

Mikroklimatische Untersuchung für das Projekt B18-028 Deutschherrenstraße in Bonn

Bericht GA 7450-1 vom 30.09.2022 / Druckdatum: 11.10.2022

Auftraggeber: Lubig Real Estate GmbH & Co. KG
Dinxperloer Straße 18-22
46399 Bocholt

Bericht-Nr.: GA 7450-1

Datum: 30.09.2022 / Druckdatum: 11.10.2022

Ansprechpartner/in: Herr Siebers/ Frau Zühlke

Dieser Bericht besteht aus insgesamt 47 Seiten,
davon 32 Seiten Text und 15 Seiten Anlagen.

VMPA anerkannte
Schallschutzprüfstelle
nach DIN 4109

Leitung:

Dipl.-Phys. Axel Hübel

Dipl.-Ing. Heiko Kremer-Bertram
Staatlich anerkannter
Sachverständiger für
Schall- und Wärmeschutz

Dipl.-Ing. Mark Bless

Anschriften:

Peutz Consult GmbH

Kolberger Straße 19
40599 Düsseldorf
Tel. +49 211 999 582 60
Fax +49 211 999 582 70
dus@peutz.de

Borussiastraße 112
44149 Dortmund
Tel. +49 231 725 499 10
Fax +49 231 725 499 19
dortmund@peutz.de

Pestalozzistraße 3
10625 Berlin
Tel. +49 30 92 100 87 00
Fax +49 30 92 100 87 29
berlin@peutz.de

Gostenhofer Hauptstraße 21
90443 Nürnberg
Tel. +49 911 477 576 60
Fax +49 911 477 576 70
nuernberg@peutz.de

Geschäftsführer:

Dr. ir. Martijn Vercammen
ir. Ferry Koopmans
AG Düsseldorf
HRB Nr. 22586
Ust-IdNr.: DE 119424700
Steuer-Nr.: 106/5721/1489

Bankverbindungen:

Stadt-Sparkasse Düsseldorf
Konto-Nr.: 220 241 94
BLZ 300 501 10
DE79300501100022024194
BIC: DUSSEDDXXX

Niederlassungen:

Mook / Nimwegen, NL
Zoetermeer / Den Haag, NL
Groningen, NL
Eindhoven, NL
Paris, F
Lyon, F
Leuven, B

peutz.de

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Situation und Aufgabenstellung..... | 4 |
| 2 | Bearbeitungsgrundlagen, zitierte Normen und Richtlinien..... | 5 |
| 3 | Örtliche Gegebenheiten..... | 7 |
| 4 | Grundlagen..... | 8 |
| 4.1 | Stadtklima..... | 8 |
| 4.1.1 | Lufttemperatur..... | 8 |
| 4.1.2 | Windfeld..... | 9 |
| 4.1.3 | Thermischer Komfort..... | 9 |
| 4.2 | Lokalklima im Umfeld des Planvorhabens..... | 10 |
| 4.3 | Auswirkungen des Klimawandels..... | 11 |
| 5 | Berechnungsmodell..... | 14 |
| 5.1 | Modellbeschreibung..... | 14 |
| 5.2 | Aufbau der Rechengitter..... | 14 |
| 5.3 | Eingangsdaten..... | 15 |
| 5.3.1 | Gebäude..... | 15 |
| 5.3.2 | Vegetation..... | 16 |
| 5.3.3 | Oberflächen..... | 16 |
| 5.3.4 | Initialisierungsparameter..... | 18 |
| 6 | Ergebnisse..... | 21 |
| 6.1 | Durchlüftung..... | 21 |
| 6.2 | Lufttemperaturen..... | 23 |
| 6.2.1 | 14 Uhr..... | 23 |
| 6.2.2 | 4 Uhr..... | 24 |
| 6.3 | Bioklima (PET)..... | 25 |
| 7 | Planungsempfehlungen..... | 27 |
| 8 | Zusammenfassung..... | 30 |

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Bewertung des thermischen Komforts mit PET..... 10
Tabelle 5.1: Initialisierungsparameter für die Modellberechnungen.....20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Prognose der Entwicklung der sommerlichen Wärmebelastung an der
Deutschherrenstraße in Bonn..... 13
Abbildung 5.1: Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit beim Simple-
Forcing..... 18

1 Situation und Aufgabenstellung

Im Auftrag der Ten Brinke Projektentwicklung GmbH & Co. KG soll der Bebauungsplan B 18-028 „Deutschherrenstraße“ in Bonn aufgestellt werden. Auf einem ca. 1,3 ha großen, zur Zeit unbebauten Grundstück soll ein Quartier mit Wohnraum sowie Einzelhandelsflächen entstehen.

Im Rahmen des Bebauungsplanverfahrens sind die Auswirkungen des Planvorhabens auf das lokale Mikroklima zu untersuchen. Hierzu werden mithilfe des mikroskaligen Stadtklimamodells ENVI-met in der aktuellen Version 5.0.3 (Summer Release 2022) Simulationsrechnungen für den Ist- und den Planfall in zwei Hauptwindrichtungen für einen heißen Sommertag durchgeführt. In die Berechnungen fließen Gebäudestellungen und -höhen, der Vegetationsbestand sowie die Oberflächenbeschaffenheit ein.

Die Beurteilung der klimatischen Veränderungen erfolgt anhand der simulierten Temperaturverhältnisse zu zwei verschiedenen Uhrzeiten sowie anhand der bioklimatischen Kenngröße des PET-Wertes am Nachmittag. Zusätzlich werden die Windverhältnisse in einer Höhe von 1,5 m und 14,5 m über Grund ausgewertet und dargestellt.

Die den Berechnungen der Istsituation zugrunde liegenden örtlichen Gegebenheiten sowie die Abgrenzung des Plangebietes werden in Anlage 1 dargestellt. Anlage 2 beinhaltet einen Überblick über die lokalen Gegebenheiten für den Planfall.

2 Bearbeitungsgrundlagen, zitierte Normen und Richtlinien

| Titel / Beschreibung / Bemerkung | | Kat. | Datum |
|----------------------------------|--|------|-------------------------|
| [1] | Vorentwurfsplanung - Dachaufsicht Studio grüngrau Landschaftsarchitektur GmbH | P | 25.02.2022 |
| [2] | Pläne Projekt B18-028 Deutscherherrenstraße BauWerkStadt Partnerschaft von Architekten mbB | P | 25.07.2022 |
| [3] | Baumkataster der Stadt Bonn Stadt Bonn: opendata.bonn.de/dataset/baumstandorte | P | 2021 |
| [4] | Stadtklimaanalyse Bonn Stadt Bonn, Amt für Umwelt, Verbraucherschutz und lokale Agenda | Lit. | 2020 |
| [5] | Klimaatlas NRW Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas | | Abruf am: 03.02.2022 |
| [6] | Zeitreihe der Windrichtung und -geschwindigkeit der LANUV-Station Bonn-Auerberg aus dem Zeitraum 2011-2020 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen | P | 2022 |
| [7] | LOD2-Modell des Untersuchungsgebietes im CityGML-Format Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [8] | Normalisiertes digitales Oberflächenmodell (NDOM) des Untersuchungsgebietes Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [9] | Digitales Geländemodell (DGM) – Gitterweite 2 m Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [10] | Digitale Orthophotos (DOP) Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [11] | Amtliche Basiskarte (ABK) des Untersuchungsgebietes Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [12] | INSPIRE-WFS NW Bodenbedeckungsvektor ALKIS Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [13] | BK 50; Bodenkarte von NRW 1:50.000 Geoportal NRW: https://www.geoportal.nrw/ | P | 2022 |
| [14] | Rechenmodell ENVI-met, Version 5.0.3 - Summer Release 2022 ENVI_MET GmbH https://www.envi-met.com/ | Lit. | 2022 |
| [15] | GALK-Straßenbaumliste GALK e.V., Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz: http://strassenbaumliste.galk.de/ | P | 2022 |

| Titel / Beschreibung / Bemerkung | | Kat. | Datum |
|----------------------------------|---|---|---------------------------|
| [16] | VDI 3787, Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. | Verein Deutscher Ingenieure | RIL 2021 |
| [17] | VDI 3787, Blatt 8. Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel | Verein Deutscher Ingenieure | RIL 2020 |
| [18] | Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels | A. Matzarakis, in Umweltmeteorologie, Nr. 3, 2013 | Lit. 2013 |
| [19] | Stadtklima | S. Henninger & S. Weber, 2019 | Lit 2019 |
| [20] | Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume | Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-Verbraucherschutz NRW | Lit 2011 |
| [21] | Meteorologie | H. Häckel, 4. Auflage | Lit 1999 |
| [22] | Klimatologie | W. Kuttler, 2. Auflage | Lit 2013 |
| [23] | Stadtklima in Hamburg | Heinke Schlünzen, K., Riecke W., Bechtel B. et al. Enthalten in: Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer Spektrum, S. 37-53 | Lit. 2018 |
| [24] | DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit | Deutsches Institut für Normung e.V. www.din.de | N 2006 |
| [25] | Beaufort-Skala | Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100310&lv3=100390 | Lit. Abruf am: 23.02.2022 |

Kategorien:

| | | | |
|--------|-----------------------|-----|----------------------------------|
| G | Gesetz | N | Norm |
| V | Verordnung | RIL | Richtlinie |
| VV | Verwaltungsvorschrift | Lit | Buch, Aufsatz, Berichtigung |
| RdErl. | Runderlass | P | Planunterlagen / Betriebsangaben |

3 Örtliche Gegebenheiten

Das Plangebiet befindet sich im Bonner Stadtteil Pennenfeld an der Deutschherrenstraße, welche westlich des Plangebietes verläuft. Im Norden begrenzen das Schenkpfädchen und die Paracelsusstraße das Grundstück. Zu allen Seiten grenzt Wohnbebauung an das ca. 1,3 ha große, zur Zeit unbebaute Plangebiet an.

Nördlich des Plangebietes liegt in ca. 270 m Entfernung der Sportpark Pennefeld. Im Nordosten liegt zwischen der Mallwitzstraße und der Drachenburgstraße ein Gewerbe- bzw. Industriegebiet in ca. 300 m Entfernung. Dahinter verläuft eine Bahnstrecke sowie die B9. Der Rhein befindet sich etwa 1,3 km östlich des Plangebietes. Richtung Südosten und Süden befinden sich Wohngebäude und in ca. 500 m Entfernung liegen landwirtschaftlich genutzte Flächen. Im Westen liegt hinter Wohngebieten ein Wald in etwa 420 m Entfernung.

Mit Realisierung des Bauvorhabens sollen auf dem Grundstück Wohngebäude in Kombination mit Einzelhandelsflächen entstehen. Die Erschließung des Quartiers erfolgt über das Schenkpfädchen, welches im Westen an die Deutschherrenstraße und im Nordosten an die Paracelsusstraße angeschlossen ist. Entlang der Erschließung befinden sich zwei Einfahrten zu Tiefgaragen sowie eine Einfahrt für den Anlieferungsverkehr des Einzelhandels. Das Plangebiet wird im Norden durch eine Hecke von den nördlich gelegenen Grundstücken getrennt. Im Bereich der Anlieferung ist eine Lärmschutzwand vorgesehen.

Das Quartier kann zu Fuß oder mit dem Rad durchquert werden. Zusätzlich zu den Fahrradstellplätzen in den Tiefgaragen befinden sich auch oberirdisch weitere Stellplätze und Boxen. Das Plangebiet wird mit Rasenflächen, Gräserpflanzungen sowie Bäumen durchgrünt. Die Gebäude sind mindestens mit einer extensiven Begrünung ausgestattet und auf einem Großteil der Dächer befinden sich Photovoltaikanlagen. Einzelne Fassadenteile sind mit Rankpflanzen begrünt.

4 Grundlagen

4.1 Stadtklima

Durch die Umgestaltung der natürlichen Oberflächen und ihrer Eigenschaften wird lokal das Klima verändert. In urbanen Gebieten mit ihren zahlreichen künstlichen Materialien und Formen resultiert daraus das Stadtklima [23].

4.1.1 Lufttemperatur

Durch die Überwärmung von Stadtgebieten, die im Allgemeinen als städtische Wärmeinsel bezeichnet wird, sind im Vergleich zur ländlichen Umgebung bodennah höhere Lufttemperaturen zu verzeichnen. Im Jahresmittel beträgt der Temperaturunterschied zwischen 1 und 2 K, in den Sommermonaten kann die Differenz mehr als 10 K betragen [21]. Das Maximum der städtischen Wärmeinsel bildet sich vor allem in den späten Abendstunden sowie in der Nacht aus. Tagsüber werden deutlich geringere Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland beobachtet [23].

Dem Überwärmungseffekt, der üblicherweise vom Stadtrand hin zum Stadtzentrum zunimmt, liegen verschiedene Ursachen zugrunde. Zum einen trägt eine veränderte Energiebilanz dazu bei, dass im Stadtgebiet verschiedene raum-zeitliche Ausprägungen von Wärmeinseln auftreten. Künstliche Baumaterialien können aufgrund ihres geringen Reflexionsvermögens und der hohen Wärmeleitfähigkeit tagsüber die einfallende kurzweilige Sonneneinstrahlung besonders gut absorbieren, was zur Bildung hoher Oberflächentemperaturen führen kann. Die tagsüber absorbierte Strahlung wird nachts in Form von langwelliger Rückstrahlung an die unteren Luftschichten abgegeben, sodass daraus hohe nächtliche Temperaturen resultieren. Zum anderen trägt die anthropogene Wärmeerzeugung im privaten und gewerblichen Bereich zu einer Erhöhung der Lufttemperatur bei.

Die raum-zeitliche Ausprägung der städtischen Überwärmung hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen neben geographischen Gegebenheiten wie Lage, Topographie und Relief auch meteorologischen Rahmenbedingungen wie Witterung und Wetterlagen. Darüber hinaus ist die Lufttemperatur in Städten stark an die Bebauungsdichte, die Flächennutzungsanteile (Versiegelung, Grün- und Wasserflächen), die thermischen Eigenschaften der Oberflächen und den Grad der anthropogenen Wärmefreisetzung gebunden [19].

Für die menschliche Gesundheit stellen die erhöhten Lufttemperaturen im Stadtgebiet ein erhöhtes Risiko dar. So erhöht sich die Gefahr für Hitzestress und vor allem ältere Menschen, vorerkrankte Personen oder Kleinkinder können sich häufig nur unzureichend an die erhöhte Wärmebelastung anpassen.

4.1.2 Windfeld

Städte, insbesondere Großstädte, stellen durch einen Komplex aus Grünflächen, Straßenzügen, Parkplätzen und verschiedensten Bauweisen eine äußerst strukturierte Oberfläche dar. Dementsprechend zeichnet sich ein Stadtkörper vor allem durch eine erhöhte aerodynamische Rauigkeit gegenüber dem nicht bebauten, unbewaldeten Umland aus [21].

Wesentliche Effekte einer erhöhten Oberflächenrauigkeit sind die Beeinflussung der Strömungsrichtung, die Verminderung der bodennahen Windgeschwindigkeit durch Reibung an der Oberfläche, häufigere Windstillen sowie Auswirkungen auf das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil. Dabei hängt der Reibungseinfluss maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Durch Wechselwirkungen zwischen der Bebauung und der Windströmung prägen sich in Abhängigkeit der Anordnung der Gebäude charakteristische Windfelder aus. Mit einer zunehmend dichteren Bebauung wird die Strömung oberhalb sowie im Bereich innerhalb der Bebauung zunehmend gestört. Jedoch sinkt in der Regel mit zunehmender Höhe der Widerstand, sodass in Abhängigkeit von der atmosphärischen Schichtung und dem Grad der Bodenrauigkeit mit zunehmender Höhe höhere Windgeschwindigkeiten auftreten [19]. Auch Kanalisierungseffekte in Straßenschluchten können innerhalb eines Stadtgebietes zu höheren Windgeschwindigkeiten führen. Weiterhin können sich beim Durchströmen der Stadtstrukturen mechanisch und thermisch bedingte Turbulenzen ausbilden [22].

4.1.3 Thermischer Komfort

Das physiologische Wärmeempfinden des Menschen wird nicht nur von der Lufttemperatur, sondern auch von den Einstrahlungsbedingungen (jahres- und tageszeitliche Varianz, Schattenwurf, langwellige Abstrahlung von Objekten in der Umgebung), der Windgeschwindigkeit sowie der Luftfeuchtigkeit beeinflusst [18]. Dabei ist die Lufttemperatur nicht immer der maßgebliche Faktor, sondern je nach Situation und Tageszeit können auch die Strahlungs- und Windverhältnisse dominant sein. Charakteristisch für das Stadtklima sind Wärmebelastungen bis zum Hitzestress, die insbesondere aus der zusätzlichen Abstrahlung der erwärmten Gebäude und der versiegelten Flächen sowie der infolge der erhöhten Rauigkeit gegenüber dem Umland reduzierten Windgeschwindigkeit resultieren.

In der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 [16] werden verschiedene Methoden zur Quantifizierung des thermischen Komforts aufgeführt. Im Folgenden wird zur Beurteilung des thermischen Komforts die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) herangezogen. Die PET beschreibt das thermische Empfinden bei wechselnden Umgebungsbedingungen. Eine thermische Belastung kann sowohl durch Kälte (niedriger PET-Wert) als auch durch Hitze (hoher PET-Wert) verursacht werden. Neben der Temperatur berücksichtigt der PET-Wert die für die Beschreibung des physiologischen Wärmeempfindens notwendigen Parameter Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung. Ein

PET-Wert zwischen 18 °C und 23 °C beschreibt ein Temperaturempfinden, das als behaglich bezeichnet wird.

