nicht implementierten Eintrag.

5.2.2. Der Reiter "Allgemeines"

Hier werden projektbezogene Meta- und Konfigurationsdaten erfasst. Für die Modellierung relevant sind insbesondere die Pixelgröße, also die Größe der Rasterzellen (in Metern) und die Jahreszeit. Die Pixelgröße kann über den Schieberegler oder durch Eingabe in das Textfeld festgelegt werden. Bei Eingabe im Textfeld passt sich der Regler automatisch an und umgekehrt. Hier können auch gebrochene Werte angegeben werden.



Beachten Sie, dass bei der Eingabe der Pixelgröße als Dezimaltrenner der Punkt (.) verwendet wird!

Abbildung 22. Reiter zur Erfassung allgemeiner Daten

Die Festlegung der Jahreszeit erfolgt über die entsprechenden Optionsfelder.

Über die Schaltfläche "Ausgabepfad" ist die Ausgabedatei (Endung ".nc") festzulegen.

5.2.3. Der Reiter "Modellgebiet"

Auf diesem Reiter wird die Abgrenzung des Modellgebietes vorgenommen.

Dies erfolgt entweder durch Auswahl eines Shapefiles mit genau einem (rechteckigen) Polygon (Schaltfläche "Datei wählen...") oder durch direkte Eingabe von Koordinaten, wobei Sie hier das entsprechende Koordinatensystem anhand der Auswahlliste festlegen müssen.



Wenn die Größe des Modellgebietes kein ganzzahliges Vielfaches der Pixelgröße darstellt, wird das Modellgebiet auf die nächstgrößeren Vielfachen erweitert!

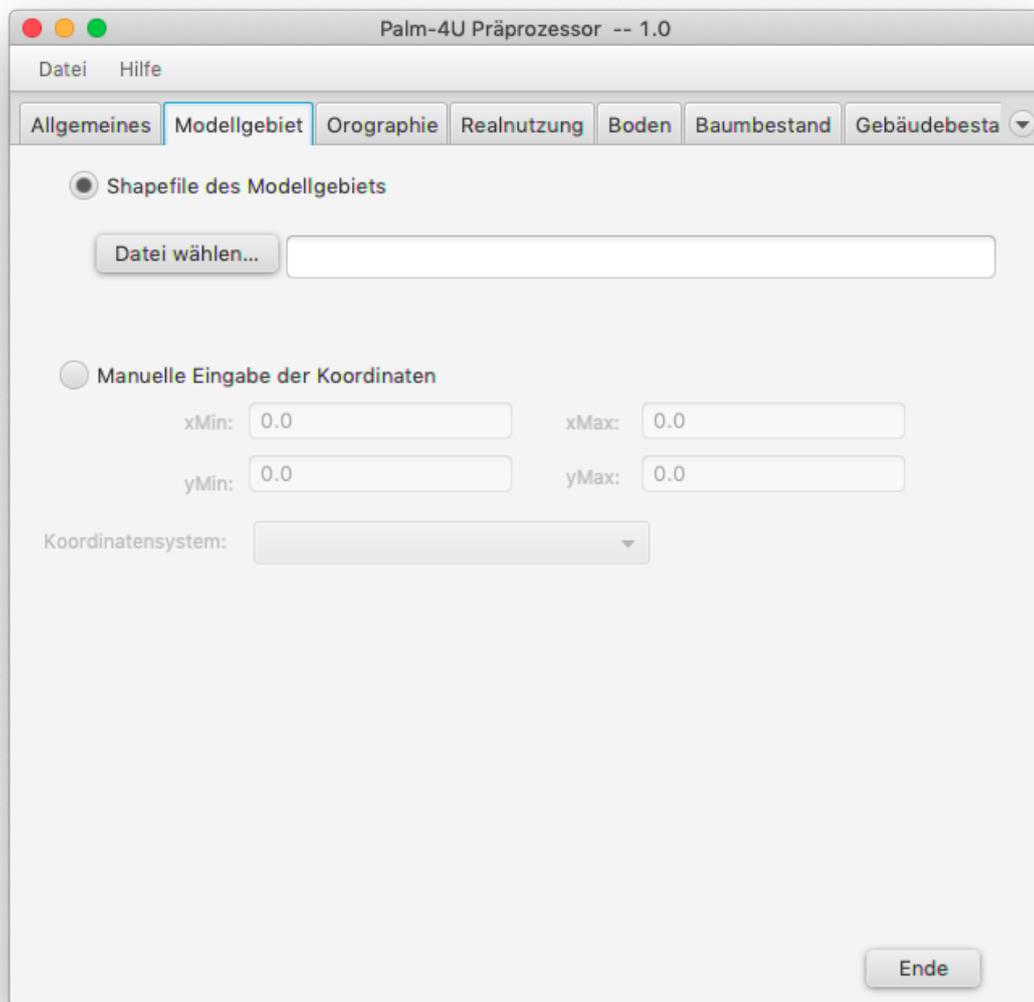


Abbildung 23. Reiter zur Definition des Modellgebietes

5.2.4. Der Reiter "Orographie"

Hier ist das zu verwendende digitale Höhenmodell auszuwählen. Aktuell wird nur das Geo-TIFF-Format unterstützt. Es ist geplant, auch weitere Formate zu implementieren.

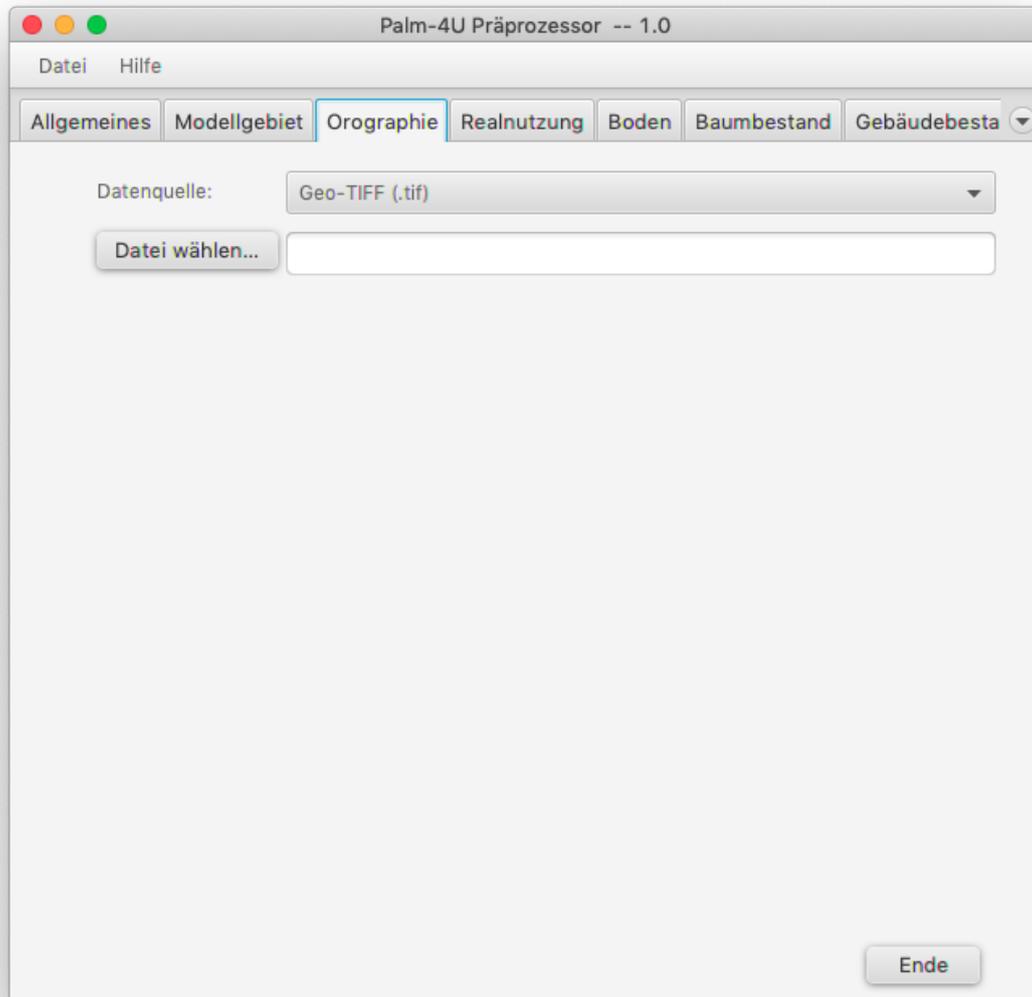


Abbildung 24. Reiter zur Auswahl der DGM-Daten.

5.2.5. Der Reiter "Realnutzung"

In diesem Reiter wird die Datenquelle der Realnutzung ausgewählt. Aktuell können nur FNK-Daten des Regionalverband Ruhr eingelesen werden. Es ist geplant, auch weitere Datenquellen (z.B. CORINE) zu implementieren.

Abbildung 25. Reiter zur Auswahl von Flächennutzungsdaten

Die obere Schaltfläche "Datei wählen..." dient der Auswahl der Realnutzungsdatei. Mit der unteren Schaltfläche legen Sie fest, wohin die vorverarbeiteten Daten (als shapefile) geschrieben werden sollen.

5.2.6. Der Reiter "Boden"

Hier ist die Datenquelle für Bodenarten anzugeben. Es ist das Feld anzugeben, in dem sich eine textliche Festlegung der Bodenart befindet. Der Feldbezeichner ist aufgrund der digitalen Bodenkarte 1:50.000 (BK50) vorgelegt. Er kann aber frei gewählt werden.

Aktuell werden ausschließlich ESRI-Shapefiles unterstützt.

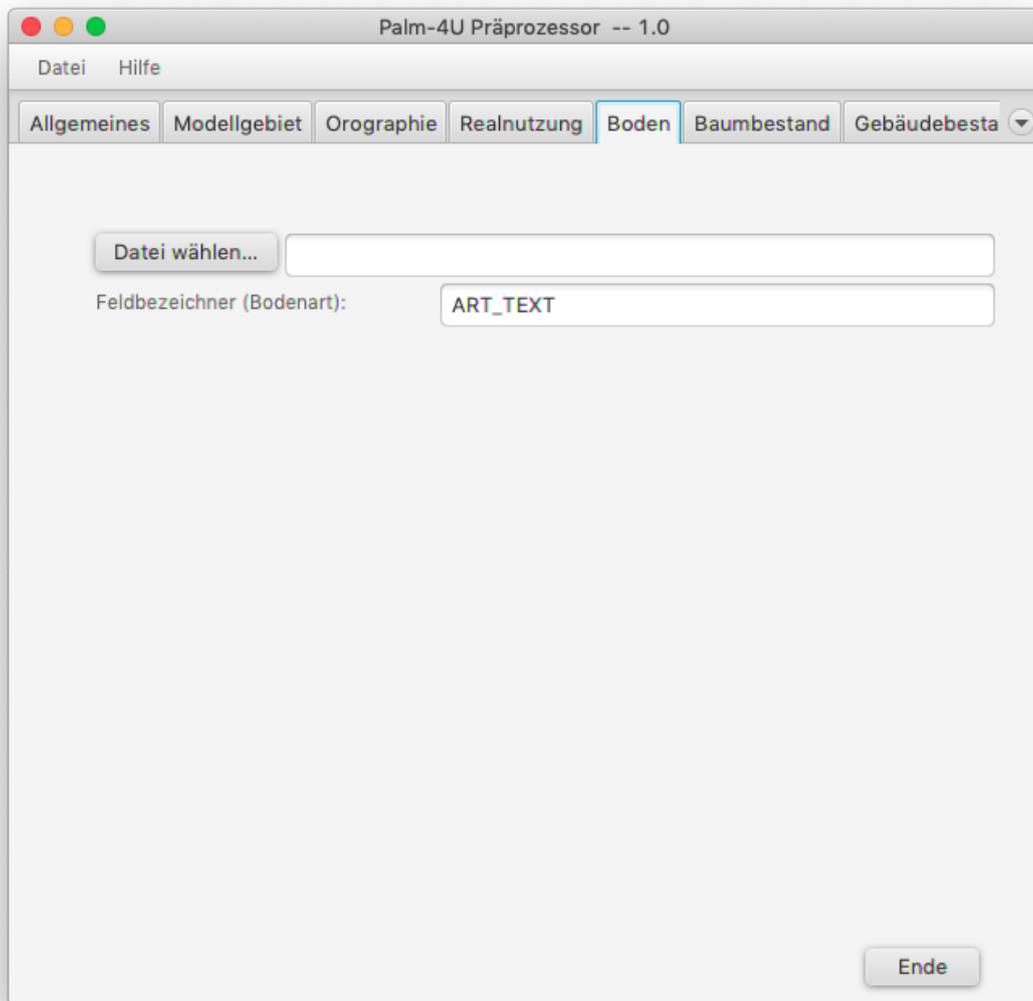


Abbildung 26. Reiter zur Auswahl digitaler Bodendaten.

Die Abbildung der in der BK50 definierten Bodenarten auf den *soil_type* gemäß PIDS ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

| Bodenart | soil_type | soil_type_code |
|--------------------|------------------|-----------------------|
| feinbodenarm | coarse | 1 |
| lehmig-sandig | coarse | 1 |
| sandig | coarse | 1 |
| stark lehmig-sandi | coarse | 1 |
| sandig-lehmig | medium | 2 |
| sandig-schluffig | medium | 2 |
| lehmig-tonig | fine | 4 |
| tonig-lehmig | medium-fine | 3 |
| tonig-schluffig | medium-fine | 3 |
| organisch | organic | 6 |

5.2.7. Der Reiter "Baumbestand"

Hier ist die Datenquelle für den Baumbestand (Einzelbäume) anzugeben. Es sind die Felder anzugeben, in denen sich die für die Berechnung der Blattfläche/-dichte LAD (leaf area density) und Stammfläche/-dichte BAD (basal area density) benötigten Angaben befinden. Die Feldbezeichner sind aufgrund der im Rahmen der Entwicklung vorliegenden Datengrundlage vorbelegt. Sie können aber frei gewählt werden.

Abbildung 27. Reiter zur Auswahl von Daten zum Baumbestand



Bitte achten Sie darauf, Zahlenwerte ggf. entsprechend der vorgegebenen Einheiten (Baumhöhe: Meter, Stamm- und Kronendurchmesser: Zentimeter) umzurechnen.

Die zugrundeliegende Gattungsliste wurde aus dem PALM-4U-Projekt übernommen.

Details zu den Gattungen sind im Anhang dargestellt.

5.2.8. Der Reiter "Gebäudebestand"

Datenquelle für den Gebäudebestand sind die City-GML-Daten. Es kann entweder eine einzelne Datei oder ein Verzeichnis mit City-GML-Dateien angegeben werden.

Für den Fall, dass für Bauwerke kein Nutzungstyp ermittelt werden konnte (entweder direkt aus den importierten City-GML-Daten oder durch Kombination mit der Realnutzung) ist ein Vorgabewert zu setzen. Dieser wird nur dann verwendet, wenn kein Nutzungstyp ermittelt werden konnte.

Gleiches gilt für das Gebäudealter. Liegen hierzu keine Informationen vor, ist für die beiden Nutzungsarten jeweils eine Vorgabealtersklasse zu setzen.

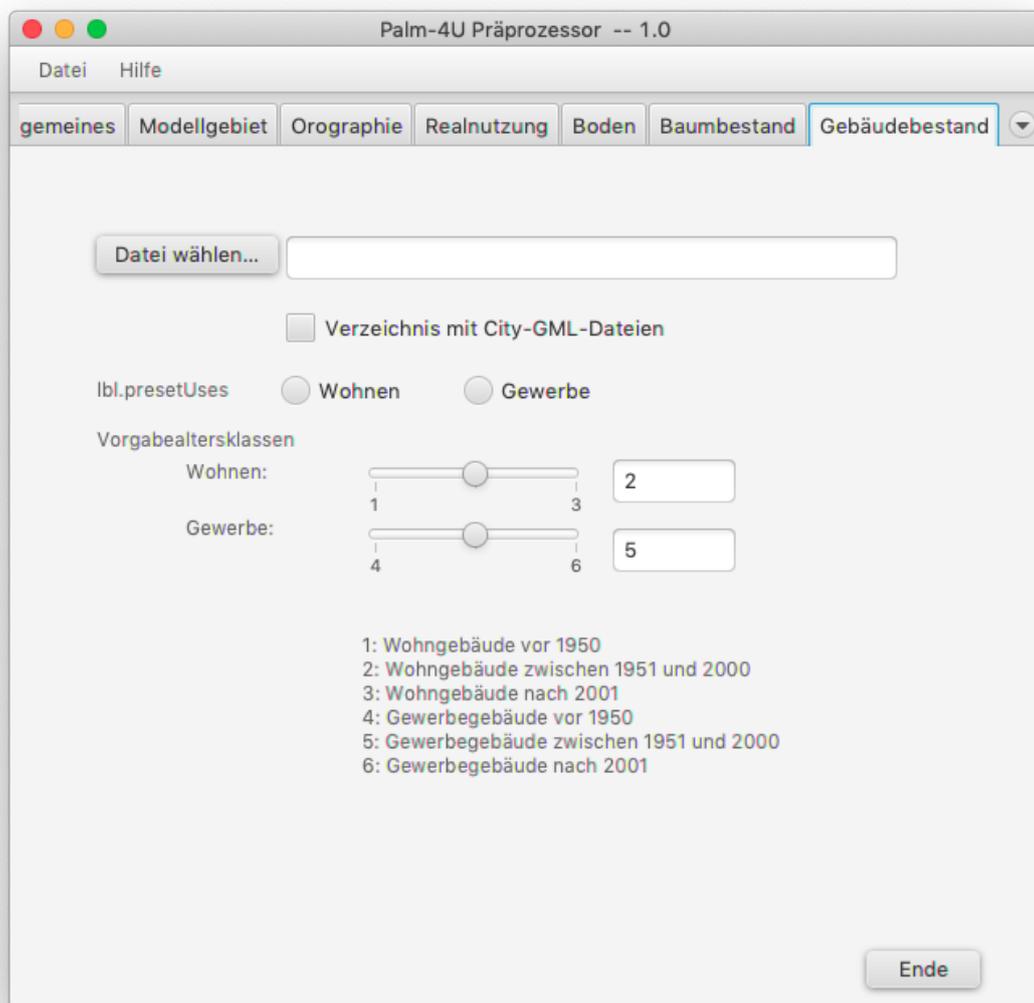


Abbildung 28. Reiter zur Auswahl von Daten zum Gebäudebestand.

5.2.9. Der Reiter "Prüfung und Export"

Vor Erzeugung der NetCDF-Datei für Palm-4U sind die Daten zu prüfen.

Durch Anklicken der Schaltfläche "Alle Inputdaten prüfen" wird diese Prüfung angestoßen und in dem darunter befindlichen Textfeld dokumentiert.

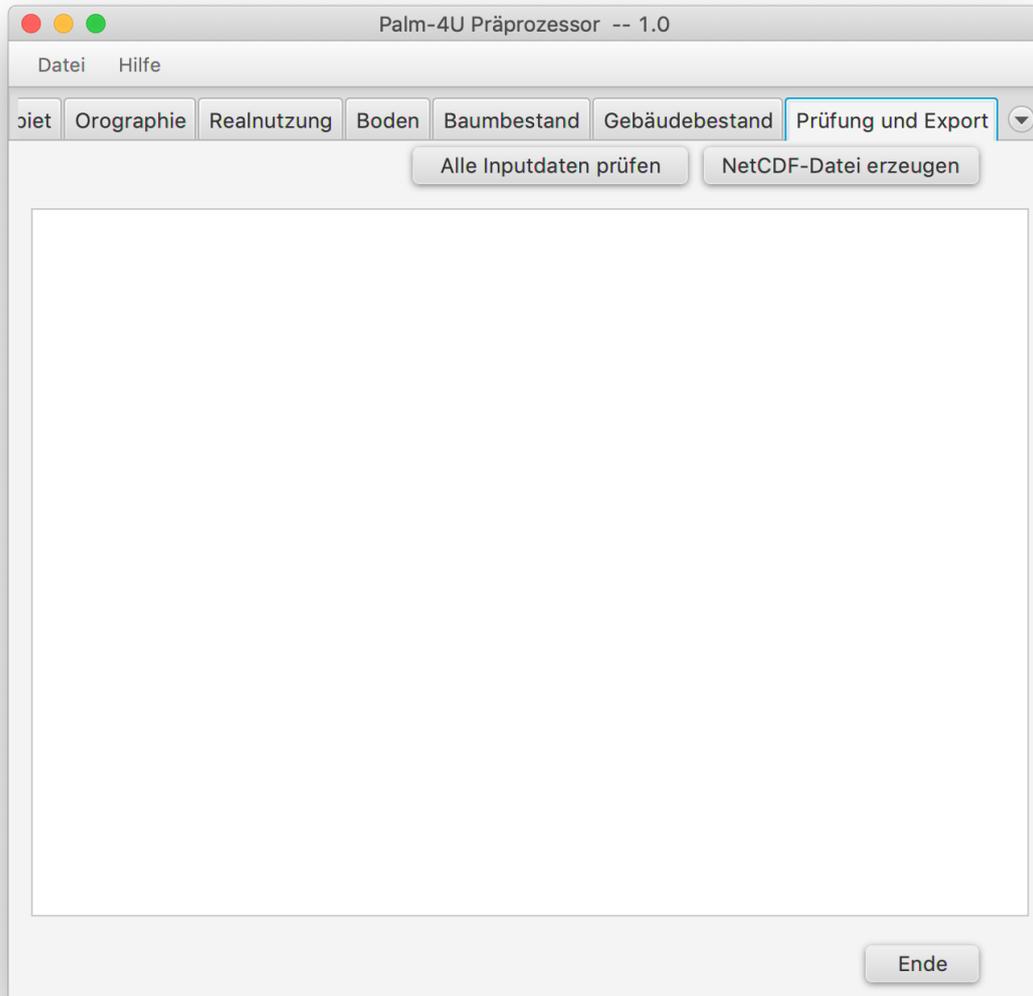


Abbildung 29. Reiter zur Datenprüfung und Erzeugung der Palm-4U-Datei.

Die Prüfkriterien und die Meldungen des Prüfprozesses werden im Anhang ausführlich beschrieben.

6. Unterstützung

Wenn während der Arbeit mit dem Programm ein Fehler oder etwas Unerwartetes eintritt, ist wie folgt vorzugehen:

- Der Fehler oder das unerwartete Verhalten sollte möglichst reproduziert werden. Wenn dies gelingt, ist im Bereich der Systemfunktionen auf den Menü-Eintrag "LOG" zu klicken, und die dort vorgefundenen Meldungen sind in eine Datei zu kopieren. Diese Datei ist mit einer kurzen Beschreibung des Fehlers zu speichern (siehe unten).
- Anschließend ist diese Datei an die unter "Kontakt" genannte eMail-Adresse zu senden.
- An dem Datensatz, bei dem der Fehler aufgetreten ist, sollten keine Änderungen mehr vorgenommen werden.
- Wenn der Fehler nicht reproduziert werden kann, ist es wahrscheinlich, dass eine Fehleingabe vorgenommen wurde. Es kann dann normal weitergearbeitet werden.

Um aufgetretene Fehler möglichst gut und schnell beheben zu können, ist eine gute Fehlerdiagnose und -dokumentation unabdingbar.

Wenn Sie einen Fehler melden, sind folgende Informationen besonders wichtig:

- Welche Programmversion verwenden Sie?
- Mit welchen Daten ist der Fehler aufgetreten?
- Was genau haben Sie getan und was sollte Ihrer Meinung nach passieren?
- Was ist stattdessen passiert?
- Konnten Sie das Verhalten reproduzieren?
- Haben Sie Daten verloren?
- Konnten Sie trotz des Fehlers weiter arbeiten?
- Ist der Fehler früher schon einmal aufgetreten?

7. Nutzungsbedingungen

7.1. Geltungsbereich

Der Regionalverband Ruhr (nachfolgend "Lizenzgeber"), bietet allen an der Klimamodellierung interessierten Nutzerinnen und Nutzern (nachfolgend "Nutzer") die Möglichkeit, die Software *PALM-4U Präprozessor* (nachfolgend "Software") zu nutzen. Indem der Nutzer die Software verwendet, stimmt er diesen Nutzungsbedingungen zu.

7.2. Nutzungsrechte und -beschränkungen

7.2.1. Nutzungsrechte

Die Software steht zur kostenlosen Nutzung zur Verfügung. Dem Nutzer wird ein einfaches, zeitlich unbegrenztes Recht zur Nutzung der Software und der dazugehörigen Bedienungsanleitung eingeräumt, das ihn berechtigt, die Software für eigene Zwecke zu verwenden. Die Verwendung der Software ist nur für den eigenen Gebrauch genehmigt. Dieses Recht ist nicht übertragbar. Jeglicher Verkauf, Vertrieb, Übermittlung des Programms ist verboten. Das Recht zur Veröffentlichung, Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung sowie Bearbeitung verbleibt beim Regionalverband Ruhr. Das Anfertigen von Kopien ist dem Anwender nur für den eigenen internen Gebrauch erlaubt. Weitere Verwendungen müssen vom Regionalverband Ruhr gestattet werden. Ein Anspruch des Nutzers auf Offenlegung des Quelltextes besteht nicht. Der Nutzer verpflichtet sich, auf den Lizenzgeber als Rechtsinhaber hinzuweisen. Eine kommerzielle Verwendung der urheberrechtlich geschützten Software sowie von Teilen der Software durch den Nutzer ist unzulässig.

Der Nutzer ist nicht berechtigt, Abänderungen, Bearbeitungen oder andere Umgestaltungen an der Software vorzunehmen und die Software oder Teile davon in abgeänderter, bearbeiteter oder umgestalteter Form zu vervielfältigen, zu veröffentlichen, zu verbreiten, vorzuführen, zu übertragen und im Internet und Intranet oder in anderen Netzen entgeltlich oder unentgeltlich zum Abruf bereitzuhalten bzw. öffentlich zugänglich zu machen.

7.2.2. Beschränkungen der Anwendung

Mit dem vorliegenden Tool können gängige Geodaten in das Eingangsformat für das Programm *PALM-4U* konvertiert werden. Die Verantwortung für die fachliche Korrektheit sowohl der Eingabedaten als auch der konvertierten Daten liegt bei den Anwendern.

7.3. Eigentumsrecht, Urheberrecht, Schutzrechte

Die Software ist urheberrechtlich geschützt und steht im Eigentum des Lizenzgebers. Die dem Nutzer vom Lizenzgeber als Inhaber des ausschließlichen Nutzungsrechts überlassene Software verbleibt bei zeitlich unbegrenzter unentgeltlicher Überlassung einschließlich der gesamten Dokumentation im Eigentum des Lizenzgebers. Der Lizenzgeber versichert, dass er Inhaber der ausschließlichen Nutzungsrechte an der Software ist und über diese Rechte frei verfügen kann. An allen in diesem Werk verwendeten Warennamen, Firmen- und Markenbezeichnungen können Schutzrechte bestehen, auch wenn diese als solche nicht gekennzeichnet sind. Eine Veröffentlichung in diesem Werk berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese frei verwendbar

sind.

Die Software verwendet Bibliotheken, die durch verschiedene Open Source Lizenzen geschützt sind.

7.4. Haftungsausschluss

Die Software wird vom Lizenzgeber zu deren kostenlosen Nutzung als Freeware im Ist-Zustand zur Verfügung gestellt. Der Lizenzgeber übernimmt keine Gewährleistung für den Gebrauch und die Leistung der Software. Er ist insbesondere nicht für deren Brauchbarkeit, Funktionsfähigkeit, Mängelfreiheit und sonstigen Eigenschaften der Software, auch in Bezug auf das Erreichen des mit dem Einsatz der Software bezweckten Ergebnisses verantwortlich. Eine Haftung des Lizenzgebers für etwaige unmittelbare Schäden und mittelbare Folgeschäden durch den Gebrauch der Software ist ausgeschlossen. Alle Risiken, die sich direkt oder indirekt aus der Nutzung der Software ergeben, liegen ausschließlich beim Nutzer. Dies gilt auch für einen etwaigen Datenverlust und für etwaige Beschädigungen am Computer des Nutzers und daraus resultierenden Folgeschäden durch die Installation und den Gebrauch der Software. Jeder Aufwand wurde in dem Bestreben erbracht sicherzustellen, dass die in der Software enthaltenen Daten fehlerfrei und auf dem neuesten Stand sind. Dennoch gibt es keine Gewährleistung für die Exaktheit und Belastbarkeit der hier enthaltenen Informationen. Der Lizenzgeber übernimmt keine Gewähr für die Genauigkeit, Vollständigkeit oder Sinnhaftigkeit der Informationen. Eine Haftung für Schäden, die aus der Nutzung der Software folgen, ist außer in Fällen von Vorsatz und grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen. Der Lizenzgeber übernimmt keine Gewähr dafür, dass die übertragene Software frei von Viren, Trojanern, Würmern etc. ist. Der Lizenzgeber übernimmt keine Garantie dafür, dass die von ihm lizenzierte Software frei von Rechten Dritter ist.

7.5. Schlussbestimmungen

Diese Nutzungsbedingungen unterliegen deutschem Recht. Gerichtsstand ist Essen, Deutschland.

Sollten einzelne Bestimmungen dieser Nutzungsbedingungen unwirksam sein oder werden, so wird dadurch die Wirksamkeit der übrigen Bestimmungen nicht berührt. Statt der unwirksamen Bestimmung tritt an deren Stelle die einschlägige gesetzliche Regelung.

8. Anhang

8.1. Erläuterung der Prüfkriterien

Modellgebiet innerhalb der Ausdehnung [der Orographie, des Baumbestands, der Realnutzung, der Bodendaten]

Die Ausdehnung der Shape-Datei des Modellgebietes muss innerhalb der Ausdehnung der Eingabedaten liegen. Ist eine Ausdehnung kleiner als die Ausdehnung des Modellgebietes, dann erscheint z.B. folgende Meldung:

Modellgebiet größer als die Ausdehnung der Realnutzung

Passen Sie dann die Shape-Datei des Modellgebietes so an, dass diese innerhalb des Gebietes der Realnutzung liegt. Beachten Sie dazu auch den Hinweis unter „Ungültiger Bereich im Modellgebiet“.

Pfad zum Modellgebiet ist nicht gesetzt.

Wählen Sie im Reiter Modellgebiet eine Shape-Datei aus, die das Modellgebiet als Geometrie enthält.

Ungültiger Bereich im Modellgebiet

Aus der Shape-Datei des Modellgebietes und der Eingabe „Pixelgröße (m)“, konnte kein Raster erstellt werden. Achten Sie darauf, dass das Modellgebiet ein korrektes Rechteck bildet. Idealerweise sind die Länge und die Breite des Rechteckes ein Vielfaches der eingegebenen Pixelgröße. Wenn Länge und Breite des Rechteckes kein Vielfaches der eingegebenen Pixelgröße sind, wird die jeweilige Seite so vergrößert, dass das Rechteck ein Vielfaches der Pixelgröße ist. Dies kann zur Folge haben, dass das Modellgebiet größer ist als die Ausdehnung der zu verarbeitenden Daten. Diese müssen dann entsprechend korrigiert werden.

Shapefile des Modellgebiets und Manuelle Eingabe der Koordinaten leer

Geben Sie entweder ein Shapefile mit einem Modellgebiet an oder legen Sie das Modellgebiet durch manuelle Eingabe der Koordinaten im Reiter „Modellgebiet“ fest.

Fehler beim Einlesen ... [der Realnutzung, der Orographie, der Bodendaten, des Baumbestands]

Die entsprechende Datei konnte nicht eingelesen werden. Prüfen Sie, ob die ausgewählte Datei in einem gültigen Dateiformat vorliegt und ob die Datei der vorgegebenen Struktur entspricht.

Fehler beim Dateizugriff auf NetCdf-Datei

Die NetCdf-Datei (Programmausgabe) konnte nicht erstellt werden. Überprüfen Sie, ob der Pfad korrekt ist und ob Sie im Ausgabepfad Schreibzugriff besitzen.

Fehler beim Schreiben der PalmCsdConfig

Die Datei, die zur Erstellung der NetCdfDatei verwendet wird, wird im Anwendungsverzeichnis unter „temp/csd.config.example“ abgelegt.

Kann diese Datei nicht erstellt werden, erscheint dieser Fehler.
Prüfen Sie, ob Sie im Anwendungsverzeichnis Schreibrechte besitzen.

Verarbeitung von X übersprungen - Pfad der CityGML-Daten nicht gesetzt

X: [CityGML-Daten, DGM, Realnutzungsdaten, Bodendaten, Baumdaten]

Wenn Sie im entsprechendem Reiter in der Anwendung keine Eingabe-Datei ausgewählt haben, wird diese Meldung ausgegeben. Die Meldung dient als Hinweis. Falls Sie eine Auswahl einer Eingabe-Datei fälschlicherweise nicht gemacht haben, können Sie dies nachholen. Ansonsten ignorieren Sie die Meldung.

Zellgröße ist nicht gesetzt

Die „Pixelgröße (m)“ im Reiter „Allgemeines“ wurde nicht gesetzt. Dieser Wert muss für die weitere Verarbeitung gesetzt sein.

PythonScript kann nicht ausgeführt werden

Das Script zur Erstellung der Ausgabe NetCdf-Datei kann nicht ausgeführt werden werden.
Stellen Sie sicher, dass der Pfad zu Python in den Voreinstellungen richtig gesetzt ist und dass Sie unter „temp/csd.config.example“ Schreibrechte besitzen.

Anzahl Baeume im Modellgebiet : X Anzahl unvollstaendiger Baeume im Modellgebiet : Y

Es werden die Anzahl der vorgefundenen Bäume im Modellgebiet, sowie die Anzahl der unvollständiger Bäume im Modellgebiet ausgegeben.

Baum an Position y:Y x:X ohne Angabe von [Kronendurchmesser, Stammdurchmesser, Artangabe, Höhenangabe]

Die Meldung beschreibt, welche Daten an einem Baum an einer Position (x,y) des Rasters fehlen.

Für einen Baum muss mindestens eine Information aus Kronendurchmesser, Stammdurchmesser, Artangabe, Höhenangabe für den Baum vorhanden sein.

Falls nicht, wird der Baum übersprungen.

Wenn mindestens ein Wert gesetzt ist, werden vom System Standardwerte für die anderen Attribute vergeben.

Fnk an Position y:Y x:X ohne Angabe von Vegetation, Wasser und Oberflächenbefestigung

Es liegt ein unvollständiger Datensatz in der Realnutzung vor.

In der erstellten Raster-Datei (Reiter „Realnutzung“ unter „Ausgabe Raster-Daten“) können Sie die entsprechenden Daten nachtragen. Wiederholen Sie den danach den Vorgang „Alle Inputdaten prüfen“.

Eine Erzeugung der NetCdf-Datei ist technisch auch mit unvollständigen Realnutzungsdaten möglich.

Gebaeude an Position y:Y x:X ohne [Höhenangabe, Baujahr, Nutzungsangabe]

Es liegt ein unvollständiger Datensatz in den Gebäudedaten vor.

Bei Daten ohne Baujahr und Nutzungsangabe wird der Bauwerkstyp anhand der Vorgabeklassen im Reiter „Gebäudebestand“ erstellt.

Eine Erzeugung der NetCdf-Datei ist technisch auch mit unvollständigen Gebäudedaten möglich.

Die Prüfung wurde beendet. Sie können nun die NetCDF-Datei erzeugen!

Die NetCDF-Datei kann erzeugt werden.