Die durch den PET-Wert definierten Klassen des thermischen Komforts sind in der nachfolgenden Tabelle 4.1 dargestellt:

Tabelle 4.1: Bewertung des thermischen Komforts mit PET

| PET | Thermisches Empfinden | Thermophysiological Belastungsstufe |
|---------------|-----------------------|-------------------------------------|
| < 4 °C | sehr kalt | extreme Kältebelastung |
| 4 °C – 8 °C | kalt | starke Kältebelastung |
| 8 °C – 13 °C | kühl | mäßige Kältebelastung |
| 13 °C – 18 °C | leicht kühl | schwache Kältebelastung |
| 18 °C – 23 °C | behaglich | keine thermische Belastung |
| 23 °C – 29 °C | leicht warm | schwache Wärmebelastung |
| 29 °C – 35 °C | warm | mäßige Wärmebelastung |
| 35 °C – 41 °C | heiß | starke Wärmebelastung |
| > 41 °C | sehr heiß | extreme Wärmebelastung |

4.2 Lokalklima im Umfeld des Planvorhabens

Zur stadtklimatologischen Einordnung des Plangebietes wird die Klimaanalyse der Stadt Bonn aus dem Jahr 2019 [4] herangezogen. Grundlage dieser Klimaanalyse sind mesoskalige Klimasimulationen für das gesamte Stadtgebiet. Aus den Modellberechnungen wurden u.a. Planungshinweise abgeleitet. Diese sind in den Planungshinweiskarten für die Tag- und die Nachtsituation zusammengefasst. Auszüge dieser Planungshinweiskarten für das Umfeld sind in Anlage 3 (Tagsituation) und Anlage 4 (Nachtsituation) dargestellt. Die Anlagen zeigen, dass in den Berechnungen im südöstlichen Teil des Plangebietes die ehemalige gewerbliche Nutzung und nicht die aktuelle brachliegende Fläche eingeflossen ist.

Die Planungshinweiskarte für den Tag weist dem Grundstück eine „günstige humanbioklimatische Situation“ zu. Gemäß der Beschreibung in der Legende weist die Fläche einen ausreichenden Grünanteil auf und sollte so erhalten bleiben. Der auf der Karte dargestellte Hauptausgleichsraum auf dem Plangebiet ist in der aktuellen Situation allerdings nicht mehr gegeben. Als Hauptausgleichsräume werden Flächen bezeichnet, die frei zugänglich sind und die der Stadtbevölkerung als Erholungsraum dienen können. Das Gelände sowie die auf den Luftbildern zu sehende nördlich gelegene Grünfläche, welche zuvor bereits als Garten zur Bebauung an der Deutschherrenstraße gehörte, ist umzäunt. Die Zugänglichkeit für die Öffentlichkeit war aufgrund dessen in den letzten 70 Jahren nicht gegeben. Der in der Pla-

nungshinweiskarte ausgewiesene Bereich kann im Sinne eine Ausgleichsfläche daher nicht genutzt werden.

Den Flächen im Umfeld des Plangebietes wird hauptsächlich eine günstige bzw. weniger günstige klimatische Situation zugeordnet. Auf Flächen mit einer weniger günstigen Situation ist in Teilen mit Hitzebelastung zu rechnen, der mit geeigneten Maßnahmen entgegengewirkt werden sollte.

Aus der Planungshinweiskarte zur Nachtsituation geht hervor, dass im Areal eine günstige bioklimatische Situation herrscht. Dementsprechend besteht eine geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung bzw. zusätzlicher Bebauung unter Beachtung klimaökologischer Belange. Zwar sind keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Belastung notwendig, jedoch sollten bestehende Freiflächen und der Vegetationsanteil möglichst erhalten bleiben, um das günstige Bioklima zu sichern. Auch hier ist zu beachten, dass die Klimaanalyse auf Grundlage der damaligen Bebauung und nicht mit der heutigen Freifläche erstellt wurde.

4.3 Auswirkungen des Klimawandels

Städte werden bereits heute mit den Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert. Dazu gehören steigende Temperaturen, Hitzestress sowie eine Zunahme von Extremereignissen wie beispielsweise Starkregen. Mit Blick auf die Zukunft und unter dem Aspekt der zunehmenden Urbanisierung ist besonders in städtischen Gebieten mit einer Zunahme dieser Betroffenheit zu rechnen. Daher stehen diese vor der Herausforderung, Synergien zwischen Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren und umzusetzen. Das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Klima und Städtebau erlangt daher eine wachsende Bedeutung.

Um Aussagen zu möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen zu treffen, können komplexe Klimarechenmodelle herangezogen werden, die die physikalischen Prozesse im Klimasystem abbilden. Unter der Annahme verschiedener Klimaszenarien, die die zukünftige Entwicklung wie beispielsweise das Bevölkerungswachstum, den technischen Fortschritt oder den Energiemix berücksichtigen, können aus den Ergebnissen Klimaprojektionen aufgestellt werden.

Der Klimaatlas NRW [5] liefert für drei verschiedenen RCP-Klimaszenarien Informationen zur Entwicklung zukünftiger Klimavariablen und -kenntage aus regionalen Klimamodellen. Die RCP-Szenarien kamen im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates zum Einsatz und stehen für repräsentative Konzentrationspfade (englisch: Representative Concentration Pathways). Diese berücksichtigten bestimmte Szenarien von anthropogenen Treibhausgasemissionen, die den Energie- und Strahlungshaushalt der Erde und damit auch das Klima beeinflussen.

- RCP8.5: „weiter-wie-bisher“-Szenario
- RCP4.5: mittleres Szenario
- RCP2.6: „Klimaschutz-Szenario“ zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels

Für die Sommermonate Juni, Juli und August veranschaulichen die folgenden Grafiken die zukünftigen Entwicklungen der mittleren Lufttemperaturen sowie die Anzahl der heißen Tage (Tagesmaximum > 30 °C) und Tropennächte (Tagesminimum > 20 °C) im Untersuchungsgebiet auf Basis des Klimaatlas NRW für den Referenzzeitraum 1971-2000 sowie die Projektionen für die „nahe Zukunft“ 2031-2060 und für die „ferne Zukunft“ 2071-2100. Diese Prognosewerte beruhen auf Ergebnissen verschiedener Modellrechnungen, denen unterschiedliche Eingangsdaten, Randannahmen und Modellierungstechniken zu Grunde liegen. Die Ergebnisse der verschiedenen Modellrechnungen sind aber grundsätzlich als gleich wahrscheinlich anzusehen. Für die Auswertung wird daher das 50. Perzentil der Klimaprojektionen herangezogen. Das 50. Perzentil teilt hierbei die Berechnungsergebnisse, so dass 50 % der Modelle geringere Ergebnisse und 50 % der Modelle größere Ergebnisse zeigen.

Bei Zugrundelegung des Szenarios RCP2.6 ist demnach davon auszugehen, dass:

- die mittlere Lufttemperatur im Sommer bis Ende des Jahrhunderts um 1,1 °C steigt,
- sich die Anzahl der heißen Tage und der Tropennächte bis Ende des Jahrhunderts in etwa verdoppelt.

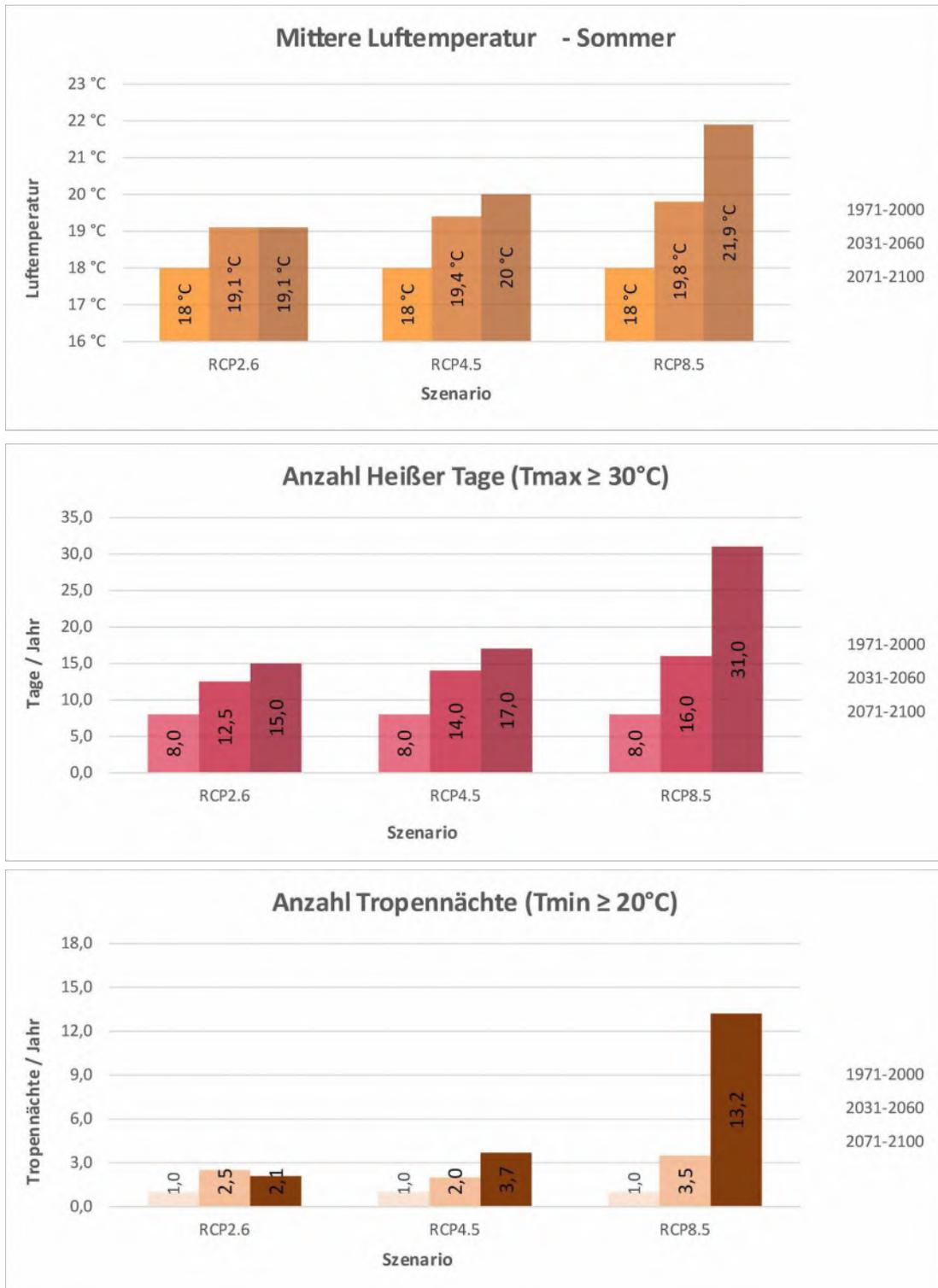
Für das mittlere Szenario RCP4.5 wird prognostiziert, dass gegenüber dem Referenzzeitraum 1970-2000:

- die mittlere Lufttemperatur im Sommer von 18,0 °C auf 20,0 °C in der „fernen“ Zukunft ansteigt,
- die Anzahl der heißen Tage bis zum Jahr 2100 von 8 auf 17 ansteigt und im Schnitt 3,7 Tropennächte pro Jahr auftreten.

Die Klimamodelle geben für das worst-case-Szenario RCP8.5 an, dass gegenüber dem Referenzzeitraum 1970-2000:

- sich die sommerlichen Temperaturen im Mittel um 1,8 °C (2031-2060) bzw. um 3,9 °C (2071-2100) erhöhen
- sich bis zum Ende des Jahrhunderts die Anzahl der heißen Tage fast vervierfacht und im Mittel 13,2 Tropennächte pro Jahr auftreten werden.

Abbildung 4.1: Prognose der Entwicklung der sommerlichen Wärmebelastung an der Deutscherrenstraße in Bonn



5 Berechnungsmodell

Die infolge des Planvorhabens zu erwartenden Klimaänderungen im lokalen Umfeld des Bauvorhabens werden mit dem mikroskaligen Stadtklimamodell ENVI-met in der Version 5.0.3 (Summer Release 2022) [14] für die nachfolgend aufgeführten Varianten mit der bei sommerlichen Wetterlagen auftretenden Hauptwindrichtungen Südost und Nordwest durchgeführt:

Istfall: brachliegendes Grundstück, aktueller Vegetationsbestand und aktuelle Oberflächenbeschaffenheit

Planfall: Zukünftige Bebauungssituation nach Realisierung der Planung entsprechend der Vorentwurfsplanung [1] sowie von Grundrissen, Ansichten und Schnitten [2]

Anhand der Ergebnisse dieser beiden Varianten werden anschließend Planungsempfehlungen zur Minimierung negativer lokalklimatischer Folgen erarbeitet.

5.1 Modellbeschreibung

ENVI-met in der Version 5.0.3 ist ein dreidimensionales nicht-hydrostatisches Modell zur Simulation der Wechselwirkungen zwischen Oberflächen, Pflanzen und der Luft. Es wurde für die Mikroskala mit typischen horizontalen Gitterauflösungen zwischen 0,5 und 5 m und typischen Simulationszeiten zwischen 24 und 48 Stunden mit Zeitschritten zwischen 1 und 5 Sekunden entwickelt. Diese sowohl räumlich als auch zeitlich sehr detaillierte Auflösung erlaubt die Analyse kleinräumiger Wechselwirkungen zwischen Gebäuden, Oberflächen, Pflanzen und der Atmosphäre.

Zur Berechnung nutzt ENVI-met verschiedene Untermodelle, die miteinander gekoppelt sind. Einen Überblick über die miteinander gekoppelten Modelle gibt die Anlage 5.

Als Ergebnis liefert das Rechenmodell die räumlich und zeitlich variierenden Ausgabegrößen für Boden, Luft, Gebäude und Vegetation. Berechnet werden unter anderem Temperaturen, Feuchte, Strahlungsparameter, bioklimatische Kenngrößen (z. B. PET- und PMV-Werte) sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

5.2 Aufbau der Rechengitter

Die Ausdehnung des Untersuchungsraumes wurde so groß definiert, dass zum einen das gesamte Plangebiet abgedeckt ist und zum anderen Aussagen zu den klimatischen Auswirkungen in den umliegenden Flächen getroffen werden können.

Die Modellrechnungen erfordern die Definition eines Rechengebietes und eine Aufteilung dieses Gebietes in viele quaderförmige Rechenzellen. Für die vorliegende Untersuchung wurde eine horizontale Gitterauflösung von 2,5 m realisiert. Mikroskalige Effekte durch Kleinstrukturen wie Bäume und Einzelgebäude werden bei dieser Gitterauflösung noch hinreichend genau abgebildet. Die Ausdehnung des Rechengebietes beträgt 750 m in x- und 750 m in y-Richtung.

Für die Auflösung der Rechenzellen in der Vertikalen wurde ein variabler Ansatz mit in der Höhe zunehmenden vertikalen Ausdehnungen der Gitterboxen gewählt. So wurde für die unteren zehn Schichten eine feine Vertikalaufklärung von 1,0 m festgelegt. Ab der Modellhöhe von 15 m erhöht sich die vertikale Zellausdehnung um jeweils 12 %. Bei einer Anzahl von 30 Gitterzellen in z-Richtung ergibt sich hieraus eine maximale Modellhöhe von 56,75 m.

5.3 Eingangsdaten

5.3.1 Gebäude

Gebäude fließen in die ENVI-met Simulationsrechnungen mit ihrer Lage und Höhe sowie den verbauten Materialien und ihren thermischen und strahlungstechnischen Eigenschaften ein.

Lage und Höhe der Bestandsbebauung außerhalb des Plangebietes im Untersuchungsgebiet wurden aus dem vom Land NRW zu Verfügung gestellten LOD2-Gebäudemodell [7] abgeleitet. Anlage 6 zeigt hierzu den berücksichtigten Gebäudebestand im Istfall, Anlage 7 enthält den Gebäudebestand sowie die Plangebäude im Planfall, welche auf Grundlage des Vorentwurfsplanung [1] sowie der Grundrisse, Ansichten und Schnitte [2] abgeleitet wurden. Für alle Plangebäude fließt in die Berechnungen zudem die Dach- und Fassadenvegetation entsprechend der Vorentwurfsplanung [1] mit ein.

Neben der Lage und Höhe müssen den Gebäuden in ENVI-met auch thermische und strahlungstechnische Eigenschaften zugewiesen werden. Hier wurden bei den Gebäudewänden und -dächern der Bestandsbebauung im Umfeld nach dunklen und hellen Oberflächen unterschieden. Den Plangebäuden wurde entsprechend den zur Verfügung gestellten Ansichten und Schnitte ein helles Oberflächenmaterial zugewiesen. Allen Dächern und Fassaden wurde der ENVI-met Standardaufbau (moderate Isolierung) zugeordnet. Nur das Reflexionsvermögen (Albedo) der äußersten Schicht wurde angepasst. Die Rauminnentemperatur beträgt bei allen Gebäuden zum Startzeitpunkt der Simulationsrechnung 20 °C.

5.3.2 Vegetation

Neben den Gebäuden ist die Vegetation eine weitere wichtige Einflussgröße zur Ausprägung des individuellen Stadtklimas. Der Einfluss von Bäumen und niedrigem Bewuchs auf das Mikroklima kann mit ENVI-met detailliert untersucht werden. In den Simulationsrechnungen werden u.a. die Verschattung durch die Baumkronen, die Verdunstung und Transpiration der Blätter und der Einfluss der Vegetation auf die Windverhältnisse berücksichtigt.

Neben der Wuchsform (Breite und Höhe des Baumes) muss für jeden im Modell platzierten Baum die Belaubungsdichte vorgegeben werden.

Die Erfassung der Wuchshöhe und Kronenbreite der Bäume im Untersuchungsgebiet erfolgte mithilfe des hochaufgelösten digitalen Oberflächenmodells (NDOM) [8].

Mit Hilfe des Baumkatasters der Stadt Bonn [3] konnte zudem die Baumart verschiedener Bäume im Umfeld des Plangebietes ermittelt werden. Auf Grundlage der im Internet veröffentlichten Straßenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz [15] und dem hier hinterlegten artspezifischen Parameter der Lichtdurchlässigkeit konnte anschließend der Belaubungsgrad abgeleitet werden. Hierbei entspricht eine geringe Lichtdurchlässigkeit einem sehr dichten Belaubungsgrad, eine mittlere Lichtdurchlässigkeit einem dichten Belaubungsgrad und eine starke Lichtdurchlässigkeit einem lichten Belaubungsgrad. Allen nicht im Baumkataster der Stadt Bonn erfassten Bäume wurde pauschal ein „dichter“ Belaubungsgrad zugewiesen.

Für die Berechnungen zum Planfall wurden die Standorte der Baumneupflanzungen der Vorentwurfplanung [1] entnommen. Für die geplanten Bäume wurde aus der Abstimmung mit dem Landschaftsarchitekturbüro studio grüngrau eine Höhe von 7 m und ein „dichter Belaubungsgrad“ abgeleitet.

Unversiegelten Bereichen im Untersuchungsgebiet ohne Baumbewuchs wurde im Istfall pauschal ein niedriger Bewuchs (Gras, Rasen) mit einer Wuchshöhe von 10 cm zugewiesen. Für den Planfall wurden die Begrünungsarten der Dachaufsicht [1] entnommen.

In Anlage 6 und Anlage 7 sind die in die Berechnungen eingehenden Vegetationsbestände für beide Planungssituationen dargestellt.

5.3.3 Oberflächen

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor zur Ausprägung des innerstädtischen Klimas ist die Oberflächenbeschaffenheit. So wird durch die erhöhte Oberflächenversiegelung die Verdunstung gegenüber einer Freifläche reduziert, was zu einer Erhöhung der Temperaturen führt. Auf versiegelten Flächen erfolgt zudem eine stärkere Wärmespeicherung der einfallenden

den kurzweiligen Strahlung. Diese Wärme wird nachts wieder an die Umgebungsluft abgegeben und sorgt für eine gegenüber dem Umland deutlich reduzierte Abkühlung.

Die benötigten Informationen zu den vorhandenen Bodenprofilen wurden auf Grundlage des Informationssystems „Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50.000 (BK50)“ [13] abgeleitet. Im Bereich des Plangebietes wurde eine Aufschüttung aus Schotter angenommen.

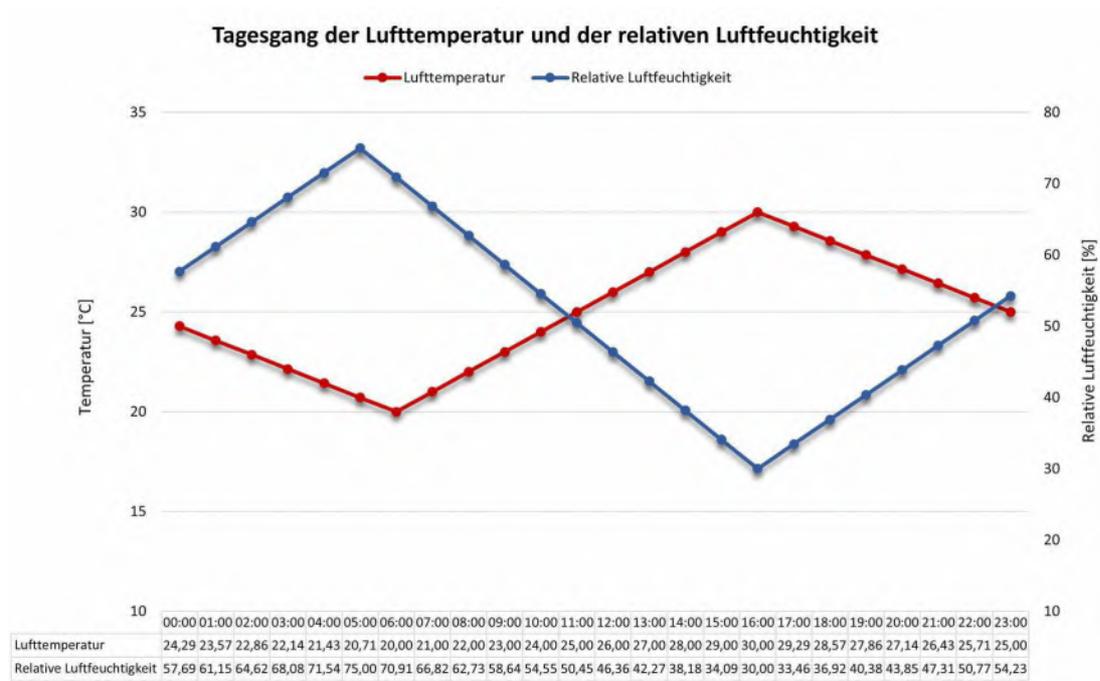
Die versiegelten Flächen im Bestand in- und außerhalb des Plangebietes wurden anhand aktueller Orthofotos [10] sowie anhand von ALKIS - Bodenbedeckungsdaten des Landes NRW [12] erfasst. Für Straßen wurde hierbei Asphalt, für weitere versiegelte Flächen wie z.B. Parkplätze Beton bzw. Pflaster als Versiegelungsmaterial vorgegeben. Die Ableitung der Oberflächenarten im Planfall erfolgte auf Grundlage der Vorentwurfsplanung [1]. Grundsätzlich wird in beiden Planungssituationen den unversiegelten Vegetationsflächen unterhalb der angesetzten Rasenfläche die zugrunde liegende Bodeneigenschaft zugewiesen.

Anlage 8 und Anlage 9 zeigen die ins Modell einfließenden Oberflächenbeschaffenheiten für den Ist- und Planfall.

5.3.4 Initialisierungsparameter

Innerhalb von ENVI-met können die tageszeitlichen Schwankungen der meteorologischen Parameter Lufttemperatur und relative Feuchte entweder über feste Startparameter oder durch ein sogenanntes „Simple-Forcing“ vorgegeben werden. Beim Simple-Forcing werden die Bedingungen am Einströmrand für jede Stunde des Tages explizit vorgegeben. Als meteorologischer Antrieb für die Klimamodelle wurde ein heißer Sommertag mit einer nachmittäglichen Maximaltemperatur von 30°C und einer nächtlichen Minimaltemperatur von 20°C gewählt. Die Tagesgänge der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit können der folgenden Abbildung 5.1 entnommen werden:

Abbildung 5.1: Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit beim Simple-Forcing



Ein weiterer wichtiger Initialisierungsparameter ist die Bodenfeuchte zum Startzeitpunkt der Simulation. Im vorliegenden Fall wurde eine Bodenfeuchte von 75 % in der oberflächennahen Bodenschicht angesetzt, d.h. dass noch ausreichend Wasser für Verdunstungsprozesse im Boden vorhanden ist. Dies repräsentiert die typischen Verhältnisse an einem Sommertag, dem wenige Tage zuvor Regenfälle vorausgegangen waren. Durch Verdunstung wirkt diese Feuchte kühlend auf die darüber liegenden Luftschichten. Ein komplett ausgetrockneter Boden nach einer Hitzeperiode hat demnach eine deutlich niedrigere Kühlleistung, was einerseits durch insgesamt höhere Temperaturen im Rechenmodell sichtbar werden würde und andererseits einen geringeren Unterschied zwischen versiegelten und unversiegelten Flächen zur Folge hätte. Im Gegensatz dazu ist ein gesättigter Boden nach anhaltendem sommerli-

chen Landregen mit einer höheren Kühlleistung und damit mit insgesamt niedrigeren Temperaturen und stärkeren Unterschieden zwischen den Oberflächenarten verbunden.

Für die Anströmung wurde eine konstante Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s in 10 m Höhe vorgegeben. Dies entspricht einer typischen sommerlichen Schwachwindsituation. Zur Ableitung der zu untersuchenden Windrichtungen wurden Wetterdaten von der LANUV-Station in Bonn-Auerberg herangezogen. Die Station liegt etwa 11 km nördlich des Untersuchungsgebietes.

Anlage 10 zeigt die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an dieser Station in allen Situationen des Auswertzeitraumes (links) sowie für heiße Tage mit einer Maximaltemperatur > 30 °C (rechts).

Die Windrichtungsverteilung für den gesamten Auswertzeitraum (2011-2020) zeigt, dass der Wind in Bonn bevorzugt aus einer südöstlichen Richtung weht. Sekundäre Windmaxima ergeben sich aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung.

Die Windrichtungsverteilung an Hitzetagen unterscheidet sich nur unwesentlich von der Windrichtungsverteilung des gesamten Auswertzeitraumes. Auch hier entfällt das Maximum auf die südöstliche Anströmungsrichtung, weitere Häufungen ergeben sich aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung.

Aufgrund der Windrichtungsverteilung an Hitzetagen werden die beiden Hauptanströmungsrichtungen Südost (120°) und Nordwest (290°) in den Simulationsrechnungen berücksichtigt.

Die Berechnungen umfassen insgesamt 35 h und starten um 5 Uhr zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs. Für die Ergebnisanalyse werden die Modellausgaben des zweiten Tages genutzt. Der erste Tag dient lediglich als Modell-Einschwingphase.

Als Eingangsparameter zur Berechnung des thermischen Komforts mittels des PET-Wertes werden die Standardeinstellung gemäß der Norm DIN EN ISO 7730 verwendet [24]. Dabei wird von einer 35-jährigen männlichen Person mit einem Körpergewicht von 75 kg und einer Größe von 1,75 m ausgegangen, die eine leichte körperliche Aktivität (langsames Gehen mit 4 km/h) ausübt. Hieraus ergibt sich eine metabolische Rate von 164,5 W. Weiterhin wird ein Bekleidungsindex von 0,9 einbezogen, was einem leichten Anzug entspricht.

Die nachfolgende Tabelle 5.1 dokumentiert die wichtigsten Initialisierungsparameter der Simulationsrechnungen:

Tabelle 5.1: Initialisierungsparameter für die Modellberechnungen

| Initialisierungsparameter | Startwert |
|--|--|
| Geographische Position | 50,66°N, 7,17°E |
| Startzeit der Simulation | 20.06., 05:00 Uhr |
| Dauer der Simulation | 35 Stunden |
| Lufttemperatur in 2 m über Grund | Simple Forcing (Spanne zwischen 20,0 °C und 30,0 °C) |
| Relative Feuchte in 2 m über Grund | Simple Forcing (Spanne zwischen 30 % und 75 %) |
| Rauigkeitslänge z0 | 0,1 m |
| Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund | 1,5 m/s |
| Windrichtung | 120° (Südost) & 290° (Nordwest) |
| Bodentemperatur | |
| Oberste Schicht (0-20 cm) | 20,5 °C |
| mittlere Schicht (20 – 50 cm) | 21,5 °C |
| tiefe Schicht (50 – 200 cm) | 20,3 °C |
| Gesteinsschicht (> 200 cm) | 20,3 °C |
| Bodenfeuchte | |
| Oberste Schicht (0-20 cm) | 75,0 % |
| mittlere Schicht (20 – 50 cm) | 80,0 % |
| tiefe Schicht (50 – 200 cm) | 70,0 % |
| Gesteinsschicht (> 200 cm) | 70,0 % |

6 Ergebnisse

Die Berechnungen wurden mit den dokumentierten Eingangsdaten für den Ist- und den Planfall für die zwei Hauptanströmungsrichtungen an Hitzetagen durchgeführt. Zur Bestimmung der thermischen Belastung wurden die beiden Kenngrößen Lufttemperatur und PET-Wert analysiert. Dabei wird die Lufttemperatur analog zur Klimaanalyse der Stadt Bonn [4] zu zwei verschiedenen Tageszeiten (14 Uhr und 4 Uhr) ausgewertet und dargestellt, in der Ergebnisauswertung zum PET-Wert wurde der Mittelwert im Zeitraum zwischen 12 und 16 Uhr visualisiert.

Für die Untersuchung zur Durchlüftung wurden die Windfelder um 14 Uhr analysiert und in zwei verschiedenen Höhengniveaus (bodennah, 1,5 m ü. Grund und in 14,5 m ü. Grund) ausgewertet und dargestellt. Die Windfelder zu anderen Tageszeiten unterscheiden sich nur unwesentlich von der 14 Uhr Situation und werden daher nicht analysiert.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist grundsätzlich zu beachten, dass die Berechnungsergebnisse die stadtklimatologischen Verhältnisse unter den zugrunde gelegten Einström- und Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 5.3.4) repräsentieren. Änderungen der aufgeführten Initialisierungsparameter würden zu abweichenden Ergebnissen führen.

6.1 Durchlüftung

Anlage 11 und Anlage 12 zeigen die simulierten Windgeschwindigkeiten für den Ist- und Planfall sowie die aus der Planung resultierenden Windgeschwindigkeitsdifferenzen für die untersuchten Windrichtungen (120° und 290°) in zwei Bezugsniveaus (1,5 m und 14,5 m) um 14 Uhr. Die berechneten Windfelder beziehen sich hierbei auf eine typische Schwachwindsituation mit einer ungestörten Anströmgeschwindigkeit von 1,5 m/s in 10 m Höhe. Gemäß der Beaufort-Skala [25] mit der die Auswirkungen des Windes beschrieben werden können, entspricht eine derartige Windgeschwindigkeit einem „leichten Zug“. Die Wirkung an Land wird als „kaum merklich, Rauch treibt leicht ab, Windflügel und Windfahnen unbewegt“ beschrieben.

In den Ergebnisdarstellungen zeigen grüne Farbtöne deutlich reduzierte Windgeschwindigkeiten an. Orangene Farbtöne weisen Flächen aus, in denen die mittlere Windgeschwindigkeit in etwa der ungestörten Freilandgeschwindigkeit entspricht.

Aufgrund der Bebauungsstruktur im Rechengebiet zeigt sich, dass die Durchlüftungssituation im Bestand in den dichter bebauten Bereichen des Untersuchungsgebietes aufgrund der erhöhten Rauigkeit gegenüber den ungestörten Freilandverhältnissen bereits deutlich reduziert ist. Bezogen auf die zu Grunde gelegte Anströmgeschwindigkeit von 1,5 m/s werden hier typischerweise Strömungsgeschwindigkeiten von unter 0,5 m/s erreicht. Diese Situation

ist typisch für eine städtische Bebauung und ist damit als üblich anzusehen. Unbebaute Freiflächen, die parallel zur Anströmungsrichtung verlaufen, fungieren mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 1,25 m/s als Belüftungsleitbahnen, so z.B. der Sportplatz im Nordosten des Untersuchungsgebietes, der Friedhof nordwestlich des Plangebietes sowie die derzeit unbebaute Plangebietsfläche.

Durch die Planung sinkt die Windgeschwindigkeit auf Grund der dichten Bebauung in beiden Anströmvarianten innerhalb des Plangebietes auf den verbleibenden Freiflächen auf weniger als 0,25 m/s. Bei einer Anströmung aus südöstlicher Richtung (120°) ergeben sich die größten Abnahmen an der Mündung des Schenkpfädchens in die Deutschherrenstraße am nordwestlichen Rand des Plangebietes. Die Windgeschwindigkeit sinkt hier um bis zu 1,0 m/s. Bei nordwestlicher Anströmung (290°) ergibt sich die stärkste Verringerung im Lee des östlich gelegenen L-förmigen Gebäudes. Es ergeben sich Verringerungen von mehr als 1 m/s, da der Wind durch das Gebäude aufgehalten bzw. umgelenkt wird.

Das Windfeld im Überdachniveau (s. Anlage 12) ist wie bereits das bodennahe Windfeld in beiden Anströmungssituationen sehr ähnlich. Es weist jedoch insgesamt höhere Windgeschwindigkeiten auf, da sich in diesem Auswertenniveau weniger Strömungshindernisse in Form von Gebäude und Bäumen befinden. Es ergeben sich Windgeschwindigkeiten von mehr als 1,5 m/s. In Bereichen mit hohen Gebäuden (> 14,5 m) sind die Windgeschwindigkeiten geringer und ähneln denen im bodennahen Niveau. Über dem unbebauten Plangebiet liegen die Windgeschwindigkeiten zwischen 1,0 m/s und 1,75 m/s.

Durch die Planung sinkt auch in 14,5 m Höhe die Windgeschwindigkeit bei beiden Anströmungen im Plangebiet sowie dessen näheren Umfeld. Die deutlichsten Windgeschwindigkeitsabnahmen ergeben sich im Bereich der höchsten Gebäude mit einer Höhe von 16 m. Abgesehen davon liegen die Verringerungen hauptsächlich zwischen 0,15 m/s und 0,45 m/s.

Die Veränderungen der bodennahen Durchlüftung beschränkt sich weitestgehend auf das Plangebiet und dessen direktes Umfeld. Etwa 50 m von den Plangebietsgrenzen entfernt, nehmen die Windgeschwindigkeiten wieder das ursprüngliche Niveau an. Signifikante Windgeschwindigkeitsminderungen, die deutlich über das Plangebiet hinausgehen, können daher ausgeschlossen werden. Im Überdachniveau reichen die Veränderungen etwas weiter über die Plangebietsgrenzen hinaus, da sich im direkten Umfeld keine hohen Gebäude (> 14,5 m) befinden, die bereits im Bestand zu einer Minderung der Windgeschwindigkeit führen könnten. Daher haben diese Veränderungen in dieser Höhe jedoch auch keine Auswirkungen auf die Nachbarbebauung.

6.2 Lufttemperaturen

Die Anlagen 13 und 14 zeigen die simulierten Lufttemperaturen zu den zwei Auswertezeiten für den Ist- und Planfall. Zusätzlich wird jeweils die planbedingte Temperaturdifferenz ausgegeben. In der oberen Abbildungsreihe sind jeweils die Ergebnisse für die südöstliche Anströmungsrichtung und in der unteren Abbildungsreihe die Ergebnisse für die nordwestliche Anströmungsrichtung dargestellt.

An den Einströmrändern des Untersuchungsgebietes werden zum Teil deutliche Abweichungen zum Temperaturniveau des restlichen Untersuchungsgebietes ausgewiesen. Diese Abweichungen resultieren aus modelltechnischen Randeffekten im Einströmbereich und sollten daher nicht weiter interpretiert werden. Verlässliche Ergebnisse sind etwa ab Entfernungen von 100 m zum Einströmrand zu erwarten.