8.2. Baumdaten gemäß PALM-4U

Die folgenden Baumarten sind im Canopy-Generator des PALM-4U-Projektes hinterlegt (für eine Erläuterung der Spaltenköpfe sei auf das Palm-4U-Projekt verwiesen).

| Gattung | Klassennummer |
|----------------|----------------------|
| Abies | 1 |
| Acer | 2 |
| Aesculus | 3 |
| Ailanthus | 4 |
| Alnus | 5 |
| Amelanchier | 6 |
| Betula | 7 |
| Buxus | 8 |
| Calocedrus | 9 |
| Caragana | 10 |
| Carpinus | 11 |
| Carya | 12 |
| Castanea | 13 |
| Catalpa | 14 |
| Cedrus | 15 |
| Celtis | 16 |
| Cercidiphyllum | 17 |
| Cercis | 18 |
| Chamaecyparis | 19 |
| Cladrastis | 20 |
| Cornus | 21 |
| Corylus | 22 |
| Cotinus | 23 |
| Crataegus | 24 |

| Gattung | Klassennummer |
|-----------------|----------------------|
| Cryptomeria | 25 |
| Cupressocyparis | 26 |
| Cupressus | 27 |
| Cydonia | 28 |
| Davidia | 29 |
| Elaeagnus | 30 |
| Euodia | 31 |
| Euonymus | 32 |
| Fagus | 33 |
| Fraxinus | 34 |
| Ginkgo | 35 |
| Gleditsia | 36 |
| Gymnocladus | 37 |
| Hippophae | 38 |
| Ilex | 39 |
| Juglans | 40 |
| Juniperus | 41 |
| Koelreuteria | 42 |
| Laburnum | 43 |
| Larix | 44 |
| Ligustrum | 45 |
| Liquidambar | 46 |
| Liriodendron | 47 |
| Lonicera | 48 |
| Magnolia | 49 |
| Malus | 50 |

| Gattung | Klassennummer |
|----------------|----------------------|
| Metasequoia | 51 |
| Morus | 52 |
| Ostrya | 53 |
| Parrotia | 54 |
| Paulownia | 55 |
| Phellodendron | 56 |
| Picea | 57 |
| Pinus | 58 |
| Platanus | 59 |
| Populus | 60 |
| Prunus | 61 |
| Pseudotsuga | 62 |
| Ptelea | 63 |
| Pterocaria | 64 |
| Pterocarya | 65 |
| Pyrus | 66 |
| Quercus | 67 |
| Rhamnus | 68 |
| Rhus | 69 |
| Robinia | 70 |
| Salix | 71 |
| Sambucus | 72 |
| Sasa | 73 |
| Sequoiadendron | 74 |
| Sophora | 75 |
| Sorbus | 76 |

| Gattung | Klassennummer |
|----------------|----------------------|
| Syringa | 77 |
| Tamarix | 78 |
| Taxodium | 79 |
| Taxus | 80 |
| Thuja | 81 |
| Tilia | 82 |
| Tsuga | 83 |
| Ulmus | 84 |
| Zelkova | 85 |
| Zenobia | 86 |
| Cephalotaxus | 87 |
| Evodie | 88 |
| Unbekannt | -1 |

Die Werte sind hier dokumentiert, um ggf. weitere, hier nicht berücksichtigte Baumgattungen entsprechend zuzuordnen (ohne Änderung des Programmcodes müsste eine "pseudo"-Gattung verwendet werden, indem der hier nicht berücksichtigten Gattung X die ihr weitgehend ähnliche, hier berücksichtigte Gattung Y zugeordnet wird).

| Gattung | shape | ratio | diameter | height | lai_supper | lai_winter | lad_max_height | bad_scale | dbh |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Default | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.35 |
| Abies | 3.0 | 1.0 | 4.0 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Acer | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Aesculus | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.00 |
| Ailanthus | 1.0 | 1.0 | 8.5 | 13.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.30 |
| Alnus | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 16.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.20 |
| Amelanchier | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 4.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.20 |
| Betula | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 14.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.30 |

| Gattung | shape | ratio | diameter | height | lai_sommer | lai_winter | lad_max_height | bad_scale | dbh |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Buxus | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 4.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Calocedrus | 3.0 | 1.0 | 5.0 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Caragana | 1.0 | 1.0 | 3.5 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Carpinus | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Carya | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 17.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Castanea | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Catalpa | 1.0 | 1.0 | 5.5 | 6.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Cedrus | 1.0 | 1.0 | 8.0 | 13.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Celtis | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Cercidiphyllum | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 6.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Cercis | 1.0 | 1.0 | 2.5 | 7.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Chamaecyparis | 5.0 | 1.0 | 3.5 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Cladrastis | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Cornus | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 6.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.20 |
| Corylus | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Cotinus | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 4.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Crataegus | 3.0 | 1.0 | 3.5 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.40 |
| Cryptomeria | 3.0 | 1.0 | 5.0 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Cupressocyparis | 3.0 | 1.0 | 3.0 | 8.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Cupressus | 3.0 | 1.0 | 5.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Cydonia | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Davidia | 1.0 | 1.0 | 10.0 | 14.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Elaeagnus | 1.0 | 1.0 | 6.5 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.20 |
| Euodia | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Euonymus | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |

| Gattung | shape | ratio | diameter | height | lai_sommer | lai_winter | lad_max_height | bad_scale | dbh |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Fagus | 1.0 | 1.0 | 10.0 | 12.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Fraxinus | 1.0 | 1.0 | 5.5 | 10.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.60 |
| Ginkgo | 3.0 | 1.0 | 4.0 | 8.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Gleditsia | 1.0 | 1.0 | 6.5 | 10.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Gymnocladus | 1.0 | 1.0 | 5.5 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Hippophae | 1.0 | 1.0 | 9.5 | 8.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Ilex | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 7.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Juglans | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Juniperus | 5.0 | 1.0 | 3.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |
| Koelreuteria | 1.0 | 1.0 | 3.5 | 5.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Laburnum | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Larix | 3.0 | 1.0 | 7.0 | 16.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Ligustrum | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Liquidambar | 3.0 | 1.0 | 3.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.30 |
| Liriodendron | 3.0 | 1.0 | 4.5 | 9.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Lonicera | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Magnolia | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 5.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Malus | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 5.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.30 |
| Metasequoia | 5.0 | 1.0 | 4.5 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Morus | 1.0 | 1.0 | 7.5 | 11.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.00 |
| Ostrya | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.00 |
| Parrotia | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.30 |
| Paulownia | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 8.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Phellodendron | 1.0 | 1.0 | 13.5 | 13.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Picea | 3.0 | 1.0 | 3.0 | 13.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.90 |

| Gattung | shape | ratio | diameter | height | lai_sommer | lai_winter | lad_max_height | bad_scale | dbh |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Pinus | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 16.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Platanus | 1.0 | 1.0 | 10.0 | 14.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Populus | 1.0 | 1.0 | 9.0 | 20.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.40 |
| Prunus | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.60 |
| Pseudotsuga | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 17.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Ptelea | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 4.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Pterocaria | 1.0 | 1.0 | 10.0 | 12.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Pterocarya | 1.0 | 1.0 | 11.5 | 14.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.60 |
| Pyrus | 3.0 | 1.0 | 3.0 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.80 |
| Quercus | 1.0 | 1.0 | 8.0 | 14.0 | 3.1 | 0.1 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |
| Rhamnus | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 4.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.30 |
| Rhus | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 5.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Robinia | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 13.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Salix | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 14.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Sambucus | 1.0 | 1.0 | 8.0 | 6.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.40 |
| Sasa | 1.0 | 1.0 | 10.0 | 25.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Sequoiadendron | 5.0 | 1.0 | 5.5 | 10.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.60 |
| Sophora | 1.0 | 1.0 | 7.5 | 10.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.40 |
| Sorbus | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Syringa | 1.0 | 1.0 | 4.5 | 5.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Tamarix | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 7.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.50 |
| Taxodium | 5.0 | 1.0 | 6.0 | 16.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.60 |
| Taxus | 2.0 | 1.0 | 5.0 | 7.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.50 |
| Thuja | 3.0 | 1.0 | 3.5 | 9.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |
| Tilia | 3.0 | 1.0 | 7.0 | 12.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.70 |

| Gattung | shape | ratio | diameter | height | lai_summer | lai_winter | lad_max_height | bad_scale | dbh |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------------|
| Tsuga | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 10.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.10 |
| Ulmus | 1.0 | 1.0 | 7.5 | 14.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.80 |
| Zelkova | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 5.5 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 1.20 |
| Zenobia | 1.0 | 1.0 | 5.0 | 5.0 | 3.0 | 0.8 | 0.6 | 0.025 | 0.40 |



Lohmeyer

Stadtweite Klimasimulationen Bochum

Auftraggeber:

Regionalverband Ruhrgebiet

Kronprinzenstraße 35

45128 Essen

Bearbeitung:

Lohmeyer GmbH

Niederlassung Dorsten

Dr. rer. nat. Benedict Brecht

Dr. rer. nat. Rowell Hagemann

M.Sc. Met. Patrick Hogan

M.Sc. Geogr. Jessica Lehmkühler

Dipl.-Met. Georg Ludes

Februar 2021

Projekt 30095-20-02

Berichtsumfang 51 Seiten

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | ZUSAMMENFASSUNG | 2 |
| 2 | EINLEITUNG | 8 |
| | 2.1 Hintergrund | 8 |
| | 2.2 Gebietsbeschreibung | 8 |
| | 2.3 Aufgabenstellung | 8 |
| 3 | UNTERSUCHUNGSGEBIETEMETHODIK UND VORGEHENSWEISE | 11 |
| 4 | EINGANGSDATEN | 18 |
| | 4.1 Modellinitialisierung | 18 |
| | 4.2 Geodaten | 20 |
| | 4.2.1 Topographie | 20 |
| | 4.2.2 Oberflächenbeschaffenheit..... | 21 |
| | 4.2.3 Vegetation | 23 |
| | 4.2.4 Gebäude..... | 24 |
| 5 | ERGEBNISSE | 25 |
| | 5.1 Ergebnisse für die Situation am Nachmittag | 26 |
| | 5.2 Ergebnisse für die Situation kurz vor Sonnenaufgang | 28 |
| 6 | FAZIT | 31 |
| 7 | LITERATUR | 33 |
| | ANHANG | 33 |

Hinweise:

Der vorliegende Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des Ingenieurbüros Lohmeyer GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch den Namen und die Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

1 ZUSAMMENFASSUNG

Für das gesamte Stadtgebiet von Bochum sollen im Rahmen der Förderung von Projekten zur Grünen Infrastruktur mit Hilfe eines geeigneten Simulationsmodells die lokalklimatischen Verhältnisse für das gesamte Bochumer Stadtgebiet modelliert werden. Ziel des Projekts ist es, für eine hochsommerliche windschwache und wolkenarme Wetterlage einen Überblick über die stadtklimatische Situation in Bochum zu erhalten, der es ermöglicht, Belastungsräume, Ausgleichsflächen und klimatische Besonderheiten des Untersuchungsraumes abzuleiten.

Vor der Durchführung der mikroskaligen Simulationsrechnungen für das Bochumer Stadtgebiet wurden mesoskalige Berechnungen für einen größeren Untersuchungsraum durchgeführt, um klimatische Einflüsse aus den benachbarten Stadtgebieten und die Einwirkung regionaler thermischer Windsysteme aus dem Sauerland in das Bochumer Stadtgebiet berücksichtigen zu können.

Bei den mikroskaligen Simulationsrechnungen, die mit der geforderten Maschenweite von 10 m erfolgten, wurden - wie seitens des Auftraggebers gefordert - sämtliche Gebäude explizit aufgelöst. Hierbei wurde mit Ausnahme von zwei geplanten Gebäudekomplexen in der Innenstadt der momentane Istzustand zugrunde gelegt.

Bei den Berechnungen wurden folgende klimatische Größen für eine repräsentative Tag- und Nachtsituation ermittelt und kartografisch dargestellt:

- die bodennahe Lufttemperatur
- die bodennahe Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- die *gefühlte Temperatur* als bioklimatische Kenngröße für die Wärmebelastung
- die Kaltluftvolumenstromdichte als Kenngröße der nächtlichen Kaltluftdynamik

Die klimatischen Simulationsrechnungen wurden mit dem Modell PALM-4U durchgeführt. Die ersten Testrechnungen zeigten, dass die Größe des mikroskaligen Rechengebietes verkleinert werden musste, um eine termingerechte Abwicklung des Projektes zu gewährleisten. Als kompensatorische Gegenleistung wurde eine zusätzliche Klimasimulation für einen innerstädtischen Bereich mit einer feineren räumlichen Auflösung von 5 m durchgeführt.

Bei den Simulationsrechnungen wurde am Tag ein Antrieb mit einem schwachen ostnordöstlichen Wind angenommen. Nachts wurden die Simulationen ohne Antrieb gerechnet, da sich die nächtlichen Kaltluftströmungen im Modell selbst ausbilden.

Bei den stadtweiten Simulationsrechnungen werden das Geländere relief, die Flächennutzung und Gebäude berücksichtigt. Für die innerstädtische Simulation werden zusätzlich Bäume und Baumgruppen als 3d-Geometrien in das Modell integriert.

ERGEBNISSE

An einem windschwachen und wolkenlosen heißen Sommertag wird meist zwischen 16 Uhr und 18 Uhr die höchste Lufttemperatur in 2 m Höhe erreicht, die größte Wärmebelastung in der Sonne in Form eines bioklimatischen Index wird etwa zwischen 13 Uhr und 15 Uhr erreicht. Deshalb wurde als repräsentative Auswertezeit tagsüber 16 Uhr gewählt, bei dem beide Größen nahe Ihrem Maximum sind. Die Minimumtemperatur in einer windschwachen und wolkenarmen Nacht wird meist in der Zeit um den Sonnenaufgang erreicht. Deshalb wurde für die nächtliche Auswertung ein Zeitpunkt vor Sonnenaufgang gewählt, d. h. 05 Uhr. Die Ergebnisabbildungen sind im Anhang dokumentiert.

Nachmittags (16:00 Uhr)

Die stadtweiten Simulationen ergeben nachmittags für die **Lufttemperatur** Werte von 32 bis 36 °C. Während in Waldgebieten Temperaturen von ca. 32 bis 33 °C ermittelt werden, betragen die Temperaturen in Siedlungsbereichen und über Freiflächen meist 34 bis 35 °C. Erhöhte Temperaturen von bis zu 36 °C werden insbesondere für hoch versiegelten Industrieflächen und in Teilbereichen der nordwestlich liegenden Stadtteile Wattenscheid, Hordel und Hofstede ausgewiesen.

Bei der Innenstadtberechnung ergibt sich eine räumlich differenziertere Verteilung der bodennahen Lufttemperatur. Im Stadtpark ergeben sich beispielsweise durch die feinere Gitterauflösung und die explizite Berücksichtigung von Baumgeometrien eine realitätsnähere heterogenere Verteilung der Lufttemperatur. Anders als bei der stadtweiten Berechnung treten hier versiegelte Gewerbeflächen westlich der Innenstadt als Hitze-Hotspots mit Temperaturen über 36 °C hervor.

Die Auswertung der **bodennahen Windgeschwindigkeiten** zeigen erwartungsgemäß, dass über Freiflächen gute Luftaustauschbedingungen herrschen. Relativ hohe Windgeschwindigkeiten treten auch in geeignet ausgerichteten Straßenzügen und Bahntrassen auf, welche aufgrund ihrer Leitwirkung auch die Durchlüftung angrenzender Siedlungsräume fördern. In dicht bebauten Wohngebieten und Wäldern ergeben sich durch den erhöhten Reibungswiderstand deutlich niedrigere Windgeschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der Innenstadtberechnung weisen größtenteils eine gute Übereinstimmung mit denen der stadtweiten Berechnung auf. Aufgrund der feineren Rechengitterauflösung werden jedoch Durchströmungen von Straßen und Bahntrassen besser im Modell abgebildet, sodass diese deutlicher als Luftleitbahn hervortreten. In Bereichen mit dichter Bebauung (Innenstadt) und dichterem Baumbestand - z. B. dem Stadtpark - treten teilweise niedrige Windgeschwindigkeiten auf.

Die Wärmelastung wird nachmittags maßgeblich von der Verschattungssituation, der Durchlüftung und der Flächennutzung geprägt. Die **gefühlte Temperatur** variiert bei der stadtweiten Simulation zwischen 31 °C und 37 °C. Weite Teile von Bochum sind somit stark wärmebelastet. Dies gilt vor allem für die Bereiche, die mehrere Stunden besonnt werden. Über versiegelten Flächen wird die Überhitzung durch die Wärmespeicherung der Oberfläche zusätzlich verstärkt. In Waldgebieten ist die Wärmelastung aufgrund der Verschattungswirkungen der Bäume deutlich geringer. Auf der sonnenabgewandten Seite von Gebäuden liegt die gefühlte Temperatur durch den Schattenwurf der Baukörper ebenfalls deutlich niedriger. Die bioklimatischen Auswertungen ergeben, dass die Wohn- und Gewerbegebiete im Nordwesten der Stadt tendenziell eine etwas höhere Wärmelastung aufweisen als die südlicheren Gebiete.

Die innerstädtischen Berechnungen ermöglichen es, durch die 3d-Berücksichtigung von Bäumen zusätzliche kleinräumige Unterschiede der Wärmelastung aufzuzeigen, z. B. in Parks oder auf Plätzen mit Baumgruppen. Durch die höhere räumliche Auflösung kann auch der Schattenwurf von Gebäuden und dessen Einfluss auf die gefühlte Temperatur genauer abgebildet werden. Eine Zunahme der Wärmelastung zeigt sich im Umfeld windabgewandter Gebäudefassaden und in schlecht belüfteten Innenhöfen von Vierteln mit Blockrandbebauung.

Nachts (5:00 Uhr)

Bei den stadtweiten Simulationsrechnungen werden nachts erhöhte **Lufttemperaturen** für Gewerbeflächen, Wohnsiedlungen und insbesondere die dicht bebaute Bochumer Innenstadt ermittelt. Hier ist mit Temperaturen von teilweise mehr als 22 °C der Wärmeinseleffekt besonders deutlich ausgeprägt. Für Freiflächen werden aufgrund der effektiveren Abkühlung meist Temperaturen von weniger als 19 °C berechnet.

Die innerstädtische Simulation lässt die nächtliche Überwärmung der Bochumer City noch deutlicher erkennen. In Bereichen mit dichter Bebauung fallen hier die nächtlichen Lufttemperaturen nicht unter 22 °C. Größere Grünflächen (Stadtpark, Friedhof) und Bahntrassen kühlen in den Nachtstunden deutlich schneller ab. Die Temperaturen liegen hier unter 19 °C.

Die **bodennahen Windgeschwindigkeiten** sind nachts aufgrund der fehlenden Thermik deutlich geringer als tagsüber. Die westlichen und nordwestlichen Stadtgebiete weisen nachts geringere Windgeschwindigkeiten auf als die östlichen Stadtbezirke, da diese stärker von Kaltluftströmungen aus südlicher Richtung beeinflusst werden.

Die innerstädtischen Simulationen weisen insbesondere die Bahntrasse des Gleisdreiecks als gut belüfteten Bereich aus. Die Bahntrasse fungiert somit als nächtliche Luftleitbahn und bewirkt für Teilbereiche der angrenzenden Innenstadt einen positiven thermischen

Ausgleich. Besonders schwach belüftet sind nachts große Teile der dicht bebauten Innenstadt.

Die stadtweiten Auswertungen der **Kaltluftvolumenstromdichte** belegen, dass sich nachts ein Bergwindssystem ausbildet, das gespeist wird von Kaltluftproduktionsflächen des Sauerlandes. Dieses Kaltluftsystem transportiert über das Ruhrtal und den Taleinschnitt entlang der A43 kühle Luftmassen nach Norden. Hiervon ausgehende Luftleitbahnen, beispielsweise entlang von Bahntrassen, lenken Kaltluft in westliche Richtung ab und mindern in Teilbereichen der östlichen Bochumer Innenstadt die nächtliche Überwärmung. Schwache Kaltluftströmungen werden für Stiepel und im Westen und Nordwesten von Bochum ermittelt.

Die Ergebnisse der Innenstadtberechnung bestätigen, dass nächtliche Kaltluft aus östlicher Richtung über die Bahngleise in Richtung der Bochumer Innenstadt transportiert wird. Hier verteilt sich die Kaltluft über die Gleise in Richtung Norden und Südwesten und gelangt von dort in die angrenzenden Wohngebiete. Allerdings schwächt sich die Kaltluftdynamik im Bereich des Hauptbahnhofs aufgrund der warmen Stadtoberfläche sowie der fehlenden Kaltluftneubildung ab und weist im Bereich des westlich angrenzenden Gleisdreiecks keine große bioklimatische Bedeutung mehr auf.

Aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung wird nachts die **gefühlte Temperatur** ausschließlich von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit, der langwelligen Ausstrahlung von Boden und Bauwerken sowie von der atmosphärischen Gegenstrahlung beeinflusst. Hieraus resultiert eine räumlich gleichmäßigere Verteilung der Wärmebelastung als tagsüber. Mit unter 16 °C treten über Freiflächen aufgrund der guten und der effektiven Abkühlung die niedrigsten Werte der gefühlten Temperatur auf. In Wäldern vermindern die Baumkronen die langwelligen Strahlungsverluste und verringern somit die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Im Umfeld von dichter Bebauung wird aufgrund der schwachen Windgeschwindigkeiten und der Wärmeabstrahlung der Baukörper eine erhöhte Wärmebelastung ausgewiesen.

Die Auswertungen der Innenstadtberechnung zeigen, dass mit gefühlten Temperaturen von über 21 °C die höchsten Wärmebelastungen in dicht bebauten innerstädtischen Bereichen auftreten. Die niedrigsten gefühlten Temperaturen werden aufgrund der fehlenden Bäume und der daraus resultierenden stärkeren effektiveren langwelligen Ausstrahlung im Bereich von Freiflächen (z.B. Bahngleisen), ermittelt. Auch in Teilen des Friedhofs werden niedrige nächtliche Temperaturen von unter 16 °C berechnet. Die Differenz der gefühlten Temperatur zwischen Siedlung und Freiland beträgt ca. 6 K.

FAZIT

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der stadtweiten Klimasimulation mit dem Rechenmodell PALM-4U lassen folgende Rückschlüsse zu:

- Mit PALM-4U können stadtweite Klimasimulationen durchgeführt werden, um stadtklimatisch wichtige Phänomene wie Luftleitbahnen, Kaltluftströmungen, Wärmeinseleffekte realitätsnah zu analysieren.
- Da die Entwicklungsarbeiten und Modellevaluierungen von PALM-4U noch nicht vollständig abgeschlossen sind, erfordert die gegenwärtige Anwendung des Modells und die Interpretation der Simulationsergebnisse meteorologische Fachkenntnisse und setzt langjährige Erfahrungen mit der Anwendung numerischer Strömungsmodelle sowie deren Ergebnisauswertung und Ergebnisinterpretation voraus.
- Die klimatischen Ergebnisauswertungen für das Bochumer Stadtgebiet zeigen, dass die Anwendung des Modells in einem 10 m-Raster gegenüber einem auf 5 m verringerten Gitterabstand qualitative Einbußen mit sich bringt. Dies betrifft insbesondere eine fehlende bzw. unzureichende geometrische Erfassung kleinräumiger Strömungshindernisse (Bäume, Gebäude) und hieraus resultierende Unschärfen in der Bestimmung der kurzwelligen Einstrahlung und der bodennahen Strömung. Durch die räumliche Generalisierung wird daher in bestimmten Bereichen die exakte Ermittlung bioklimatischer Kenngrößen, z.B. der gefühlten Temperatur, beeinträchtigt,
- Mit einer Auflösung von 5 m verbessert sich die Prognosegüte, weil hierdurch größere Einzelbäume und Baumgruppen im Rechenmodell als 3D-Strukturen und Schattenspender berücksichtigt werden können und kleinräumige Bebauungsstrukturen besser aufgelöst werden können. Hierdurch werden die Strömungsverhältnisse in Luftleitbahnen und in engen Straßenzügen genauer wiedergegeben.
- Durch Anwendung eines geeigneten Nesting-Verfahrens ist es mit PALM-4U möglich, bei stadtweiten Simulationsrechnungen regionale Windsysteme in Form eines Modellantriebs zu berücksichtigen.
- Die Ergebnisse aus stadtweiten Berechnungen wiederum lassen sich als Antrieb für räumlich hoch aufgelöste kleinräumige Klimasimulationsrechnungen beispielsweise im Rahmen von Bebauungsplanungen verwenden.
- Räumlich hoch aufgelöste Simulationsrechnungen für große Rechengebiete stellen sehr hohe Anforderungen an die Hardware. Die Modellrechnungen für Bochum benötigten auf einem Hochleistungsrechner mit 256 GB Ram und 64 Rechenkernen eine mehrwöchige Rechenzeit.

2 EINLEITUNG

2.1 Hintergrund

Effiziente und effektive Leistungen der Grünen Infrastruktur in den Bereichen „Anpassung an den Klimawandel“ und „Luftqualität, Luftreinhaltung“ sind für zukünftige Maßnahmen und Entwicklungsszenarien notwendig. Die Beschreibung der Leistungen und deren Wirkungsgrad aber auch das Kosten-/Nutzenverhältnis sind wesentlicher Bestandteil einer Strategie zur Grünen Infrastruktur.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen stehen zunehmend numerische Simulationsverfahren zur Anpassung an den Klimawandel mit quantitativen Aussagen zum Mikroklima, zur bioklimatischen Belastung für den Menschen, zur Schadstoffausbreitung und zu den Verkehrsbelastungen bereit.

Für das gesamte Stadtgebiet von Bochum soll im Rahmen der Förderung von Projekten zur Grünen Infrastruktur eine stadtweite Klimasimulation durchgeführt werden. Das Ziel des Projekts besteht darin, einen Überblick über die stadtklimatische Situation in Bochum zu erhalten, der es ermöglicht, Belastungsräume, Ausgleichsflächen und klimatische Besonderheiten des Untersuchungsraumes abzuleiten.

2.2 Gebietsbeschreibung

Die Stadt Bochum liegt zwischen den Flüssen Emscher und Ruhr und besitzt eine Fläche von ca. 145 km². Die Höhe über NHN schwankt zwischen 43 m im Stadtteil Hordel und 196 m in Stiepel.

Die sechs Stadtbezirke unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Bebauungsstruktur und Nutzung zum Teil deutlich und es sind sowohl hochverdichtete innerstädtische Bereiche als auch weitläufige Freiflächen und Waldgebiete anzutreffen.

Das Stadtgebiet von Bochum grenzt an Gelsenkirchen, Herne, Castrop-Rauxel, Essen, Hattingen, Witte und Dortmund an.

2.3 Aufgabenstellung

Seitens des Auftraggebers war gefordert, mit Hilfe eines geeigneten Simulationsmodells für einen Tagesgang bei einer hochsommerlichen autochthonen Wetterlage, d. h. windschwach und wolkenarm, die lokalklimatischen Verhältnisse für das gesamte Bochumer Stadtgebiet mit einer maximale horizontalen Maschenweite von 10 m zu modellieren und zu beurteilen.

Vor der Durchführung der mikroskaligen Simulationsrechnungen für das Bochumer Stadtgebiet wurden mesoskalige Berechnungen für einen größeren Untersuchungsraum durchgeführt, um klimatische Einflüsse aus den benachbarten Stadtgebieten und die Einwirkung regionaler thermischer Windsysteme aus dem Sauerland in das Bochumer Stadtgebiet berücksichtigen zu können.

Bei den mikroskaligen Simulationsrechnungen sollten sämtliche Gebäude explizit aufgelöst und nicht über einen parametrisierten Ansatz implementiert werden. Grundsätzlich war bei den Berechnungen mit Ausnahme von zwei geplanten Gebäudekomplexen in der Innenstadt der momentane Istzustand zugrunde zu legen.

Bei den Berechnungen wurden folgende klimatische Größen für eine repräsentative Tag- und Nachtsituation ermittelt und kartografisch dargestellt:

- die bodennahe Lufttemperatur
- die bodennahe Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- die *gefühlte Temperatur* als bioklimatische Kenngröße für die Wärmebelastung
- die Kaltluftvolumenstromdichte als Kenngröße der nächtlichen Kaltluftdynamik

Die klimatischen Simulationsrechnungen wurden mit dem Modell PALM-4U durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass bei einem Rechengebiet, welches das gesamte Bochumer Stadtgebiet mit 10 m Auflösung umfasst, der verfügbare Arbeitsspeicher von 256 GB nicht ausreichte, um das Rechengitter mit 223 Mio. Rechenzellen zu prozessieren. Auch bei einer Aufrüstung des Speichers auf 512 GB wäre aufgrund der relativ kurzen Bearbeitungsdauer ein termingerechter Abschluss der Bearbeitung nicht möglich gewesen. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde daraufhin die Größe des mikroskaligen Rechengebietes mit 10 m Gitterweite verkleinert und als kompensatorische Gegenleistung eine zusätzliche Klimasimulation für einen innerstädtischen Bereich mit 5 m Auflösung durchgeführt. Die **Abb. 2.1** zeigt einen Ausschnitt des äußeren Rechengebietes mit den darin genesteten meso- und mikroskaligen Rechengebieten mit 50 m beziehungsweise 10 m und 5 m Gitterweite.

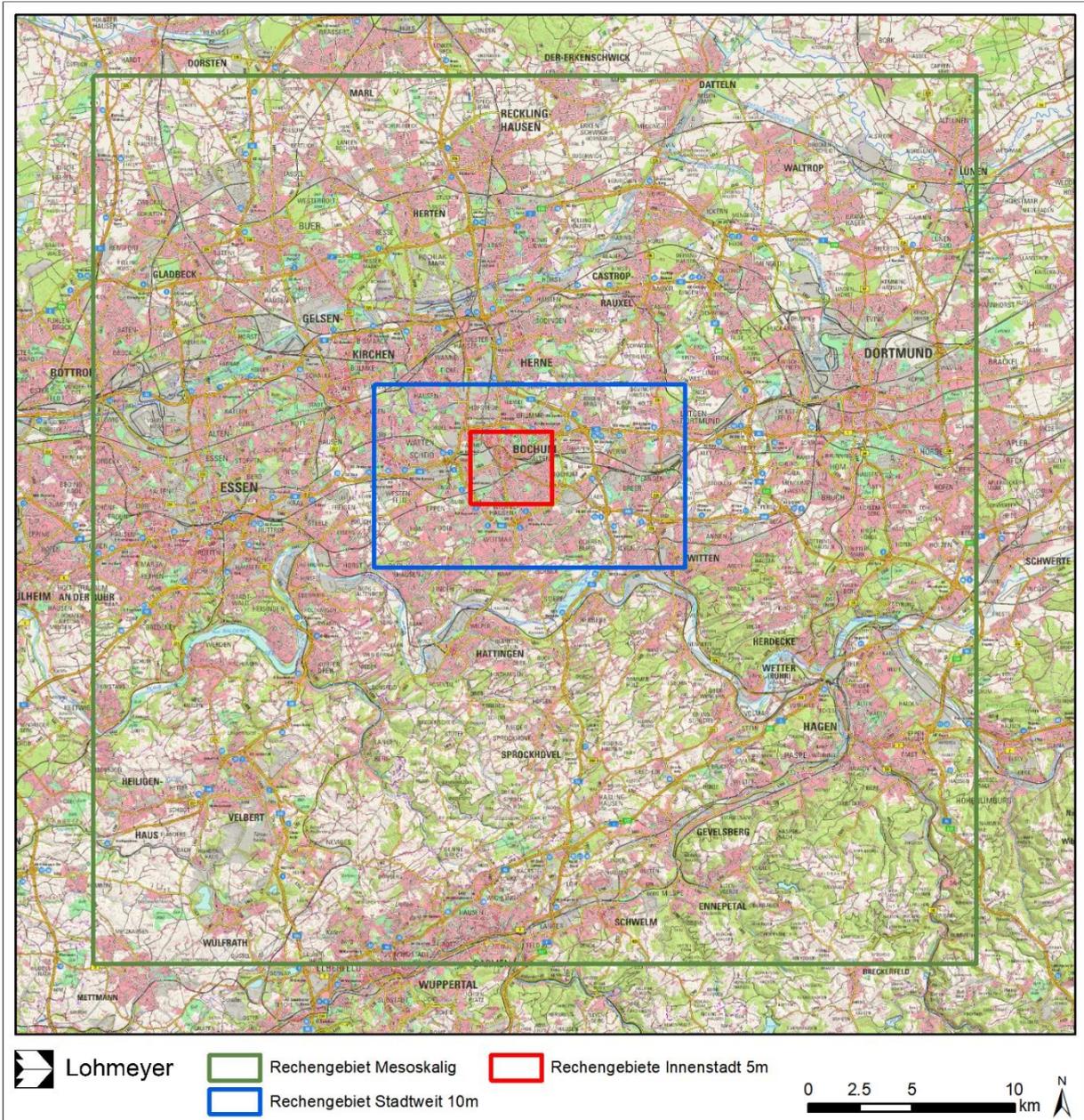


Abb. 2.1: Abgrenzung der aktuellen Rechengebiete

3 UNTERSUCHUNGSGEBIETEMETHODIK UND VORGEHENSWEISE

Zur Simulation der Verteilung von Klimaparametern in Einzelsituationen wurde das numerische Modell PALM-4U (<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/palm4u>) verwendet, das z. B. die Variablen potentielle Temperatur, spezifische Feuchte und die Windkomponenten prognostisch berechnet. PALM-4U ist ein meso- und mikroskaliges Modell, das die Wechselwirkungen zwischen dem Boden, von Oberflächen und der Atmosphäre unter Berücksichtigung des Reliefs und der Landnutzung sowie von Strömungshindernissen, z. B. von Gebäuden, sonstigen Bauwerken und/oder der Vegetation, beschreibt. Es basiert auf den Grundgesetzen der Strömungs- und Thermodynamik und beinhaltet u. a. die Simulation von:

- Umströmungen, Überströmungen und Unterströmungen von Hindernissen bzw. Bauwerken, z. B. Gebäuden,
- Austausch von Wärme und Feuchte an natürlichen und anthropogenen Oberflächen,
- turbulenten Strömungen,
- Wechselwirkungen von Strahlung, Impuls und Wärme mit einer expliziten Vegetationsschicht,
- bioklimatischen Bewertungsindizes.

Für weiterführende Informationen sei auf die o. g. Internetadresse und Fachliteratur (z. B. Raasch und Schröter, 2001; Maronga et al., 2015, 2019) verwiesen.

Das Modell ist nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9 „Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle“ (VDI 3783 Blatt 9, 2017) validiert (<https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/tec/evaluation>). Eine Validierung des komplexen Testfalls E8 „Stuttgarter Talkessel Strömungskanalisation, Kaltluftabflüsse“ der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 „Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle“ (VDI 3783 Blatt 7, 2017) wurde von unserem Büro erfolgreich durchgeführt (Lohmeyer GmbH, 2020).

Grundlage der Simulationsrechnungen sind die Aufnahme des Reliefs und der Landnutzung sowie der Bebauung nach Lage und Höhe im Untersuchungsgebiet und dessen Umgebung. Die Simulation der lokalklimatischen Situation inkl. der nächtlichen Ausgleichsströmungen wird in vier Schritten mit einem sogenannten Nesting-Verfahren (Gitterverfeinerung) durchgeführt. Um alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete zu erfassen, wurde eine grobe Simulation mit 200 m horizontaler Gitterweite und 544 x 448 Gitterpunkten durchgeführt (etwa 109 km x 90 km). Das Gitter reicht bis in etwa 11 km Höhe bei einer vertikalen Auflösung von 20 m in den unteren Schichten. Daran anschließend folgen eine genestete Simulation mit 50 m horizontaler Maschenweite bei 600 x 600 Gitterpunkten (ca. 70 km x

60 km) sowie einer vertikalen Auflösung von 8 m in den unteren Schichten und die stadtweite Simulation mit 10 m horizontaler Maschenweite bei 1 504 x 888 Gitterpunkten (ca. 15 km x 9 km) sowie einer vertikalen Auflösung von 4 m in den unteren Schichten. Bei letztgenannter Simulation werden Baukörper dreidimensional dargestellt. Für das innere Rechengebiet wurde eine horizontale Maschenweite von 5 m bei 792 x 704 Gitterpunkten (ca. 4 km x 3.5 km) genutzt, um Gebäudestrukturen und hohe Vegetation dreidimensional darstellen zu können; die vertikale Auflösung beträgt in Bodennähe 3 m.

Die wichtigsten modelltechnischen Randannahmen der im Rahmen des „Nestings“ verwendeten Rechengebiete sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

| Rechengebiet | Gitterzellen In x- und y- Richtung | Horizontale Gitterauflösung (m) | Vertikale Gitterauflösung in Bodennähe (m) | Anmerkungen |
|--------------|------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Mesoskala | 544 x 448 | 200 | 20 | – |
| Mesoskala | 600 x 600 | 50 | 8 | – |
| Mikroskala | 1 504 x 888 | 10 | 4 | Gebäude explizit aufgelöst |
| Mikroskala | 792 x 704 | 5 | 3 | Gebäude u. Vegetation explizit aufgelöst |

Tab.3.1: Modelltechnische Angaben zu den „Nesting“-Rechengebieten

Die **Abb. 3.1** zeigt das Relief des äußeren Rechengebietes sowie die weiteren Simulationsgebiete als schwarze Rechtecke.

Das Setup der Simulationen entspricht den Anforderungen der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 7 „Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle“ und der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9 „Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle“.

Folgende Einteilung wurde für die vorkommenden Oberflächen u. a. gewählt:

- Bauwerke unterschiedlicher Größe, d. h. Gebäude (beide inneren Gebiete),
- versiegelte oder teils versiegelte Oberflächen wie Straßen, Wege und Parkplätze,
- lockere bis dichte städtische Bebauung (äußere Simulationsgebiete),
- Grünflächen, Grünflächen mit Sträuchern, vegetationsarme Flächen, landwirtschaftlich genutzte Flächen,
- Sportflächen, Wasserflächen
- Waldflächen bzw. Baumgruppen als dreidimensionale Vegetation (inneres Gebiet).

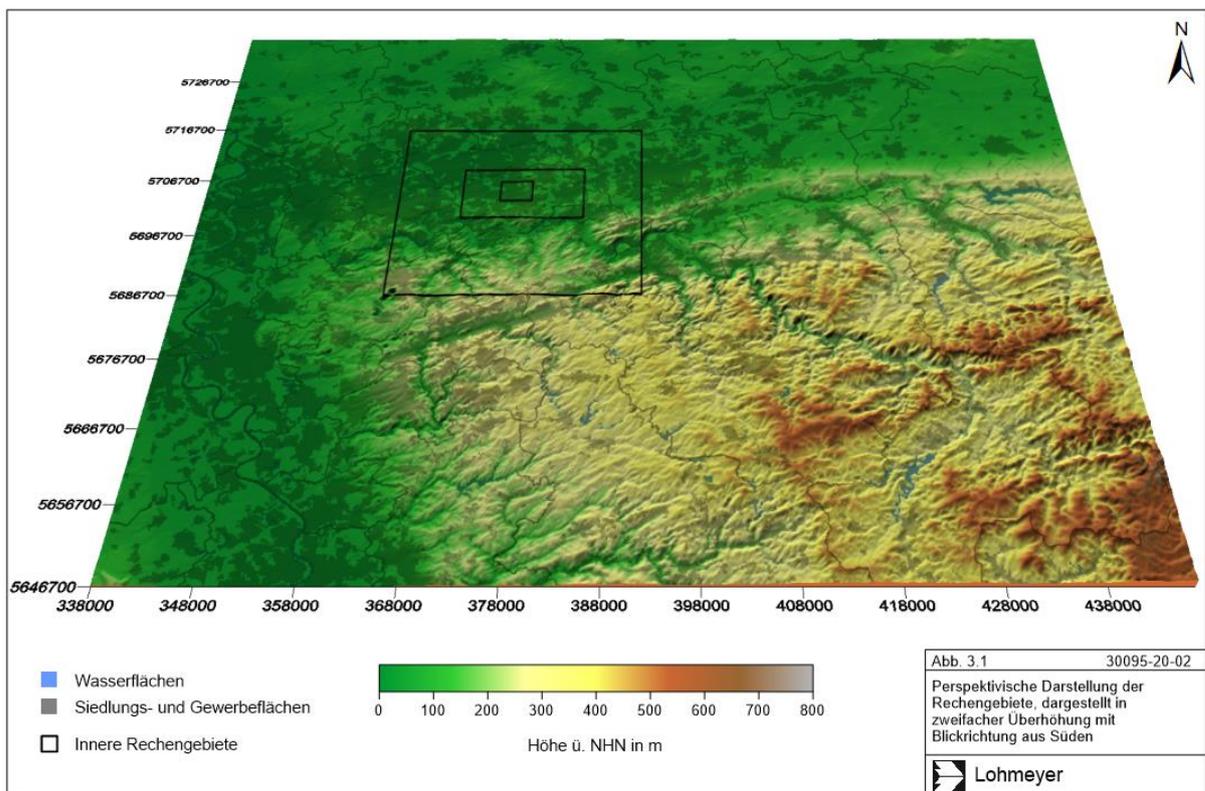


Abb.3.1: Darstellung der Rechengebiete

Als Auswertegrößen werden die Lufttemperatur in 2 m über Grund, der bioklimatische Index „Gefühlte Temperatur“, das bodennahe Windfeld und die nächtlichen thermischen Ausgleichsströmungen betrachtet, d. h. vorwiegend die nächtlichen Kaltluftströmungen.