6.2.1 14 Uhr

Anlage 13 zeigt die simulierten Lufttemperaturen in 1,5 m Höhe für die untersuchten Hauptwindrichtungen (120° und 290°) an Hitzetagen für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Temperaturdifferenzen zum nachmittäglichen Auswertzeitpunkt 14 Uhr.

Die Berechnungsergebnisse zum Istfall zeigen, dass sich überwärmte Zonen insbesondere in stark versiegelten Bereichen mit schlechter Durchlüftung ausprägen. Dies ist z.B. im Bereich der stark versiegelten Gewerbegebiete im Nordosten des Untersuchungsgebietes der Fall.

Negativ wirkt sich zudem aus, wenn sich versiegelte Bereiche in Ausrichtung der Anströmungsrichtung erstrecken, da dann der Luft über einen längeren Zeitraum die Wärme der erhitzten Oberflächen zugeführt werden kann.

Positiv stellen sich hingegen unversiegelte Freiflächen mit dichtem, verschattendem Baumbewuchs dar. Innerhalb des Untersuchungsgebietes treten durch die unterschiedlichen Nutzungen, Versiegelungsgrade und Vegetationsdichten Temperaturunterschiede von bis zu 2°C auf.

Auf dem Plangebiet liegt das Temperaturniveau bei beiden Anströmungsrichtungen zwischen 27,6 °C und 28,5 °C.

Durch die Realisierung der Planung verändert sich das Temperaturniveau infolge der neuen Nutzung sowohl innerhalb als auch außerhalb der Plangebietsgrenzen. Die Differenzdarstellungen für beide Anströmungsrichtungen zeigen, dass sich am Nachmittag hauptsächlich Abkühlungen ergeben. Diese liegen zwischen 0,1 °C und 0,6 °C. Bei Anströmung aus Nord-

west sinkt die Lufttemperatur auch um bis zu 0,8 °C. Diese Abkühlungen werden durch die thermischen Eigenschaften sowie die Verschattungswirkung der neuen Gebäude und Bäume hervorgerufen. Vor allem die Gebäude entziehen der Umgebungsluft Energie und speichern diese. Die Verschattung sorgt darüber hinaus dafür, dass sich die bodennahen Oberflächen gegenüber der Istsituation weniger stark erwärmen und somit auch der angrenzenden Luftschicht weniger Energie zugeführt werden kann. Bei südöstlicher Anströmung reichen Abkühlung von > 0,1°C bis zum nordwestlich gelegenen Friedhof und bei nordwestlicher Anströmung fast bis zum Floßweg, der südöstlich des Plangebietes liegt.

Eine geringfügige Erwärmung von maximal 0,2°C ergibt sich lediglich bei nordwestlicher Anströmung auf der Deutschherrenstraße in Höhe des Plangebietes. Diese ist auf die Wärmeabgabe der von der Sonne beschienenen Fassaden der Plangebäude entlang der Deutschherrenstraße zurückzuführen.

Insgesamt zeigt sich am Nachmittag jedoch bei beiden Anströmungsrichtungen eine Abkühlung. Eine zusätzliche thermische Belastung in den umgebenden Wohnquartieren am Nachmittag infolge des Planvorhabens ist daher auszuschließen.

6.2.2 4 Uhr

Anlage 14 zeigt die simulierten Lufttemperaturen in 1,5 m Höhe für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Temperaturdifferenzen für die untersuchten Anströmungsrichtungen um 4 Uhr.

In der Nacht zeigt sich ein deutlich geringeres Temperaturniveau als am Tag. Die Temperaturen in der Bestandssituation liegen bei beiden Anströmungsrichtungen zwischen 22,5 °C und 24,0 °C. Innerhalb des Plangebietes werden Temperaturen zwischen 22,5 °C und 23,5 °C ausgewiesen.

Anders als am Nachmittag werden durch die Realisierung des Planvorhabens am Morgen in Teilen des Plangebietes sowie in dessen Lee geringfügige Temperaturerhöhungen prognostiziert. Die Temperaturzunahme beträgt maximal 0,2 °C. Bei südöstlicher Anströmungsrichtung betrifft diese Erwärmung das nördlich gelegene Wohngebiet bis zu einem Verbindungsweg zwischen der Deutschherren- und der Paracelsusstraße. Bei nordwestlicher Anströmung reicht die Erwärmung in die südöstlich gelegenen Wohngebiete bis zur Drachenburgstraße.

Ursächlich für diese Erwärmung ist die in den heißen Nachmittagsstunden in den Plangebäuden aufgenommene Energie, welche in der Nacht wieder an die Umgebungsluft abgegeben wird.

6.3 Bioklima (PET)

Anlage 15 zeigt die simulierten PET-Werte für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Differenzen für die untersuchten Windrichtungen am Nachmittag. Die dargestellten PET-Werte sind das Ergebnis einer Mittelwertwertbildung aus den Simulationsergebnissen zwischen 12 und 16 Uhr.

Die Grafiken zeigen, dass infolge der gewählten Initialisierungsparameter (Sommertag mit einer maximalen Temperatur von 30°C) sowohl im Ist- als auch im Planfall im gesamten Untersuchungsgebiet mit Wärmebelastungen (vgl. Tabelle 4.1) gerechnet werden muss. Dabei ist die Wärmebelastung in von Bäumen und Gebäuden verschatteten Bereichen als schwach bis mäßig zu bezeichnen, in unverschatteten und versiegelten Bereichen mit eingeschränkter Durchlüftung wird die Wärmebelastung hingegen als extrem empfunden.

Die derzeitige bioklimatische Belastungen im Plangebiet reichen von schwach bis extrem. In unverschatteten Bereichen über versiegelten bzw. geschotterten Flächen steigen die Werte auf bis zu 43 °C an. Über bewachsenen Flächen die zudem verschattet sind ergeben sich Werte um 29 °C. Bei südöstlicher Anströmung ist die Belastung im Plangebiet teilweise etwas höher als bei nordwestlicher Anströmung. Positiv für das Belastungsniveau wirkt sich insbesondere die derzeitige gute Durchlüftung des Plangebietes aus.

Für die Plansituation wurde ergänzend zum bodennahen Auswertenniveau auch die thermische Belastung auf der Terrasse des Gebäudes an der Deutschherrenstraße ausgewertet und in den Ergebnisabbildungen dargestellt.

Durch die Realisierung der Planung steigt die thermische Belastung im Plangebiet gegenüber der Istsituation deutlich an. Bei beiden Anströmungsrichtungen wird hierbei ein ähnliches Belastungsniveau ausgewiesen. Extreme Wärmebelastungen mit einem PET-Wert von zum Teil mehr als 49 °C ergeben sich insbesondere in Bereichen, die während des gesamten betrachteten nachmittäglichen Zeitraums unverschattet sind. Diese sind insbesondere der Durchgang im Bereich der Fahrradstellplätze im östlichen Teil des Plangebietes sowie auf der Terrasse des an der Deutschherrenstraße gelegenen Gebäudes. Bereiche die von Gebäuden oder Bäumen verschattet sind weisen eine mäßige bis starke Wärmebelastung auf. Ursächlich für das insgesamt erhöhte Belastungsniveau sind vor allem die niedrigen Windgeschwindigkeiten sowie die Strahlungsreflexionen der Fassaden und versiegelten Oberflächen im Plangebiet.

Die Differenzabbildungen zeigen deutlich die Zunahmen der thermischen Belastung im Plangebiet. So muss in Teilen mit einer Erhöhung des PET-Wertes von mehr als 15 °C gerechnet werden. Diese starken Zunahmen ergeben sich insbesondere in unverschatteten, versiegelten Bereichen vor beschienenen Fassaden.

Zum Teil sind auch Verringerungen der thermischen Belastungssituation zu erkennen. Diese ergeben sich in Bereichen die in der Istsituation unverschattet waren und durch Plangebäude oder -vegetation nun im Schatten liegen.

Insgesamt beschränken sich die Veränderungen der thermischen Belastung hauptsächlich auf das Plangebiet. Es ergeben sich jedoch auch außerhalb des Plangebietes an der direkt angrenzenden Nachbarbebauung Verschlechterungen der bioklimatischen Belastungssituation um bis zu 5 °C. Betroffene sensible Bereiche sind vor allem die Gebäude entlang der Deutschherrenstraße, des Schenkpfädchens und ein einzelnes Wohngebäude an der Paracelsusstraße. Diesen zusätzlichen bioklimatischen Belastungen sowie auch den hohen Belastungen innerhalb des Plangebietes sollte mit geeigneten Maßnahmen entgegengewirkt werden um eine gute Aufenthaltsqualität im Freien zu gewährleisten.

7 Planungsempfehlungen

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich Veränderungen des lokalen Klimas weitestgehend auf das Plangebiet und dessen nahes Umfeld beschränken. Dies trifft insbesondere auf die Durchlüftung und die bioklimatische Belastung zu. In Bezug auf das Temperaturniveau hingegen ist in der Nacht mit einer Erwärmung sowohl innerhalb als auch außerhalb der Plangebietsgrenzen zu rechnen.

Aufgrund der verminderten Durchlüftung und der Wärmeabstrahlung der Gebäude bilden sich innerhalb der Plangebietsgrenzen sowie an den direkt angrenzenden Wohnnutzungen Bereiche mit zum Teil sehr hohen bioklimatischen Belastungen aus. Da hiervon auch Aufenthaltsbereiche wie Terrassen und Spielflächen zwischen den Plangebäuden betroffen sind, sollte nach Möglichkeit planerisch auf die Reduktion der thermischen Belastung abgezielt werden, um die Aufenthaltsqualität in den Außenbereichen aus bioklimatischer Sicht zu verbessern. Folgende Maßnahmen können einzeln oder in Kombination umgesetzt zur Reduktion des Belastungsniveaus beitragen:

Erhöhung des Baumanteils

Da Bäume sowohl durch Verschattung als auch über Abkühlungsprozesse durch Evapotranspiration zur Verminderung der bodennahen Lufttemperatur beitragen, können weitere Baumpflanzungen zur Verbesserung des Lokalklimas beitragen. Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass Bäume und Hecke das Windfeld negativ beeinträchtigen können. Daher sollten die Bäume eine ausgeprägte Krone aufweisen und im Stammbereich möglichst wenig Strömungswiderstand durch Äste und Blätter liefern. Innerhalb des Plangebietes kann die thermische Belastung durch zusätzliche Baumstandorte reduziert werden. Hierfür bietet sich z.B. die stark belastete Durchgangsfläche im Bereich Fahrradstellplätze an. Als zusätzliche Maßnahme, insbesondere so lange die neu gepflanzten Bäume nur eine geringe Höhe und somit auch geringe Verschattungswirkung aufweisen, können Sonnensegel oder bewachsene Pergolen eingesetzt werden. In Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels empfiehlt die VDI 3787 Blatt 8 [17] Bäume anhand von vier Kriterien auszuwählen. Die gewählten Bäume sollten trocken- und hitzeresistent sein. Darüber hinaus sollte darauf geachtet werden, dass die Bäume geringe biogene Emissionen und ein niedriges Allergiepotehtial haben.

Fassadenbegrünung und intensive Dachbegrünung

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der bioklimatischen Belastung besteht darin, den Anteil der Gebäudebegrünung in Form von Fassadenbegrünung zu erhöhen. Hierfür bieten sich insbesondere Fassaden in Bereichen mit sehr hoher thermischer Belastung auf der sonnenzugewandten Seite der Plangebäude an. Diese Begrünungsart liefert zwar keine zusätzli-

chen Verschattungsflächen, kann aber die Reflexion von den Gebäuden in Richtung Boden reduzieren und die Verdunstung erhöhen, wodurch sich ebenfalls das Bioklima verbessert. Ein weiterer Vorteil dieser Begrünungsart liegt darin, dass die Gebäude tagsüber weniger Wärme aufnehmen, wodurch sich die nächtliche Wärmerückstrahlung ebenfalls reduziert. Zudem greift diese Begrünungsart nur geringfügig in das Windfeld ein. Durch die aktive Bewässerung der Fassadenbegrünung kann auch während anhaltenden Trockenphasen durch Verdunstung Kühle entstehen.

Dachbegrünungen sollten möglichst intensiv ausgeführt werden, da mehrschichtige und mächtigere Substrate die Regenwasserrückhaltung verbessern und gleichzeitig in Trockenphasen für eine längere Wasserversorgung der Pflanzen sorgen können.

Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten

Um die nachmittägliche Wärmeaufnahme zu reduzieren, eignen sich im Außenbereich helle Oberflächen bzw. Baumaterialien mit hellen Oberflächen, da diese tagsüber weniger Wärme speichern und dementsprechend auch nachts weniger Wärme an die umliegenden Luftschichten abgeben. Zudem sollten Flächen nach Möglichkeit entsiegelt werden um Versickerung und Verdunstung zu gewährleisten [17]. Auch eine Teilentsiegelung beispielsweise durch Rasengittersteine, wie bereits in der Planung vorgesehen, kann das Lokalklima verbessern.

Geeignete Baumaterialien verwenden

Typisch städtische Baumaterialien wie Beton nehmen aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften tagsüber deutlich mehr Energie auf als natürliche Oberflächen wie beispielsweise Holz und geben diese nachts wieder an die Umgebungsluft ab. Um die nächtliche Wärmebelastung zu verringern, ist daher der gezielte Einsatz von Baumaterialien entsprechend ihrer thermischen Eigenschaften sinnvoll. Neben den stofflichen Eigenschaften ist auch die Oberflächenbeschaffenheit der Baumaterialien relevant. Abhängig von der Oberfläche des Materials wird ein Teil der auftreffenden Sonnenenergie sofort wieder reflektiert und steht damit nicht zur Erwärmung zur Verfügung. Helle Baumaterialien erhöhen diesen Effekt, reflektieren also mehr kurzweilige Strahlung. Dadurch heizen sich hell gestrichene Häuser oder Straßen mit hellem Asphaltbelag weniger stark auf und geben im Lauf der Nacht entsprechend weniger Wärme an die Umgebungsluft ab. Allerdings muss hier auch darauf geachtet werden, dass die Reflexionen nicht zu einer Verschlechterung des Bioklimas in bodennahen Bereichen führen.

Offene Wasserflächen

Die Verdunstung von Wasser verbraucht Wärmeenergie und kühlt so die aufgeheizte Luft. Indem der Anteil von Wasserflächen in Städten erhöht wird, kann ein Abkühlungseffekt erzielt und gleichzeitig in der meist relativ trockenen Stadtatmosphäre die Luftfeuchtigkeit erhöht werden. Bewegte Wasser wie Springbrunnen oder Wasserzerstäuber tragen hierbei insgesamt in größerem Maß zur Verdunstungskühlung bei als stehende Wasserflächen und können in ihrem Umfeld so zur thermischen Entlastung beitragen.

Grünflächenbewässerung

Während langer Hitzeperioden trocknen die Böden aus. Die trockenen Böden verhalten sich dann ähnlich wie Stein und Beton und können keinen Beitrag mehr zur Kühlung leisten. Auf ausreichend mit Wasser versorgten Grünflächen und Böden wird dagegen ein Teil der Energie durch Verdunstung (Transpiration von Pflanzen und Evaporation von Böden) in latente Wärme umgewandelt. Flächen mit hoher Evaporation heizen sich deshalb deutlich weniger auf und können angrenzende städtische Flächen kühlen. Um eine ausreichende Bewässerung der Grünflächen auch in Trockenperioden zu gewährleisten, eignen sich beispielsweise oberirdische oder unterirdische Regenwasserspeicher, um in Zeiten des Wasserüberschusses (z.B. nach Starkregen) das anfallende Wasser zwischenzuspeichern, damit es dann in Hitzeperioden wieder abgegeben werden kann.

8 Zusammenfassung

Im Auftrag der Ten Brinke Projektentwicklung GmbH & Co. KG soll der Bebauungsplan B 18-028 „Deutschherrenstraße“ in Bonn aufgestellt werden. Auf einem ca. 1,3 ha großen, zur Zeit unbebauten Grundstück soll ein Quartier mit Wohnraum sowie Einzelhandelsflächen entstehen.

Im Rahmen des Bebauungsplanverfahrens wurden die Auswirkungen des Planvorhabens auf das lokale Mikroklima untersucht. Hierzu wurden mithilfe des mikroskaligen Stadtklimamodells ENVI-met in der aktuellen Version 5.0.3 (Summer Release 2022) Simulationsrechnungen für den Ist- und den Planfall in zwei Hauptwindrichtungen für einen heißen Sommertag durchgeführt. In die Berechnungen flossen Gebäudestellungen und -höhen, der Vegetationsbestand sowie die Oberflächenbeschaffenheit ein.

Die Beurteilung der klimatischen Veränderungen erfolgte anhand der simulierten Temperaturverhältnisse zu zwei verschiedenen Uhrzeiten sowie anhand der bioklimatischen Kenngröße des PET-Wertes am Nachmittag. Zusätzlich wurden die Windverhältnisse in einer Höhe von 1,5 m und 14,5 m über Grund ausgewertet und dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass in Bezug auf das Lufttemperaturniveau am Nachmittag mit einer Abkühlung gerechnet werden kann. In der Nacht ist hingegen eine Erwärmung gegenüber der Istsituation zu erwarten. Sowohl die Abkühlungen als auch die Erwärmungen reichen über das Plangebiet hinaus und erreichen die Wohnbebauung im Umfeld des Plangebietes.

Das Windfeld wird sowohl bodennah als auch im Überdachniveau durch das Bauvorhaben gestört. Die Windgeschwindigkeit sinkt gegenüber der unbebauten Freifläche zwischen den geplanten Gebäuden. Die Durchlüftung des Plangebietes wird stark eingeschränkt. Diese Veränderungen beschränken sich jedoch in beiden Höhenniveaus hauptsächlich auf das Plangebiet sowie dessen näheren Umfeld, da die Windgeschwindigkeit in der Umgebung aufgrund der dichten Bebauung bereits im Bestand sehr gering ist. An Hitzetagen mit der betrachteten Schwachwindsituation ist daher davon auszugehen, dass das Windfeld nur im direkten Umfeld des Plangebietes durch die Planung beeinflusst wird.

Die deutlichsten Veränderungen innerhalb des Plangebietes ergeben sich in Bezug auf die bioklimatische Belastungssituation. Aufgrund der verminderten Durchlüftung und der Wärmeabstrahlung der Gebäude bilden sich innerhalb der Plangebietsgrenzen Bereiche mit zum Teil sehr hohen bioklimatischen Belastungen aus. Da hiervon auch Aufenthaltsbereiche wie Terrassen und Spielflächen zwischen den Plangebäuden betroffen sind, sollte nach Möglichkeit planerisch auf die Reduktion der thermischen Belastung abgezielt werden, um die Aufenthaltsqualität in den Außenbereichen aus bioklimatischer Sicht zu verbessern. Eine Ver-

schlechterung des Bioklimas ist zudem an den direkt angrenzenden Wohnnutzungen zu erwarten.

Folgende Maßnahmen können einzeln oder in Kombination umgesetzt zur Reduktion des nächtlichen Temperaturniveaus sowie der bioklimatischen Belastungssituation beitragen:

- Erhöhung der Verschattungswirkung und Verdunstungsabkühlung durch zusätzliche Baumstandorte, Sonnensegel oder bewachsene Pergolen
- weitere Gebäudebegrünung in Form von intensiver Dachbegrünung und Fassadenbegrünung zur Reduktion der nachmittäglichen Wärmeaufnahme und Erhöhung der Verdunstungsabkühlung
- Verwendung geeigneter Baumaterialien, um die Wärmeaufnahme in den Tagstunden und die Wärmeabgabe in den Nachtstunden zu reduzieren
- Künstliche Bewässerung der Grün- und Rasenflächen, um die Verdunstungskühlung auch während langer Hitze- bzw. Trockenperioden aufrecht zu erhalten
- Schaffung von offenen Wasserflächen zur Förderung der Verdunstungskühlung in den sensiblen Bereichen mit hohen PET-Werten

Peutz Consult GmbH



i.V. Dipl.-Geogr. Björn Siebers
(fachliche Verantwortung)



i.A. M. Sc. Karina Zühlke
(Projektbearbeitung)



i.A. Max Wohlfarth
(Projektmitarbeit)

Anlagenverzeichnis

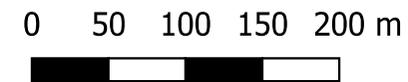
- Anlage 1 Übersichtslageplan und Gebäude im Istfall
- Anlage 2 Übersichtslageplan und Gebäude im Planfall
- Anlage 3 Auszug aus der Klimahinweiskarte der Stadt Bonn (Tag)
- Anlage 4 Auszug aus der Klimahinweiskarte der Stadt Bonn (Nacht)
- Anlage 5 ENVI-met Modell-Architektur
- Anlage 6 Vegetation im Istfall
- Anlage 7 Vegetation im Planfall
- Anlage 8 Oberflächenbeschaffenheit im Istfall
- Anlage 9 Oberflächenbeschaffenheit im Planfall
- Anlage 10 Windrichtungs- und geschwindigkeitsverteilung an der LANUV-Station Bonn-Auerberg im Zeitraum 2011-2020 (links: Allgemein; rechts: Tmx > 30 °C)
- Anlage 11 Windfeld in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr
- Anlage 12 Windfeld in 14,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr
- Anlage 13 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr
- Anlage 14 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 4 Uhr
- Anlage 15 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag

Anlage 1: Übersichtslageplan und Gebäude im Istfall



Legende

- Bestandsgebäude
- Plangebiet

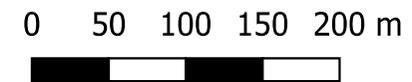


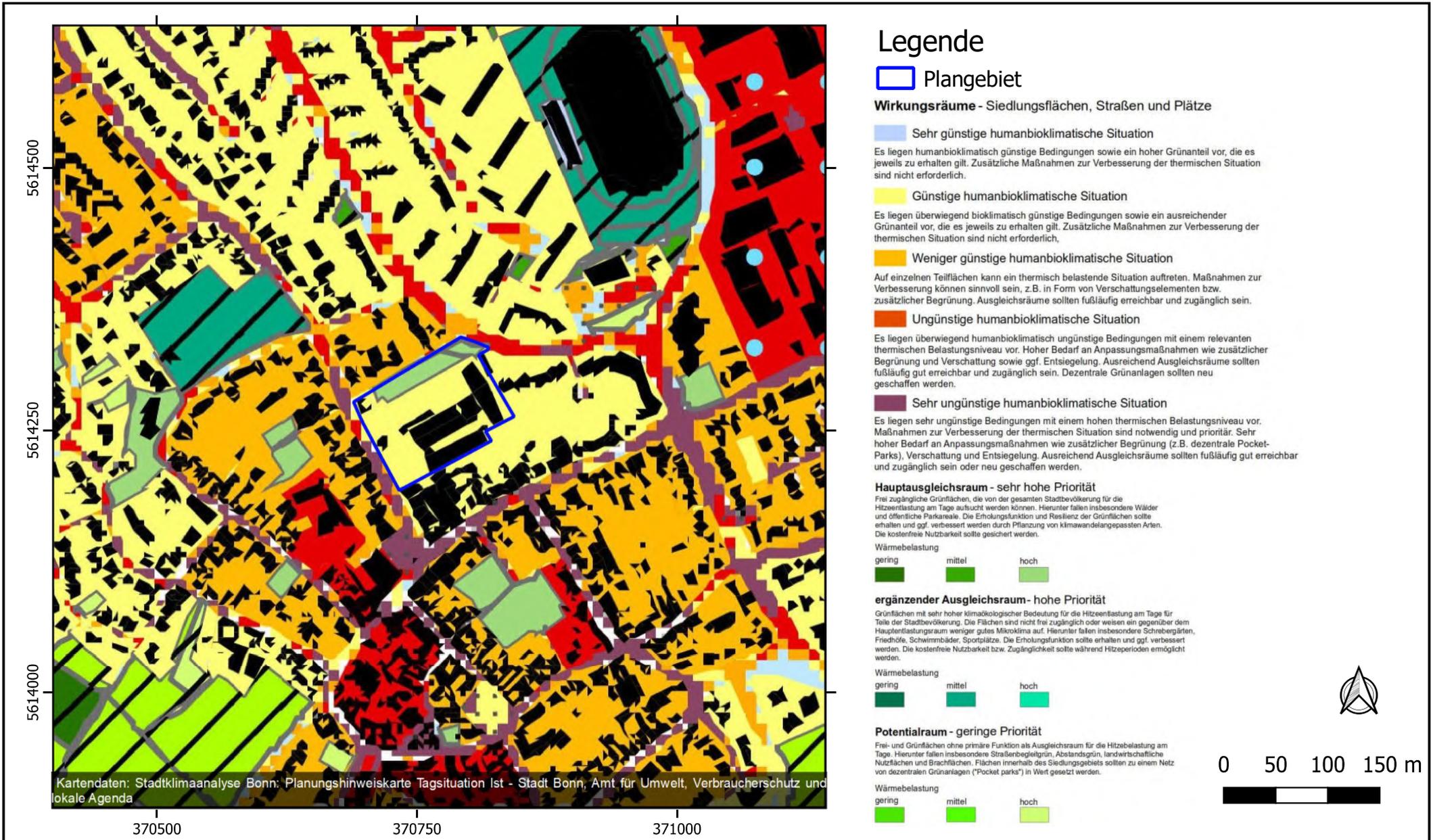
Anlage 2: Übersichtslageplan und Gebäude im Planfall

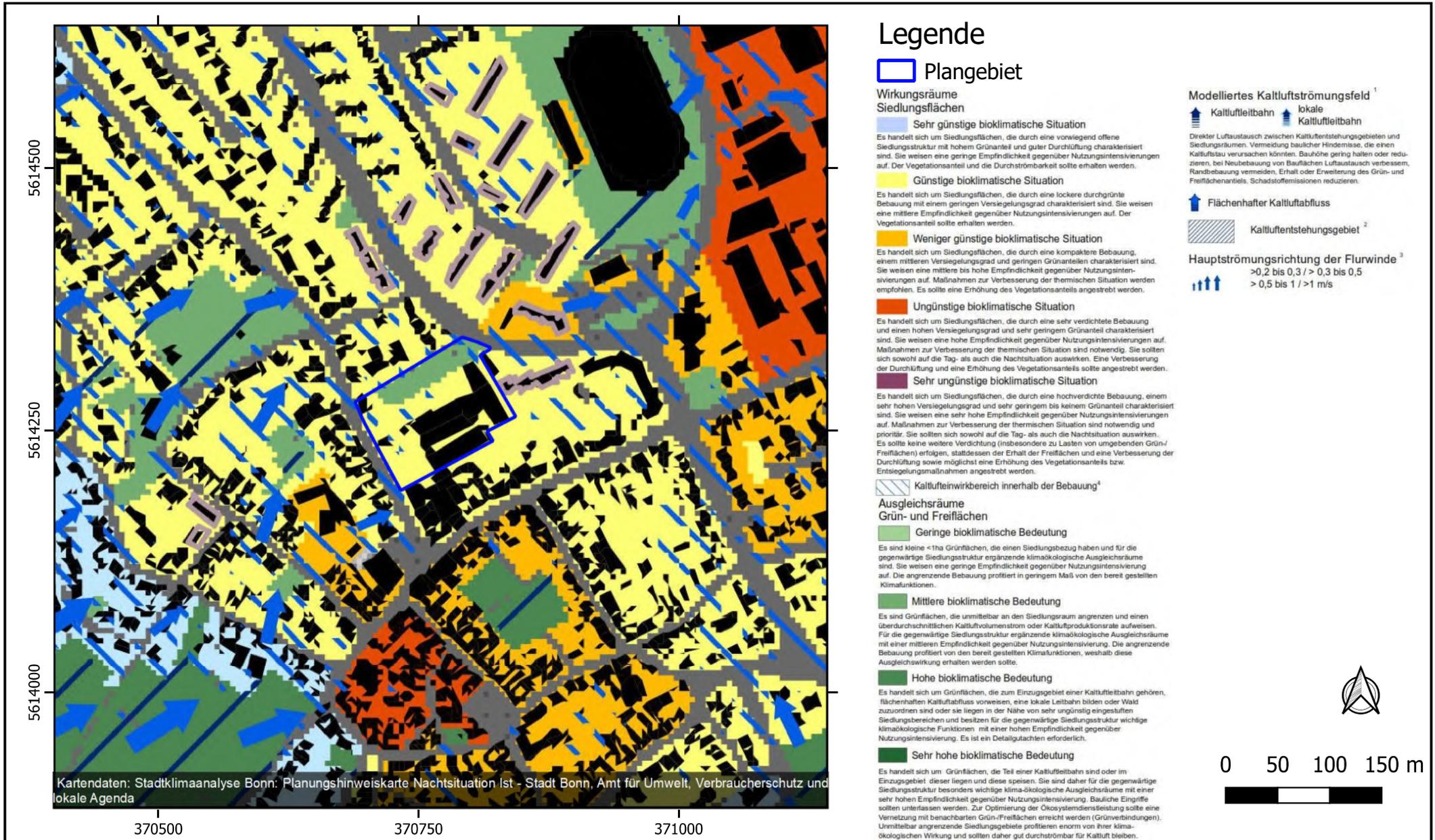


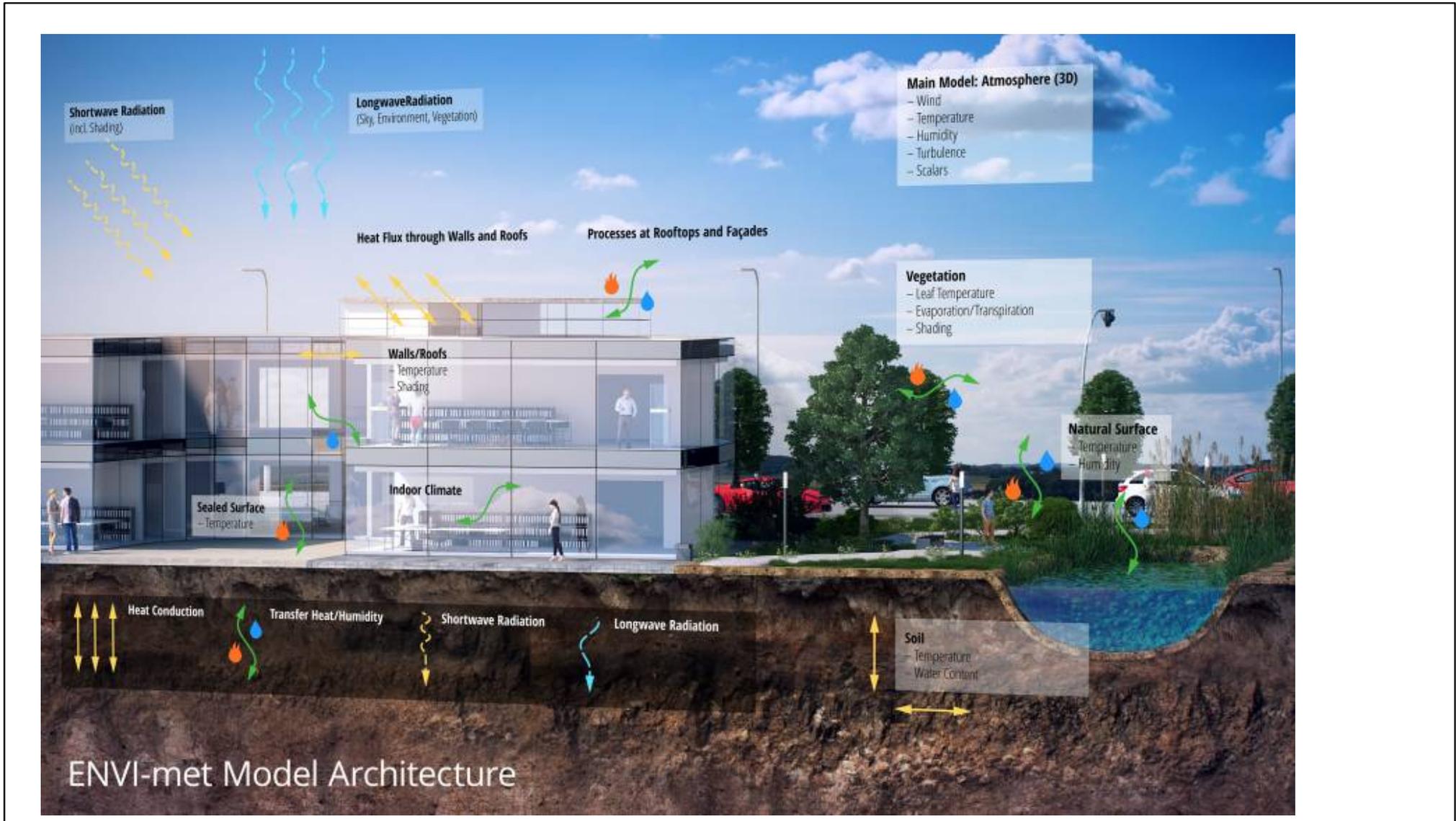
Legende

- Bestandsgebäude
- Plangebäude
- Plangebiet

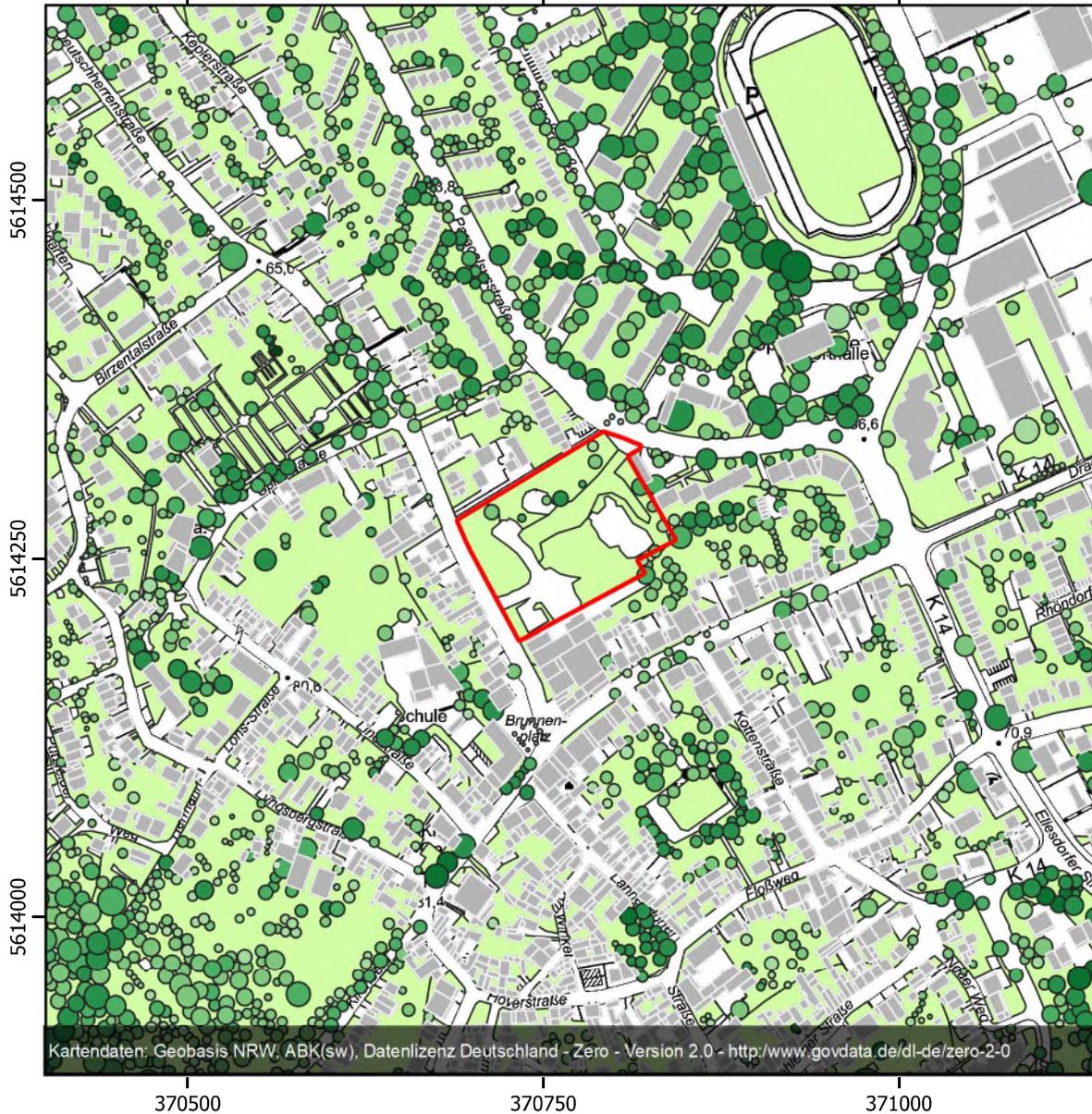








Anlage 6: Vegetation und Gebäude im Istfall



Legende

Vegetationshöhe [m]