Bewertung des Thermischer Komfort

Früher wurde zur Beurteilung des thermischen Komforts häufig die Schwüle als Kenngröße herangezogen. Dies hat jedoch den Nachteil, dass thermophysiologisch wichtige Parameter nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde wird nach heutigem Stand der Technik auf bioklimatische Indizes zurückgegriffen, die auf dem Wärmehaushalt des Menschen beruhen.

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2008) werden standardisierte Bewertungsverfahren der Human-Biometeorologie für die auf Menschen bezogene Berücksichtigung von Klima und Lüftung (Bioklima) bei der räumlichen Gesamtplanung bereitgestellt.

Der Thermische Wirkungskomplex umfasst die meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlung, die sich thermophysiologisch auf den Menschen im Freien und in geschlossenen Räumen auswirken. Die wahrgenommene Umgebungstemperatur kann aufgrund dieser meteorologischen Parameter oftmals von der tatsächlichen Lufttemperatur abweichen. Zum Beispiel wird die Umgebungstemperatur bei starkem Wind oftmals als kälter empfunden als durch die Messungen erfasst. Die gesundheitliche Bedeutung hängt mit der engen Vernetzung von Thermoregulation und Kreislaufregulation zusammen. Bei hoher Wärmebelastung versucht der Körper durch Erhöhung der Hauttemperatur und Schwitzen die Wärmeabgabe zu steigern. Daneben spielen der Aktivitätsgrad und der Isolationswert der Bekleidung eine entscheidende Rolle für das Wärme- bzw. Kälteempfinden.

Zur Bewertung des thermischen Komforts wird die sogenannte *gefühlte Temperatur* herangezogen, welche aus den genannten meteorologischen Elementen des Thermischen Wirkungskomplexes abgeleitet wird. Die gefühlte Temperatur vergleicht die tatsächlich gemessene Temperatur mit jener, die in einer Standardumgebung herrschen sollte, um ein identisches Temperaturempfinden zu haben. Die Standardumgebung entspricht einem beschatteten Raum in dem nur ein leichter Luftzug von 0,2 m/s herrscht. Die gefühlte Temperatur basiert auf der Lösung der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers für stationäre Bedingungen. Bei der Bestimmung der Energiebilanz wird ein „Norm-Mensch“ (Größe 1,75 m, Gewicht 75 kg, Körperoberfläche 1,78 m²) zugrunde gelegt, der seine Kleidung an die thermischen Randbedingungen anpasst. Zusätzlich wird eine leichte körperliche Aktivität (langsames Gehen mit 4 km/h) angenommen.

Eine optimale Behaglichkeit des thermischen Befindens kann in Abhängigkeit der ausgeübten Aktivität sowie der Bekleidung zwischen 0 bis 20°C erreicht werden. Bei höheren Temperaturen tritt eine Wärmebelastung, bei tieferen Temperaturen Kältestress auf. Bei anderen Aktivitäten oder auch Bekleidungsverhältnissen verschieben sich die für Behaglichkeit erforderlichen Temperaturen zu höheren (geringere Aktivität oder dünnere Bekleidung) oder niedrigeren (gesteigerte Aktivität oder dickere Bekleidung) Werten.

Die durch die gefühlte Temperatur definierten Klassen des thermischen Komforts sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

| Gefühlte Temperatur [°C] | Thermisches Empfinden | Thermophysiologische Belastungsstufe |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| <= -39 | Sehr kalt | Extremer Kältestress |
| -26 bis -39 | Kalt | Starker Kältestress |
| -13 bis -26 | Kühl | Mäßiger Kältestress |
| 0 bis -13 | Leicht kühl | Schwacher Kältestress |
| 0 bis +20 | Behaglich | Komfort möglich |
| +20 bis +26 | Leicht warm | Schwache Wärmebelastung |
| +26 bis +32 | Warm | Mäßige Wärmebelastung |
| +32 bis +38 | Heiß | Starke Wärmebelastung |
| >= +38 | Sehr heiß | Extreme Wärmebelastung |

Tab.3.2: *Gefühlte Temperatur* und thermische Beanspruchung

Nächtliche thermische Ausgleichsströmung / Kaltluftabflüsse

Kaltluft wird insbesondere in klaren windschwachen Strahlungsnächten produziert. Ursache für die Abkühlung ist die effektive langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche, d.h. die Differenz zwischen der Wärmestrahlung der aktiven Oberfläche (Boden, Vegetation) und der lang-welligen Gegenstrahlung der Atmosphäre. Letztere ist insbesondere bei klarem Himmel zu gering, um die Ausstrahlung zu kompensieren, so dass letztlich ein Wärmeverlust und eine Abkühlung der aktiven Oberfläche resultiert. Hiermit einher geht ein Wärmeverlust und eine Abkühlung der bodennahen Luftschicht und somit die Produktion bodennaher Kaltluft.

Voraussetzungen für die Ausbildung einer ausgeprägten bodennahen Kaltluftschicht sind:

- eine negative Strahlungsbilanz
- eine geringe Wärmezufuhr aus dem Boden
- ein geringer turbulenter Austausch mit den darüber liegenden Luftmassen
(schwacher Wind bei Hochdruckwetterlagen)

In ebenem Gelände bleibt die bodennahe gebildete Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände hingegen setzt sie sich infolge der horizontalen Dichteunterschiede hangabwärts in Bewegung (Hangabwind). Für das Abfließen von Kaltluft ist eine Hangneigung von mindestens 1° bis 2° erforderlich. Die vertikale Mächtigkeit und die Geschwindigkeit von Hangabwinden ist von der Länge des Hanges, der Hangneigung, der Bodenreibung (Bewuchs, Bebauung) und dem Dichteunterschied abhängig.

In Tälern fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Talabwind entstehen, der als Bergwind bezeichnet wird. Typische Geschwindigkeiten von Hangwinden liegen im Bereich von 0,5 m/s bis 2,0 m/s. Bergwinde können mit ca. 1 m/s bis zu 10 m/s erheblich höhere Geschwindigkeiten erreichen. Die vertikale Mächtigkeit der abfließenden Kaltluft und die Geschwindigkeit des Abflusses hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebietes, der Kaltluftproduktionsrate, dem Talgefälle und den Rauigkeiten im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Als Leitlinien des Kaltluftabflusses treten talwärts führende Einsenkungen des Geländes, wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen in Erscheinung.

Die Kaltluftentstehung und der Kaltluftabfluss hängen somit von den folgenden Faktoren ab:

- Meteorologische Verhältnisse
- Flächennutzung
- Geländeform und Exposition.

Kaltluftabflüsse können in Abhängigkeit der topographischen Gegebenheiten und dem Vorhandensein von Luftleitbahnen einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der nächtlichen Wärmebelastungen in städtischen Räumen leisten. Im Hinblick auf den Klimawandel werden extreme Hitzebelastungen am Tag und in der Nacht zunehmen, wodurch sich gesundheitliche Risiken für bestimmte Personengruppen erhöhen können [Umweltbundesamt 2020]. Kaltluftabflüsse und Flurwinde können zu einer Reduzierung der städtischen Überwärmung beitragen, da sie kühle Frischluft in Richtung der Innenstadt transportieren und somit eine positive thermische Ausgleichsfunktion gewährleisten.

Kaltluft wird nachts auf Kälteproduktionsflächen mit Freilandeigenschaften, wie Park- und Grünflächen gebildet. Diese sind oft im äußerem Stadtbereich zu finden, von wo aus Kaltluft hangabwärts der Topographie folgend in Richtung Tal fließt (Hangabwind).

Neben den Geschwindigkeiten der bodennahen Strömung spielt die Mächtigkeit der Kaltluft für die klimatische Ausgleichsleistung von Kaltluftströmungen eine wesentliche Rolle. Als Maß für die klimatische Bedeutung von Kaltluftströmungen hat sich daher die sogenannte Kaltluftvolumenstromdichte etabliert. Diese Kenngröße beschreibt die Kaltluftmenge, die in einer Sekunde durch einen ein Meter breiten Streifen, fließt, der sich von der Erdoberfläche bis zur Obergrenze des Kaltluftstroms erstreckt. Sie ist somit eine geeignete Kenngröße, um die Intensität von Kaltluftabflüssen bzw. Flurwinden einzuordnen und miteinander zu vergleichen. Die Einheit der Kaltluftvolumenstromdichte wird in $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ angegeben:

4 EINGANGSDATEN

4.1 Modellinitialisierung

In der weiteren Umgebung von Bochum liegen für die Parameter Wind, Lufttemperatur und dem Bedeckungsgrad Messdaten der Station Werl vom Deutschen Wetterdienst (DWD) vor, die etwa 47 km ostnordöstlich der Innenstadt von Bochum und im nordöstlichen Bereich des äußeren Rechengebietes aus **Abb. 3.1** liegt. Das Rechengebiet geht hier deutlich über die Stadtgrenzen hinaus, weshalb die Station Werl als gut geeignet angesehen wird. Die **Abb. 4.1** zeigt beispielhaft die Windrose für die Station Werl im Zeitraum 2009 bis 2019. Die Hauptwindrichtung ist Südwest, ein Nebenmaximum tritt bei ostnordöstlicher Anströmung auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 3.4 m/s in 10 m Höhe. Eine Auswertung für sommerliche Stunden (Lufttemperatur ≥ 25 °C) tagsüber mit wenig Bewölkung ($\leq 3/8$) in den Sommermonaten 2009 bis 2019 zeigt, dass diese häufig bei Anströmungen aus ostnordöstlichen Richtungen auftreten (**Abb. 4.2**). Infolgedessen werden die Simulationen mit schwachen ostnordöstlichen Anströmungen tagsüber, d. h. bis etwa 2 m/s in 10 m Höhe, angetrieben. Nachts wird die Simulation ohne Antrieb gerechnet, da sich die nächtlichen Kaltluftströmungen im Modell selbst ausbilden.

Abb. 4.3 zeigt beispielhaft Zeitreihen der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte vom 24.07.2018 bis 27.07.2018 an der Station Werl. An allen drei Tagen werden Höchstwerte zwischen 32 °C und 35 °C gemessen, im Laufe der Nacht gehen die Lufttemperaturen auf etwa 17 °C bis 19 °C zurück. Zur Initialisierung der Rechnungen mit PALM-4U wurden die Temperatur und Feuchte in Anlehnung an die Werte des 26.07.2018 um 00 MESZ verwendet. Die Werte im Boden wurden ebenfalls mit Messungen der DWD-Station Werl initialisiert. Zur Initialisierung des Vertikalprofils der Atmosphäre wurden die Radiosondendaten der Station Essen genutzt.

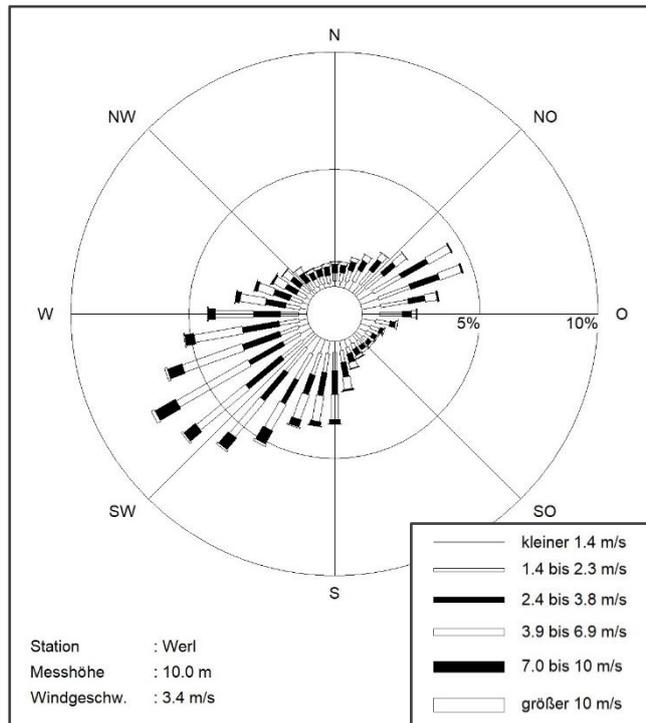


Abb. 4.1: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Werl im Zeitraum 2009 bis 2019 (Quelle: DWD)

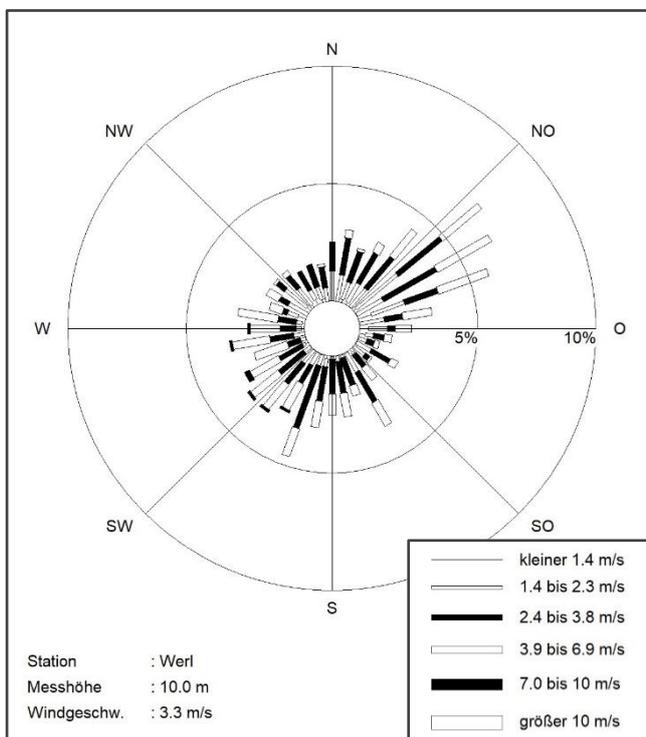


Abb. 4.2: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an der DWD-Station Werl für gering bewölkte Stunden tagsüber mit einer Lufttemperatur größer gleich 25 °C in den Sommermonaten 2009 bis 2019 (Quelle: DWD)

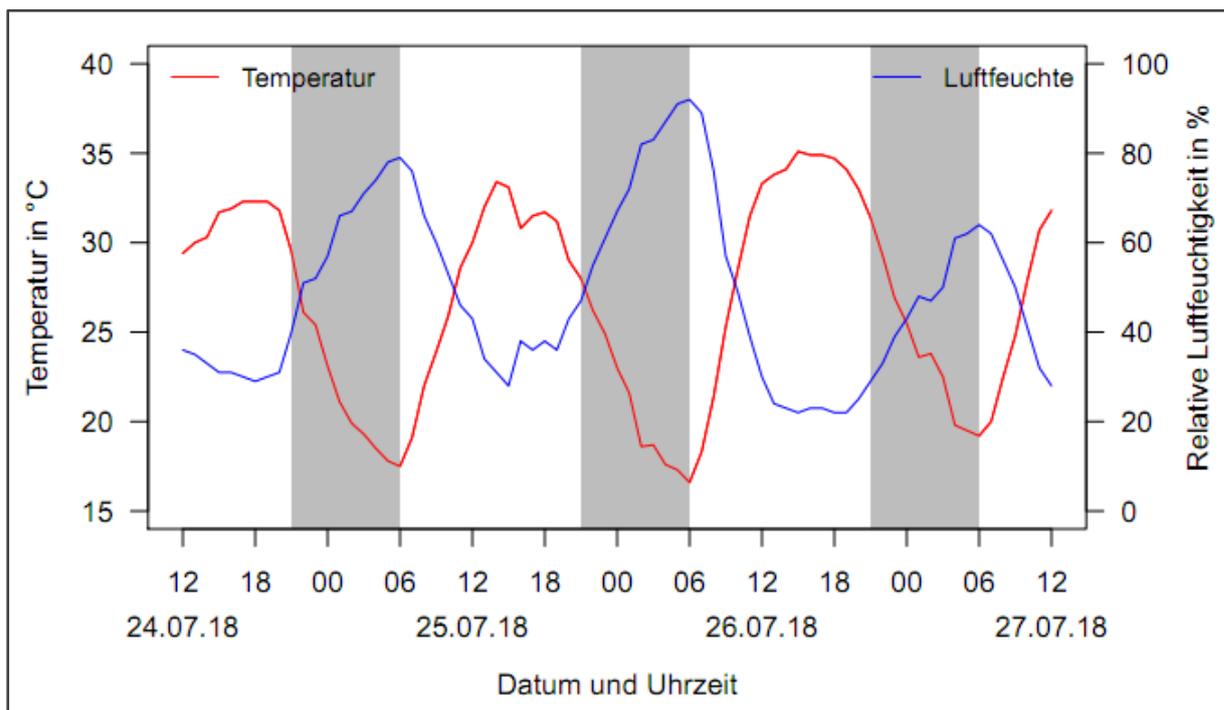


Abb. 4.3: Zeitreihen der Lufttemperatur (rot) und relativen Luftfeuchtigkeit (blau) an der DWD-Station Werl vom 24.07.2018 bis 27.07.2018. Nachstunden sind grau eingefärbt. Quelle: DWD.

4.2 Geodaten

4.2.1 Topographie

Für die Klimamodellierung ist das Relief eine wesentliche Eingangsgröße, denn es übt direkten Einfluss auf kleinräumige meteorologische Prozessgeschehen aus (z.B. lokale Strömungsfelder). Die Topographie des Untersuchungsgebietes wurde aus dem digitalen Geländemodell von NRW mit einer Auflösung von zehn bzw. fünf Meter abgeleitet (siehe **Abb. A1 im Anhang**).

Das Relief im Untersuchungsgebiet wird durch ein von Süden nach Nordwesten abfallendes Gelände beschrieben. Der höchste Punkt liegt im südlichen Stadtteil Stiepel auf einer Höhe von ca. 196 m über NHN. Südlich von Stiepel fällt das Gelände steil in Richtung Ruhrtal ab. Der niedrigste Punkt mit 43 m über NHN liegt im nordwestlichen Stadtteil Hordel. Ein flacher Höhenzug von ca. 120 bis 128 m über NHN verläuft mittig durch das Bochumer Stadtgebiet in Süd-Nord Ausrichtung. Östlich des flachen Höhenzugs fällt das Gelände ab und die niedrigste Geländestufe liegt hier bei 80 bis 90 m über NHN im Bereich der Autobahn A43 und im Stadtteil Langendreer. In Altenbochum östlich der Innenstadt befindet sich mit der Zentraldeponie Kornharpen eine topographische Erhebung anthropogenen Ursprungs (ca. 155 m über NHN).

4.2.2 Oberflächenbeschaffenheit

Ein weiterer wichtiger Baustein, der zur Ausprägung von kleinräumigen Klimatopen führt, ist die vorherrschende Oberflächenart. So wird durch die erhöhte Oberflächenversiegelung und dem hiermit verbundenen geringen Grünanteil in städtischen Strukturen die Verdunstung reduziert, was zu einer Erhöhung der Temperatur in innerstädtischen Bereichen führt.

Über versiegelten Flächen erfolgt zudem eine stärkere Wärmespeicherung der einfallenden Strahlung. Diese Wärme wird nachts wieder an die Umgebungsluft abgegeben und sorgt für eine gegenüber dem Umland deutlich reduzierte nächtliche Abkühlung.

Die in den Simulationsrechnungen verwendeten Oberflächentypen wurden auf der Grundlage der uns zur Verfügung gestellten Flächennutzungsdaten, dem Copernicus Urban Atlas Datensatz der EU sowie von Luftbildern abgeleitet. Die **Abb. A2** zeigen die Oberflächentypen im Untersuchungsgebiet.

Die Oberflächentypen werden anschließend in das in PALM integrierte Landoberflächenmodell (**land surface model**) überführt. In dem Modell sind drei verschiedenen Oberflächentypen (Vegetation, versiegelte Fläche, Wasser) mit verschiedenen vordefinierten Oberflächenklassen aus Vegetationstypen, Versiegelungstypen, Wassertypen und Bodentypen aufgeführt. Die relevanten LSM-Parameter für die angesetzten Flächennutzungstypen sind in der **Tab. 4.1** dokumentiert.

Neben den Oberflächeneigenschaften werden auch Daten zu den Bodeneigenschaften berücksichtigt. Als Grundlage hierfür wurde die Bodenkarte von Nordrheinwestfalen (ISBK50) zugrunde gelegt.

| Flächennutzungstyp | Oberfläche | Mittlerer Versiegelungsgrad (%) | Rauigkeitslänge (m) |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Pavement types | | | |
| Continuous urban fabric, discontinuous dense urban fabric | Asphalt/Beton Mischung | >50 | 0.05 |
| discontinuous medium/low density urban fabric | Asphalt | 10 - 50 | 0.05 |
| Industrial, commercial units | Beton | >50 | 0.01 |
| Roads, airports | Straße | 95 | 0.05 |
| Vegetation types | | | |
| Mineral extraction sites, construction sites, land without current use | Unbedeckter Boden | - | 0.005 |
| Arable land (annual and permanent crops), very low-density urban fabric | Getreide | <10 | 0.1 |
| Open spaces with little or no vegetations (beaches, dunes, bare rocks, glaciers) | Kurzes Grass | - | 0.03 |
| Forests | Laubwälder | - | 2.0 |
| Pastures, herbaceous vegetation, green urban areas | Hohes Grass | - | 0.47 |
| Green urban areas | Sträucher | - | 0.25 |
| Water | | | |
| Water bodies | Gewässer | - | 0.01 |

Tab. 4.1: Flächennutzungstypen im Untersuchungsgebiet (Quelle: [://palm.muk.uni-hannover.de](http://palm.muk.uni-hannover.de))

4.2.3 Vegetation

Grünanlagen können das Mikroklima und damit die Lebensqualität in Städten positiv beeinflussen. Den Einfluss von Bäumen auf das städtische Mikroklima kann in PALM-4U abgebildet werden.

Bei den Berechnungen werden die folgenden Prozesse berücksichtigt:

- Verschattung des Bodens durch Baumkronen
- Reflektion und Absorption kurzwelliger Strahlung
- Langwellige Wärmestrahlung
- Verdunstung von Wasser
- Einfluss der Vegetation auf das lokale Windfeld (Reibungswiderstand)

Für die stadtweite Klimasimulation mit 10 m Auflösung werden die Vegetationsstrukturen über den Oberflächentyp definiert (vgl. **Abb. A2** und **Tab. 4.1**).

Bei der innerstädtischen Klimasimulation werden aufgrund der feiner Rechengitterauflösung von 5 m Bäume als 3D-Objekte berücksichtigt. Die Bäume werden modellseitig u.a. durch ihre Position, ihre Höhe, die Wuchsform und die Belaubungsdichte definiert.

Für hohe Vegetationsstrukturen (z. B. Bäume) bietet PALM-4U ein 3D-Vegetationsmodell (plant canopy model) an, das u. a. auf dem Reibungskoeffizienten (drag force approach) und der Blattflächendichte (leaf area density = LAD) basiert. Das 3D-Vegetationsmodell ist somit vollständig an das Bodenmodell gekoppelt und ein Energiebilanzlöser für die Blatttemperatur wird bei allen Gittervolumina mit einer Blattflächendichte gelöst. Auch eine explizite Transpiration der 3D-Überdachungselemente wird realisiert.

Die Erfassung der bestehenden Baumstandorte und Baumhöhen erfolgte auf der Grundlage von Luftbildern und Laserscandaten sowie dem Baumkataster der Stadt Bochum.

Die **Abb. A3** zeigt den aktuellen Vegetationsbestand für den innerstädtischen Bereich.

4.2.4 Gebäude

Städtische Baukörper und unverschattete versiegelte Flächen sind maßgebliche Einflussfaktoren für die Ausprägung des Stadtklimas. Tagsüber speichern sie die Wärme und Strahlungsenergie erheblich besser als natürliche Böden oder Vegetation. Abends und nachts wird diese Wärme wieder an die Umgebungsluft abgegeben. Daher ist es nachts im Bereich dicht bebauter Gebiete in der Regel deutlich wärmer als im städtischen Umland. Diese nächtliche Überwärmung innerstädtischer Bereiche gegenüber dem Umland wird als „Wärmeinseleffekt“ bezeichnet.

Tagsüber lassen sich aber auch gegenläufige Effekte feststellen. So kann sich in dicht bebauten Stadtvierteln durch den Schattenwurf der Gebäude die Luft tagsüber weniger stark erwärmen als auf unverschatteten Freiflächen.

Neben den Auswirkungen auf den Wärmehaushalt beeinflussen die Bebauungsstrukturen einer Stadt auch in erheblichem Maße den Luftaustausch. Durch die erhöhte Rauigkeit der Oberfläche kommt es zu einer Abnahme der Windgeschwindigkeit und somit zu einer verringerten Frischluftzufuhr.

Die Ableitung der Gebäudegrundrisse und Gebäudehöhen im Untersuchungsraum erfolgte auf der Grundlage eines digitalen Stadtmodells, welches vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurde, sowie eines aktuellen Luftbildes. Die geplanten Bauprojekte „Victoria Karree“ am ehemaligen Standorte Gerichtskomplexes und „City-Tower“ am Standort des abgerissenen Parkhauses an der Ecke Universitätsstraße / Südring wurden in den Berechnungen berücksichtigt.

Bei den Simulationsrechnungen werden den Gebäuden neben der Gebäudehöhe thermische und strahlungstechnische Eigenschaften zugewiesen. Hierbei wurden die in PALM-4U hinterlegten Standard-Gebäudeeigenschaften (urban surface model) verwendet, die gemäß den Modellentwicklern die durchschnittlichen Verhältnisse in einer mitteleuropäischen Stadt abbilden.

5 ERGEBNISSE

Basierend auf den mikroklimatischen Modellsimulationen werden die bodennahe Lufttemperatur (2 m über Grund), die bodennahe Windgeschwindigkeit (2 m über Grund), die gefühlte Temperatur als bioklimatische Kenngröße sowie die nächtliche Kaltluftströmung (Volumenstromdichte) ausgewertet und kartografisch dargestellt. Die Ergebnisse sollen einen Überblick über die stadtklimatische Situation in Bochum aufzeigen, um hieraus Belastungsräume, Ausgleichsflächen und klimatische Besonderheiten ableiten zu können. An einem windschwachen und wolkenlosen heißen Sommertag wird meist zwischen 16 Uhr und 18 Uhr die höchste Lufttemperatur in 2 m Höhe erreicht, die größte Wärmebelastung in der Sonne in Form eines bioklimatischen Index wird etwa zwischen 13 Uhr und 15 Uhr erreicht. Deshalb wurde als repräsentative Auswertzeit tagsüber 16 Uhr gewählt, bei dem beide Größen nahe Ihrem Maximum sind. Die Minimumtemperatur in einer windschwachen und wolkenarmen Nacht wird meist in der Zeit um den Sonnenaufgang erreicht. Deshalb wurde für die nächtliche Auswertung ein Zeitpunkt vor Sonnenaufgang gewählt, d. h. 05 Uhr. Die Ergebnisabbildungen sind im Anhang dokumentiert.

Für eine bessere räumliche Orientierung sind in der folgenden Abbildung Bereiche im Untersuchungsgebiet, die in der Ergebnisbeschreibung erwähnt werden, räumlich gekennzeichnet.

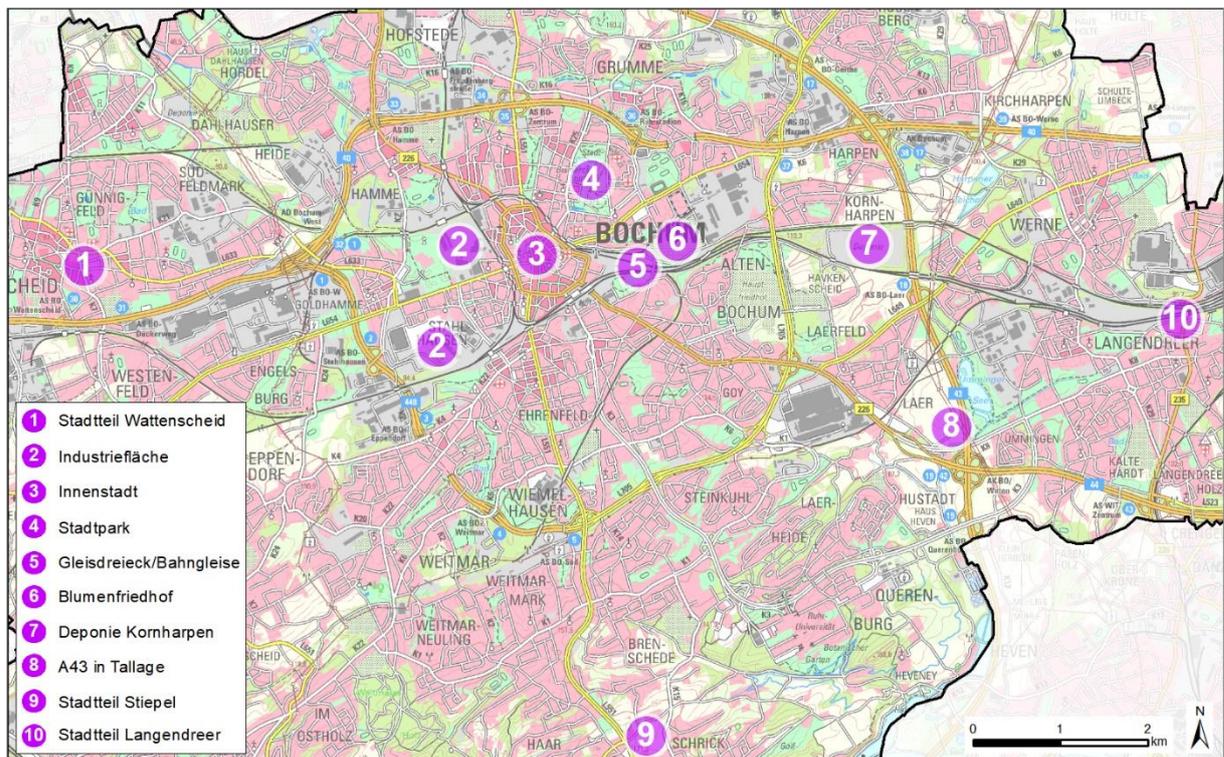


Abb. 5.1: Lageplan

5.1 Ergebnisse für die Situation am Nachmittag

Die **Abb. A4** zeigt die **bodennahe Lufttemperatur** für das stadtweite Untersuchungsgebiet für die Tageszeit um 16 Uhr. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Verteilung der bodennahen Lufttemperatur relativ homogen ist und größtenteils zwischen 32 °C (hellgelb) und 36 °C (dunkelorange) liegt. Erwartungsgemäß werden in Bereichen von Wäldern im Verhältnis zur direkten Umgebung niedrigere Temperaturen ermittelt. Die Lufttemperaturen in Siedlungsbereichen und über Freiflächen liegen bei etwa 34 bis 35 °C. Erhöhte Lufttemperaturen werden in vielen Teilen von hoch versiegelten Industrieflächen ermittelt. Hier werden in Bereichen der nach Süden orientierten Gebäudefassaden der Industriehallen bis zu 36 °C erreicht. Zudem fällt auf, dass im Bereich der Wohnsiedlungen der nordwestlich liegenden Stadtteile Wattenscheid, Hordel und Hofstede erhöhte Lufttemperaturen von bis zu 36 °C berechnet werden.

Im Vergleich hierzu zeigen die Ergebnisse der Innenstadtberechnung eine räumlich differenziertere Verteilung der bodennahen Lufttemperatur (vgl. **Abb. A5**). Am Beispiel des Stadtparks lässt sich zeigen, dass durch die feinere räumliche Auflösung des Rechenrasters und der Auflösung von Einzelbäumen als 3D-Objekte eine deutlich heterogenere Verteilung der Lufttemperatur und somit auch eine realitätsnähere Darstellung möglich ist. Anders als bei der stadtweiten Berechnung treten hier versiegelte Gewerbeflächen westlich der Innenstadt als Hitze-Hotspots mit Temperaturen über 36 °C hervor.

Die **bodennahen Windgeschwindigkeiten** bei schwachen östlichen Anströmungen sind für den Nachmittag in der **Abb. A6** dargestellt. Hieraus ist erwartungsgemäß abzuleiten, dass in Bereichen niedriger Bodenrauigkeiten (z.B. Freiflächen) höhere Windgeschwindigkeiten (> 1 m/s) auftreten. Wohnsiedlungen mit nahegelegenen Freiflächen profitieren ebenfalls von den guten Durchlüftungsverhältnissen, beispielsweise in Langendreer südlich und nördlich der Bahngleise. Ähnlich hohe Windgeschwindigkeiten werden in Bereichen von parallel zur Anströmrichtung ausgerichteten Straßenzügen und Gleisanlagen berechnet, welche aufgrund ihrer Leitwirkung auch die Durchlüftung angrenzender Siedlungsräume fördert. In dicht bebauten Wohngebieten und Wäldern wird der Wind durch Strömungshindernisse abgebremst, so dass hier niedrigere Windgeschwindigkeiten (< 1 m/s) auftreten.

Die Ergebnisse der Innenstadtberechnung zeigen, dass die räumliche Verteilung der bodennahen Windgeschwindigkeiten größtenteils mit denen der stadtweiten Berechnung übereinstimmt (vgl. **Abb. A7**). Aufgrund der feineren Rechengitterauflösung werden jedoch Durchströmungen von Straßen und Bahntrassen besser im Modell abgebildet, sodass diese deutlicher als Luftleitbahn hervortreten. In Bereichen von dichter Bebauung (Innenstadt) und

dichtem Bewuchs (Stadtpark) treten aufgrund der Strömungshindernisse teilweise niedrige Windgeschwindigkeiten auf.

Die **Abb. A8** zeigt die berechneten Werte der **gefühlten Temperatur** am Nachmittag. Es wird deutlich, dass die gefühlte Temperatur im stadtweiten Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit der Verschattungssituation, der Durchlüftung und der Oberflächenbeschaffenheit stark variiert. Die Werte der gefühlten Temperatur liegen zwischen 31 °C (hellgrün) und 37 °C (rot), was im Großteil des Untersuchungsgebietes einer starken Wärmebelastung entspricht. Die Variationsbreite ist hierbei größer als bei der Lufttemperatur, da in der gefühlten Temperatur neben der Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und die Strahlungstemperatur als meteorologische Einflussgrößen eingehen. Tagsüber führt die Sonneneinstrahlung aufgrund der hohen Strahlungstemperatur in besonnten Bereichen zu einer sehr heterogenen Verteilung der gefühlten Temperatur.

Besonders von Hitzestress betroffen sind Bereiche, die über mehrere Stunden hinweg unverschattet sind, wie beispielsweise landwirtschaftlich genutzte Flächen. Bei versiegelten Flächen wird der Effekt der Aufheizung durch die Wärmespeicherung der Oberfläche zusätzlich verstärkt (siehe Industrieflächen). Im Bereich von Wäldern kommt es durch die verschattende Wirkung der Bäume zu deutlich geringeren Wärmebelastungen. Auch auf der Nordseite von hohen Gebäuden liegt die gefühlte Temperatur durch den Schattenwurf der Baukörper deutlich niedriger. Aus der Abbildung lässt sich entnehmen, dass die Wohn- und Gewerbegebiete im Nordwesten der Stadt tendenziell eine etwas höhere Wärmebelastung aufweisen als die südlicheren Gebiete.

Im Vergleich hierzu zeigen die Ergebnisse der Innenstadtberechnung eine räumlich differenzierte Verteilung und einen größeren Wertebereich der gefühlten Temperatur auf (vgl. **Abb. A9**). Die sehr heterogene Verteilung der gefühlten Temperatur, d.h. kleinräumig relativ große Unterschiede, ist in der höher aufgelösten Simulation noch besser zu erkennen, da neben einer höheren horizontalen und vertikalen Auflösung auch die hohe Vegetation dreidimensional erfasst wird und lokal zu Verschattungen führt. Dabei treten häufig sehr hohe Differenzen der gefühlten Temperatur auf engstem Raum auf, beispielsweise beim Übergang aus einem schattigen Park auf eine benachbarte voll besonnte Straße. Im Stadtpark werden daher Differenzen der gefühlten Temperatur von ca. 7 Kelvin berechnet. Auch die Auswirkung der Verschattung von Gebäuden auf die gefühlte Temperatur kann in der Innenstadtberechnung besser abgebildet werden (vgl. Gleisdreieck).

Zusätzliche thermische Belastungen resultieren in Bereichen mit geringen Windgeschwindigkeiten, die zum Beispiel in Innenhöfen von Vierteln mit Blockrandbebauung oder an windabgewandten Gebäudeseiten zu finden sind.

5.2 Ergebnisse für die Situation kurz vor Sonnenaufgang

Zur Beurteilung der klimatischen Situation in der Nacht wurde der Zeitpunkt 05 Uhr herangezogen.

Die **Abb. A10** zeigt die **bodennahe Lufttemperatur** für die stadtweite Untersuchung um 05 Uhr. In der Abbildung tritt der Wärmeinseleffekt im Bereich von Gewerbe- und Wohnsiedlungen hervor. Dieser ist besonders deutlich in der dicht bebauten Bochumer Innenstadt ausgeprägt. Der Temperaturunterschied zwischen innerstädtischen Bereichen und dem Freiland beträgt ca. 3 K bis 4 K. Die Temperaturen liegen in den Siedlungen bei über 21 °C und in Teilen der Innenstadt sogar über 22 °C, was einer Tropischen Nachtsituation (Temperaturminimum ≥ 20 °C) entspricht. Freiflächen hingegen kühlen deutlich schneller ab, so dass hier größtenteils Temperaturen von weniger als 19 °C berechnet wurden.

In der Ergebnisgrafik zu den bodennahen Lufttemperaturen für den Innenstadtbereich ist der Effekt der Wärmeinsel noch deutlicher erkennbar (vgl. **Abb. A11**). Besonders Bereiche mit einer dichten und geschlossenen Bebauung weisen erhöhte Lufttemperaturen von über 22 °C auf. Größere Grünflächen (Stadtpark, Friedhof) und breite Bahntrassen kühlen in den Nachtstunden deutlich schneller ab. Die bodennahe Temperatur liegt hier unter 19 °C.

Die **bodennahen Windgeschwindigkeiten** zur späten Nachtsituation sind in der **Abb. A12** dargestellt. Im Vergleich zum Tageszeitraum sind die Windgeschwindigkeiten aufgrund der fehlenden Thermik deutlich geringer. Auch die Verteilung der Windgeschwindigkeit unterscheidet sich zu denen im Tageszeitraum: Die westlichen und nordwestlichen Stadtgebiete weisen geringere Windgeschwindigkeiten auf als die östlichen Bereiche, da diese stärker von den Kaltluftströmungen aus Süden erfasst werden. Hier profitieren unter anderem breite Autobahn- und Bahntrassen von einer guten nächtlichen Belüftungssituation.