- 5 m
- 10 m
- 15 m
- 20 m
- 25 m
- 30 m
- Gras, 10 cm

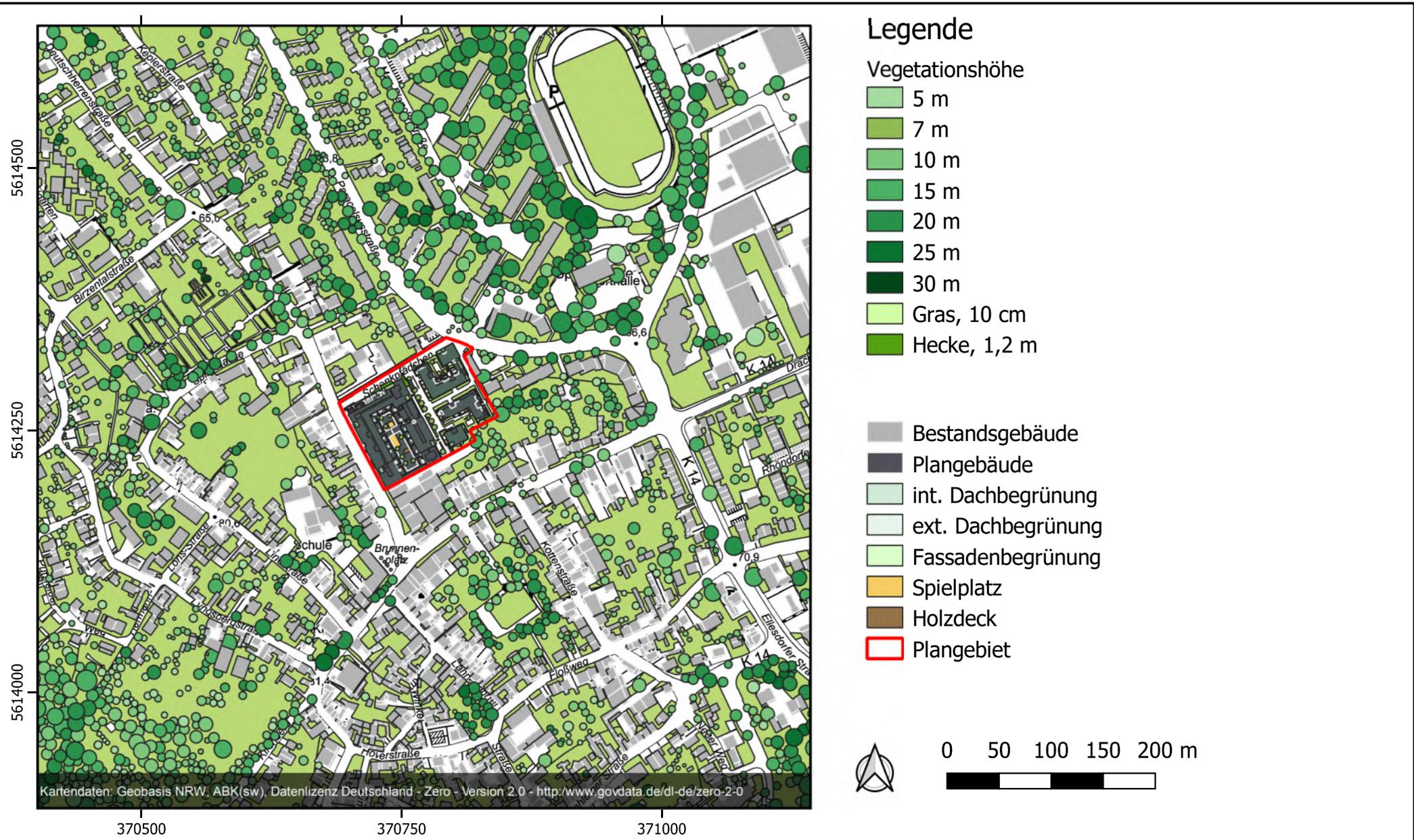
- Bestandsgebäude
- Plangebiet

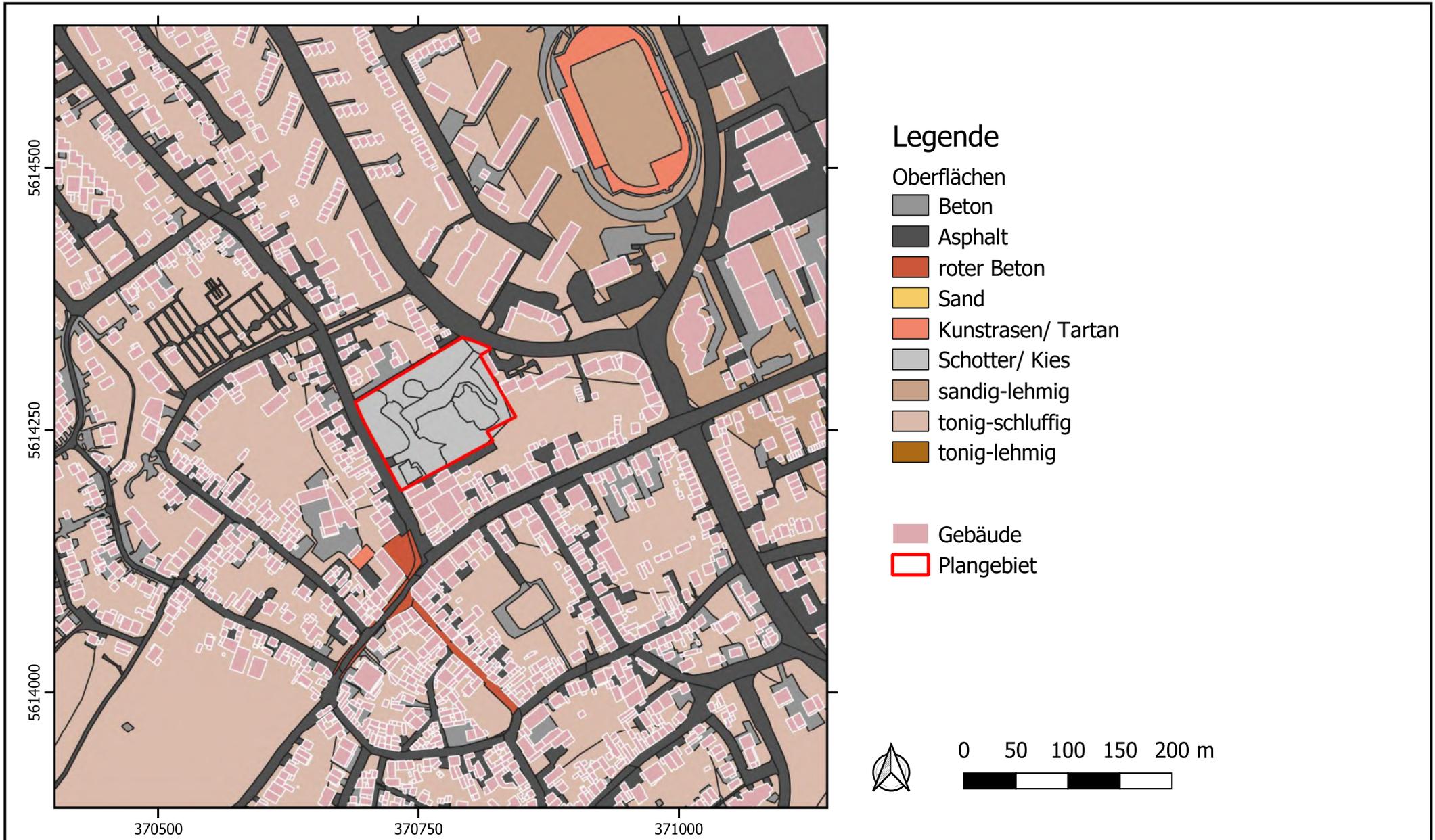


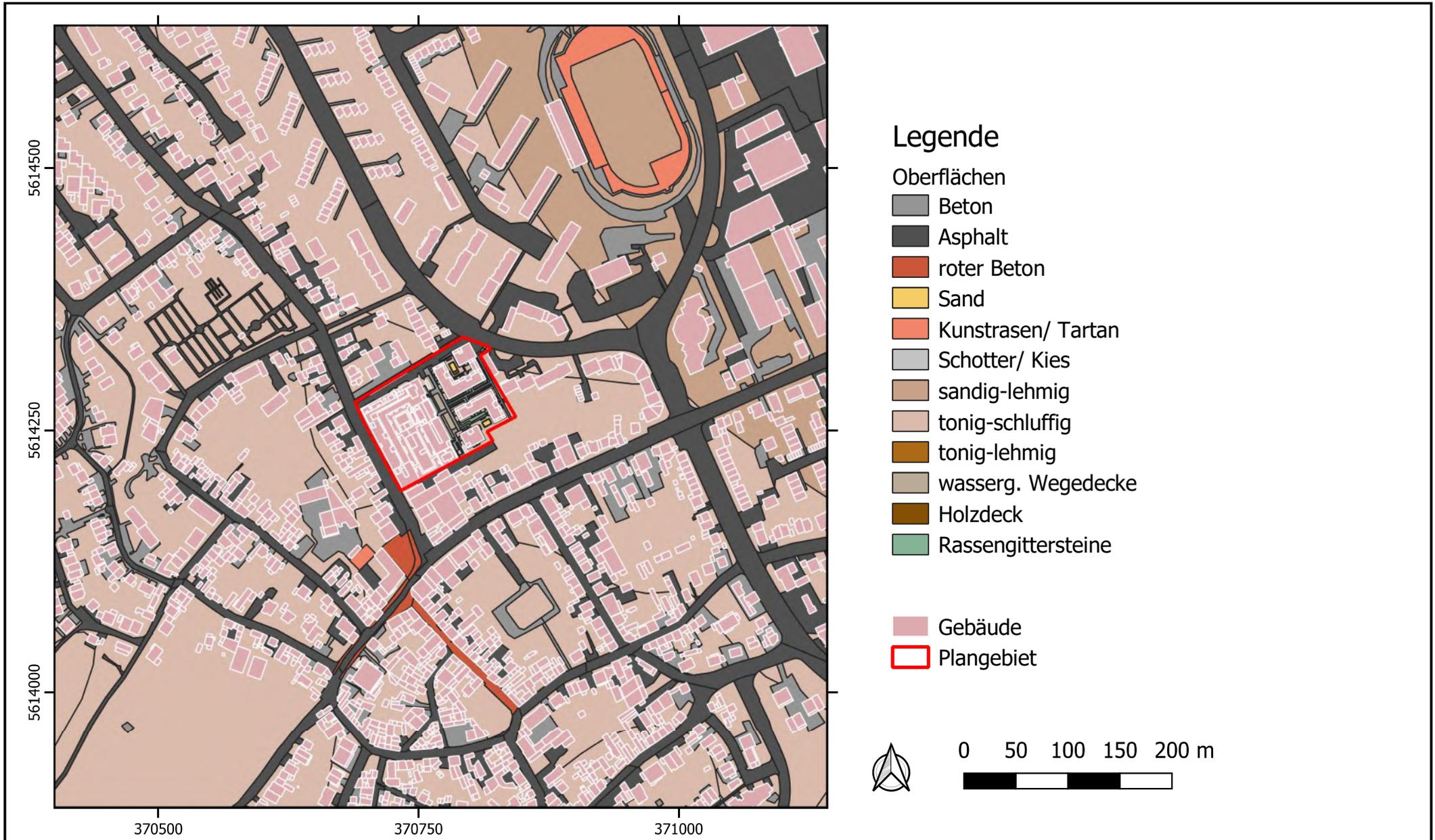
0 50 100 150 200 m



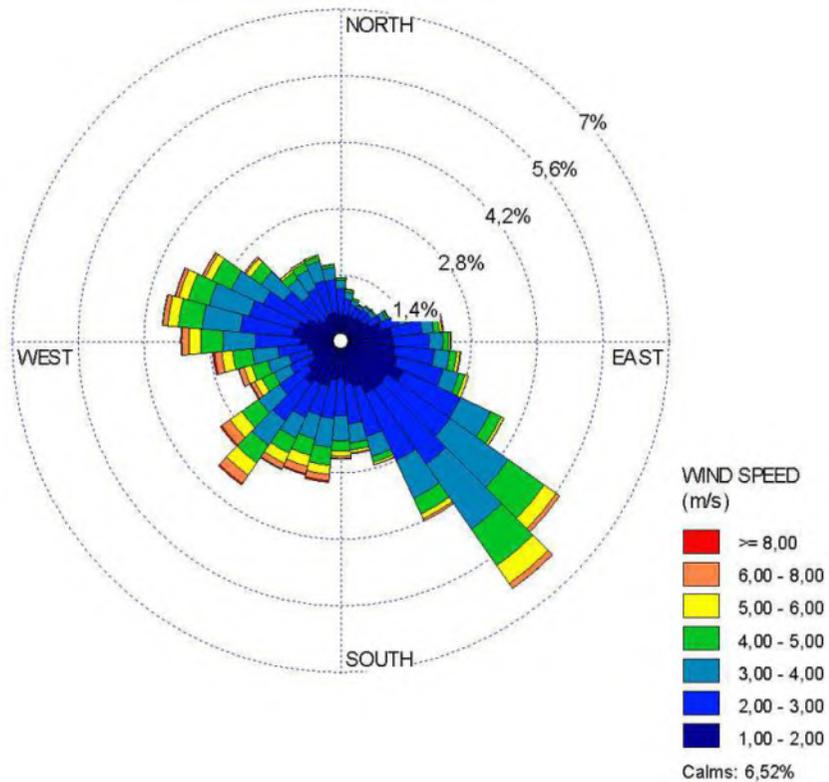
Anlage 7: Vegetation und Gebäude im Planfall



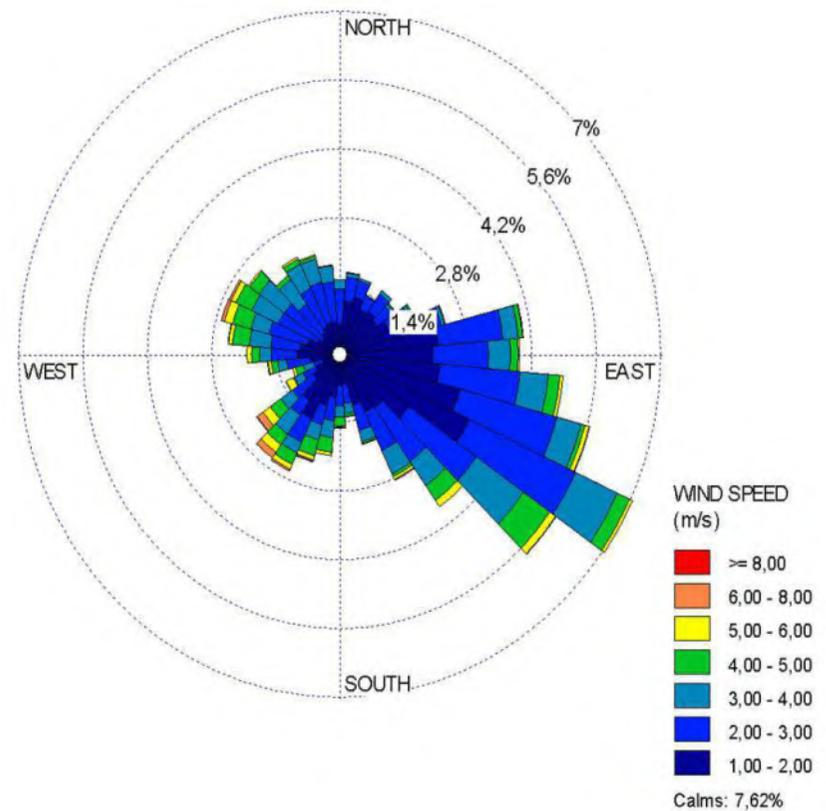


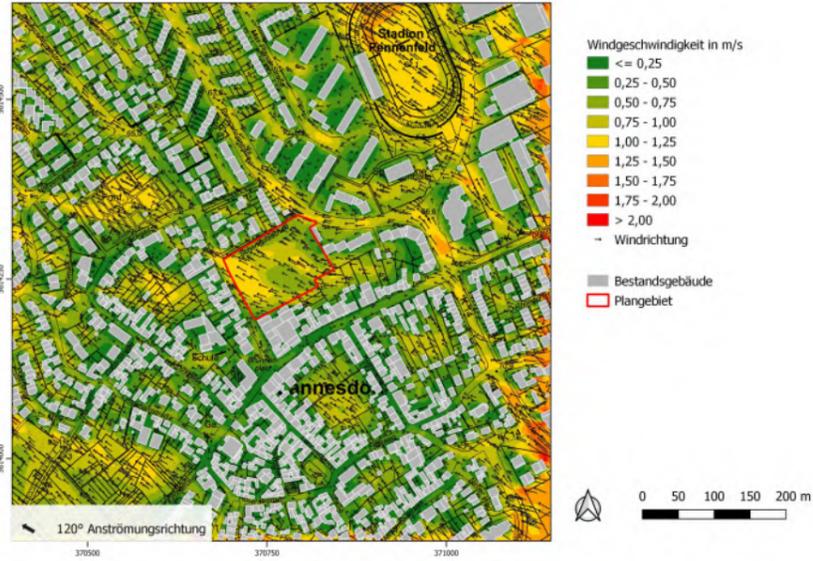


- alle Situationen -

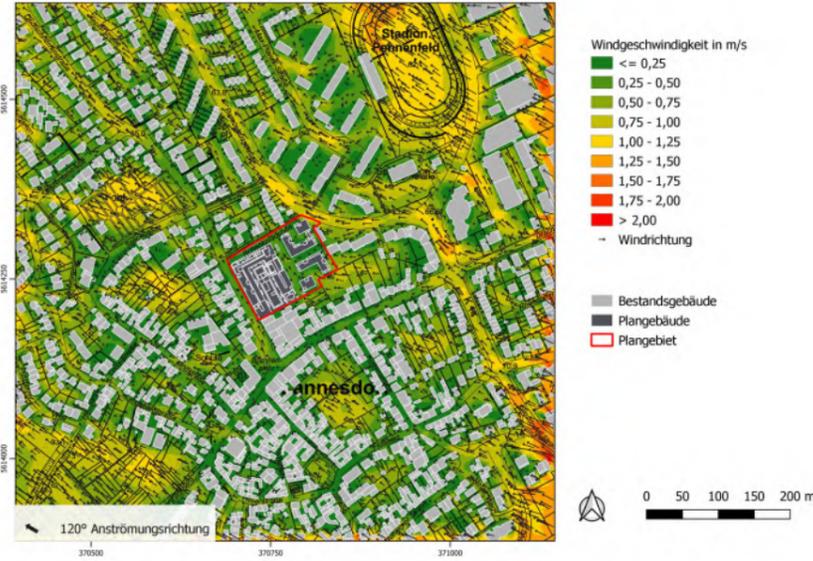


- Tage mit Tmx > 30°C -

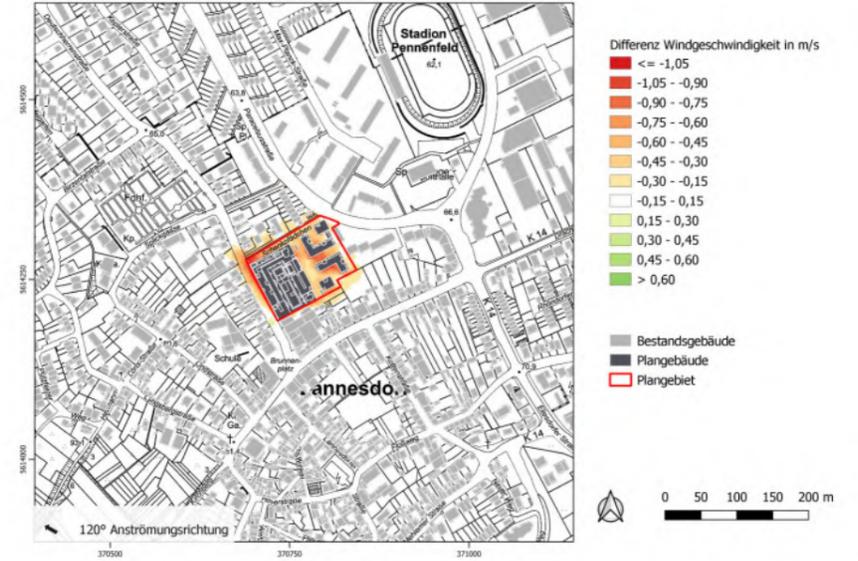




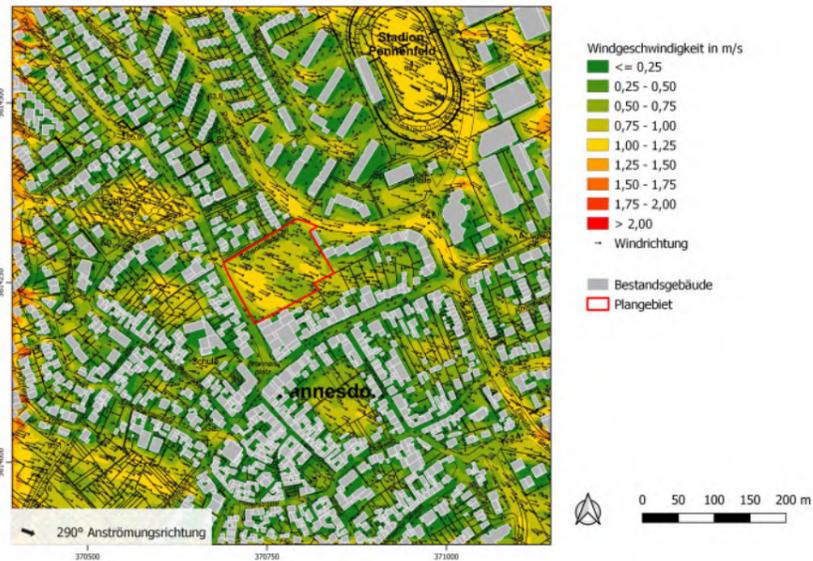
Istfall mit 120° Anströmrichtung



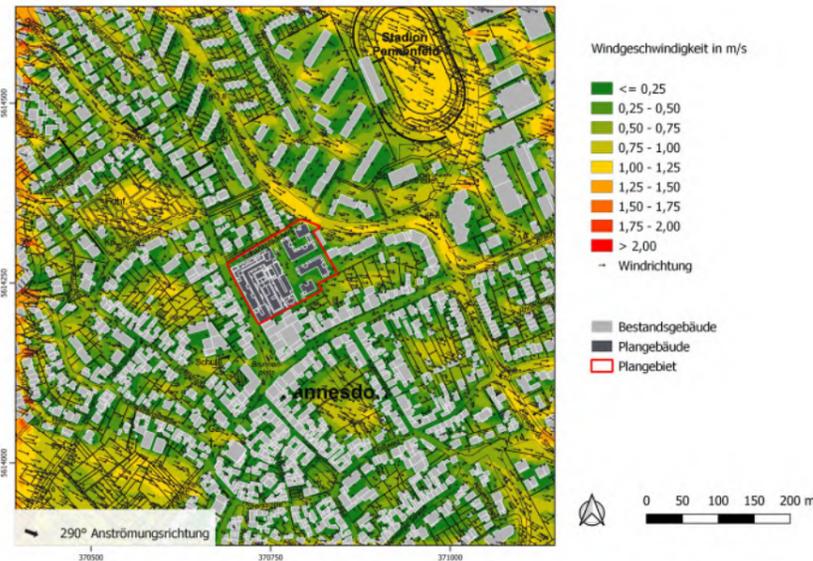
Planfall mit 120° Anströmrichtung



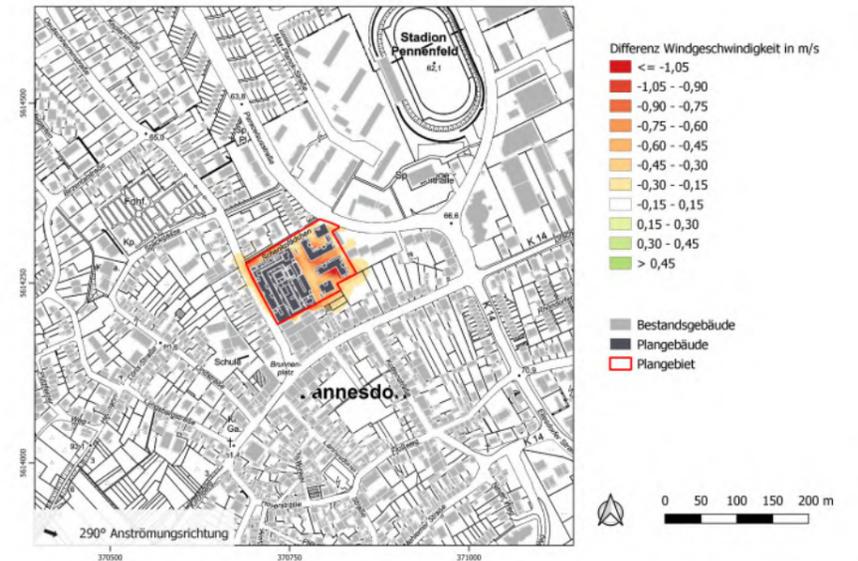
Differenz mit 120° Anströmrichtung



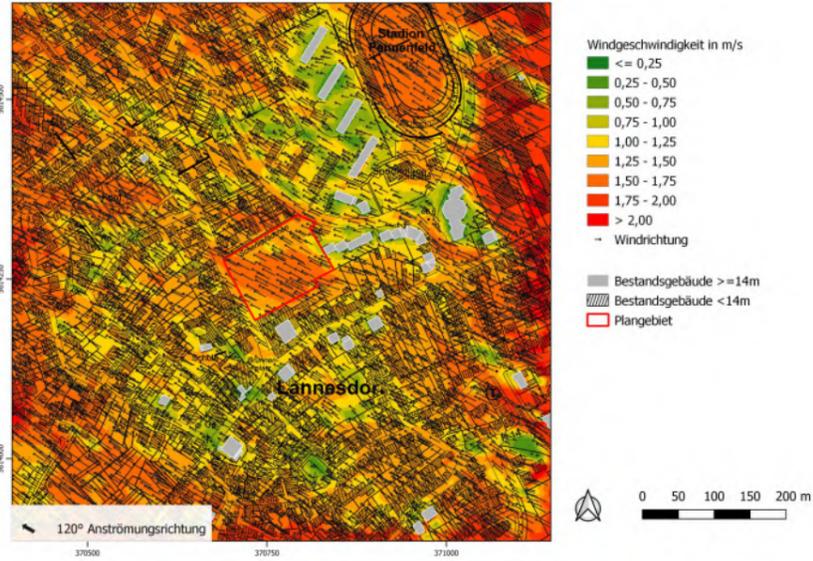
Istfall mit 290° Anströmrichtung



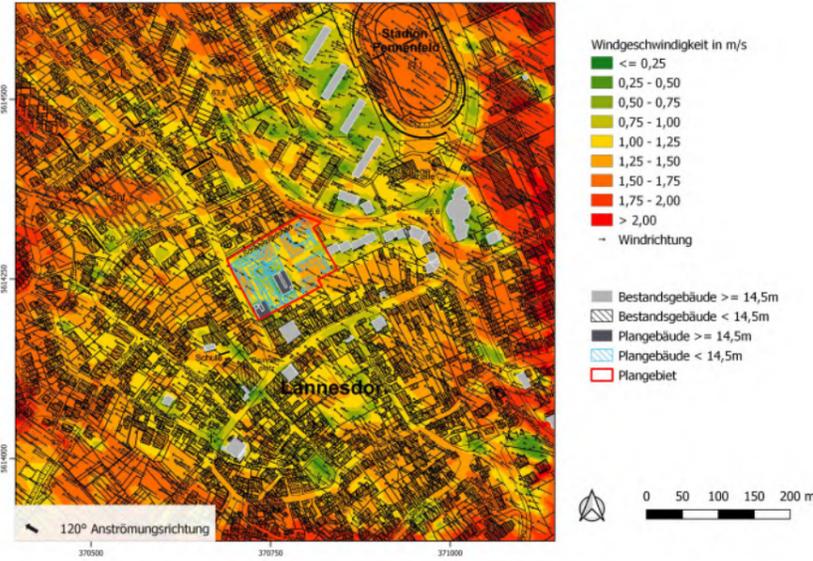
Planfall mit 290° Anströmrichtung



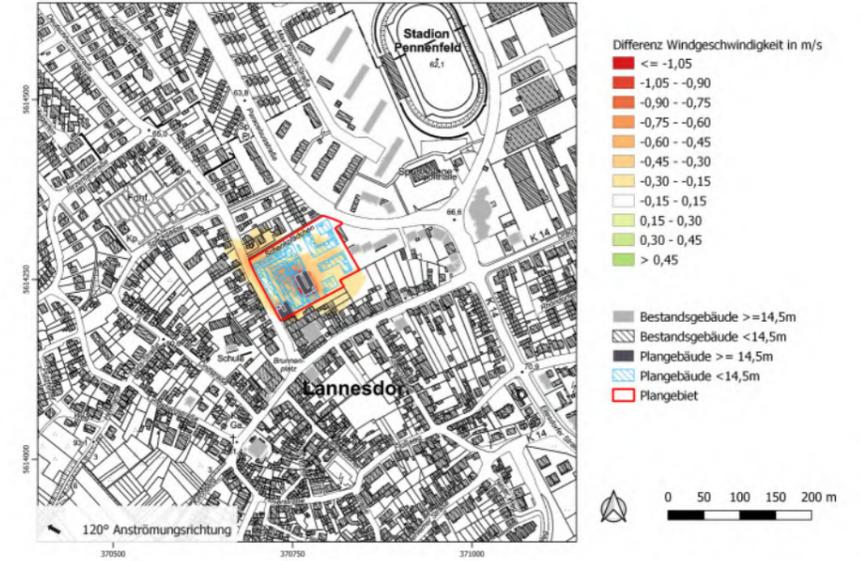
Differenz mit 290° Anströmrichtung



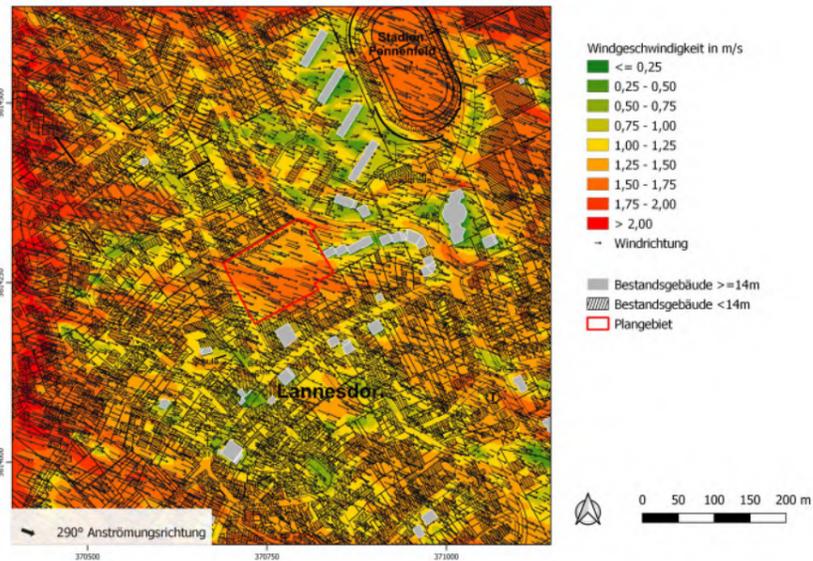
Istfall mit 120° Anströmungsrichtung



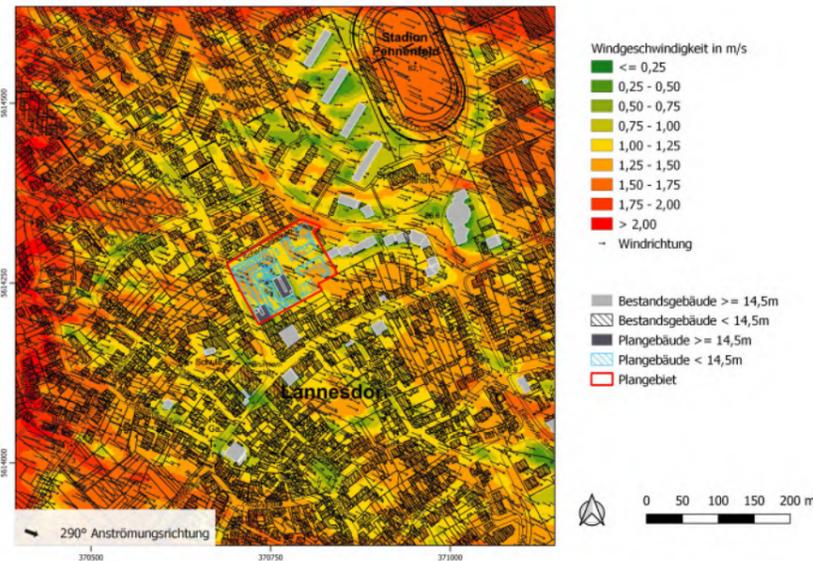
Planfall mit 120° Anströmungsrichtung



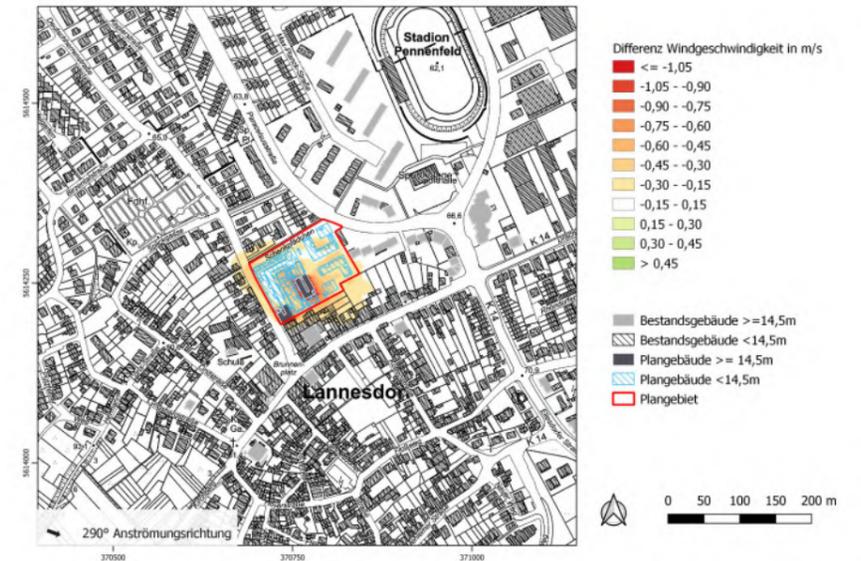
Differenz mit 120° Anströmungsrichtung