Wie auch im Tageszeitraum ähnelt die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeit der im 10 m-Raster (vgl. **Abb. A13**). In den Ergebnissen des höher aufgelösten Rechenrasters tritt insbesondere die Bahntrasse des Gleisdreiecks als gut belüfteter Bereich hervor. Der Bahntrasse kann somit eine nächtliche Luftleitfunktion zugesprochen werden, welche die Belüftungssituation in Teilbereichen der angrenzenden Innenstadt verbessert. Besonders schwach belüftet sind im Nachtzeitraum unter anderem große Teile der dicht bebauten Innenstadt. Ursache hierfür sind die engen und vielfach geschlossenen Bebauungsstrukturen.

Die **Abb. A14** stellt die flächenhafte Verteilung der **Kaltluftvolumenstromdichte** im stadtweiten Untersuchungsraum dar. Zusätzlich geben Pfeile die bodennahe Richtung und

die Intensität der Volumenstromdichte an. Neben der Geschwindigkeit der bodennahen Strömung spielt die Mächtigkeit der Kaltluft für die klimatische Ausgleichsleistung eine wesentliche Rolle.

Von den weiter südlich von Bochum gelegenen Randhöhen des Sauerlands bildet sich nachts ein Bergwindssystem aus, das kühle Luftmassen nach Norden in Richtung des Stadtgebietes von Bochum transportiert. Dabei werden im Tal der A43 entlang der Ruhr Volumenstromdichten von mehr als $100 \text{ m}^3/\text{m s}$ berechnet.

Ein Teil dieser bis zu ca. 100 m mächtigen Kaltluftströmungen kann über das Ruhrtal entlang des Taleinschnitts entlang der A43 nach Norden vordringen. Luftleitbahnen entlang von kleinen Tälern/Einbuchtungen, beispielsweise entlang der Bahntrassen, ermöglichen es, dass hiervon Kaltluft in westliche Richtung abzweigt und in Teilbereichen der östlichen Bochumer Innenstadt die nächtliche Überwärmung mindert.

Schwache Kaltluftströmungen zeigen sich über topographisch erhöhten Gebieten (z.B. Stiepel) und im Westen bis Nordwesten der Stadt.

Aus den Ergebnissen der Kaltluftvolumenstromdichte der Innenstadtberechnung geht hervor, dass nächtliche Kaltluft aus östlicher Richtung über die Bahngleise in Richtung der Bochumer Innenstadt transportiert wird (vgl. **Abb. A15**). Hier verteilt sich die Kaltluft über die Gleise in Richtung Norden und Südwesten und gelangt von dort in die angrenzenden Wohngebiete. Allerdings schwächt sich die Kaltluftdynamik im Bereich des Hauptbahnhofs aufgrund der warmen Stadtoberfläche sowie der fehlenden Kaltluftneubildung ab und weist im Bereich des westlich angrenzenden Gleisdreiecks keine große bioklimatische Bedeutung mehr auf.

Für das stadtweite Untersuchungsgebiet ist die Verteilung der nächtlichen **gefühlten Temperatur** in der **Abb. A16** dargestellt. In dieser Zeit liegt keine kurzweilige Sonneneinstrahlung vor. Die thermische Belastung ist also ausschließlich durch die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und die langwellige Ausstrahlung von Boden und Bauwerken sowie der atmosphärischen Gegenstrahlung beeinflusst. Hieraus resultiert eine deutlich homogenere Verteilung der Wärmebelastung. Mit unter 16°C treten die geringsten Werte der gefühlten Temperatur auf gut durchlüfteten Freiflächen auf. Hier führt das Fehlen von Strömungshindernissen zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten, was wiederum die gefühlte Temperatur senkt. Zusätzlich kühlen unversiegelte Flächen nachts schneller aus als betonierte und asphaltierte Flächen. In Wäldern vermindern die Baumkronen die langwelligen Strahlungsverluste des Bodens und verringern somit die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Im Umfeld von

dichter Bebauung wird aufgrund der schwachen Windgeschwindigkeiten und der Wärmeabstrahlung der Baukörper eine höhere Wärmebelastung ausgewiesen.

In der Ergebnisabbildung der Innenstadtberechnung tritt die nächtliche Wärmebelastung der dicht bebauten Gebiete deutlich hervor (vgl. **Abb. A17**). Die höchsten gefühlten Temperaturen sind in Bereiche mit einer engen Blockrandbebauung zu finden ($> 21\text{ °C}$). Die niedrigsten gefühlten Temperaturen werden aufgrund der fehlenden Bäume und der daraus resultierenden stärkeren effektiveren langwelligen Ausstrahlung im Bereich von Freiflächen (z.B. Bahngleisen), ermittelt. Auch in Teilen des Friedhofs werden niedrige nächtliche Temperaturen von unter 16 °C berechnet. Die Differenz der gefühlten Temperatur zwischen Siedlung und Freiland beträgt ca. 6 K.

6 FAZIT

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der stadtweiten Klimasimulation mit dem Rechenmodell PALM-4U lassen folgende Rückschlüsse zu:

- Das Modell PALM-4U, mit dem die Simulationsrechnungen durchgeführt wurden, ist grundsätzlich geeignet, stadtweite Klimasimulationen mit einer hohen Qualität durchzuführen. Stadtklimatisch wichtige Phänomene wie Luftleitbahnen, Kaltluftströmungen, Wärmeinseleffekte werden realistisch wiedergegeben und decken sich weitestgehend mit den Erkenntnissen aus früheren klimatischen Untersuchungen und Messungen.
- Da die Entwicklungsarbeiten und Modellevaluierungen von PALM-4U noch nicht vollständig abgeschlossen sind, erfordert die gegenwärtige Anwendung des Modells und die Interpretation der Simulationsergebnisse meteorologische Fachkenntnisse und setzt langjährige Erfahrungen mit der Anwendung numerischer Strömungsmodelle sowie deren Ergebnisauswertung und Ergebnisinterpretation voraus. So besteht derzeit noch keine Möglichkeit, Ergebnisse zur Kaltluftdynamik, z.B. Kaltluflhöhen und Kaltluftvolumenstromdichten, direkt auszugeben und grafisch darzustellen. Die Ableitung dieser Größen erfordert vielmehr eine aufwendige individuelle 3d-Datenanalyse des Temperatur- und Windfeldes unter Berücksichtigung der Topographie.
- Die klimatischen Ergebnisauswertungen für das Bochumer Stadtgebiet zeigen, dass die Anwendung des Modells in einem 10m-Raster gegenüber einem auf 5 m verringerten Gitterabstand qualitative Einbußen mit sich bringt. Dies betrifft insbesondere eine fehlende bzw. unzureichende geometrische Erfassung kleinräumiger Strömungshindernisse (Bäume, Gebäude) und hieraus resultierende Unschärfen in der Bestimmung der kurzwelligen Einstrahlung und der bodennahen Strömung insbesondere in engen Bebauungsstrukturen. Durch die räumliche Generalisierung wird in bestimmten Bereichen die exakte Ermittlung bioklimatischer Kenngrößen, z.B. der Gefühlten Temperatur, beeinträchtigt, da bei autochthonen sommerlichen Wetterlagen die bodennahe Windgeschwindigkeit und vor allem die kurzwellige Strahlungsbilanz einen starken Einfluss auf die Wärmebelastung am Tage haben.

-
- Mit einer Auflösung von 5 m verbessert sich die Prognosegüte, weil hierdurch größere Einzelbäume und Baumgruppen im Rechenmodell als 3d-Strukturen und Schattenspender berücksichtigt werden können und kleinräumige Bebauungsstrukturen besser aufgelöst werden können. Hierdurch werden die Strömungsverhältnisse in Luftleitbahnen und in engen Straßenzügen genauer wiedergegeben.
 - Durch Anwendung eines geeigneten Nesting-Verfahrens ist es mit PALM-4U möglich, bei stadtweiten Simulationsrechnungen regionale Windsysteme in Form eines Modellantriebs zu berücksichtigen.
 - Die Ergebnisse aus stadtweiten Berechnungen wiederum lassen sich als Antrieb für räumlich hoch aufgelöste kleinräumige Klimasimulationsrechnungen beispielsweise im Rahmen von Bebauungsplanungen verwenden.
 - Für potenzielle Modellanwender ist darauf hinzuweisen, dass räumlich hoch aufgelöste Simulationsrechnungen für große Rechengebiete sehr hohe Anforderungen an die Hardware stellen. Die Modellrechnungen für Bochum benötigten auf einem Hochleistungsrechner mit 256 GB Ram und 64 Rechenkernen eine mehrwöchige Rechenzeit.

7 LITERATUR

- LANUV WEB: Fachinformationssystem Klimaanpassung. <http://www.klimaanpassung-karte.nrw.de/>
- Lohmeyer GmbH (2020): „Simulationen mit PALM-4U. Lohmeyer aktuell, August 2020. URL: <http://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/hauszeitung/ausgabe43.pdf>
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M., and Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development Discussions* 8 (2015), Nr. 2, S. 1539-1637 (2015).
- Maronga, B., Gross, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., Kanani-Sühring, F., Matzarakis, A., Mauder, M., Pavlik, D., Pfaffenrott, J., Schubert, S. Seckmeyer, G., Sieker, H., and Winderlich, K. (2019): Development of a new urban climate model based on the model PALM-Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorologische Zeitschrift* (2019): 1-15.
- Raasch, S., and Schröter, M. (2001): PALM – a large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift* 10.5 (2001): 363-372.
- RVR Geoportal: Klimaserver des RVR. <https://klima.geoportal.ruhr/>
- Stadt Bochum (1991): *Klimaanalyse der Stadt Bochum*. Bochum, 1991.
- Steinrücke (2012): *Klimaanpassungskonzept Bochum*. Bochum, 2021.
- VDI 3783 Blatt 7 (2017): *Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle, Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder*. Richtlinie VDI 3783 Blatt 7, Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, Düsseldorf, Mai 2017.
- VDI 3783 Blatt 9 (2017): *Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisströmung*. Richtlinie VDI 3783 Blatt 9. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN - Normenausschuss, Düsseldorf, Mai 2017
- VDI 3787 Blatt 2 (2008): *Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima*. Düsseldorf, 2008.
- VDI 3787 Blatt 4 (2019): *Umweltmeteorologie - Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung (Entwurf)*, Düsseldorf, September 2019
- WEBSITE PALM (2020): <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac>

A N H A N G

GRAFIKEN ZU DEN EINGANGSDATEN UND DEN ERGEBNISSEN

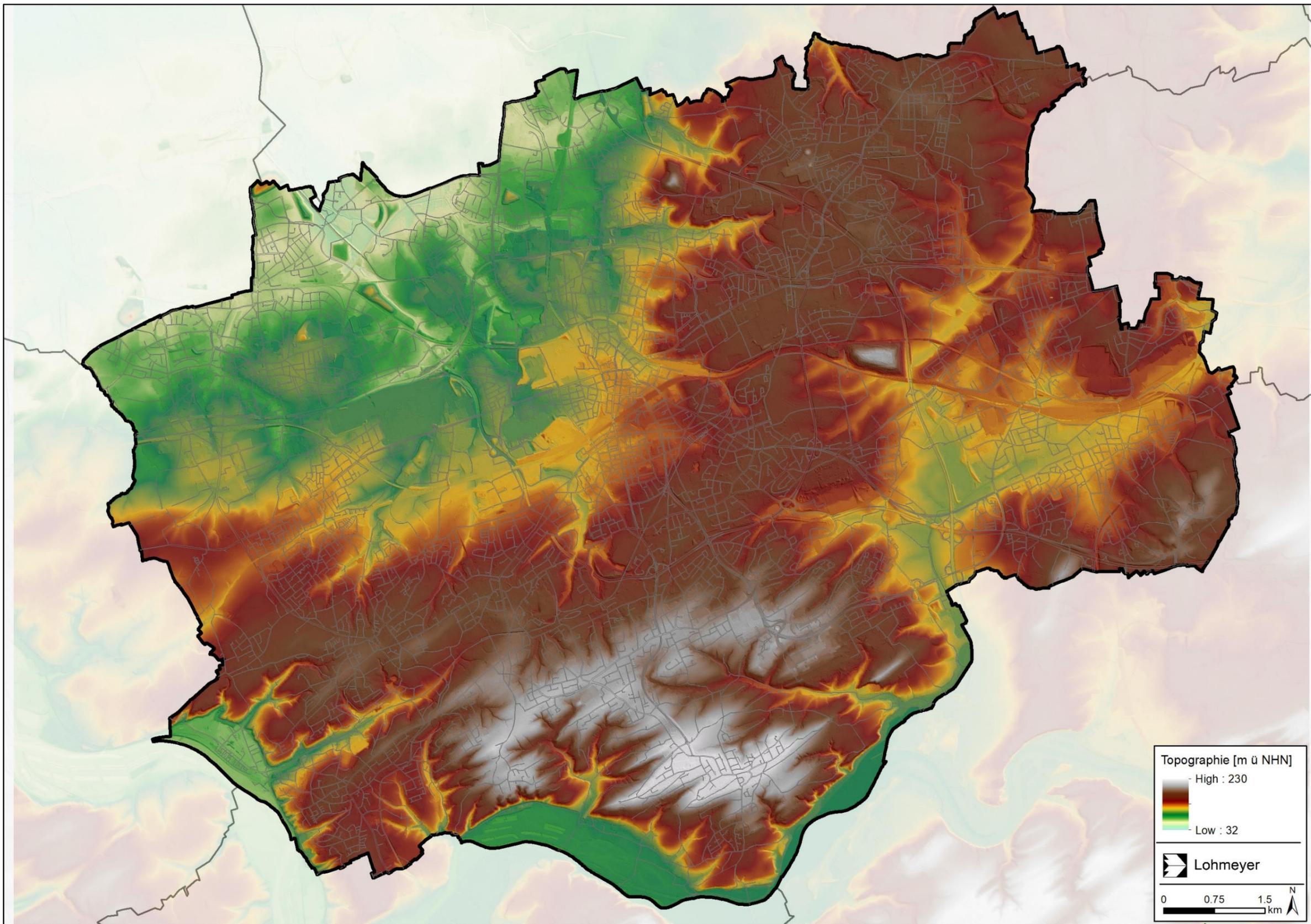


Abb. A1: Geländehöhe im Stadtgebiet Bochum

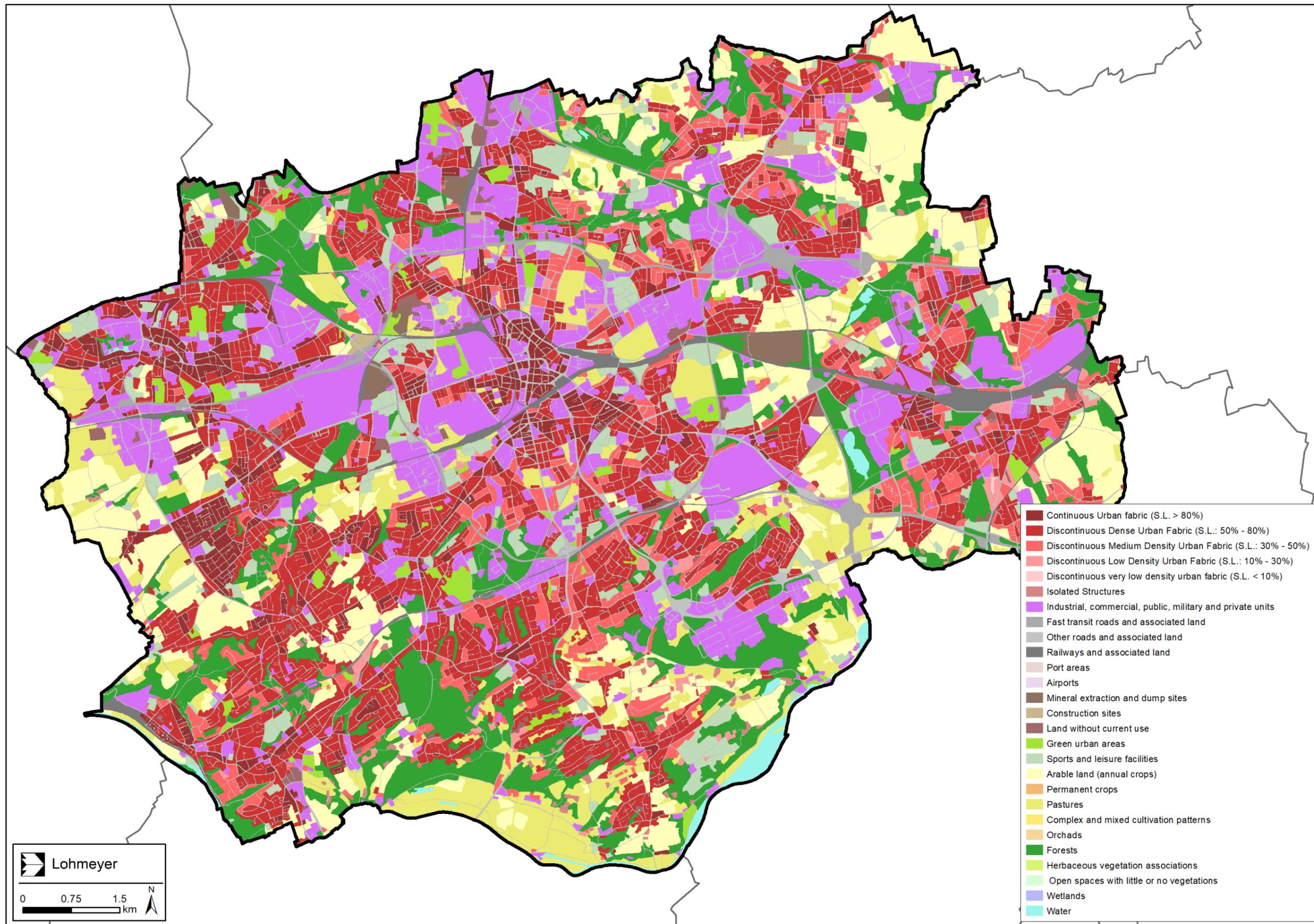


Abb. A2: Landnutzung im Stadtgebiet Bochum (Quelle: Copernicus Urban Atlas EU)



Abb. A3: Mittlere Höhe der Vegetationsstrukturen in der Innenstadt und Umgebung

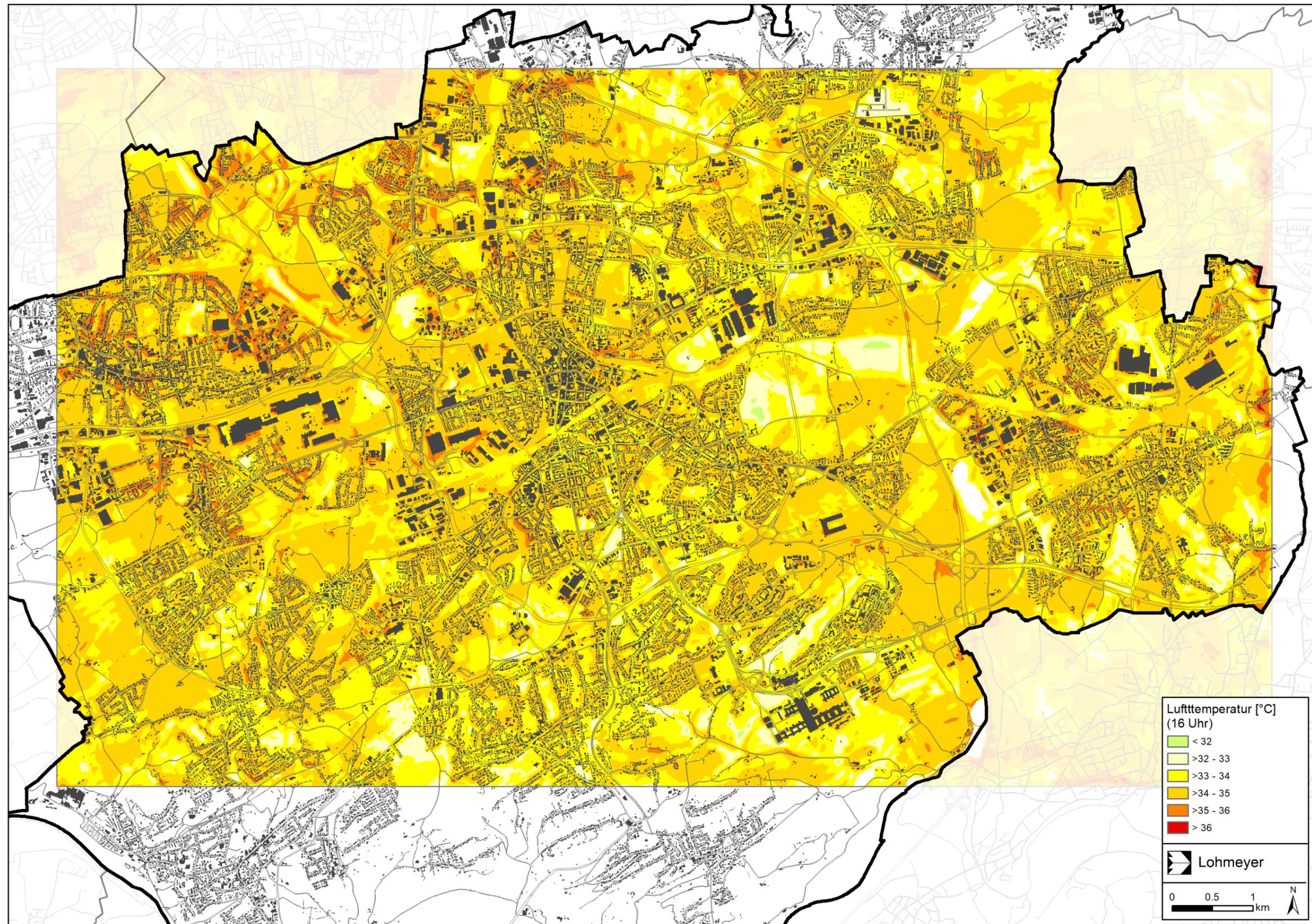


Abb. A4: Lufttemperatur um 16 Uhr für die stadtweite Untersuchung

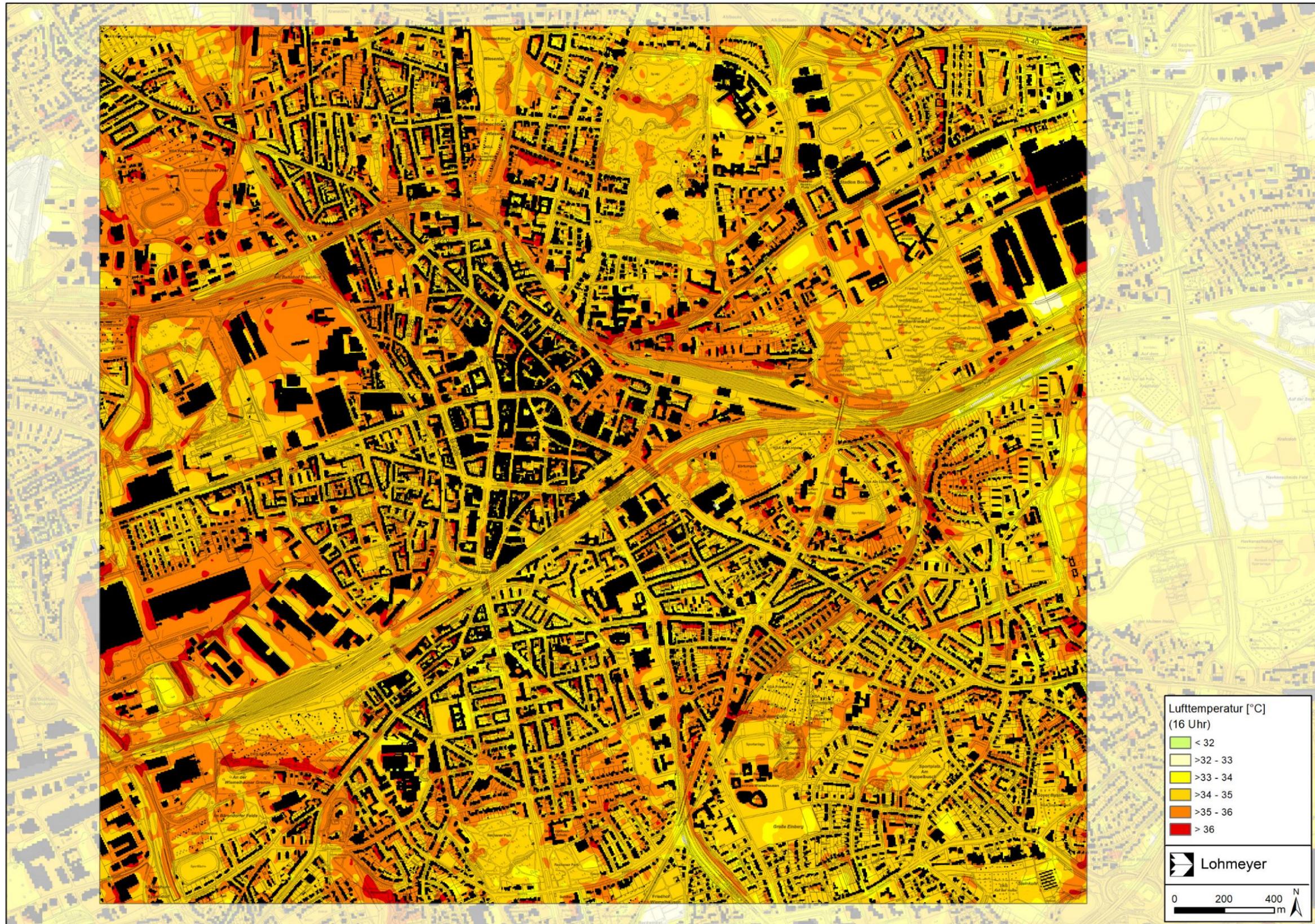


Abb. A5: Lufttemperatur um 16 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

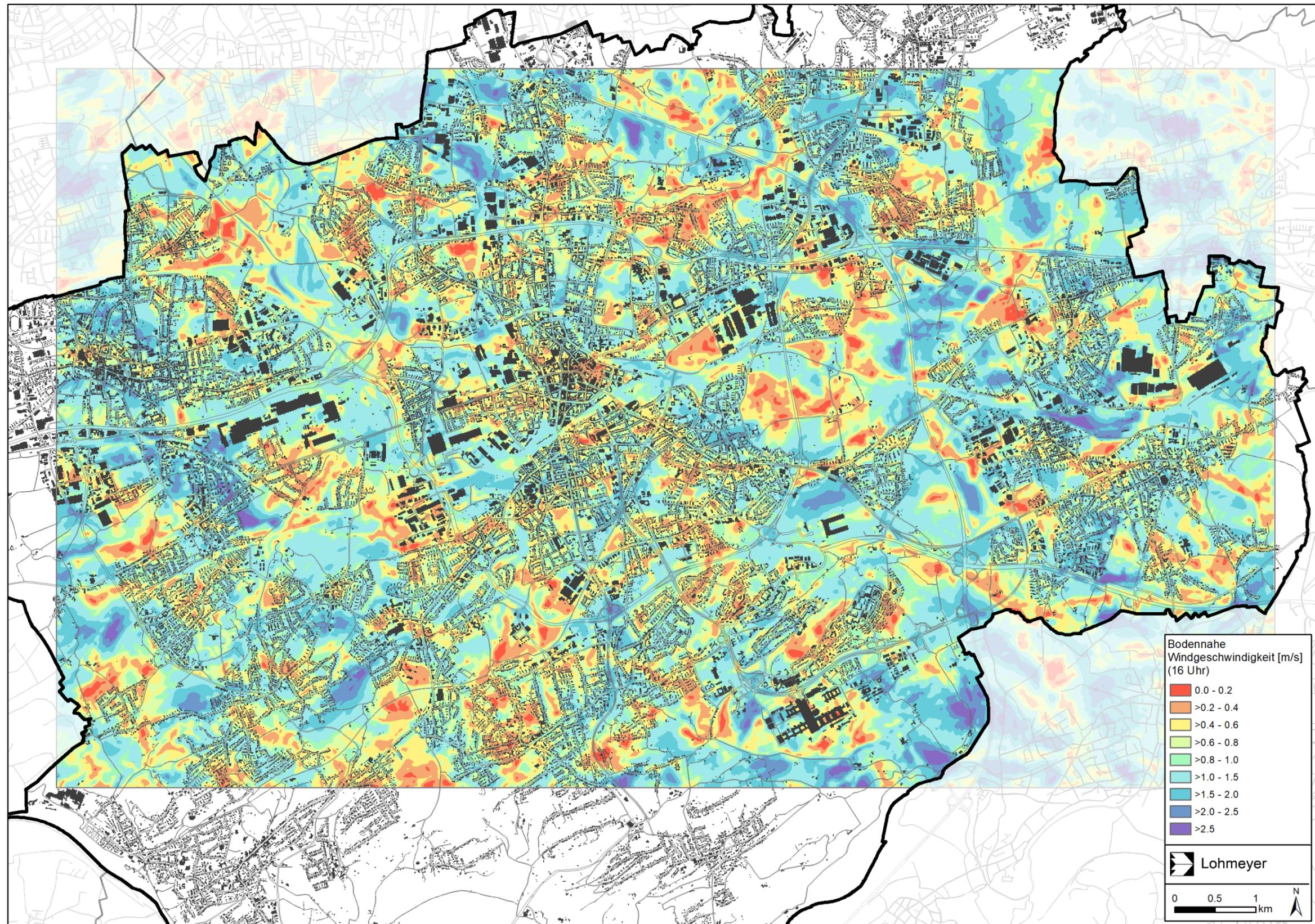


Abb. A6: Bodennahe Windgeschwindigkeit (2m über Grund) um 16 Uhr für die stadtweite Untersuchung

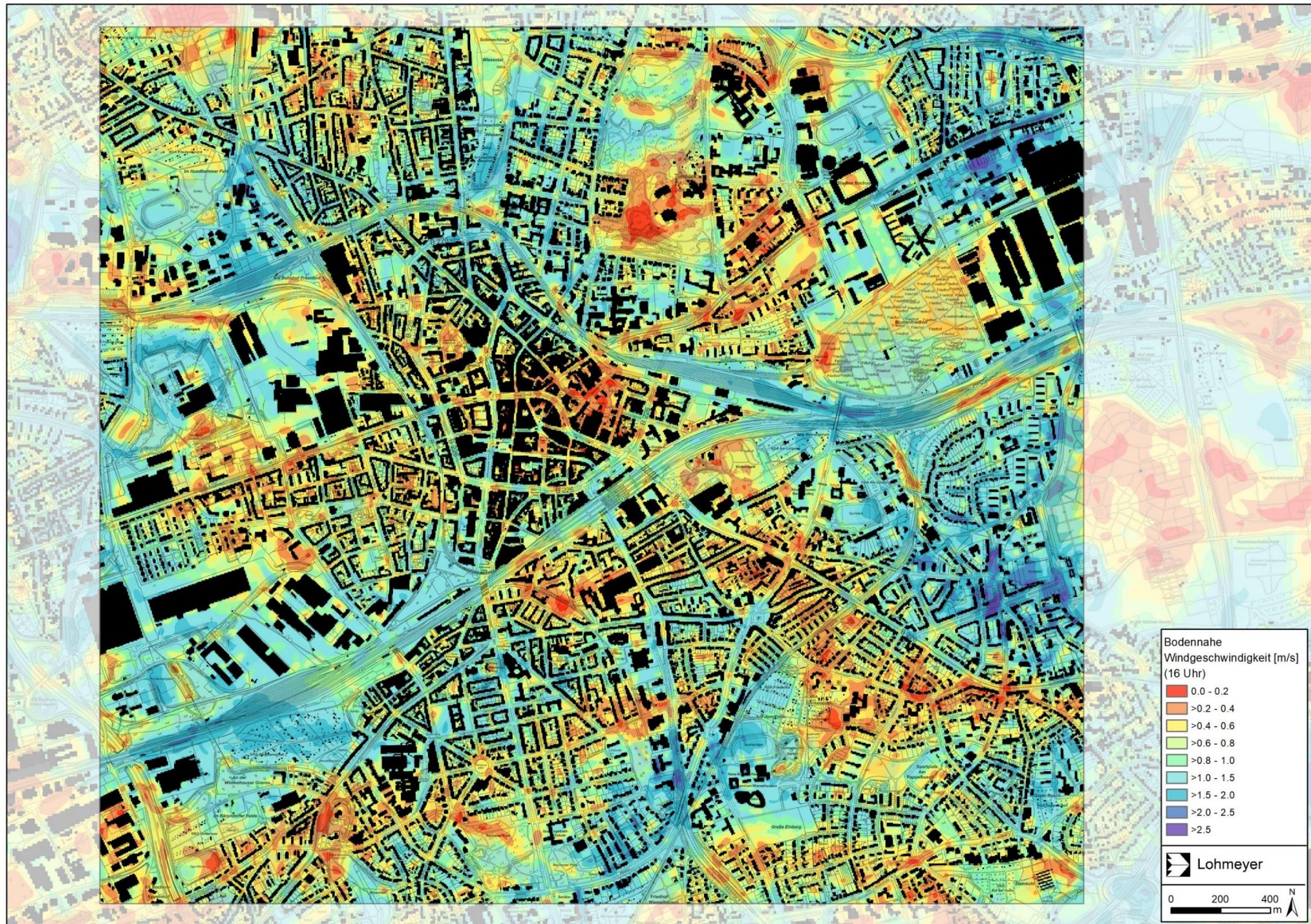


Abb. A7: Bodennahe Windgeschwindigkeit (2m über Grund) um 16 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

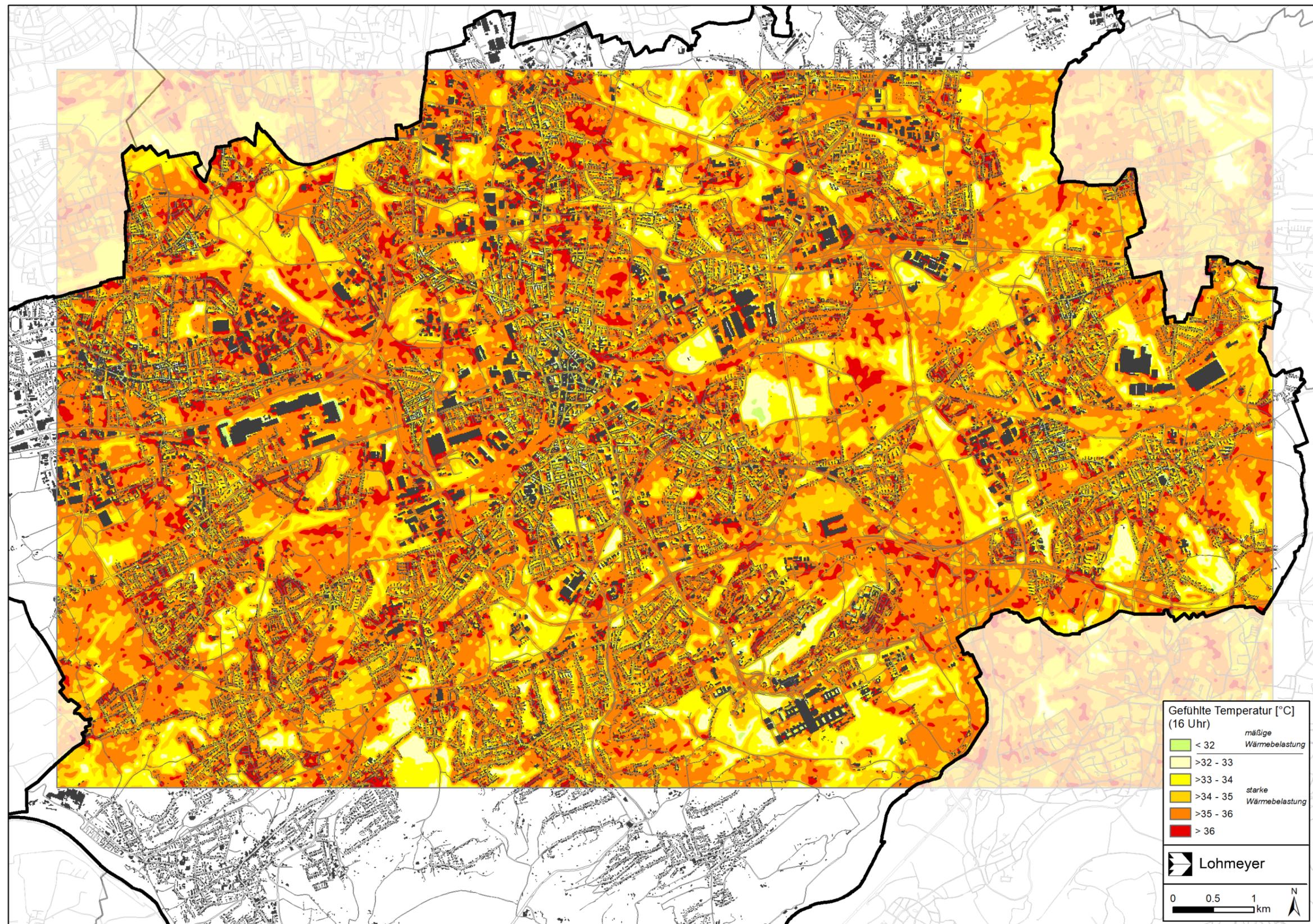


Abb. A8: Gefühlte Temperatur um 16 Uhr für die stadtweite Untersuchung

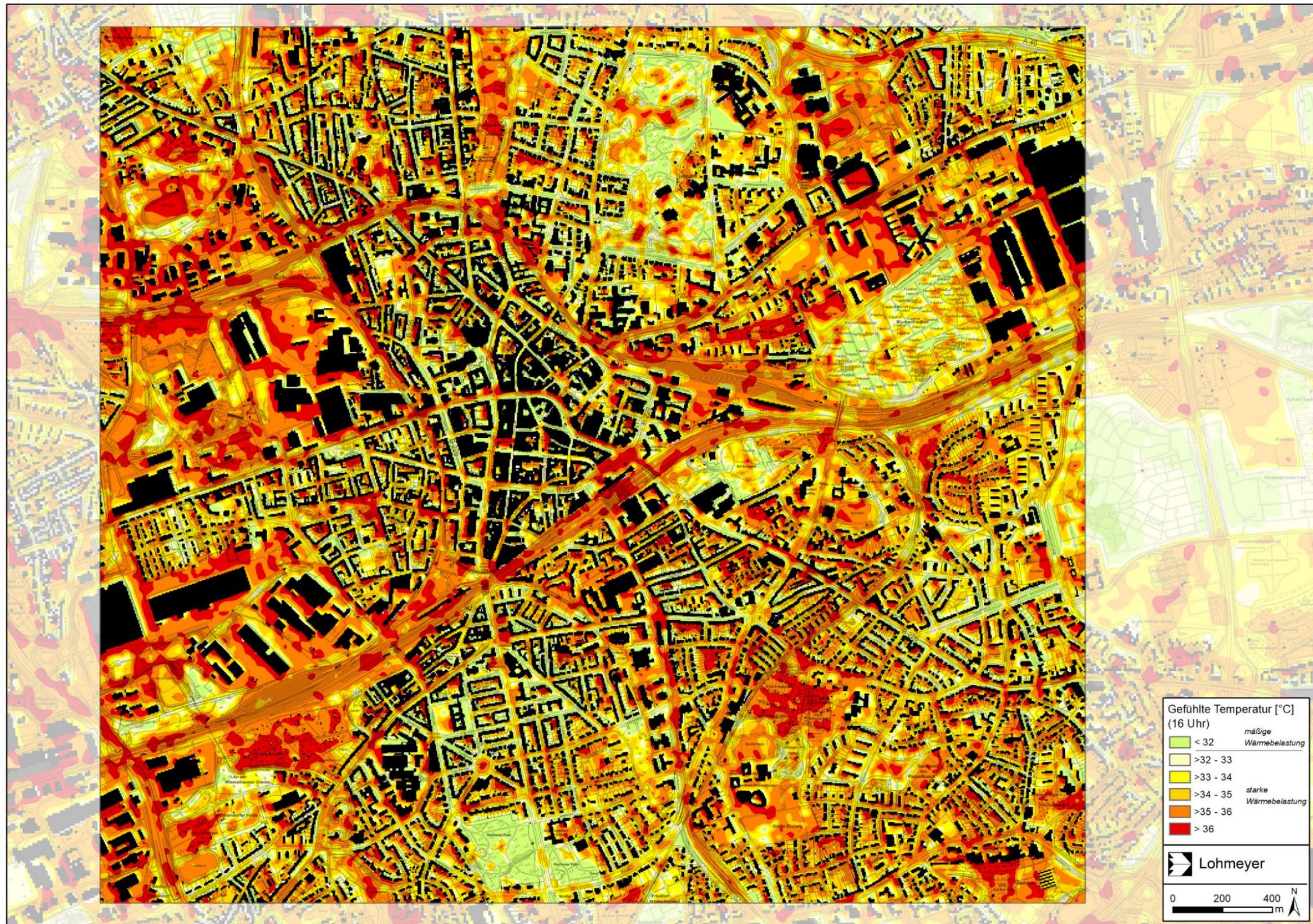


Abb. A9: Gefühlte Temperatur um 16 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

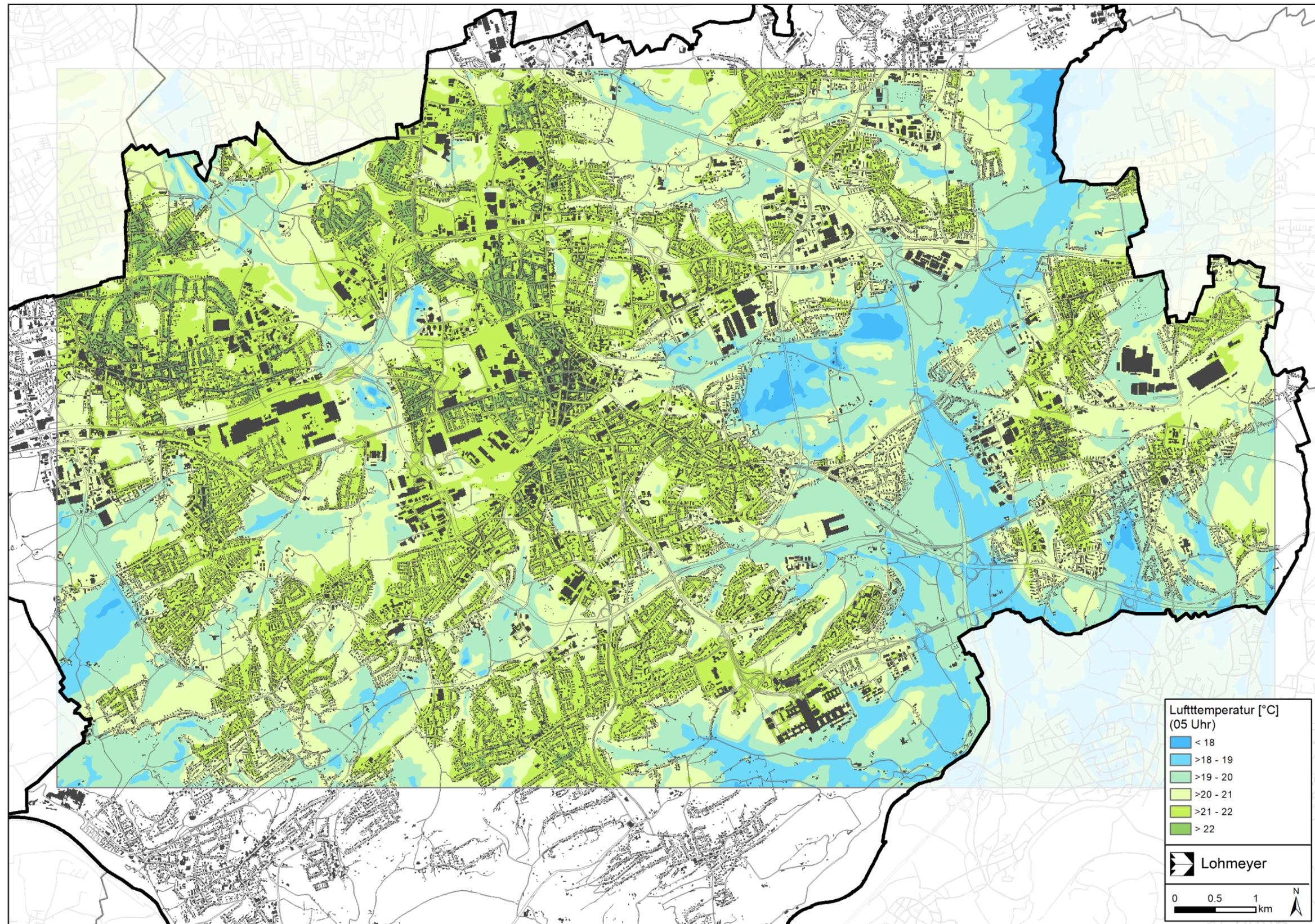


Abb. A10: Lufttemperatur um 05 Uhr für die stadtweite Untersuchung

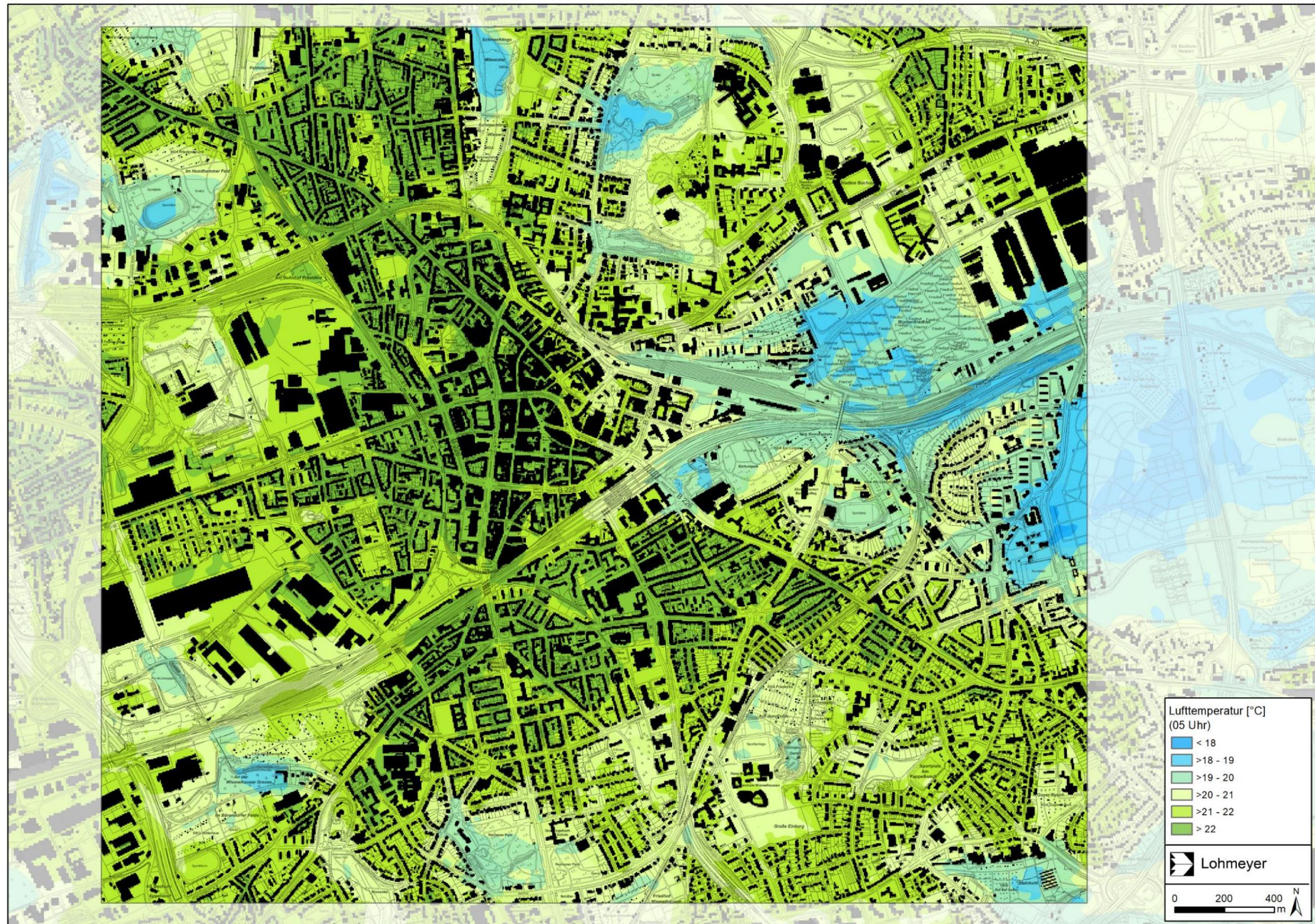


Abb. A11: Lufttemperatur um 05 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

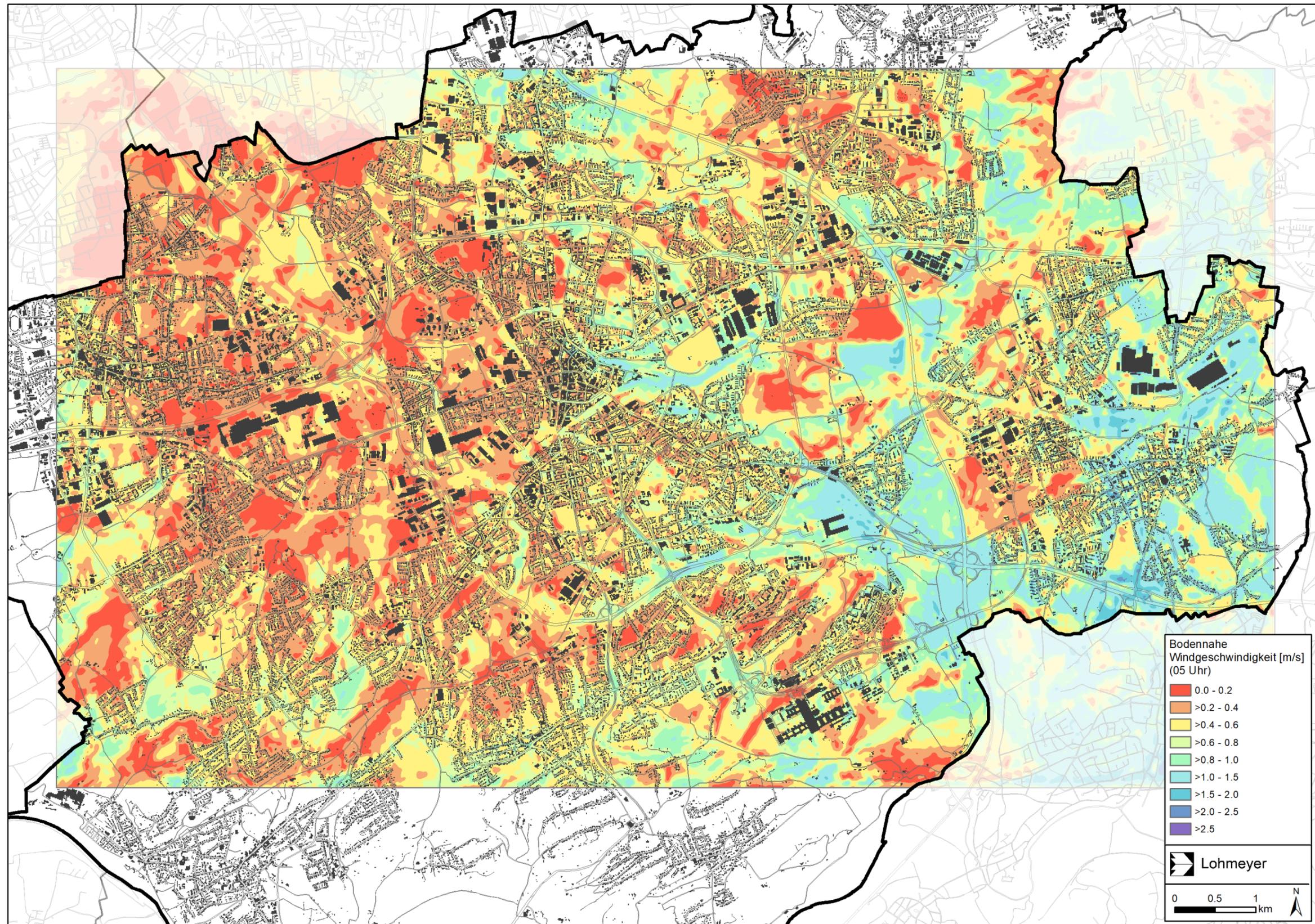


Abb. A12: Bodennahe Windgeschwindigkeit (2m über Grund) um 05 Uhr für die stadtweite Untersuchung

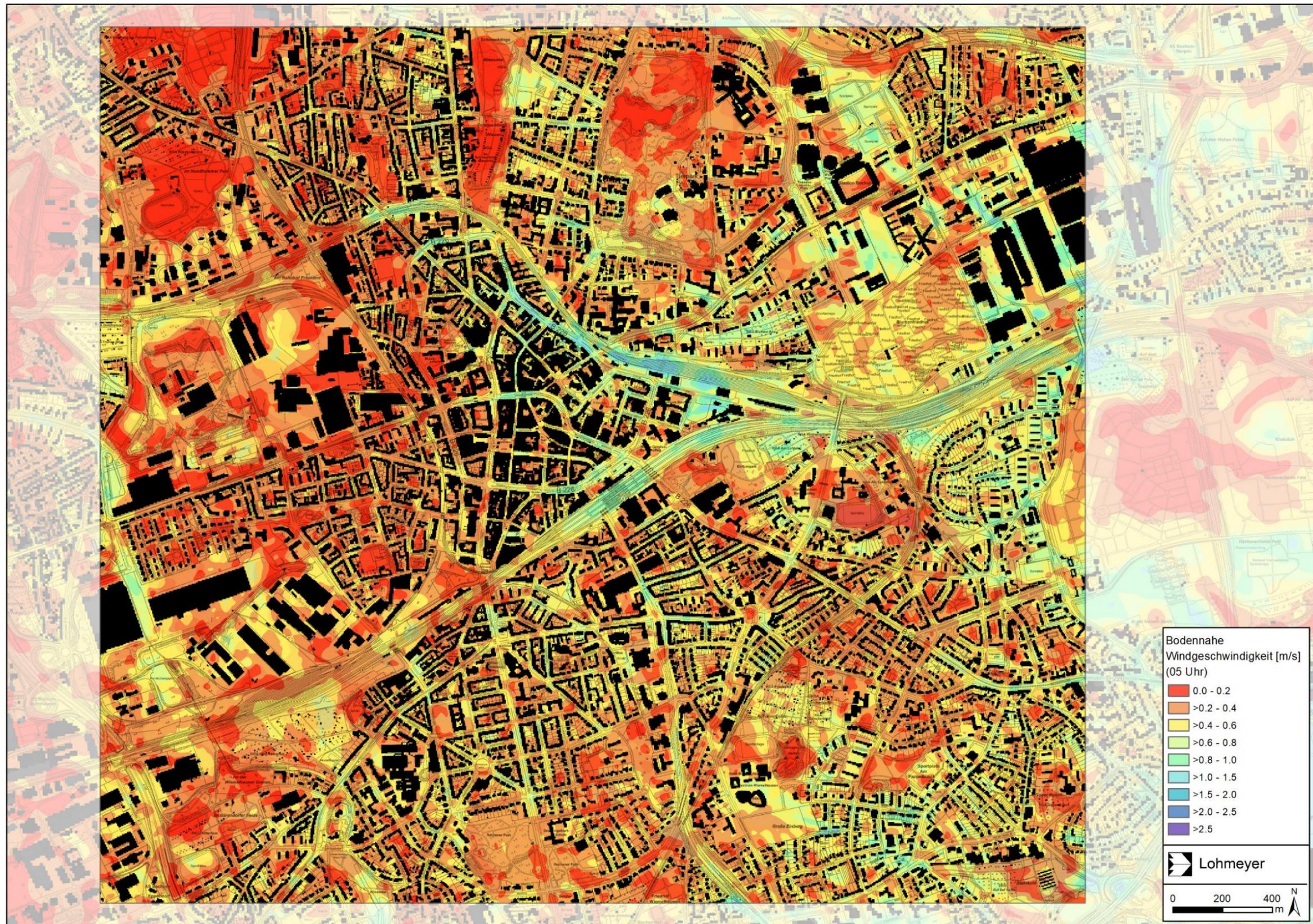


Abb. A13: Bodennahe Windgeschwindigkeit (2m über Grund) um 05 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

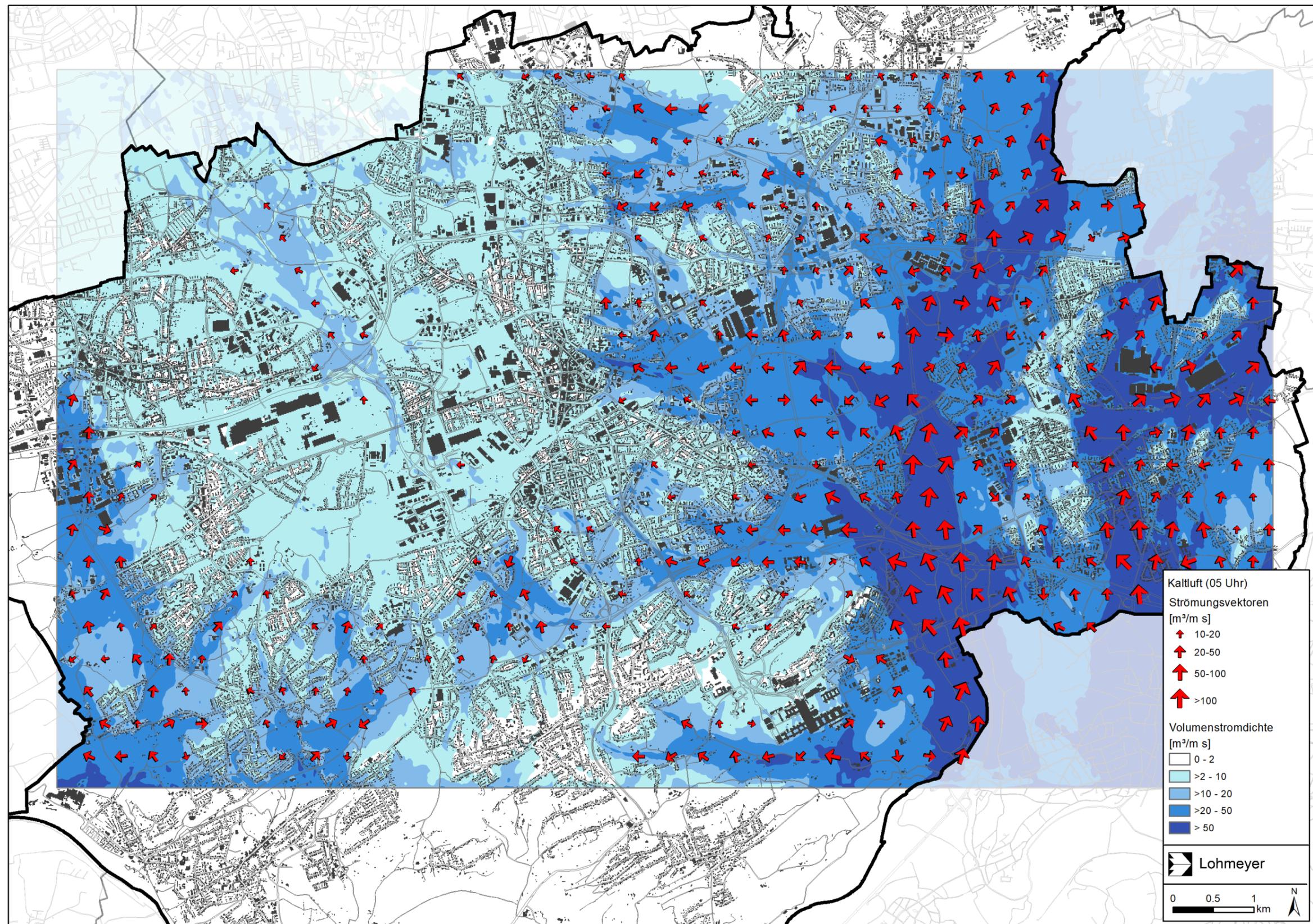


Abb. A14: Kaltluftvolumenstromdichte um 05 Uhr für die stadtweite Untersuchung

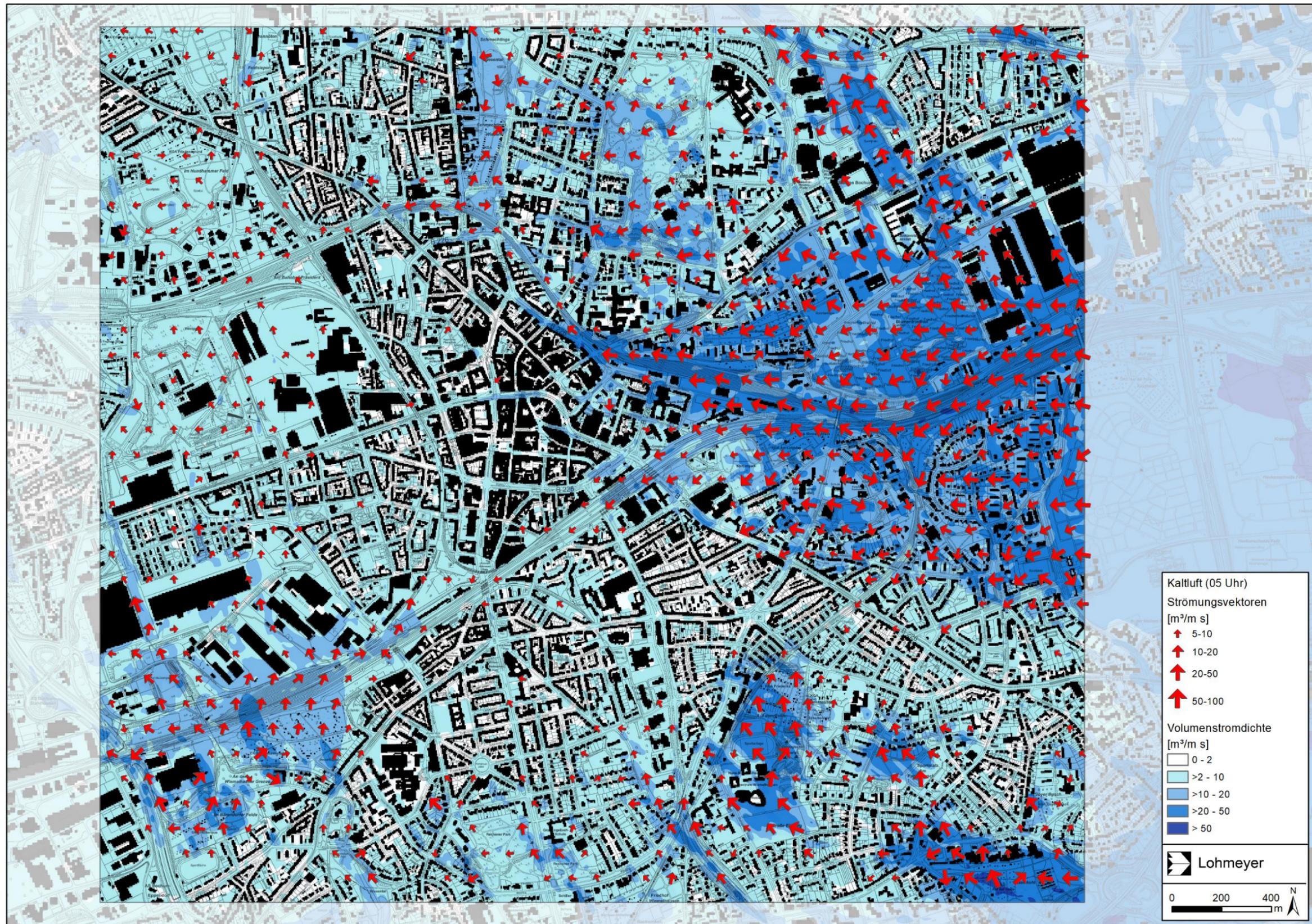


Abb. A15: Kaltluftvolumenstromdichte um 05 Uhr für die innerstädtische Untersuchung

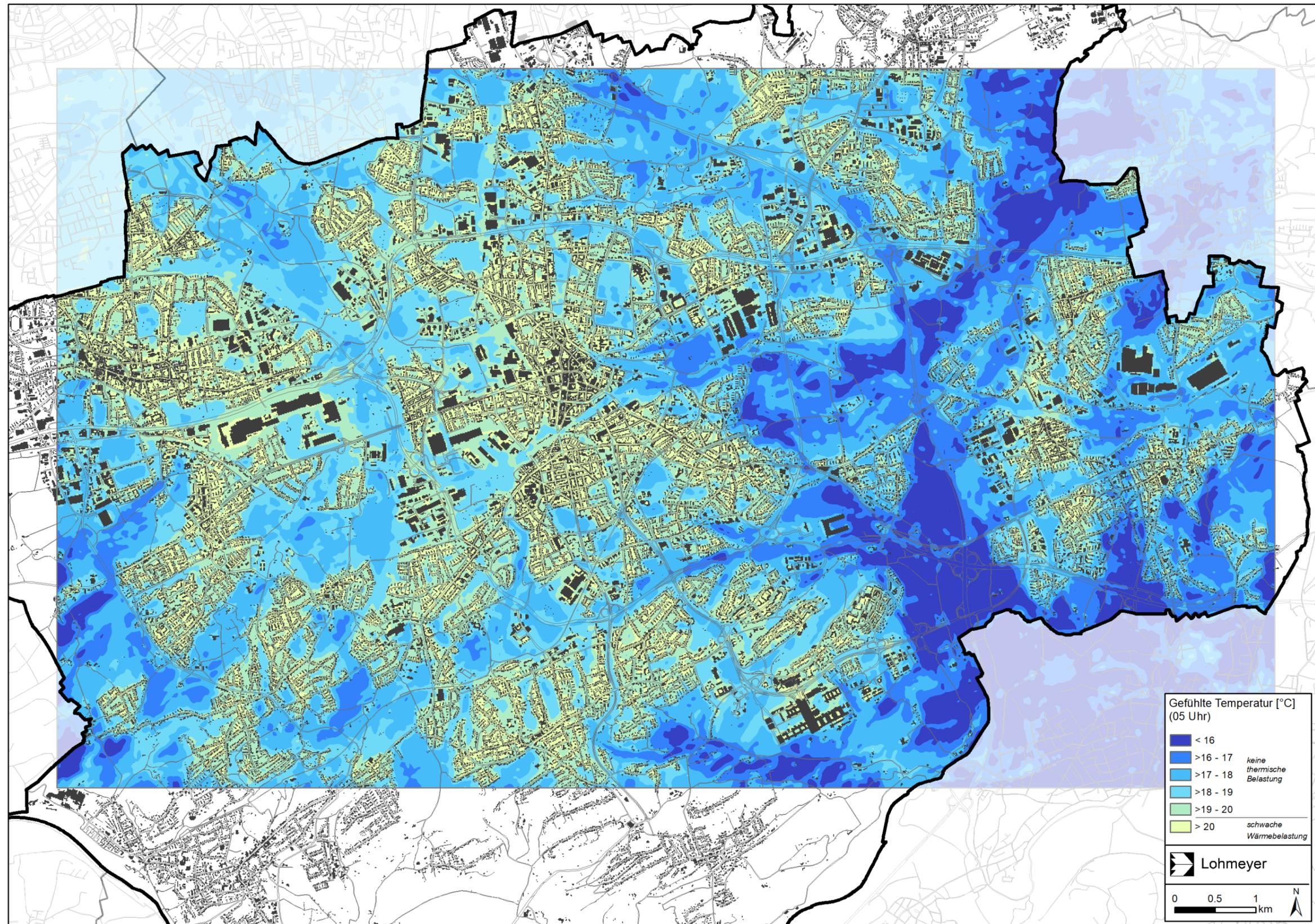


Abb. A16: Gefühlte Temperatur um 05 Uhr für die stadtweite Untersuchung

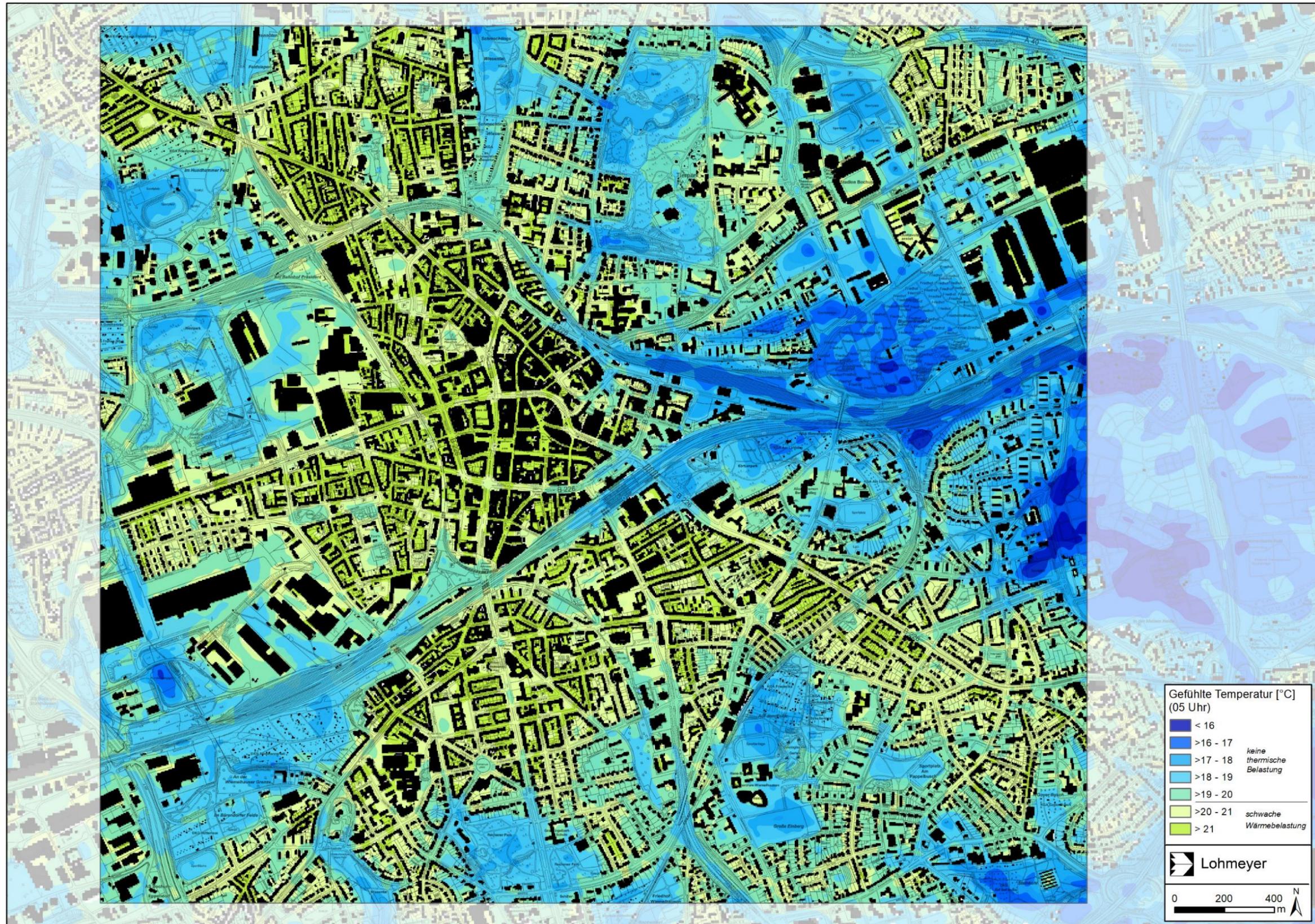


Abb. A17: Gefühlte Temperatur um 05 Uhr für die innerstädtische Untersuchung



Digitale Klimaanpassung - Klimasimulationen für ein Untersuchungsgebiet im Bochumer Stadtteil Gleisdreieck

Schlussbericht

28.02.2021

Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstr. 5a
30161 Hannover

M.Sc. Met. Katja Lohmüller
Dr. Dirk Pavlik
Dipl. Geogr. Cornelia Burmeister

Im Auftrag des:

Regionalverband Ruhr
Kronprinzenstraße 35
45128 Essen



Inhalt

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 4 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 6 |
| 1. Einführung | 7 |
| 1.1 MOTIVATION | 7 |
| 1.2 AUFGABEN- UND ZIELSTELLUNG | 7 |
| 2. Fachliche Grundlagen | 8 |
| 2.1 GEOGRAPHISCHE EINORDNUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES | 8 |
| 2.2 KLIMATISCHE RAHMENBEDINGUNGEN | 8 |
| 3. Methodik | 9 |
| 3.1 DAS MODELL PALM-4U | 9 |
| 4. Modelleingangsdaten | 11 |
| 4.1 AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN | 11 |
| 4.2 ENTWICKLUNG VON IST- UND PLANSZENARIEN KLIMAAANPASSUNGSMABNAHMEN URBAN-HEAT („GRÜNE INFRASTRUKTUR“)..... | 11 |
| 4.2.1 VIKTORIA-KARREE | 12 |
| 4.2.2 BEREICH UM DEN HAUPTBAHNHOF (CITY TOWER)..... | 13 |
| 4.3 MODELL SETUP | 16 |
| 4.3.1 INTIALISIERUNGSBEDINGUNGEN..... | 16 |
| 4.3.2 MODELLPARAMETER..... | 17 |
| 5. Modellergebnisse | 18 |
| 5.1 VIKTORIA-KARREE..... | 19 |
| 5.1.1 NACHTSITUATION (04:00)..... | 19 |
| BODENNAHE LUFTTEMPERATUR (2 M Ü. GR.)..... | 19 |
| OBERFLÄCHENTEMPERATUR | 21 |



| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| WINDGESCHWINDIGKEIT (2 M Ü. GR.) | 23 |
| 5.1.2 TAGSITUATION | 25 |
| BODENNAHE LUFTTEMPERATUR (2 M Ü.GR.) | 25 |
| OBERFLÄCHENTEMPERATUR | 25 |
| GEFÜHLTE TEMPERATUR (PT) | 26 |
| 5.2 CITY TOWER/BAHNHOFSVORPLATZ | 30 |
| 5.2.1 NACHTSITUATION (04:00 UHR)..... | 30 |
| BODENNAHE LUFTTEMPERATUR (2 M Ü. GR.)..... | 30 |
| OBERFLÄCHENTEMPERATUR | 30 |
| WINDGESCHWINDIGKEIT (IN 2 M Ü.GR.)..... | 31 |
| 5.2.2 TAGSITUATION (16:00 UHR) | 35 |
| BODENNAHE LUFTTEMPERATUR | 35 |
| OBERFLÄCHENTEMPERATUR | 35 |
| GEFÜHLTE TEMPERATUR (PT) | 35 |
| 6. Bewertung der Plan-Varianten (Ableitung von Bewertungen und Empfehlungen)..... | 40 |
| 7. Zusammenfassung | 40 |
| Quellenverzeichnis | 42 |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Klimadiagramm der DWD-Station Bochum (DWD 2021). | 9 |
| Abb. 2: Neues Gebäude des Viktoria-Karrees (RKW Architektur, 2020). | 13 |
| Abb. 3: Haus des Wissens (Cross Architecture, 2019). | 13 |
| Abb. 4: Neuplanung des Husemannplatzes (Sinai Gesellschaft von Landschaftsarchitekten mbH, 2020); die durchgezogenen Grünen Linien an den Gebäudefassaden stellen die Platzierung der Fassadenbegrünung in P1, P2 und P4 dar. | 13 |
| Abb. 5: Luftbild des Husemannplatzes mit markierten Einzelhäusern, deren Fassaden in P3 zu 100 % Fassadenbegrünt wurden. | 13 |
| Abb. 6: City Tower am Hauptbahnhof (Gerber Architekten, 2020). | 15 |
| Abb. 7: Neuplanung des Gebäudes am Südring (Rübsamen Partner Architekten BDA Ingenieure, 2018). | 15 |
| Abb. 8: Nachverdichtung an der Kreuzstraße (Kemper, Steiner & Partner, 2019). | 15 |
| Abb. 9: Alter Busbahnhof Bochum vor dem Umbau im Jahr 2017 (Luftbildatlas der Stadt Bochum). | 15 |
| Abb. 10: MFO-Park in Zürich (Fachplanung Hitzeminderung der Stadt Zürich, 2020) | 16 |
| Abb. 12: Messprofile des Radiosondenaufstieges vom 26.07.2018 um 00:00 Uhr an der Station Essen-Bredeneu (DWD 2020). | 17 |
| Abb. 13: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr nachts. | 20 |
| Abb. 14: Darstellung der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 04:00 Uhr nachts. | 22 |
| Abb. 15: Darstellung der bodennahen Windgeschwindigkeit der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts. | 24 |
| Abb. 16: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr. | 27 |
| Abb. 17: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 16:00 Uhr. | 28 |
| Abb. 18: Darstellung der gefühlten Temperatur (PT) der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr. | 29 |
| Abb. 19: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts. | 32 |
| Abb. 20: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 04:00 Uhr nachts. | 33 |
| Abb. 21: Darstellung der bodennahen Windgeschwindigkeit der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts. | 34 |
| Abb. 22: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr. | 37 |
| Abb. 23: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 16:00 Uhr. | 38 |



Abb. 24: Darstellung der gefühlten Temperatur (PT) der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr.39



Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Temperaturprofil des Bodens.....16



1. Einführung

1.1 Motivation

Das Stadtklima ist ein wichtiger Faktor für die Lebensqualität im urbanen Raum. In Deutschland leben ca. 77 % der Menschen in der Stadt oder in Ballungsgebieten, somit ist die Frage nach dem Erhalt oder der Erhöhung der Lebensqualität in Städten für mehr als $\frac{3}{4}$ der deutschen Bevölkerung ein relevantes Thema.

Die zunehmende Erwärmung aufgrund des Klimawandels verstärkt in Städten die teilweise heute schon auftretenden Probleme mit hoher thermischer Belastung, besonders in stark versiegelten Innenstadtbereichen. Eingriffe in die Stadtstruktur, vor allem bauliche Veränderungen, Ver- oder Entsiegelungen großer Flächenanteile, Errichtung von Parkanlagen oder etwa die Bebauung ehemaliger landwirtschaftlicher Flächen zeigen immer auch einen nachhaltigen Einfluss auf das lokale Stadtklima.

Die Quantifizierung und Bewertung dieser Einflüsse auf das Stadtklima erfolgt neben Langzeitmessungen und kurzzeitigen Messkampagnen seit einigen Jahren zunehmend mit immer komplexer werdenden numerischen Stadtklimamodellen. Die Herausforderung dabei ist der Know-How-Transfer aus der Wissenschaft in die kommunale Anwendung. Vor diesem Hintergrund wurde bspw. 2016 das vom BMBF geförderte Verbundprojekt „[UC]²- Stadtklima im Wandel“ ([www. http://uc2-program.org/](http://uc2-program.org/)) initiiert, welches die Entwicklung, Validierung und vor allem Verfügbarmachung des Stadtklimamodells PALM-4U für kommunale Anwender und private Klimadienstleister zur Aufgabe hat.

PALM-4U wurde in den letzten Jahren intensiv entwickelt und mit einer Vielzahl von Funktionen zur Simulation des Stadtklimas ausgestattet. Obwohl die wissenschaftliche Validierung des Modells noch nicht endgültig abgeschlossen ist, kommt es bereits zunehmend für die Beantwortung kommunaler Fragestellungen zum Stadtklima zur Anwendung. Die umfangreichen Möglichkeiten des Modells wie beispielsweise die Berücksichtigung hochaufgelöster dreidimensionaler Gebäude- und Vegetationsstrukturen, die Berechnung bioklimatischer Indizes oder die Simulation von begrünten Dächern und Fassaden waren Anlass für die Durchführung des hier beschriebenen Projektes.

1.2 Aufgaben- und Zielstellung

Ziel des Projektes war die Durchführung und Auswertung von Klimasimulationen für zwei Stadtgebiete in Bochum (Viktoria-Karree und City Tower) mit dem Modell PALM-4U. Dabei stand die Entwicklung eines geeigneten Modell-Setups im Mittelpunkt der Auswertungen. Besonders die Frage nach der erforderlichen Ausdehnung des Modellgebietes sollte betrachtet werden, da diese einen großen Einfluss auf die benötigten Ressourcen hinsichtlich IT-Ausstattung, Rechenzeit und Datenverarbeitung hat.

In beiden Stadtgebieten wurden Gebäude abgerissen und an deren Stelle neue Gebäude gebaut oder sind noch im Bau befindlich. Der Einfluss der Neubebauung auf die thermischen Bedingungen der näheren Umgebung in den Untersuchungsgebieten sollte mit PALM-4U modelliert und bewertet werden. Zusätzlich zum Vergleich des ehemaligen Ist-Zustandes (altes Gebäude) mit dem Planfall 0 (neues Gebäude), wurden jeweils weitere 5 Planvarianten für jedes Untersuchungsgebiet simuliert und ausgewertet. Die Planvarianten beinhalteten verschiedene Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünung mit variierenden



Anteilen, Bepflanzungen im Straßenraum sowie die Neugestaltung des zentralen Busbahnhofs oder die Installation eines Verdampfers auf dem Husemannplatz.

Das Projekt hat den Charakter eines Pilotprojektes, um bewerten zu können inwieweit PALM-4U bereits jetzt schon in der kommunalen Planung eingesetzt werden kann. Dies wird neben der Frage nach der Modellgebietsgröße bspw. durch die erstmalige Anwendung und Bewertung der Funktionen für Dach- und Fassadenbegrünung unterstrichen.

2. Fachliche Grundlagen

2.1 Geographische Einordnung des Untersuchungsgebietes

Das Stadtgebiet von Bochum befindet sich naturräumlich zu einem großen Teil innerhalb der Westfälischen Bucht und hat im Süden Anteil an der naturräumlichen Großeinheit des Westlichen Mittelgebirges mit dem Bergischen Land. Die Westfälische Bucht, eine nach Westen und Nordwesten geöffnete und nach Süden, Osten und Nordosten von Mittelgebirgen begrenzte geologische Mulde (Münsterländer Kreidebecken) weist ein flachwelliges Relief und Höhen zwischen 40 und 100 m ü. NN auf (Hetzel 2013). Für Bochum wird eine Höhenlage von 100 m ü. NN angegeben.

Bochum hat aktuell eine Einwohnerzahl von 370.899 Einwohnern (Stand 2020) bei einer Bevölkerungsdichte von 2.546 Einwohnern pro Quadratkilometer (BOStatIS 2021). Die Gesamtfläche des Bochumer Stadtgebietes umfasst 145,66 km² und ist in insgesamt sechs Stadtbezirke untergliedert.

2.2 Klimatische Rahmenbedingungen

Bochum befindet sich in der außertropischen Westwindzone, deren Wetterablauf von Zyklonen und Antizyklonen geprägt ist (Flohn 1954). Dieser Übergangsbereich zwischen Seeklima und kühlem Kontinentalklima zählt nach Köppen (1936) zum warm-gemäßigten Regenklima, bei dem die mittlere Temperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über -3 °C bleibt. Damit liegt Bochum innerhalb des Übergangsklimas in einem überwiegend maritim geprägten Bereich mit allgemein kühlen Sommern und milden Wintern. Gelegentlich setzt sich kontinentaler Einfluss mit längeren Phasen hohen Luftdrucks durch. Dann kann es in den Sommermonaten zu hohen Temperaturen und trockenem sommerlichen Wetter kommen. Im Winter sind kontinental geprägte Wetterlagen häufig mit Kälteperioden verbunden.

Die langjährige Mitteltemperatur für Bochum beträgt, gemessen an der DWD-Klimastation Bochum, für den 30-jährigen Zeitraum von 1988 bis 2018 10,7 °C bei einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 808 mm. Der wärmste Monat ist der Juli mit einer langjährigen monatlichen Mitteltemperatur von 18,8 °C und der kälteste Monat der Februar mit 3,4 °C. Typisch für die Lage Bochums ist ein Niederschlagsmaximum im Sommer, wobei der Juli mit einer langjährigen monatlichen Niederschlagssumme von 91 mm die höchste Niederschlagsmenge im Jahr aufzeigt. Den geringsten Niederschlag im Jahr weist der April mit einem Niederschlagsaufkommen von nur 39 mm auf (vgl. Abb. 1).

Die DWD-Station Bochum befindet sich ca. 4 km östlich der Innenstadt in einem eher ländlich geprägten Gebiet und ist somit nur bedingt geeignet das Stadtklima der innerstädtischen Siedlungsbereiche Bochums



zu repräsentieren. Durch den Baukörper der Stadt sowie die stadttypischen Oberflächenstrukturen wird das lokale Klima nachhaltig beeinflusst, was eine eigene Ausprägung des Stadtklimas gegenüber den klimatischen Bedingungen des Umlandes bewirkt. Flächenversiegelung, Verminderung der Vegetationsflächen sowie der erhöhte Urbanisierungsgrad tragen zu einer Modifizierung der klimatologischen Verhältnisse bei. Der erhöhte Versiegelungsgrad führt zu einer städtischen Überwärmung, da versiegelte Flächen, z.B. Asphalt, überproportional viel Wärme speichern und in der Nacht zusätzliche Wärme abgeben (Grudzielanek et al. 2011). Weiterhin werden Niederschläge schneller abgeführt, was eine geringere Verdunstung zur Folge hat und wodurch ein Abkühlungseffekt durch die Verdunstung ausbleibt. Grudzielanek et al. (2011) haben durch den Vergleich langjähriger Messdaten einer Umland-Klimastation und einer Stadtklimastation für die Innenstadt Bochums eine Erhöhung der langjährigen Mitteltemperatur um 0,4 K gegenüber dem Umland festgestellt.

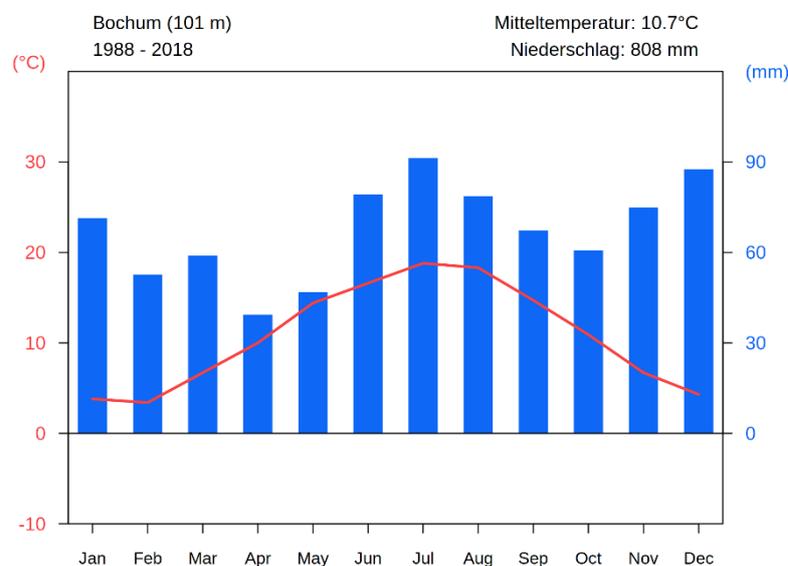


Abb. 1: Klimadiagramm der DWD-Station Bochum (DWD 2021).

3. Methodik

3.1 Das Modell PALM-4U

PALM-4U ist ein Modellsystem für die Simulation von meteorologischen Prozessen in der städtischen, atmosphärischen Grenzschicht. Es wurde für die Bedürfnisse der modernen akademischen Stadtklimaforschung sowie für die praktische Anwendung durch Stadtplaner und Klimadienstleister entwickelt. PALM-4U kann für verschiedene stadtklimatische Anwendungen von der Meso- bis zur Mikroskala eingesetzt werden. Im engeren Sinne ist PALM-4U kein eigenständiges Modell sondern besteht aus einer Vielzahl von Komponenten, die für das Modell PALM entwickelt wurden. PALM ist ein meteorologisches Modell für die Simulation von atmosphärischen und ozeanischen Strömungen in der Grenzschicht. Es wurde als turbulenzauflösendes LES-Modell (Large Eddy Simulation) entwickelt, das speziell für die Ausführung auf parallelen Computerarchitekturen designt wurde (Maronga et al. 2015, Maronga et al. 2020).



PALM-4U erlaubt die räumlich hochaufgelöste Simulation des städtischen Mikroklimas und bietet verschiedene Komponenten zur Berechnung physikalischer Prozesse in urbaner Umgebung. Die wichtigsten sind z.B.:

- ein Land- Oberflächenmodell zur Berechnung des Austauschs von Wärme, Energie und Feuchte zwischen Oberfläche und Atmosphäre über bewachsenen, versiegelten oder Wasseroberflächen,
- ein Gebäudemodell zur detaillierten Berücksichtigung von Gebäudeoberflächen, Fenstern sowie begrünten Fassaden und Dächern,
- ein Pflanzenmodell zur Berücksichtigung von Impuls, Verdunstung und Erwärmung der Vegetation,
- ein Strahlungstransfermodell zu Berechnung komplexer dreidimensionaler Strahlungsinteraktionen zwischen Oberflächen und Pflanzen,
- ein Innenraummodell für Gebäude,
- sowie ein biometeorologisches Modell zur Berechnung des thermischen Komforts und der Exposition von Personen gegenüber UV-Strahlung.

PALM-4U ist in der Lage detaillierte Informationen der realen Umgebung zu verarbeiten. So werden Gebäude explizit räumlich aufgelöst und es ist möglich Informationen über höhere Vegetation (Bäume, Gehölze, Sträucher) dreidimensional zu berücksichtigen. Das Modell kann im LES- oder im RANS-Modus (Reynolds Averaged Navier Stokes) betrieben werden und ist in der Lage online genestete oder mesoskalig angetriebene Simulationen durchzuführen.

Wichtig ist, dass PALM-4U aktuell (Stand: 02/2021) mit einer hohen Dynamik weiterentwickelt wird und einige Komponenten noch nicht oder noch nicht vollständig implementiert sind. Dies betrifft bspw. die Ausgabe von Komponenten des Kaltlufthaushaltes, die zur Bewertung der thermischen Belastung von urbanen Räumen eine wichtige Größe darstellen. Weiterhin wird PALM-4U zurzeit (ebenfalls Stand 02/2021) im BMBF-geförderten Verbundprojekt „[UC]² - Stadtklima im Wandel“ anhand von umfangreichen und komplexen Messkampagnen validiert. Bis zum vollständigen (und vor allem erfolgreichen) Abschluss dieser Validierung müssen alle mit PALM-4U erzeugten Ergebnisse als vorläufig und nicht vollständig gesichert angesehen werden.



4. Modelleingangsdaten

Ein numerisches Modell wie PALM-4U benötigt für eine mikroskalige Rechnung (horizontale Gitterauflösung beträgt 2 m) spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die jeweils von der Stadt Bochum zur Verfügung gestellt oder aus dem kostenfrei zugänglichen Geoportal NRW¹ bezogen wurden:

- Geländehöhe
 - Abgeleitet aus einem DGM 1 m (Digitales Geländemodell)
- Landnutzung
 - aktuelle Flächennutzungskartierung der Stadt Bochum
- Gebäudeinformation
 - ALKIS- Gebäudeumrisse des Landes zur Unterscheidung der Nutzungsart
 - Gebäudealter aus Zuordnung der Stadt Bochum
- Vegetation
 - RGBI DOP zur Ableitung des Grünvolumens
- Strukturhöhe
 - Gebäudehöhe (LOD1, Stadt Bochum)
 - Laserscanbefliegung (DOM) für weitere Strukturen (vorrangig Vegetation)
- Bodenart
 - Bodenkarte im Maßstab 1:50.000

4.1 Aufbereitung der Eingangsdaten

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Informationen zu den jeweiligen von PALM-4U geforderten Daten ein punkthaft gerastertes Modellgitter mit einer Gitterweite von 2 m zu erzeugen. Aufgrund der mikroskaligen Auflösung der Modellrechnung sind Bäume direkt als Einzelbäume mit individuellen Eigenschaften (bspw. Kronendurchmesser, Kronenlänge, Brusthöhendurchmesser, LAI etc.) berücksichtigt.

4.2 Entwicklung von Ist- und Planszenarien Klimaanpassungsmaßnahmen Urban-Heat („Grüne Infrastruktur“)

Um das Ausmaß der Wirkung von Maßnahmen zur Klimaoptimierung wie Fassaden- oder Dachbegrünung mit dem Modell PALM-4U untersuchen zu können, wurden von der Stadt Bochum in Rücksprache mit GEO-NET bzgl. der Umsetzbarkeit der Maßnahmen im Modell für das jeweilige Plangebiet des Viktoria-Karrees und des City Towers vier Szenarien mit unterschiedlichem Ausmaß und Ort der Maßnahmen festgelegt. Zusätzlich zu den vier Szenarien wurde für den Vergleich und der Festlegung des Ausmaßes der

¹ <https://www.opengeodata.nrw.de>



Maßnahmenwirkung das jeweilige Untersuchungsgebiet als Ist-Zustand und zum sog. Plan-Null-Fall (P0) modelliert. Die Szenarien der somit sechs durchgeführten Modellierungen werden im Folgenden explizit dargelegt.

4.2.1 Viktoria-Karree

- Ist-Zustand: in der Gebäudekulisse wurde das derzeitig bereits abgerissene Gerichtsgebäude im Viktoria-Karree aufgenommen und alle anderen Nutzungen entsprechend des aktuellen Standes vor Ort dargestellt.
- Plan-Fall-Null (P0): Im Viktoria-Karree wurde das zukünftige Gebäude (vgl. Abb. 2) in den Modelleingangsdaten mit Dachbegrünung auf den jeweiligen Stockwerksflächen aufgenommen. Zusätzlich beinhaltet der P0-Fall die bereits beschlossenen baulichen Entwicklungen im Untersuchungsgebiet. Einerseits ist dies der Bau des „Haus des Wissens“ mit Dachgrün/Dachgarten (vgl. Abb. 3) auf dem derzeitigen Parkplatzinnenhof des Gebäudeblocks, welcher das Schlegel-Haus beinhaltet, und andererseits die Entwicklung des Husemannplatzes nach dem Sieger des Wettbewerbsverfahrens (vgl. Abb. 4). Dabei wird die auf dem Husemannplatz geplante kreisförmige Anordnung von Nebeldüsen aus Ermangelung eines Äquivalents in PALM-4U als ein Springbrunnen in den Eingangsdaten berücksichtigt.
- Plan-Fall 1 (P1): Die Gebäudekulisse und Maßnahmen aus dem P0-Szenario wurden übernommen und zusätzlich wurde die jeweilige dem Husemannplatz zugewandte Fassade der Gebäude zu 20 % mit Fassadengrün versehen (vgl. Abb. 4).
- Plan-Fall 2 (P2): Wie P1, nur mit 50 % Fassadenbegrünung an der jeweiligen Fassade.
- Plan-Fall 3 (P3): Die Gebäudekulisse und Maßnahmen aus dem P0-Szenario wurden übernommen und zusätzlich wurde an Einzelhäusern angrenzend zum Husemannplatz und in der Kortumstraße (vgl. Abb. 5) die Fassade mit 100 % Fassadenbegrünung versehen.
- Plan-Fall 4 (P4): Wie P1, nur mit 100 % Fassadenbegrünung an der jeweiligen Fassade.



Abb. 2: Neues Gebäude des Viktoria-Karrees (RKW Architektur, 2020).



Abb. 3: Haus des Wissens (Cross Architecture, 2019).



Abb. 4: Neuplanung des Husemannplatzes (Sinai Gesellschaft von Landschaftsarchitekten mbH, 2020); die durchgezogenen Grünen Linien an den Gebäudefassaden stellen die Platzierung der Fassadenbegrünung in P1, P2 und P4 dar.



Abb. 5: Luftbild des Husemannplatzes mit markierten Einzelhäusern, deren Fassaden in P3 zu 100 % Fassadenbegrünt wurden.

4.2.2 Bereich um den Hauptbahnhof (City Tower)

- Status Quo: in der Gebäudekulisse wurde das derzeit bereits abgerissene Parkhaus im Osten des Hauptbahnhofs aufgenommen und alle anderen Nutzungen entsprechend des aktuellen Standes vor Ort dargestellt.



- P0: Der geplante City Tower mit direkt anschließendem Hochhaus (vgl. Abb. 6) wurde in den Modelleingangsdaten mit Dachbegrünung auf dem Parkhaus übernommen. Zusätzlich beinhaltet der P0-Fall die bereits beschlossenen baulichen Entwicklungen im Untersuchungsgebiet. Dies betrifft das Gebäude zwischen der Südstraße und dem Hellweg (vgl. Abb. 7) und eine Nachverdichtung im Innenhof des Gebäudeblocks zwischen der Kreuzstraße, der Neustraße und der Brüderstraße (vgl. Abb. 8). Bis auf die bereits beschlossene Dachbegrünung des Parkhauses am City Tower wurden keine klimaoptimierenden Maßnahmen an den Gebäuden im Untersuchungsgebiet übernommen.
- P1: Als Grundlage diente das Szenario P0. Zusätzlich wurde der City Tower in den Stockwerken 1 bis 3 mit 100 % Fassadenbegrünung versehen, das Gebäude am Südring bekam eine Dachbegrünung und für die Nachverdichtung im Blockinnenhof an der Neustraße wurde eine 100 % Dach- und Fassadenbegrünung berücksichtigt. Des Weiteren wurden auf dem Platz gegenüber des Hauptbahnhofs, auf dem die ehemalige Europagalerie stand, Einzelbaumpflanzungen realisiert.
- P2: Als Grundlage diente das Szenario P0. Die Fassaden der Gebäude gegenüber des Hauptbahnhofs wurden zusätzlich mit 20 % Fassadenbegrünung versehen und der Busbahnhof in den Begrünungsstand vor dem Umbau versetzt (vgl. Abb. 9).
- P3: Als Grundlage diente das Szenario P0. Zusätzlich wurde der City Tower in den Stockwerken 1 bis 3 mit 100 % Fassadenbegrünung versehen, das Gebäude am Südring bekommt eine Dachbegrünung und für die Nachverdichtung im Blockinnenhof an der Neustraße wurde eine 100 % Dach- und Fassadenbegrünung berücksichtigt. Zudem wurden die Fassaden beider Gebäudereihen gegenüber des Hauptbahnhofs mit 20 % Fassadenbegrünung versehen und der Platz, auf dem die ehemalige Europagalerie stand, wurde mit einer Konstruktion analog zum MFO-Park in Zürich (vgl. Abb. 10) versehen.
- P4: Als Grundlage diente das Szenario P3, jedoch wurde das Gebäude am Südring zusätzlich zur Dachbegrünung mit 100 % Fassadenbegrünung in den Modelleingangsdaten realisiert. Zudem sind die Gebäudereihen gegenüber zu 100 % mit Fassadenbegrünung versehen und im Bereich des Busbahnhofs wurde der ehemalige Begrünungsstand umgesetzt.



Abb. 6: City Tower am Hauptbahnhof (Gerber Architekten, 2020).
 Abb. 7: Neuplanung des Gebäudes am Südring (Rübsamen Partner Architekten BDA Ingenieure, 2018).

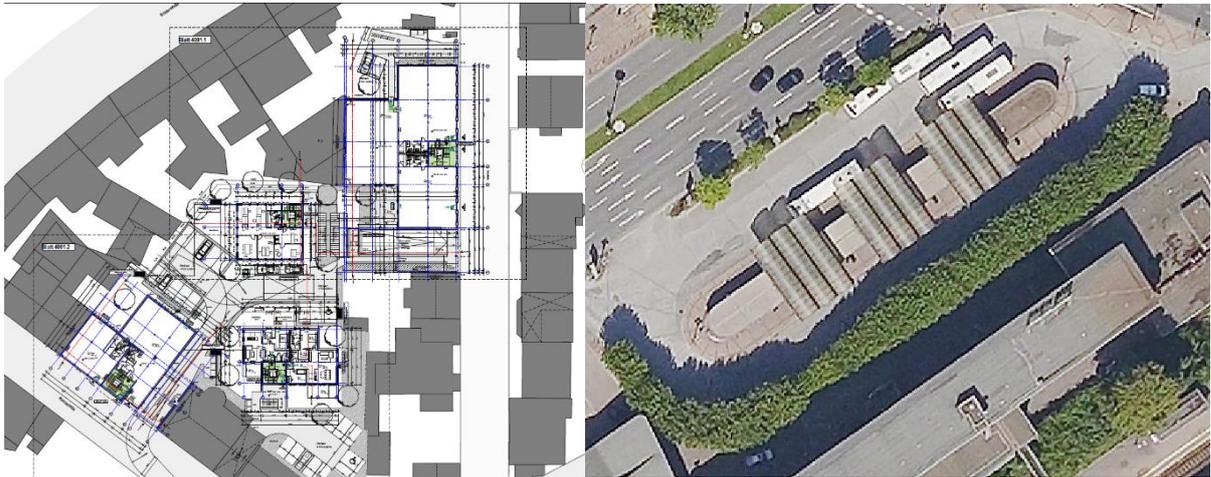


Abb. 8: Nachverdichtung an der Kreuzstraße (Kemper Steiner & Partner, 2019).
 Abb. 9: Alter Busbahnhof Bochum vor dem Umbau im Jahr 2017 (Luftbildatlas der Stadt Bochum).

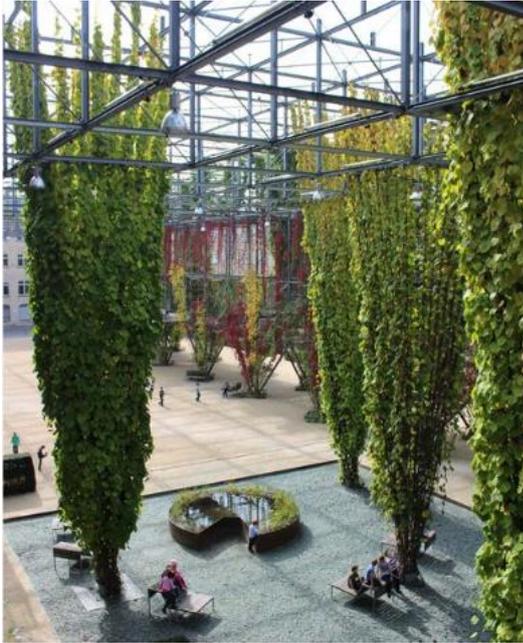


Abb. 10: MFO-Park in Zürich (Fachplanung Hitzeminderung der Stadt Zürich, 2020)

4.3 Modell Setup

4.3.1 Initialisierungsbedingungen

Für die Simulationen der Bochumer Teilgebiete Viktoria-Karree und City Tower wurden in Abstimmung mit den Auftraggebern und den Projektpartnern einheitliche meteorologische Randbedingungen festgelegt. Ziel der Klimasimulationen war die Betrachtung der thermischen Belastung, sowie die Auswirkung verschiedener stadtplanerischer Gestaltungsmaßnahmen auf die thermische Situation im typischen äußeren Aufenthaltsbereich der Bevölkerung (siehe Kapitel 4.2). Dafür wurden folgende meteorologische Gegebenheiten eines sehr warmen bis heißen Tages als Initialisierungsbedingungen festgelegt:

- Temperatur an der Oberfläche: 25 °C um 00:00 Uhr MESZ
- Relative Feuchte: 50 %
- Wind: ca. 1 m/s aus östlicher Richtung
- Bodenwassergehalt: 0,3 m³/m³ (über gesamtes Bodenprofil)
- tiefe Inversion während der Nachtstunden
- Bodentemperaturen siehe Tab. 1.

Tab. 1: Temperaturprofil des Bodens.

| Tiefe [m] | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.14 | 0.26 | 0.54 | 1.86 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T [K] | 300.05 | 300.05 | 301.15 | 301.45 | 301.45 | 297.35 | 293.15 | 291.15 |



PALM-4U benötigt weiterhin vertikale Profile der potenziellen Temperatur und der spezifischen Feuchte. Diese wurden aus Radiosondendaten der DWD-Station Essen-Bredeneu abgeleitet, die sich ca. 20 km südöstlich der Untersuchungsgebiete Viktoria-Karree und City Tower befindet. Es wurden die Daten des Radiosondenaufstieges vom 26.07.2018 um 00:00 Uhr verwendet (Abb. 11).

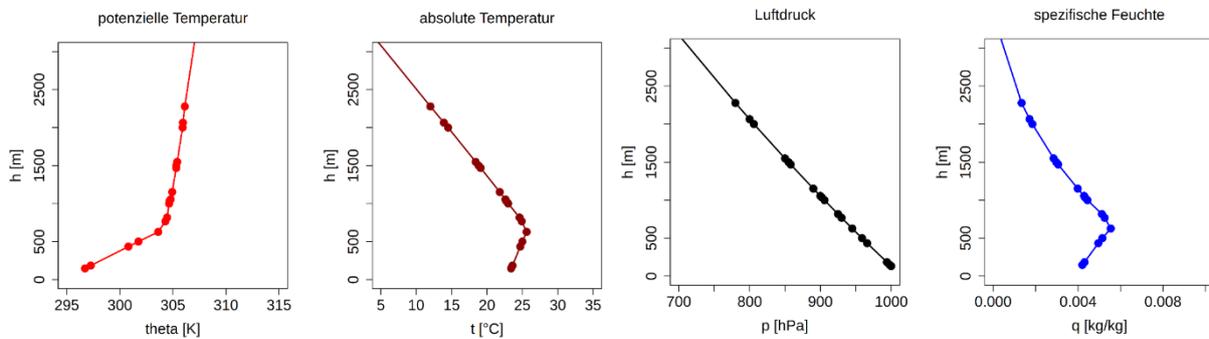


Abb. 11: Messprofile des Radiosondenaufstieges vom 26.07.2018 um 00:00 Uhr an der Station Essen-Bredeneu (DWD 2020).

4.3.2 Modellparameter

Die Gitterweite für beide Untersuchungsgebiete betrug in x- und y-Richtung 2 m. Für die vertikale Ausdehnung (z-Richtung) wurde ein gestrecktes Gitter (stretching) verwendet, um Rechenzeit zu sparen. Beim Untersuchungsgebiet Viktoria-Karree wurde bis in 62 m Höhe eine Gitterweite von 2 m verwendet, zwischen 62 m und 120 m Höhe eine Gitterweite von 5 m und ab 120 m Höhe bis zum Modelloberrand von 2200 m eine Gitterweite von 10 m. Beim Gebiet City Tower konnte das Stretching aufgrund der Gebäudehöhen erst ab 72 m Höhe beginnen, wurde dann jedoch in den gleichen Intervallen wie beim Viktoria-Karree fortgesetzt.

In der horizontalen Ausdehnung wurden für das Gebiet Viktoria-Karree 137 x 91 ($x = 274$ m, $y = 182$ m) Gitterpunkte und für das Gebiet City Tower 275 x 183 ($x = 500$ m, $y = 366$ m) Gitterpunkte festgelegt. Sollte sich herausstellen, dass die gewählten räumlichen Dimensionen beider Untersuchungsgebiete für den Betrieb des Modells im LES-Modus eventuell in ihrer Größe unzureichend sind, um alle erforderlichen meteorologischen Prozesse räumlich abbilden zu können wird in Abstimmung mit den Auftraggebern im Nachhinein eine Simulation mit einer erweiterten und ausreichenden Domaingröße durchgeführt und die Auswirkungen über eine vergleichende Analyse bewertet.

Alle Stadtklimasimulationen, sowohl für das Viktoria-Karree sowie für das Gebiet City Tower wurden im LES-Modus mit zyklischen Randbedingungen durchgeführt. Das bedeutet, dass zu jedem Modellzeitschritt die turbulenten Größen an einer Seite des Untersuchungsgebiets die Domain verlassen und an der anderen Seite wieder eingetragen werden. Dies stellt eine kontinuierliche turbulente Anströmung sicher, die zur Ausführung des LES-Modus erforderlich ist.



Für die Berücksichtigung aller benötigten und mit dem Modell abbildbaren meteorologischen Prozesse im urbanen Raum wurden folgende Modellmodule von PALM-4U verwendet (siehe <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app>):

- land surface
- urban surface
- radiation
- plant canopy
- biometeorology

Jede Modellrechnung hat einen Zeitraum von 36 Stunden simuliert, wobei alle 15 Minuten Daten rausgeschrieben wurden und zusätzlich jeder Stundenmittelwert abgespeichert wurde. Die Simulationen starteten jeweils um 00:00 Uhr MESZ, sodass für die Tagsituation die stündlichen Mittelwerte von 16:00 Uhr und für die Nachtsituation von 04:00 der zweiten Nacht (also nach 28 Stunden) verwendet werden konnten.

5. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Oberflächentemperatur und der Windgeschwindigkeit zur Nachtsituation sowie die gefühlte Temperatur, die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur zur Tagsituation beider Modellgebiete beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 2 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer heißen Sommerwetterlage (Kap. 4.3.1). Sie gelten (bis auf die Oberflächentemperatur) für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 16:00 Uhr für die Tagsituation (wärmster Zeitpunkt).

Bei der gesamten Betrachtung und eingehenden Analyse der Ergebnisse hat sich unerwartet herausgestellt, dass beide Untersuchungsgebiete höchst wahrscheinlich unzureichend ausgedehnt sind. Somit ist die Interpretation der Ergebnisse, vor allem bezüglich einer konkreten Wirkung von Maßnahmen in den Untersuchungsräumen, mit Vorsicht durchzuführen. Dadurch, dass in den zu kleinen Modellgebieten die größten, energietransportierenden Wirbel nicht ausreichend aufgelöst werden können, sind die in den Ergebnissen sichtbaren Änderungen in den Signalen der betrachteten meteorologischen Parameter nicht immer eindeutig auf etwaige Maßnahmenwirkungen oder andere nachvollziehbare, atmosphärische Prozesse zurückzuführen. Zusätzlich ist die Verwendung von gebäudebegrünenden oder anderen klimawirksamen Maßnahmen in PALM-4U bisher nicht abschließend validiert. Das heißt, es ist auch nicht auszuschließen, dass möglicherweise auf der Modellseite noch Fehlerquellen im Code vorliegen, welche zu Interpretationsschwierigkeiten in den Ergebnissen beitragen könnten. Auch ob sich überhaupt in den Ergebnissen aus PALM-4U Maßnahmenwirksamkeiten in einer erwarteten Größenordnung durchprägen werden, ist bisher noch nicht ausreichend getestet worden. Dies sollte weiterhin beim Erwartungshorizont zur Aussagekraft der im vorliegenden Projekt erzielten Ergebnisse berücksichtigt werden.



5.1 Viktoria-Karree

5.1.1 Nachtsituation (04:00)

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen. Die aufgeführten Absolutwerte aller Größen sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen.

Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Gr.)

Abb. 12 zeigt die nächtliche Lufttemperatur um 04:00 Uhr und 2 m ü. Gr. Für den Ist-Zustand und das Szenario P0 des Viktoria-Karrees. Des Weiteren sind die Differenzenplots von P0 zum Ist-Zustand und der jeweiligen Planfälle P1 bis P4 zum Referenzfall P0 dargestellt. Im definierten Ist-Zustand des Viktoria-Karrees erreicht die nächtliche Lufttemperatur zwischen Werten von weniger als 24,5 °C in den Innenhöfen des ehemaligen Gerichtsgebäudes und des Geschäftsgebäudes, welches nördlich den Husemannplatz eingrenzt, bis zu 28,5 °C direkt angrenzend zum Parkhaus an der Viktoriastraße 2. Im Szenario P0 liegen die nächtlichen Lufttemperaturen im Bereich zwischen mehr als 24,5 °C und maximal 29,35 °C. Durch die Umsetzung des neuen Gebäudes im Viktoria-Karree steigt die nächtliche Lufttemperatur im direkten Umfeld im Westen und Norden des Modellgebietes um über 1 K im Vergleich zum Ist-Zustand (vgl. Abb. 12). Aufgrund der durchgängigen Baustruktur des neuen Gebäudes wird im bodennahen Niveau in der Nachtsituation Wärmestrahlung an die direkte Umgebung abgegeben, was zu der Erhöhung der Lufttemperatur in dem Bereich führen könnte. Durch die Veränderung der Gebäudestruktur im östlichen Teil des Viktoria-Karrees und Schaffung einer offenen Verbindung in Richtung Husemannplatz wird die Lufttemperatur in dem beschriebenen Bereich nach den vorliegenden Ergebnissen um etwas mehr als 1 K verringert.

In den weiteren Abbildungsteilen sind die Differenzen der Lufttemperatur zwischen den verschiedenen Varianten der Planfälle P1 bis P4 dargestellt. Im Vergleich zu P0 unterscheiden sich die weiteren Szenarien ausschließlich in dem Grad der Fassadenbegrünung an den Gebäuden, welche den Husemannplatz einschließen (P1, P2 und P4) bzw. in einer 100 % Fassadenbegrünung an Einzelhäusern (P3). Somit wurde eine sichtbare Differenz in den Feldern der nächtlichen Lufttemperatur zwischen P0 und den weiteren Planfällen nach dem Wissen aus bisherigen Studien zur Maßnahmenwirkung ausschließlich im Bereich des Husemannplatzes erwartet. Es ist jedoch erkennbar, dass weit über den Husemannplatz hinaus großräumig Differenzen in der nächtlichen Lufttemperatur des jeweiligen Planfalls zum Referenzfall P0 auftreten. Diese Differenzen sind aus physikalischer Sicht nicht als Maßnahmenwirkung einzuordnen oder mit sonstigen physikalischen Prozessen zu erklären. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund des zu kleinen Modellgebiets bereits tagsüber in der Vorlaufzeit zum hier dargestellten nächtlichen Auswertungszeitpunkt die größten Wirbel nicht ausreichend aufgelöst wurden und somit ein gestörter Abtransport von Energie in Form von Wärme und folglich eine unnatürliche Erwärmung im Untersuchungsgebiet stattfand. Somit scheint selbst zum nächtlichen Auswertungszeitpunkt die bodennahe Schichtung labil und stark turbulent zu sein, was zu den zufälligen, nicht durch die Maßnahmen erklärbaren Differenzen führen könnte. Da bereits an dieser Stelle eindeutige Indizien darauf vorliegen, dass der Wärmetransport im Modellgebiet unrealistisch während der Simulationszeit stattfand, werden auch die folgenden zu analysieren Ergebnisparameter nur erschwert hinsichtlich einer Maßnahmenwirkung im Modellgebiet zu interpretieren sein.



Hannover, Februar 2021

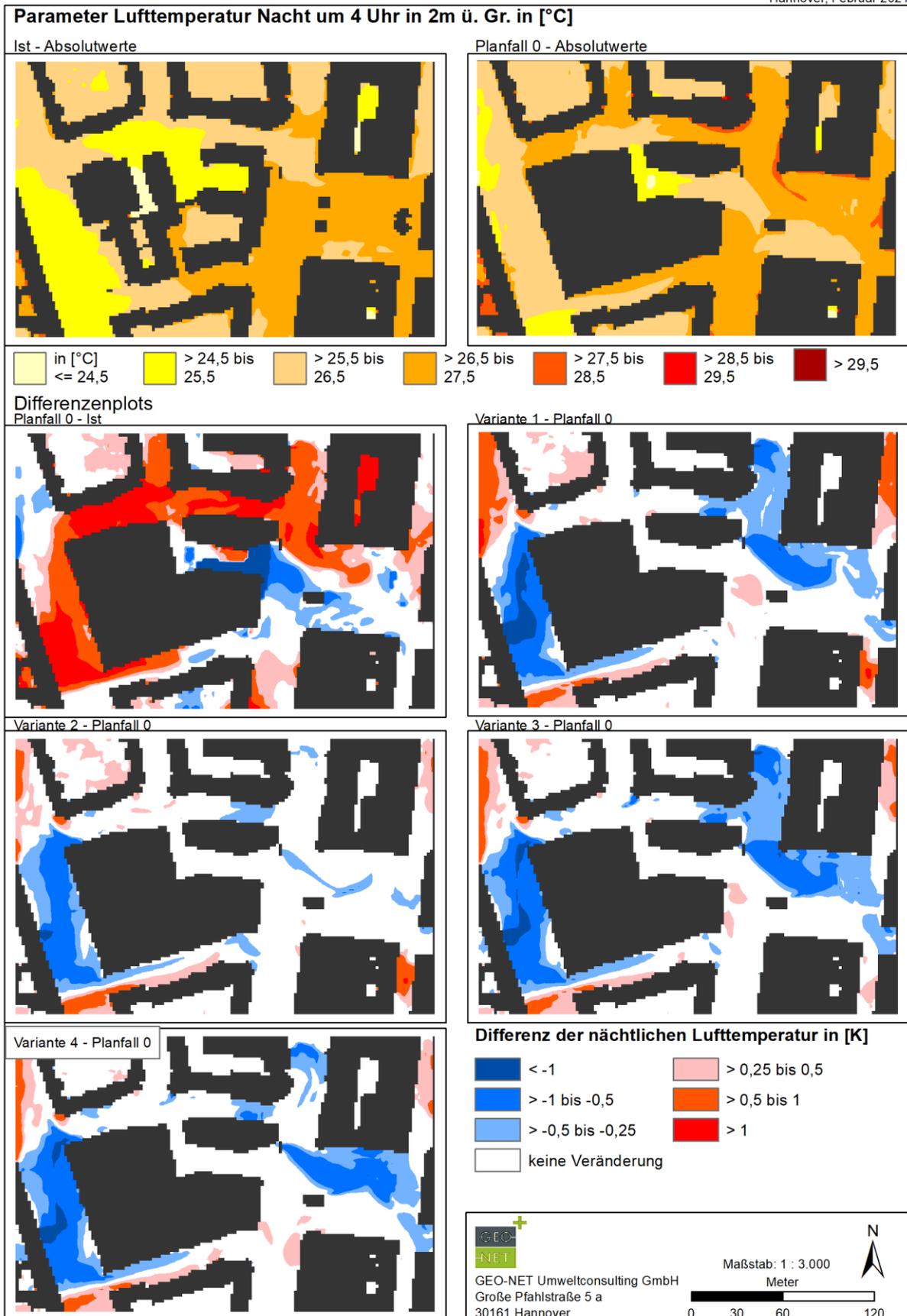


Abb. 12: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr nachts.



Oberflächentemperatur

Die nächtlichen Oberflächentemperaturen der Flächen aller Modellszenarien im Viktoria-Karree sind in Abb. 13 dargestellt. Im Ist-Zustand reichen die Werte der Temperaturen von weniger als 21 °C unter den Bäumen der Bundesstraße 226 bis zu mehr als 39 °C auf den Dächern der höchsten Gebäude im Modellgebiet. Im Ist-Zustand ist auf keinem Dach eine Begrünung berücksichtigt, wohingegen im P0 auf dem neuen Gebäude im Viktoria-Karree, auf dem Haus des Wissens und auf dem neuen Pavillon auf dem Husemannplatz eine Dachbegrünung umgesetzt wurde, was zu Oberflächentemperaturen der genannten Bereiche nahezu auf Straßenniveau um etwa 26°C führt. Da aber das neue Gebäude im Viktoria-Karree mehr bebaute Grundfläche aufweist als das alte Gerichtsgebäude ist direkt im Viktoria-Karree in der Differenzdarstellung von P0 zu Ist-Zustand auch eine Zunahme der Oberflächentemperatur an den Stellen zu erkennen, an denen sich im Ist-Zustand eine ebenerdige versiegelte Fläche befand und in P0 das neue Gebäude steht (vgl. Abb. 13). Zusätzlich ist zu vermuten, dass das hohe bodennahe Bauvolumen des neuen Gebäudes im Viktoria-Karree mehr Wärmestrahlung in den Nachtstunden abgibt als die Struktur des ehemaligen Gerichtsgebäudes, was auch zu der zu beobachtenden Erhöhung der Oberflächentemperatur im nahen Umfeld des Viktoria-Karrees von Ist-Zustand zu P0 geführt haben könnte. Zusätzlich wurden im P0 großkronige Bäume bei der Umsetzung des Entwurfs zum neuen Viktoria-Karree entfernt, was zu einer Erhöhung der lokalen Oberflächentemperatur von P0 gegenüber dem Ist-Zustand an den jeweiligen Positionen führt. Im Bereich des Husemannplatzes sind in der Differenz der nächtlichen Oberflächentemperatur deutlich die Wegnahme des einen Pavillons ohne Ersatz, die großflächigeren Bäume im Norden des Platzes und der Verdampfer als Abnahme der Oberflächentemperatur von P0 gegenüber dem Ist-Zustand zu erkennen. Der Verdampfer wurde in den Eingangsdaten als Springbrunnen klassifiziert, da dies als die geeignetste Klasse dafür erschien.

Die großflächige, im gesamten Untersuchungsgebiet zu erkennende, Zunahme der Oberflächentemperatur, auch vor allem in den Innenhöfen der nördlichen Gebäude im Modellgebiet neben dem Innenhof mit der Nachverdichtung durch das „Haus des Wissens“ scheinen keinen realistischen physikalischen Ursprung zu haben, sondern sind wahrscheinlich eher auf den fehlerhaften Energietransport im Modellgebiet zurückzuführen.



Hannover, Februar 2021

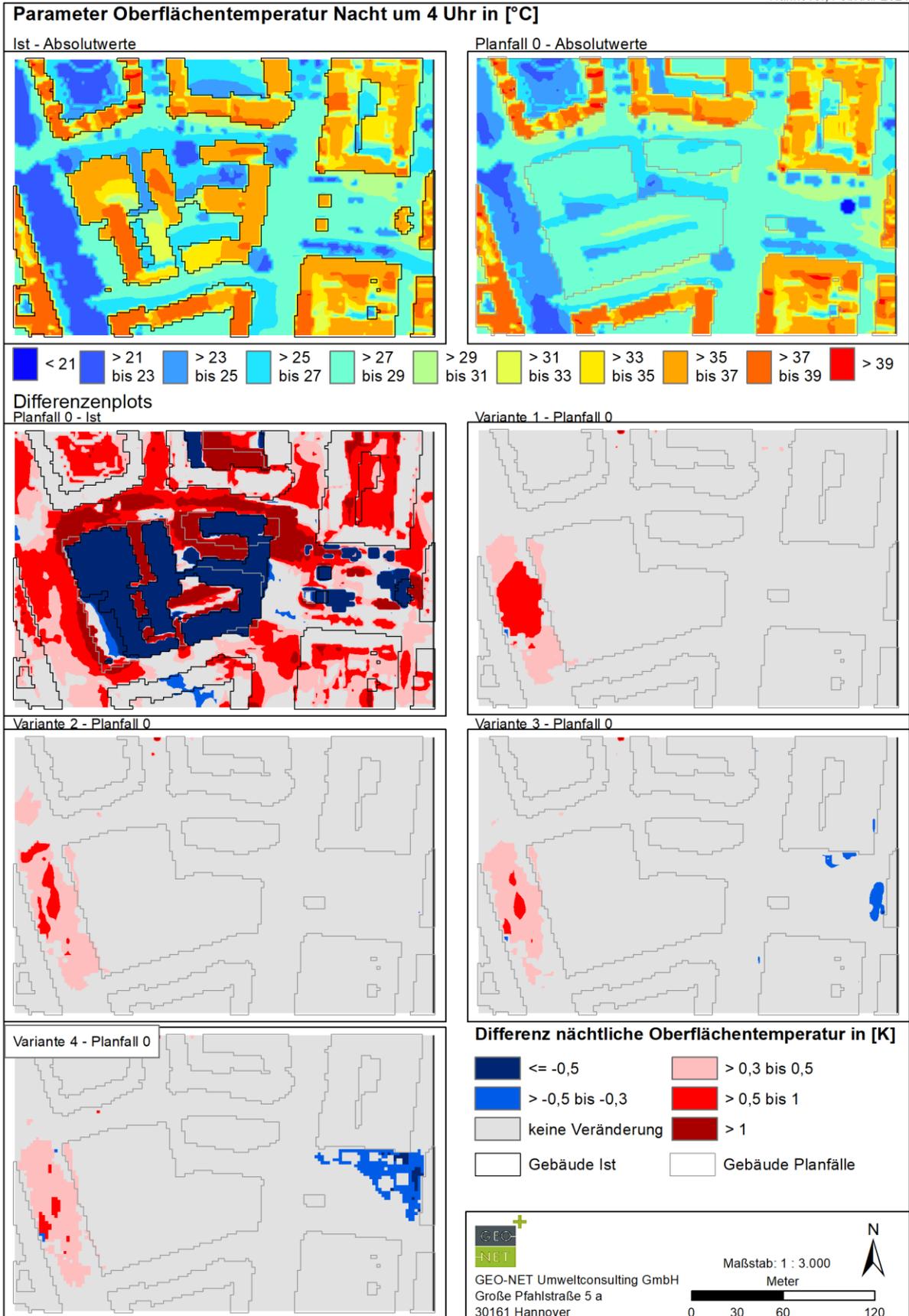


Abb. 13: Darstellung der Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 04:00 Uhr nachts.



Auch die Differenzen der weiteren Planfälle im Vergleich zum Referenzfall P0 weisen kaum durch die Veränderung des Ausmaßes oder der Begrünung am Husemannplatz erklärbare Differenzen auf und die Resultate auf eine mögliche Fernwirkung der Maßnahmenvariationen im Bereich des Husemannplatzes zu untersuchen ist somit auf Basis der vorliegenden Ergebnisse des Viktoria-Karrees nicht möglich.

Windgeschwindigkeit (2 m ü. Gr.)

Die nächtliche bodennahe Windgeschwindigkeit liegt im Ist-Zustand und P0 Fall (vgl. Abb. 14) zwischen Werten von weniger als 0,1 m/s bis zu 0,5 m/s. Dies scheinen für die modellierte autochthone Sommersituation realistische Wertebereiche für ein solch dicht bebautes und hochversiegeltes Gebiet zu sein. In der Differenz der Windgeschwindigkeit von P0 zur Ist-Situation zeigt sich an den Gebäudeecken durch die dichtere Bebauung im P0 Fall eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit. Hingegen an der Öffnung der Gebäudestruktur des neuen Gebäudes im Vergleich zum alten Gerichtsgebäude im Osten des Viktoria-Karrees ist hier eine Beschleunigung der bodennahen Windgeschwindigkeit durch den Wegfall des Strömungshindernisses zu erkennen.

Im Vergleich der anderen Planfälle zum Referenzfall P0 sind auch in dieser betrachteten Größe der Windgeschwindigkeit unrealistisch erscheinende Fluktuationen ersichtlich. Die Stärke der Fluktuationen in der bodennahen Windgeschwindigkeit und auch der Ort dieser Fluktuationen im Vergleich des jeweiligen Planfalls zum Referenzfall P0 sind nicht durch die lokal am Husemannplatz variierenden Szenarien der Fassadenbegrünung zu erklären.



Hannover, Februar 2021

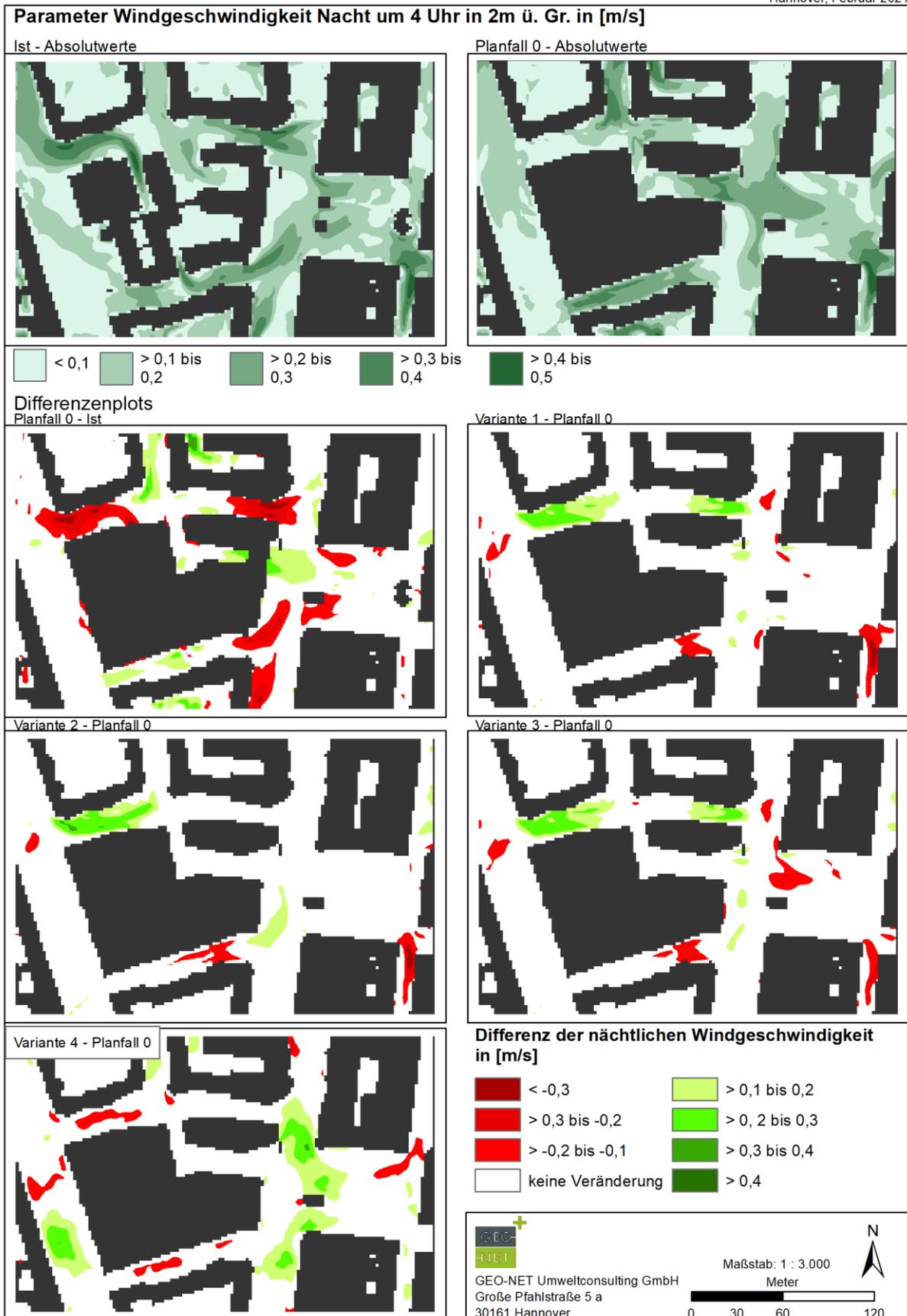


Abb. 14: Darstellung der bodennahen Windgeschwindigkeit der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts.



5.1.2 Tagsituation

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit der Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen².

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index der gefühlten Temperatur um 16:00 Uhr herangezogen (PT, perceived temperature; Staiger et al., 2012). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PT den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können³. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PT auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur. Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar.

Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü.Gr.)

Die bodennahe Lufttemperatur am Tage liegt in der Ist-Situation zwischen Werten von weniger als 25 °C in den Innenhöfen des alten Gerichtgebäudes und des Häuserblocks, welcher nördlich an den Husemannplatz angrenzt und maximalen Werten von etwa 38 °C an den direkt zu den äußeren, primär um 16 Uhr sonnenexponierten Fassaden der Gebäude (vgl. Abb. 15). Die Spannweite der Temperaturen im P0-Fall verhält sich ähnlich zu der im Ist-Zustand, in der Differenz von P0-Fall und Ist-Zustand scheint nach den vorliegenden Ergebnissen nahezu das gesamte Untersuchungsgebiet um mehr als 0,5 K im P0-Fall kühler zu sein als im Ist-Zustand. Diese Abweichung ist nicht physikalisch nachvollziehbar und es scheint sich bereits an dieser Stelle erneut ein Hinweis auf den fehlgeleiteten Energietransport im Untersuchungsgebiet durch seine zu geringe horizontale Erstreckung zu finden.

Bei Betrachtung der Differenzen der anderen Planfallvarianten zum Referenzfall P0 fallen wie auch schon in der Nachtsituation unerklärliche Abweichungen der Lufttemperatur auf, welche nicht allein durch die Änderung des prozentualen Anteils des Fassadengrüns oder der Position des Fassadengrüns am Husemannplatz zu erklären sind.

Oberflächentemperatur

Abb. 16 zeigt die Temperaturen der Oberflächen im Modellgebiet am Tage. Natürlicherweise werden hier wesentlich höhere Maximaltemperaturen erreicht, als es noch in der Nachtsituation zu beobachten war. Im Ist-Zustand und P0-Fall der Tagsituation weist die Oberflächentemperatur Werte zwischen weniger als 25 °C und mehr als 65 °C auf. Auffällig ist vor allem der Einfluss des Schattenwurfs auf die Oberflächentemperatur im Modellgebiet. So weisen durch Bäume und Gebäude verschattete Bereiche die Minimumtemperatur auf. Analog verhält es sich mit den um 16:00 Uhr maximal sonnenexponierten Bereichen, wie dem nördlichen Teil des Husemannplatzes, in denen die maximalen Werte der Oberflächentemperatur von mehr als 65 °C zu finden sind. Im Unterschied des P0-Falls zum Ist-Zustand fallen vor allem die geringeren Oberflächentemperaturen des neuen Gebäudes im Viktoria-Karree und des

² Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

³ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).



„Haus des Wissens“ bedingt durch die Dachbegrünung auf. Auch im Bereich des Husemannplatzes ist eine Veränderung der Oberflächentemperaturen im Zuge der Neugestaltung zu beobachten.

Sonstige Differenzen im Modellgebiet von Ist-Zustand zum PO-Fall oder auch die der andern Planfälle zu Referenzfall PO lassen sich nur schwerlich erklären und an dieser Stelle ist erneut auf das zu kleine Modellgebiet zu verweisen.

Gefühlte Temperatur (PT)

Die Spannweite der PT im Untersuchungsgebiet reicht von einer schwachen Wärmebelastung (26 °C) in Schattenbereichen der Gebäude bis hin zu einer extremen Wärmebelastung (> 38 °C; vgl. Abb. 17). Für die untersuchten Bedingungen eines wolkenlosen Sommertags mit großer Hitzebelastung und durch die großflächigen Areale im Untersuchungsraum ohne Verschattung sind die Ergebnisse der PT in einem erwarteten Wertebereich. Durch die geringere Höhe des neuen Gebäudes im Viktoria-Karree gegenüber dem alten Gerichtsgebäude ist auch die Länge des Schattenwurfs geringer und somit sind vor allem Zunahmen der gefühlten Temperatur im Vergleich der PT zwischen PO-Fall und dem Ist-Zustand im Bereich des Viktoria-Karrees zu erkennen. Auf dem Husemannplatz sorgt vor allem der Verdampfer in seinem Nahbereich für eine Reduzierung der PT.

Auch bei der PT treten im Vergleich der Planfälle zum Referenzfall PO kaum erklärbare Effekte auf und scheinen auch vor allem nicht durch die Maßnahmenvariationen am Husemannplatz bedingt zu sein.



Hannover, Februar 2021

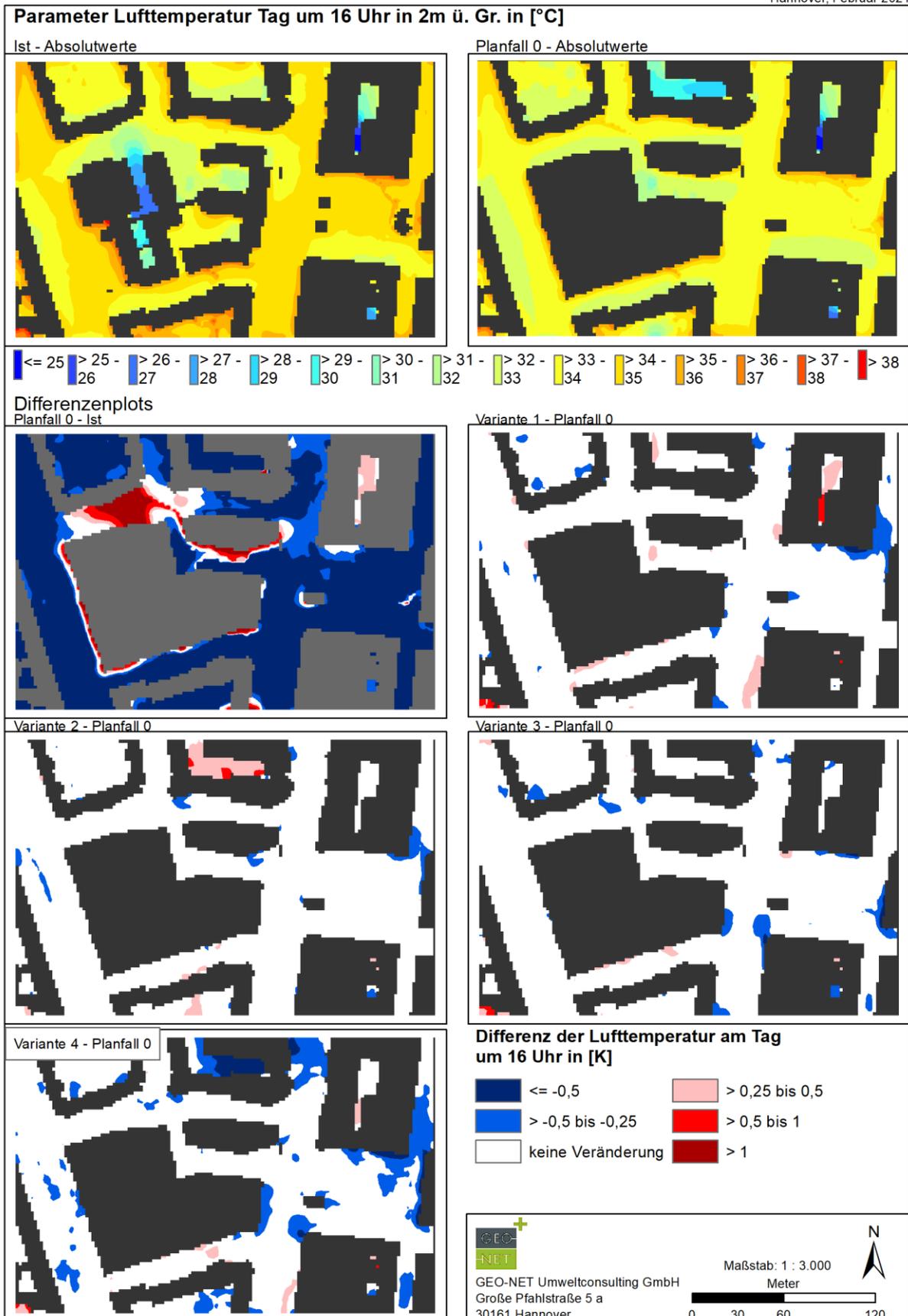


Abb. 15: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr.

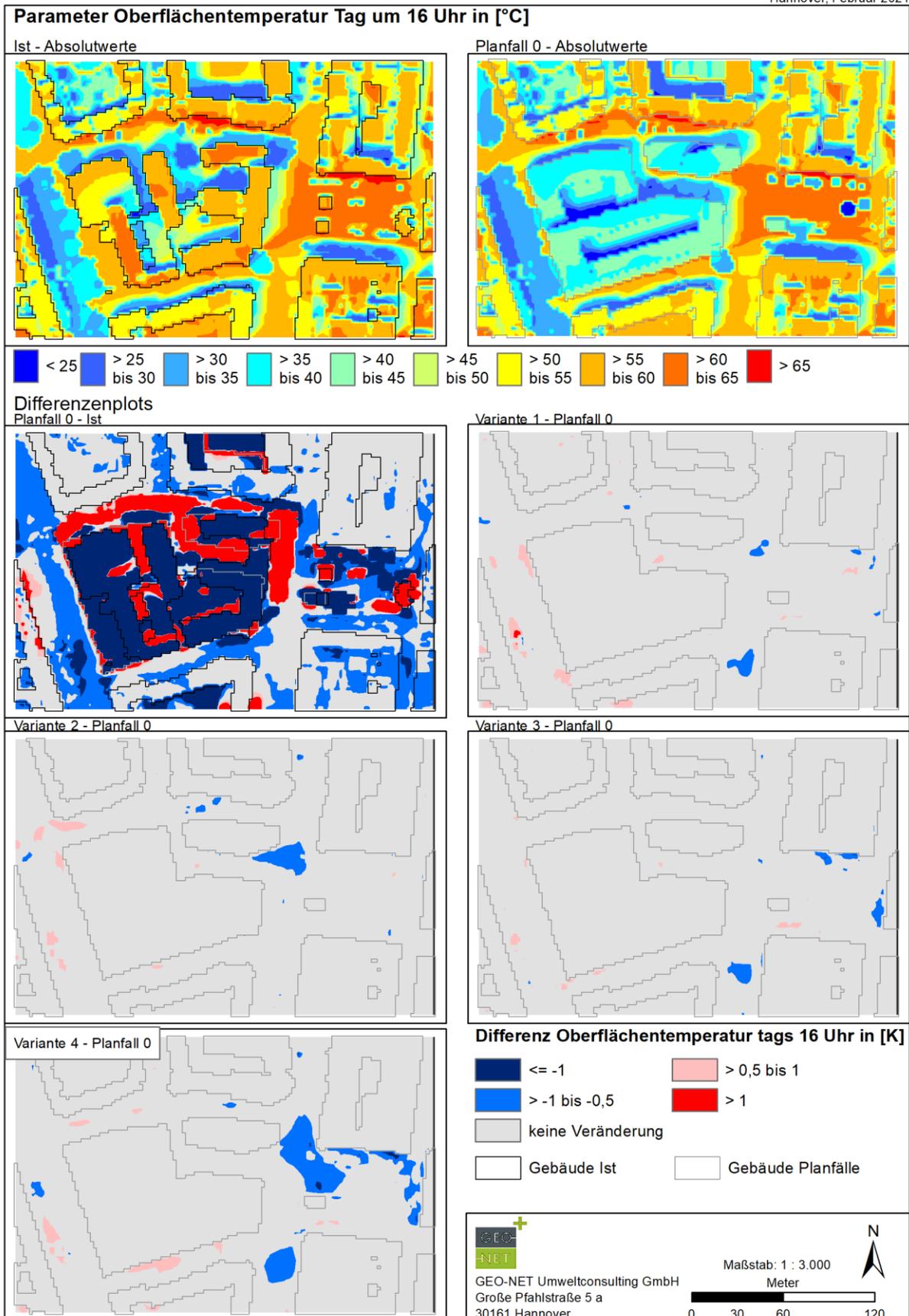


Abb. 16: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 16:00 Uhr.



Hannover, Februar 2021

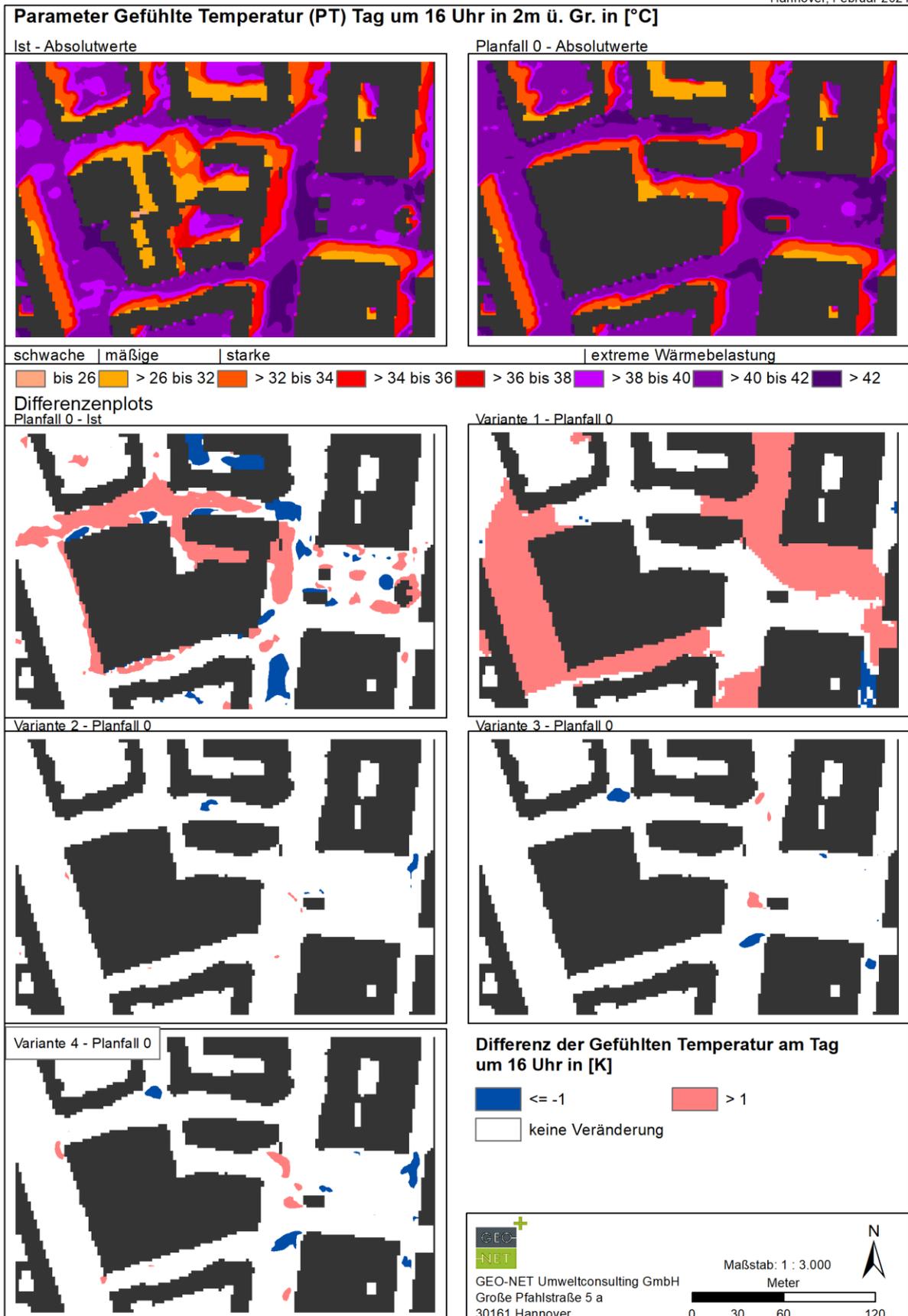


Abb. 17: Darstellung der gefühlten Temperatur (PT) der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des Viktoria-Karrees als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr.



5.2 City Tower/Bahnhofsvorplatz

5.2.1 Nachtsituation (04:00 Uhr)

Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Gr.)

Abb. 18 zeigt die bodennahe, nächtliche Lufttemperatur des Untersuchungsgebiets um den City Tower für die unterschiedlichen Szenarien bzw. die Differenz von P0-Fall zum Ist-Zustand und die Differenz des jeweiligen Plan-Szenarios zum Referenzfall P0. Sie liegt zwischen Werten geringer als 24,5 °C und etwa 29,5 °C. Die wärmsten Bereiche in beiden Abbildungen scheinen dabei im Innenhof des Gebäudes im Nordwesten des Untersuchungsgebiets und auf den Bahnsteigen des Hauptbahnhofs lokalisiert zu sein. Bei Betrachtung der Differenz der nächtlichen Lufttemperatur des Ist-Zustandes zum P0-Fall fällt vor allem die Änderung der Lufttemperatur aufgrund der Baumaßnahme der Nachverdichtung des Baublocks an der Kreuzstraße auf. Durch die Nachverdichtung in Verbindung mit der Wegnahme der Bäume im derzeitigen Innenhof und der Schließung der bisherigen Durchfahrt zur Kreuzstraße scheint sich der Innenhof gegenüber dem Ist-Zustand generell aufzuheizen. Am City Tower scheint die Öffnung der Baustruktur zur Bundesstraße 226 lokal zu einer Abkühlung gegenüber dem Ist-Zustand zu führen. Nichtsdestotrotz sind im gesamten Untersuchungsgebiet des City Towers auch wieder wie bereits im Viktoria-Karree beobachtet Differenzen ersichtlich, welche sich kaum durch die geänderten Szenarien zwischen den einzelnen Modellierungen erklären lassen. Dies ist im Vergleich Ist-Zustand zu P0 und auch in allen anderen Betrachtungen der Unterschiede zwischen den jeweiligen Plan-Fällen zum Referenzfall P0 auffällig. Teilweise scheinen die Differenzen zwar mit Maßnahmen aus den verschiedenen Szenarien einherzugehen, wie es beispielsweise in der Differenz von Plan-Fall 3 und Plan-Fall 4 zum Ist-Zustand an der Position des MFO-Parks vor der fassadenbegrünter Wand vermutet werden könnte. Gleichzeitig treten aber auch wieder Differenzen im Modellgebiet (bspw. nordwestliches Gebäude im Modellgebiet) auf, die kaum physikalisch aufgrund der verschiedenen Maßnahmen Szenarien erklärt werden können. Somit liegt auch hier wieder die Vermutung nah, dass auch die horizontale Erstreckung des Modellgebietes vom City Tower kaum ausreichend zu sein scheint, um die großen, energietransportierenden Wirbel aufzulösen, wodurch der Transport von Energie und somit Wärme während der gesamten Simulationsdauer gestört zu sein scheint. Somit wird an dieser Stelle von weiteren Interpretationsversuchen der Differenzen zwischen dem jeweiligen Plan-Fall und der Referenzsimulation abgesehen.

Oberflächentemperatur

Die nächtliche Temperatur der Oberflächen erstreckt sich von unter 21 °C auf Straßenniveau und in Nähe von Vegetation bis hin zu mehr als 39 °C auf einigen Dächern im Modellgebiet. Dies ist sowohl für den Ist-Zustand als auch den P0-Fall zutreffend (vgl. Abb. 19). Im Vergleich dieser beiden Fälle sind vor allem die neuen Gebäude auffällig und die umgesetzte Dachbegrünung auf dem Parkhaus am City-Tower ist deutlich sichtbar. Im Vergleich der Oberflächentemperaturen von P1, P3 und P4 zum Referenzfall treten wie zu erwarten die Dachbegrünungen der neuen oder neugestalteten Gebäude im Untersuchungsgebiet heraus. Zusätzlich scheint auch ein Effekt des MFO-Parks in P3 und P4 als lokale Abkühlung im Vergleich zum Referenzfall aufzutreten. Auch die Begrünung des alten Busbahnhofs aus P2 und P4 tritt mit geringeren Oberflächentemperaturen im Vergleich zum Referenzfall in Erscheinung. Da aber bereits in der Auswertung der nächtlichen Lufttemperatur Indizien auf unrealistische physikalische Wärmetransporte im Modellgebiet zu sehen waren, sind die Größenordnungen der Maßnahmenwirkung auf die Oberflächentemperatur aus PALM-4U nur spekulativ zu deuten und deshalb beschränkt sich die vorangegangene Analyse der Effekte der unterschiedlichen Szenarien auf die qualitative Beschreibung der



möglichen Maßnahmenwirkungen. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Oberflächentemperatur im Modellgebiet des City Towers deutliche Indizien dahingehend, dass PALM-4U die Maßnahmen aufnimmt und grundlegend als korrektes Signal in der Oberflächentemperatur umsetzt.

Windgeschwindigkeit (in 2 m ü.Gr.)

Abb. 20 zeigt die bodennahe Windgeschwindigkeit der Nachtsituation aller Szenarien. Dabei weisen der Ist-Zustand und P0 ähnlich zu den Ergebnissen des Viktoria-Karrees Windgeschwindigkeiten von weniger als 0,1 m/s bis hin zu etwas mehr als 0,5 m/s auf. In beiden Fällen ist auch im Bereich der Fußgängerzone eine Art Kanalisierungseffekt der Strömung zu erkennen. Hier werden die Maxima von über 0,5 m/s im Strömungsfeld erreicht. Im Vergleich von P0 zum Ist-Zustand scheint die Nachverdichtung im Innenhof des Gebäudeblocks an der Kreuzstraße zu einer lokalen Verringerung der Windgeschwindigkeit beizutragen. Aber es sind dennoch auch wieder nicht erwartete Veränderungen in der Windgeschwindigkeit zu erkennen, wie im Bereich der Fußgängerzone und den südlich anschließenden Straßen. Auch hier scheint ein gewisser Einfluss des fehlerhaften Energietransports sichtbar zu sein, denn die Veränderungen von Ist-Zustand zu P0 sollten keine so weitreichenden Änderungen der Windgeschwindigkeit zur Folge haben. Diese unrealistischen Fluktuationen zeigen sich wiederholt in den Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0.

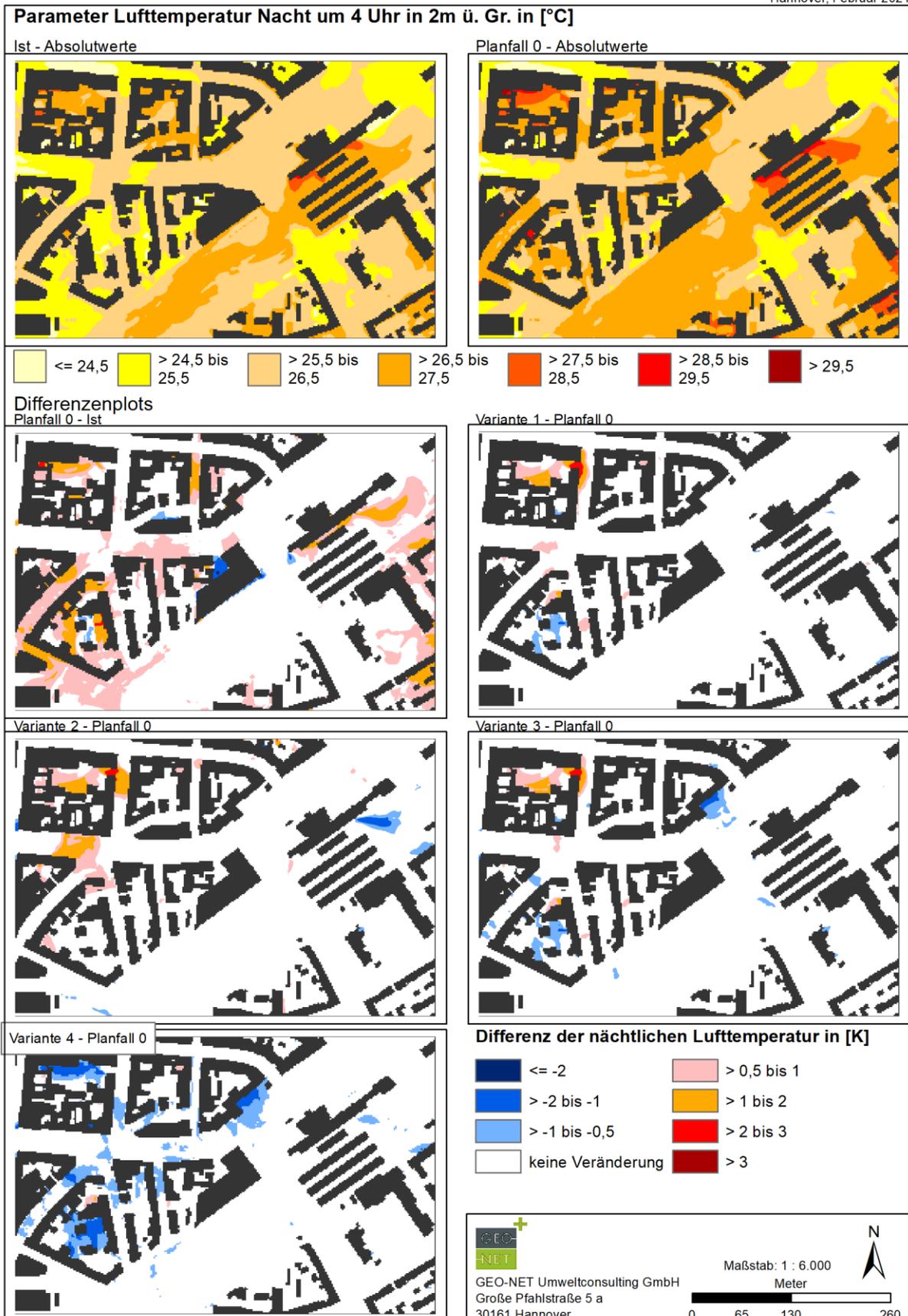


Abb. 18: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts.



Hannover, Februar 2021

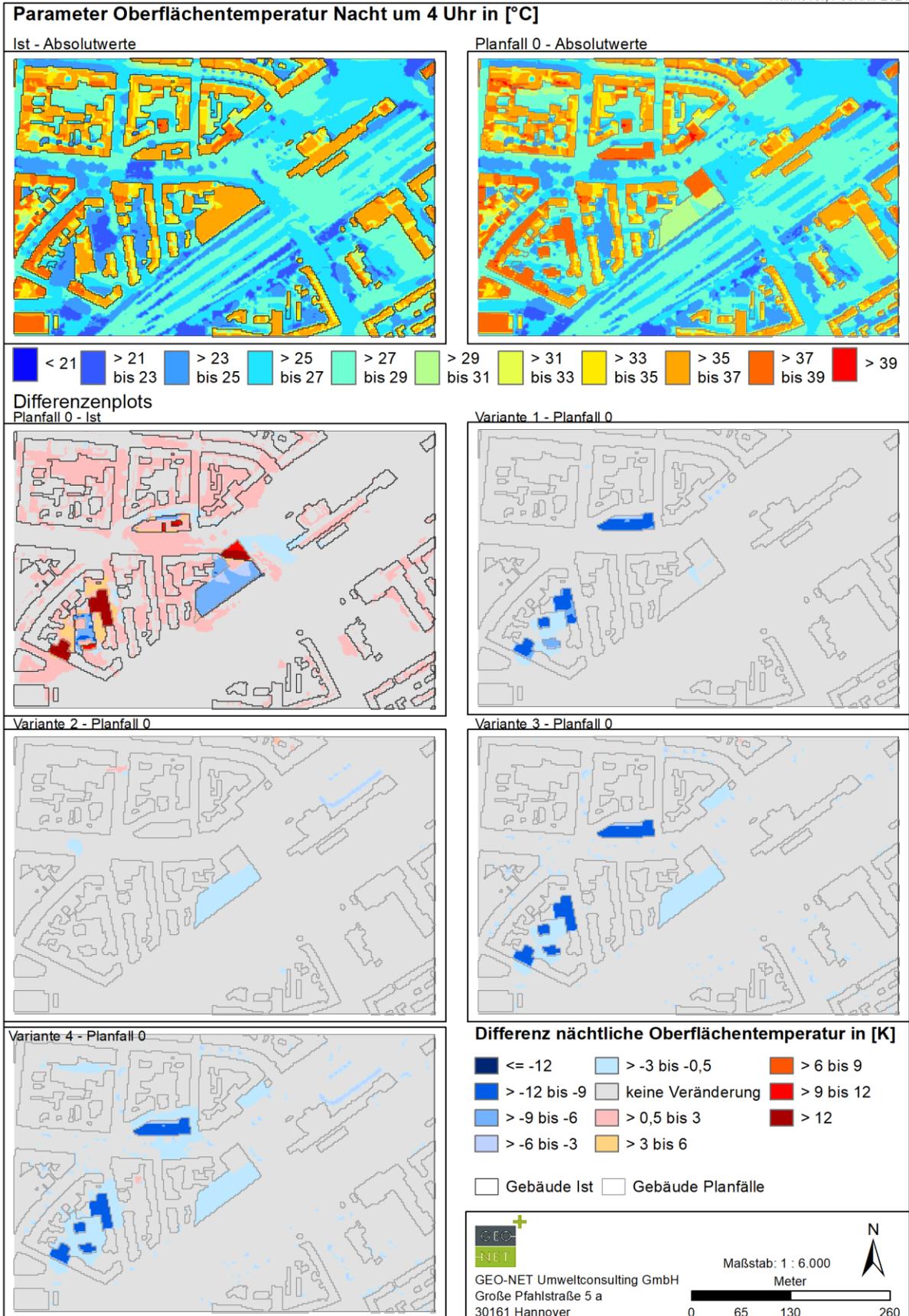


Abb. 19: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 04:00 Uhr nachts.



Hannover, Februar 2021

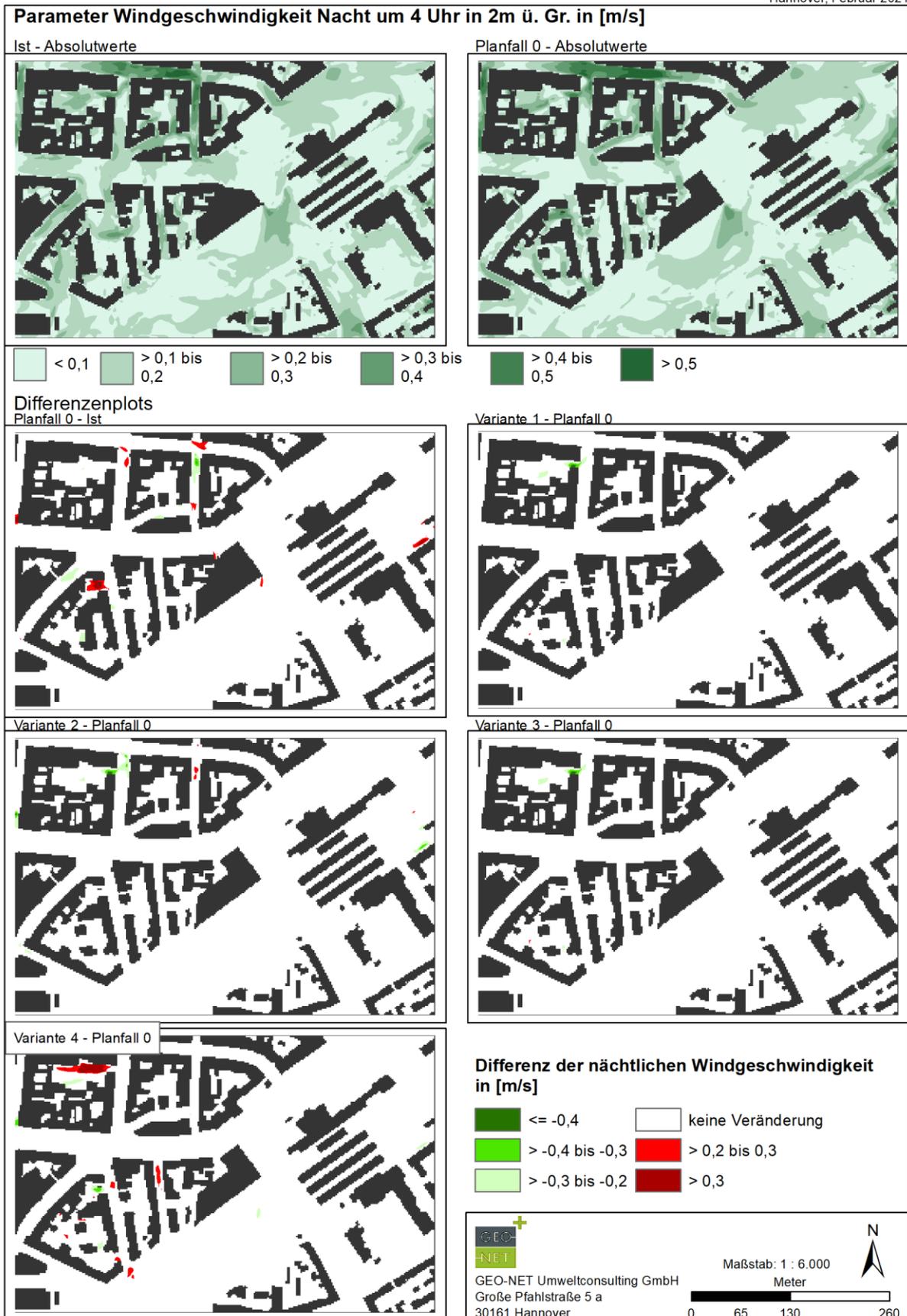


Abb. 20: Darstellung der bodennahen Windgeschwindigkeit der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 04:00 Uhr nachts.



5.2.2 Tagsituation (16:00 Uhr)

Bodennahe Lufttemperatur

In der Tagsituation zeigt sich vorrangig wieder der Unterschied zwischen Verschattung und Sonnenexposition in der bodennahen Lufttemperatur. So werden in den Schattenbereichen die geringeren Temperaturen im Untersuchungsgebiet erreicht bis hin zu minimal weniger als 25 °C in stark verschatteten Ecken von Blockinnenhöfen (vgl. Abb. 21). Die maximalen Temperaturen sind dementsprechend in den Nahbereichen der sonnenexponierten Gebäudefassaden zu erkennen. Dadurch, dass die Gebäude des P0 insgesamt höher sind als die Vorgängergebäude, erzeugen sie auch einen längeren Schattenwurf und dieser zeigt sich als Temperaturverringerung in den relevanten Bereichen von P0 zum Ist-Zustand. Warum jedoch im Bereich des Gebäudes, welches sich südöstlich an den Hauptbahnhof anschließt, eine Temperaturverringerung und vor dem Gebäude nördlich vom City Tower eine Temperaturerhöhung im P0 gegenüber des Ist-Zustandes zu beobachten ist, scheint nicht durch die Änderungen vom Ist-Zustand zum P0 direkt erklärbar.

In der Betrachtung der Differenzen der Planfälle P1 und P2 mit dem Referenzfall sind vor allem unerklärliche Zunahmen der Temperatur im nordwestlichsten Gebäudeblock ersichtlich. In den Bereichen, in den sich die beiden Szenarien wiederum zu P0 unterscheiden, scheint keine relevante Differenz in der Lufttemperatur am Tage aufzutreten. In der Differenz von P3 und P4 zu P0 hingegen ist großräumig immer wieder eine Abnahme der Temperatur zu erkennen. Diese Beobachtungen lassen erneut auf unrealistische physikalische Prozesse im Modellgebiet schließen, die auch in der Tagsituation somit keine Deutung der Maßnahmenwirksamkeit zulassen.

Oberflächentemperatur

Wie auch in der Lufttemperatur ist in der Oberflächentemperatur vorrangig der Einfluss der Sonne bzw. des Schattenwurfs der Gebäude zu erkennen (vgl. Abb. 22). Somit sind auch hier die Temperaturmaxima von etwa 65 °C an den sonnenexponierten Flächen und in den Schattenbereichen die Minima von etwa 25 °C zu erkennen. Im Vergleich des Ist-Zustandes mit dem P0-Fall sind somit vorrangig neue Gebäude ohne Dachbegrünung als Temperaturzunahme ersichtlich, wohingegen sich das Parkhaus am City Tower mit Dachbegrünung und der Schattenwurf der in P0 veränderten Gebäude als Temperaturabnahme abzeichnen.

In allen Differenzen zwischen dem jeweiligen Plan- zum Referenzfall P0 lassen sich die spezifischen klimaoptimierten Maßnahmen auch in der Oberflächentemperatur beobachten. In P1, P3 und P4 sind die begrünten Dächer der Gebäude zu erkennen, in P1 zeigen die Einzelbäume auf dem Platz der ehemaligen Europagalerie ein positives Signal auf die Oberflächentemperatur am Tage, das Grünvolumen des ehemaligen Busbahnhofs in P2 ist ersichtlich und auch der MFO-Park zeigt sich in der Differenz von P3 und P4 zu P0. Nichtsdestotrotz sind vor allem in der Differenz von P3 und P4 zu P0 erneut unerklärliche Differenzen unvorhersagbar über das Modellgebiet verstreut zu erkennen.

Gefühlte Temperatur (PT)

In Abb. 23 ist die PT aller Szenarien als Absolutwert für den Ist-Zustand und P0 sowie in Differenzdarstellung von Ist-Zustand zu P0 und des jeweiligen Planfalls zum Referenzfall P0 dargestellt. Wie schon vorangehend zu beobachten war, spielt auch in der PT der Schattenwurf bzw. die Sonnenexposition eine große Rolle



für das Wärmeempfinden des Menschen. Somit sind auch hier im Ist-Zustand die geringsten Temperaturen in den Kernschatten der Gebäude mit etwa 26 °C bis 32 °C zu erkennen (schwache bis mäßige Wärmebelastung), wohingegen sich die sonnenbeschienenen Bereiche großflächig durch eine extreme Wärmebelastung mit gefühlten Temperaturen vom mehr als 38 °C auszeichnen. In der Differenz von P0 zum Ist-Zustand sind somit die Kernschatten der veränderten bzw. neuen Gebäude als negatives Temperatursignal zu erkennen und die fehlenden Bäume im Innenhof des Baublocks der Kreuzstraße, in dem die Nachverdichtung im P0 berücksichtigt ist, machen sich in einer Temperaturerhöhung in der PT bemerkbar.

In allen anderen Differenzen der Planfälle zum Referenzfall P0 scheint großflächig durch die verschiedensten Maßnahmen keine relevante Veränderung in der PT aufzutreten. Lediglich am Ort des MFO-Parks auf dem Platz der ehemaligen Europagalerie ist eine Verringerung des Temperatursignals durch diese Struktur zu erkennen. Ein naheliegender Schluss wäre an dieser Stelle zu sagen, dass von den jeweiligen Maßnahmen in den Szenarien am Tage keine relevante Beeinflussung der gefühlten Temperatur im Untersuchungsgebiet zu erwarten scheint. Jedoch ist bereits vorangehend an der Vielzahl der bisher ausgewerteten Ergebnisse festgestellt worden, dass die Ergebnisse teilweise unrealistische atmosphärische Prozesse wiedergeben. Somit kann bei der Betrachtung der PT leider auch nicht der Schluss auf eine Maßnahmenwirksamkeit, oder in diesem Fall auf keine relevante Maßnahmenwirksamkeit, gezogen werden, auch wenn sich in diesem Ergebnisparameter keine Änderungen im Temperatursignal an unerklärlichen Orten finden. Es stellt sich eher die Frage, ob die Maßnahmenwirkung auf die PT durch das für eine LES ungeeignete Modellsetup realistisch abgebildet werden kann, weil bspw. mindestens ein Effekt des Schattenwurfs der Einzelbäume oder des erhöhten Grünvolumens am alten Busbahnhof auf die PT zu erwarten wäre.



Hannover, Februar 2021

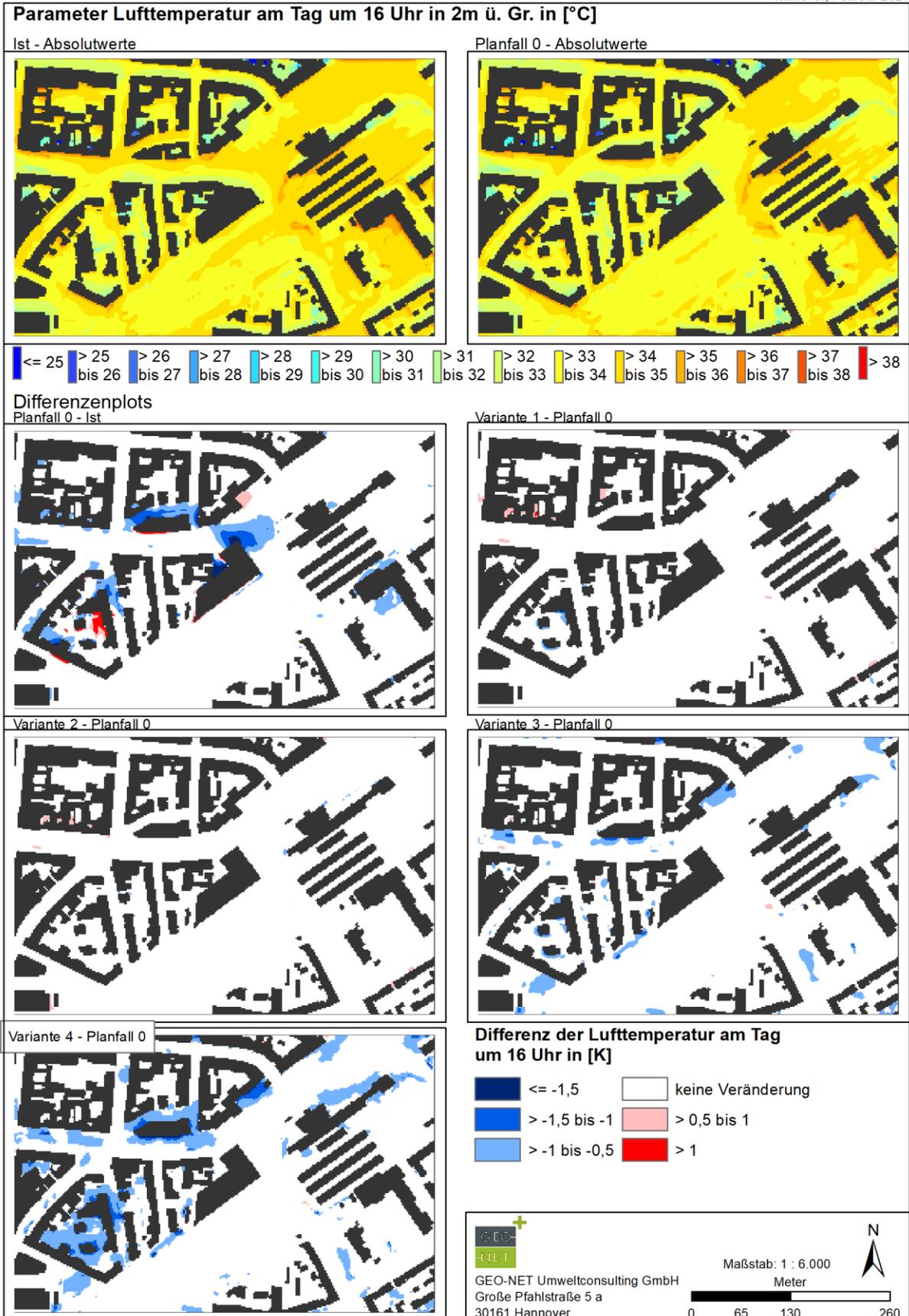


Abb. 21: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr.



Hannover, Februar 2021

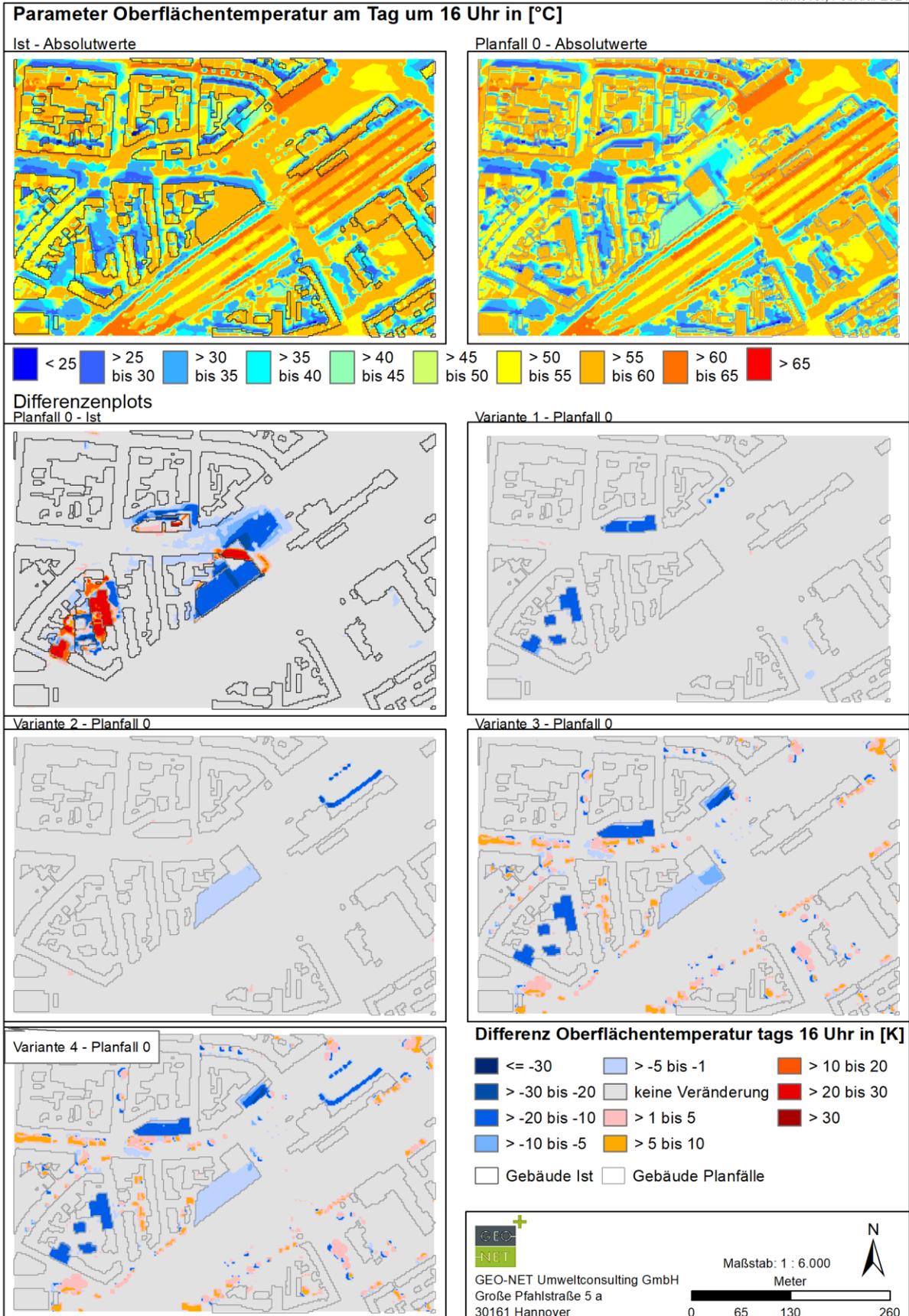


Abb. 22: Darstellung der Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 um 16:00 Uhr.

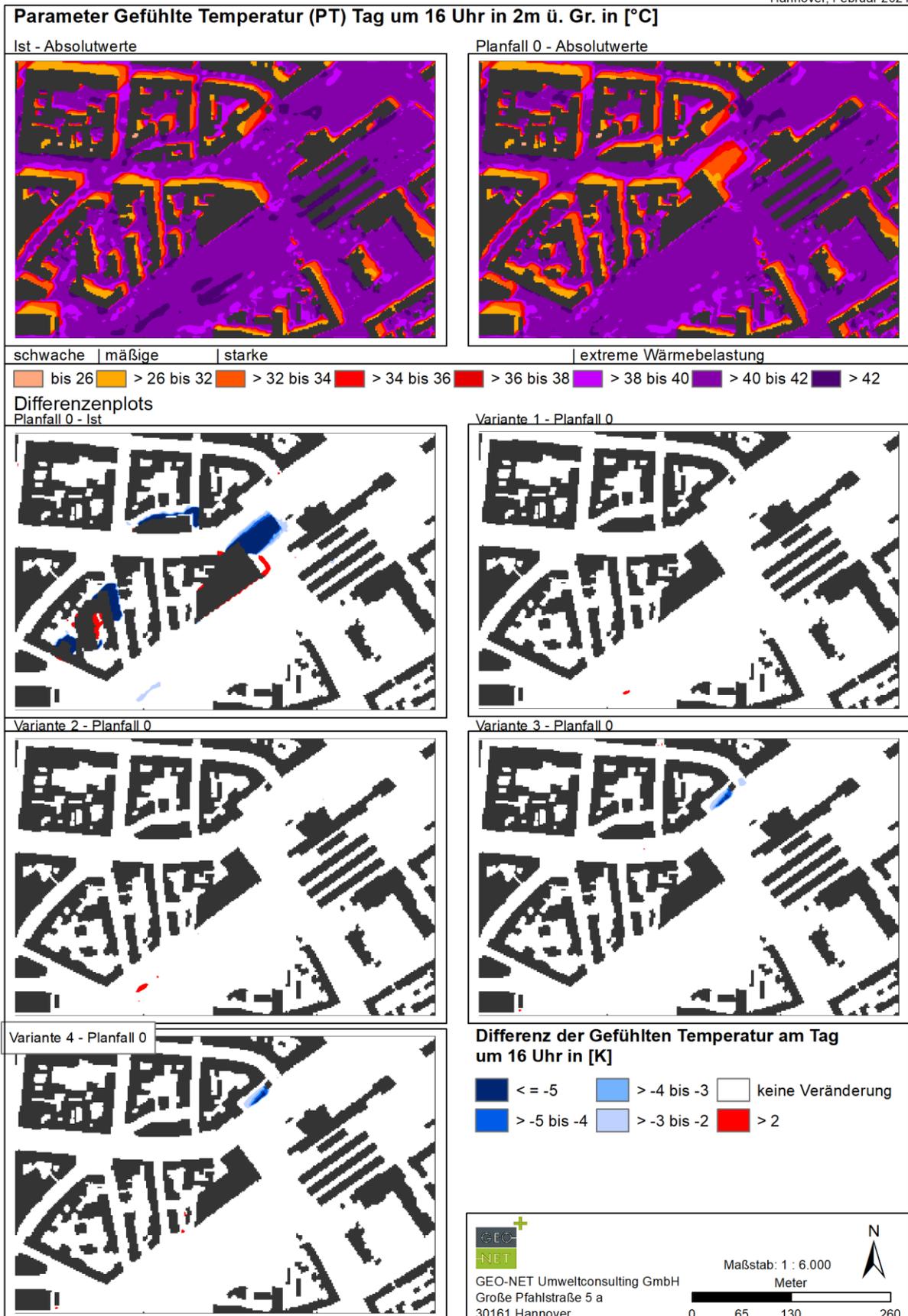


Abb. 23: Darstellung der gefühlten Temperatur (PT) der unterschiedlichen Szenarien im Gebiet des City Towers als Absolutwerte im Ist-Zustand und P0-Fall sowie als Differenzen der jeweiligen Planfälle zum Referenzfall P0 in 2 m ü.Gr. um 16:00 Uhr.



6. Bewertung der Plan-Varianten (Ableitung von Bewertungen und Empfehlungen)

Aufgrund des unrealistischen Wärmetransports in den Untersuchungsgebieten bedingt durch die zu geringe horizontale Erstreckung der Modellgebiete zeigten sich die Ergebnisse selten als physikalisch nachvollziehbar. Es wurden Differenzen in Entfernungen zu den Orten der Maßnahmenumsetzung ersichtlich, welche nach der Erwartung nicht wie erhofft durch die Maßnahmenwirkung erklärbar waren. Auch das Ausmaß der Differenzen konnte nicht nachvollzogen werden. Somit ist eine Bewertung der unterschiedlichen Plan-Varianten bezüglich ihrer Maßnahmenwirkung leider nicht durchführbar.

7. Fazit

Ein wesentlicher Erkenntnisgewinn des Projektes ist die Feststellung, dass die Ausdehnung der Modellgebiete für Simulationen im LES-Modus zu gering ist. Die gewählten Abmessungen für die Gebiete Viktoria-Karree und City Tower lassen nur eine unvollständige Ausprägung der entstehenden Wirbelstrukturen zu, was sich in einem unrealistischen Energietransport und somit fehlerhaften Ergebnissen hinsichtlich der Wärmebelastung niederschlägt. Im Dialog mit den Modellentwicklern wurde als geeignete Modellgebietsausdehnung mindestens die doppelte Höhe der atmosphärischen Grenzschicht in x- und y-Richtung vorgeschlagen. Mit dem Auftraggeber wurde deshalb vereinbart, im Nachgang zum Projekt eine Modellierung des Untersuchungsgebietes Gleisdreieck durchzuführen, welche alle bekannten Anforderungen an eine LES erfüllt. So wird erhofft, bessere Aussagen zu eventuellen Unterschieden in den Wirksamkeiten der Maßnahmen in den Untersuchungsbereichen zu erhalten und zusätzlich einen Eindruck davon zu bekommen, wie valide in PALM-4U zumindest eine Auswahl der im Projekt entworfenen Maßnahmen szenarien zur Klimaoptimierung umgesetzt sind.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der Initiative „Digitale Klimaanpassung“ des Regionalverbands Ruhr wurden Klimasimulationen für zwei Stadtgebiete in Bochum (Viktoria-Karree und City Tower) mit dem Modell PALM-4U durchgeführt und ausgewertet. In beiden Gebieten wurden ein definierter Ist-Zustand (altes Gebäude) mit dem Planfall 0 (neues Gebäude) verglichen sowie jeweils weitere 5 Planvarianten simuliert und ausgewertet. Die Planvarianten beinhalteten verschiedene Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünung mit variierenden Anteilen, Bepflanzungen sowie bauliche Neugestaltungen im Straßenraum. Alle Planvarianten wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die thermische Belastung im unmittelbaren Aufenthaltsbereich des Menschen (2m über Grund außerhalb von Gebäuden) bewertet.

Für die Modellrechnungen wurden alle erforderlichen Eingangsdaten aufbereitet und in das modellkonforme Eingangsdatenformat konvertiert. Das Modell PALM-4U wurde für jeweils 36 stündige Simulationen eines heißen autochthonen Sommertages konfiguriert und die Simulationen sukzessive im LES-Modus durchgeführt.

Betrachtet wurden die meteorologischen Parameter 2m Temperatur, Oberflächentemperatur, Gefühlte Temperatur (perceived temperature) und die Windgeschwindigkeit. Die Modellergebnisse zeigen, dass das Modell in der beschriebenen Konfiguration prinzipiell in der Lage ist die thermischen Bedingungen eines



sehr warmen Sommertages in städtischer Umgebung zu reproduzieren. Die baulichen Veränderungen in den Untersuchungsgebieten zeigen Wirkung auf die meteorologischen Parameter, wobei dies am deutlichsten bei den Oberflächentemperaturen sichtbar wird. Eine eindeutige Wirkung der erarbeiteten Maßnahmen jedoch, wie z.B. die der differenzierten Fassadenbegrünung, auf die thermische Situation im Aufenthaltsbereich des Menschen kann aus den vorliegenden Modellergebnissen nicht eindeutig interpretiert werden.

Die Modellergebnisse zeigen, dass die komplexen physikalischen und modelltechnischen Voraussetzungen für LE-Simulationen, insbesondere hinsichtlich der Ausdehnung der Modellgebiete, nicht vollständig eingehalten wurden und somit der Wärmetransport in den Untersuchungsgebieten unzureichend abgebildet wird. Dies offenbaren Effekte der betrachteten meteorologischen Parameter, die entweder physikalisch nicht erklärt werden konnten oder räumlich nicht zuzuordnen waren. Das schränkt die Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen nicht unerheblich ein.

Mit dem vorgestellten Modellansatz konnte zwar noch nicht abschließend geklärt werden, wie groß nun die Effekte von klimawirksamen Maßnahmen in den Untersuchungsgebieten Viktoria-Karree und City Tower sein werden, andererseits konnten jedoch bezüglich des erforderlichen Modell-Setups, der benötigten fachlichen Voraussetzungen und technischen Ressourcen bei der effektiven Anwendung von PALM-4U in der kommunalen Planung wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Dies wird einen wichtigen Einfluss auf zukünftige Anwendungen mit PALM-4U in der Stadt- und Landesplanung im Regionalverband Ruhr haben.



Quellenverzeichnis

- BOStatIS (2021): Bochumer Statistisches Informationssystem. <https://bostatis.bochum.de/>
- DWD (2020) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten).
Online: <https://cdc.dwd.de/portal/>
- DWD (2021) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten).
Online: <https://cdc.dwd.de/portal/>
- Flohn, H. (1954): Witterung und Klima in Mitteleuropa. 2. Auflage, Forschungen zur deutschen Landeskunde, 78 S., Hinzl Verlag Stuttgart.
- Grudzielanek, M., Steinrücke, M., Eggenstein, J., Holmgren, D., Ahlemann, D., Zimmermann, B. (2011): Das Klima in Bochum. Über 100 Jahre stadtklimatologische Messungen. GeoLoge, Nr. 1.
- Hetzel, I. (2013): Physische Geographie von Bochum und Herne Naturräume, Geologie, Böden, Klima und Vegetation im mittleren Ruhrgebiet. Veröff. Bochumer Bot. Ver. 5(2), S. 7-32.
- Köppen, W. (1936): Das Geographische System der Klimate. Verlag Gebrüder Bornträger, 44 S.
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M., Sühring, M., Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives, Geosci. Model Dev., 8, 2515–2551, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>, 2015.
- Maronga B., Banzhaf S., Burmeister C., Esch T., Forkel R., Fröhlich D., Fuka V., Gehrke K. F., Geletič J., Giersch S., Gronemeier T., Groß G., Heldens W., Hellsten A., Hoffmann F., Inagaki A., Kadasch E., Kanani-Sühring F., Ketelsen K., Khan B. A., Knigge C., Knoop H., Krč P., Kurppa M., Maamari H., Matzarakis A., Mauder M., Pallasch M., Pavlik D., Pfafferoth J., Resler J., Rissmann S., Russo E., Salim M., Schrempf M., Schwenkel J., Seckmeyer G., Schubert S., Sühring M., von Tils R., Vollmer L., Ward S., Witha B., Wurps H., Zeidler J., Raasch S. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. Geoscientific Model Development 13:3, 1335–1372. DOI:10.5194/gmd-13-1335-2020.
- Staiger, H., Laschewski, G., Grätz, A. (2012): The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. Int. J. Biometeorol. No 56, S. 165 – 176.

Impressum

Regionalverband Ruhr
Die Regionaldirektorin
Kronprinzenstraße 35
45128 Essen

Kontakt

T. +49 (0)201 2069-0
www.rvr.ruhr
#metropoleruhr

Inhaltlich verantwortlich

Regionalverband Ruhr
Bereich Umwelt und Grüne Infrastruktur
Referat Klima und Umweltschutz
Redaktion Projektteam Offensive Grüne
Infrastruktur
Dr. Wolfgang Beckröge, Thorsten Stock

Herausgeber

Regionalverband Ruhr
Kronprinzenstraße 35
45128 Essen

Projektleitung

Dr. Andreas Müller, chromgruen Planungs-
und Beratungs- GmbH & Co. KG
Georg Ludes, Lohmeyer GmbH
Dr. Dirk Pavlik, GEO-NET Umweltconsulting
GmbH
Dr. Wolfgang Beckröge, Thorsten Stock,
Regionalverband Ruhr

Autor*innen

Palm-4U Präprozessor Bedienungshandbuch:
Andreas Franzen, Dr. Andreas Müller, chrom-
gruen Planungs- und Beratungs- GmbH & Co.
KG, Velbert

Stadtweite Klimasimulationen Bochum
Abschlussbericht:

Dr. Benedict Brecht, Dr. Rowell Hagemann,
Patrick Hogan, Jessica Lehmkuhler,
Georg Ludes, Lohmeyer GmbH, Dorsten

Digitale Klimaanpassung – Klimasimulationen
für ein Untersuchungsgebiet im Bochumer
Stadtteil Gleisdreieck Schlussbericht:
Cornelia Burmeister, Katja Lohmüller, Dr. Dirk
Pavlik, GEO-NET Umweltconsulting GmbH,
Hannover

Konzept und Gestaltung Einband

Regionalverband Ruhr,
Referat Strategische Entwicklung und
Kommunikation,
Team Kommunikationsdesign

Layout Innenteil

chromgruen Planungs- und Beratungs-
GmbH & Co. KG, Lohmeyer GmbH, GEO-NET
Umweltconsulting GmbH

Bildnachweise

Palm-4U Präprozessor Bedienungshandbuch:
chromgruen Planungs- und Beratungs-
GmbH & Co. KG

Stadtweite Klimasimulationen Bochum
Abschlussbericht:
Lohmeyer GmbH

Digitale Klimaanpassung – Klimasimulationen
für ein Untersuchungsgebiet im Bochumer
Stadtteil Gleisdreieck Schlussbericht:
Cross Architecture Abb. 3, Esri, Maxar, Earth-
star Geographics, USDA FSA, USGS, Aero-
grid, IGN, IGP, and the GIS User Community
Abb. 5, GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Abb. 1 und Abb. 11 bis 24, Gerber Architekten
Abb. 6, Kemper, Steiner & Partner Abb. 8,
RKW Architektur Abb. 2, Rübsamen Partner
Architekten BDA Ingenieure Abb. 7, Sinai Ge-
sellschaft von Landschaftsarchitekten mbH
Abb. 4, Stadt Bochum -Luftbildatlas Abb. 9,
Stadt Zürich – Fachplanung Hitzeminderung
Abb. 10

Datum: Februar 2021



Dieses Projekt wird von der Bezirksregierung
Münster aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes NRW gefördert.

#grüneinfrastruktur
#menschnaturraum
#greeninfrastructure

www.grueneinfrastruktur.rvr.ruhr