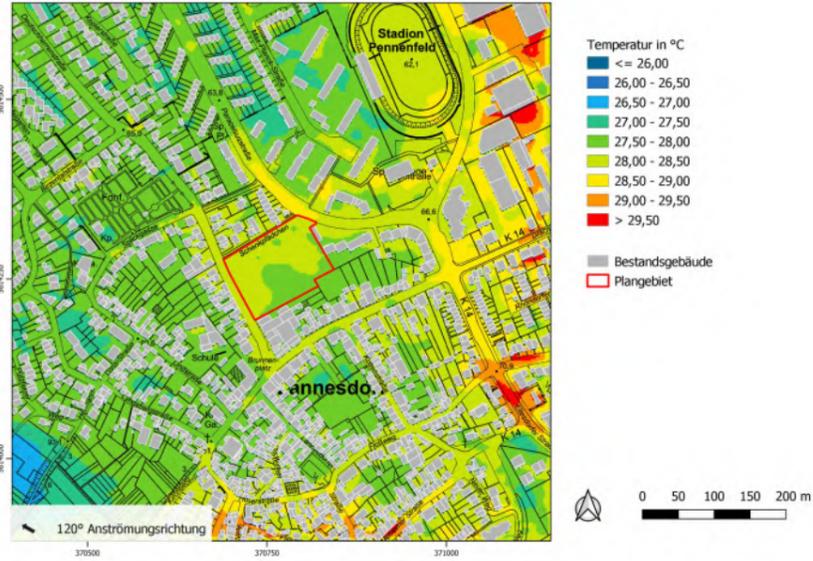
Istfall mit 290° Anströmungsrichtung



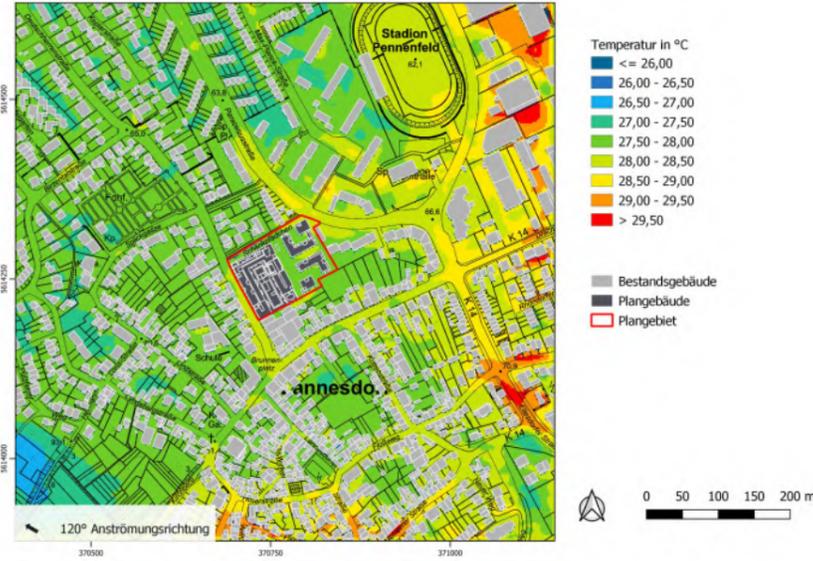
Planfall mit 290° Anströmungsrichtung



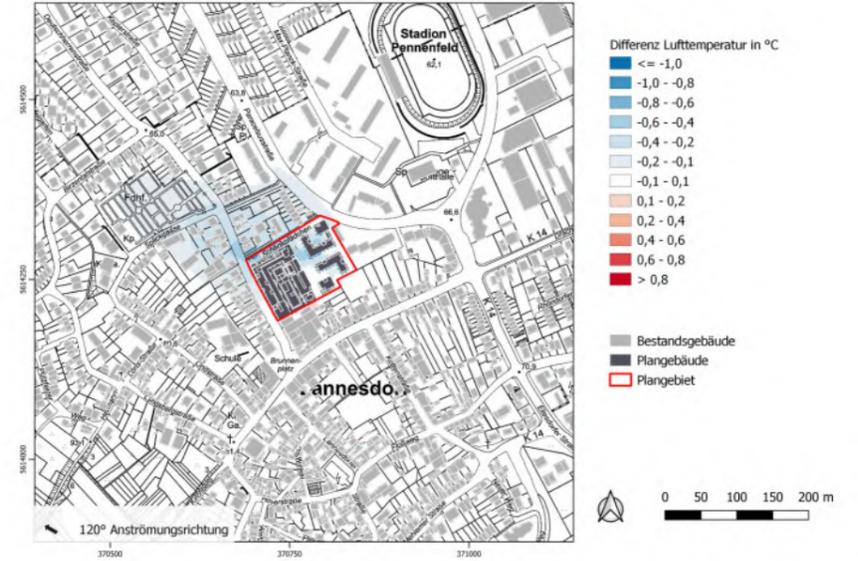
Differenz mit 290° Anströmungsrichtung



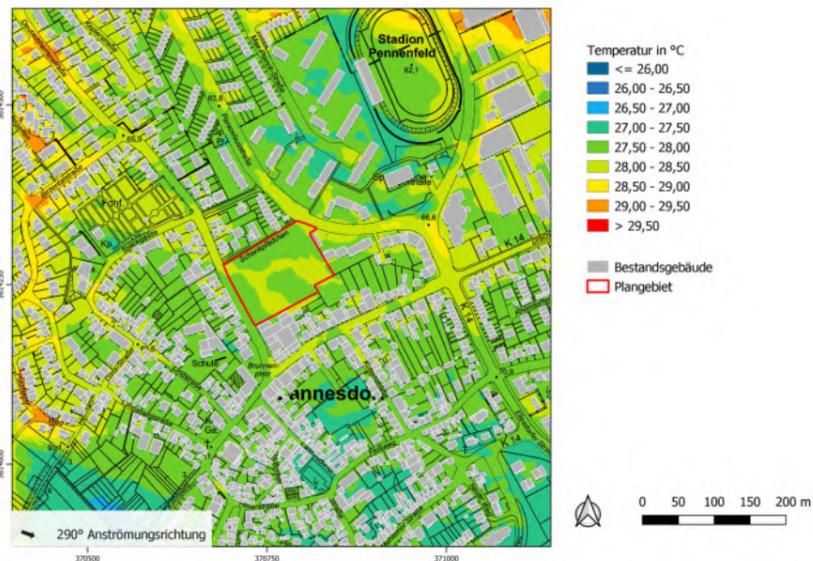
Istfall mit 120° Anströmungsrichtung



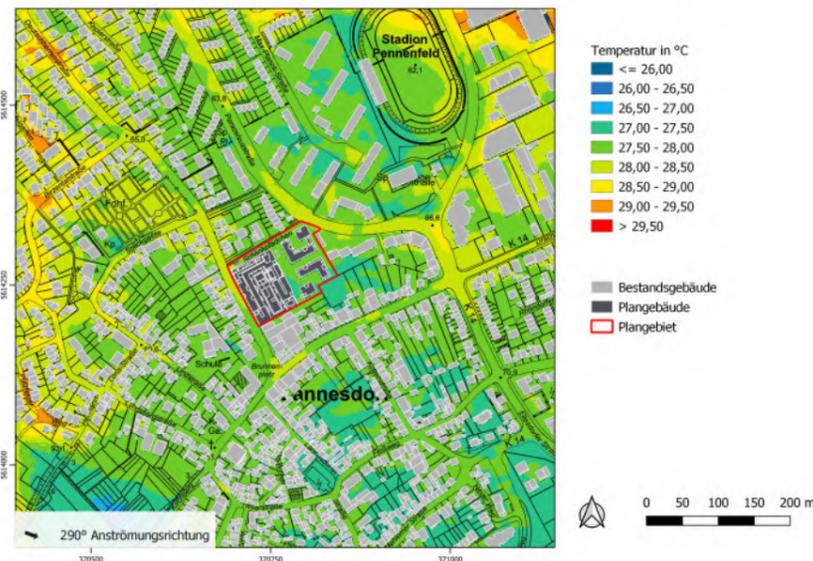
Planfall mit 120° Anströmungsrichtung



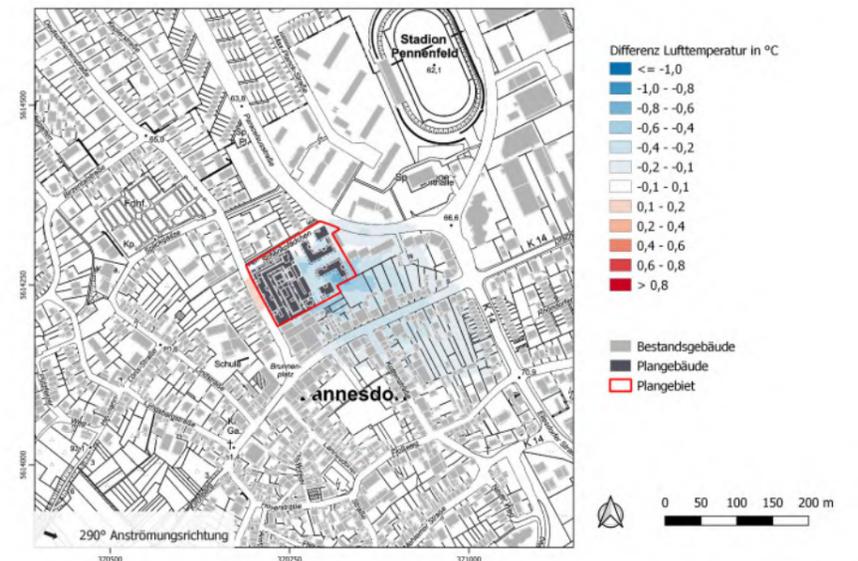
Differenz mit 120° Anströmungsrichtung



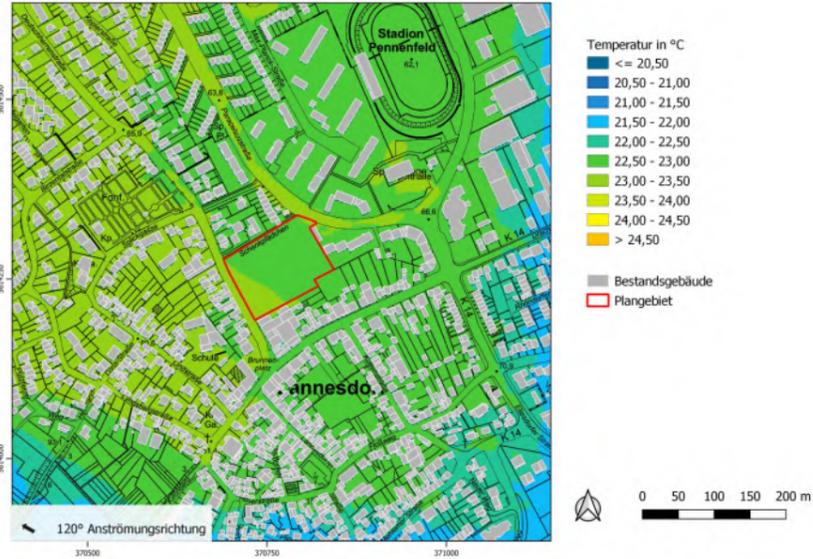
Istfall mit 290° Anströmungsrichtung



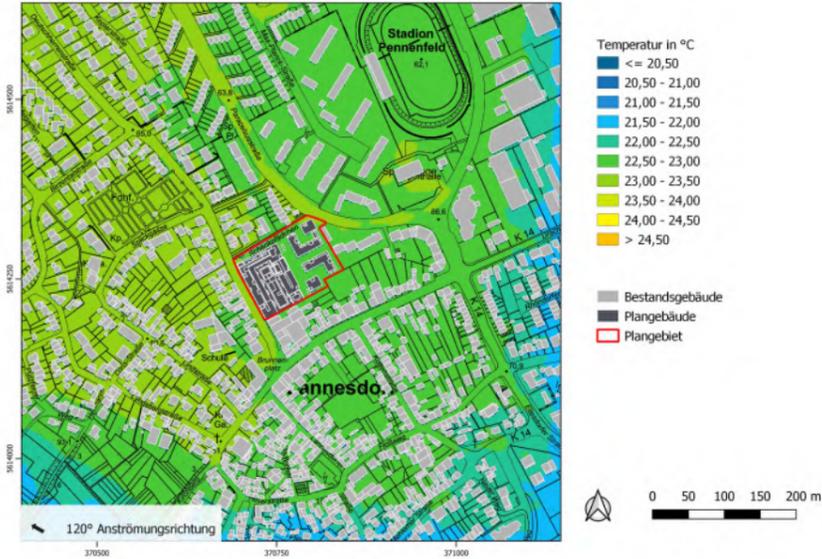
Planfall mit 290° Anströmungsrichtung



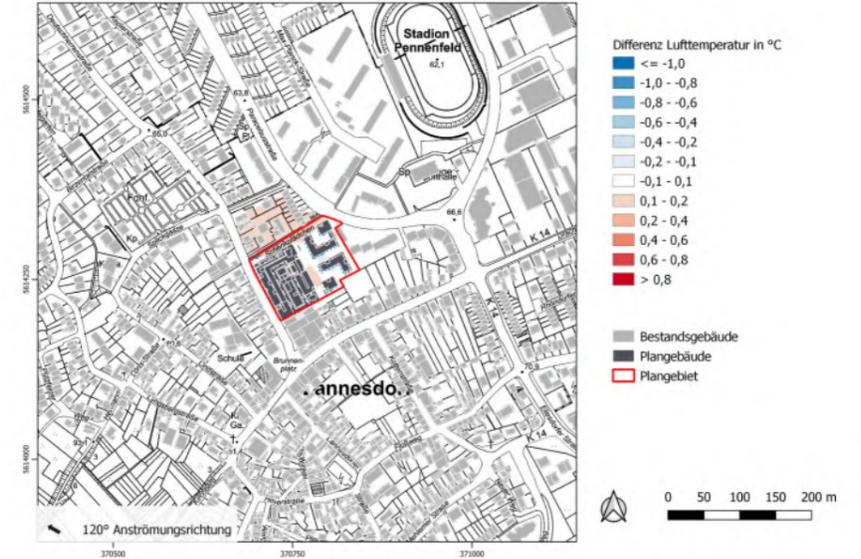
Differenz mit 290° Anströmungsrichtung



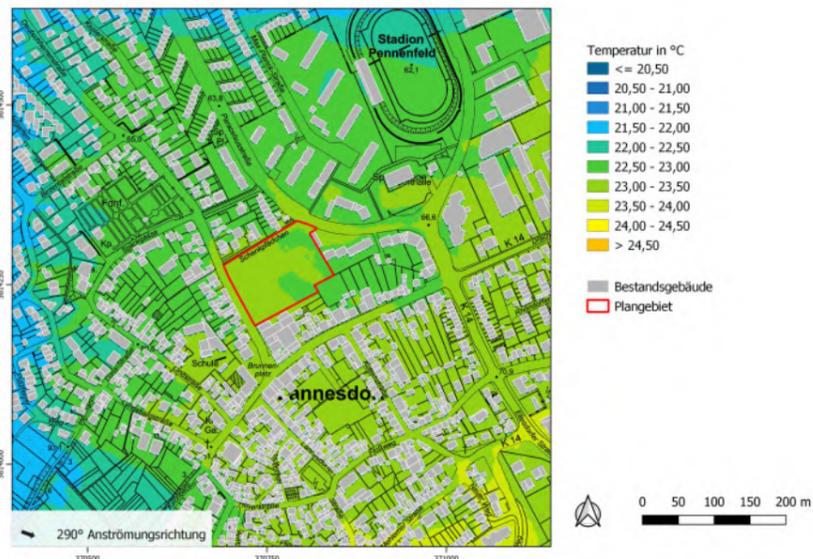
Istfall mit 120° Anströmungsrichtung



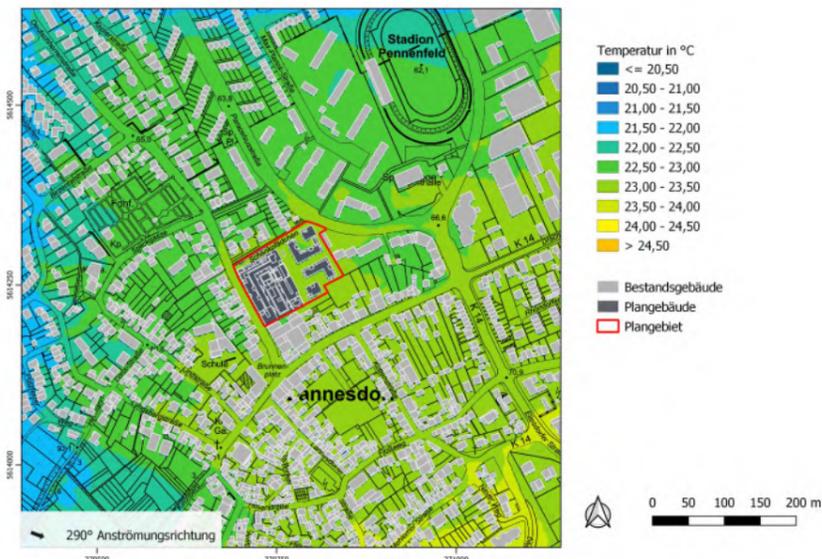
Planfall mit 120° Anströmungsrichtung



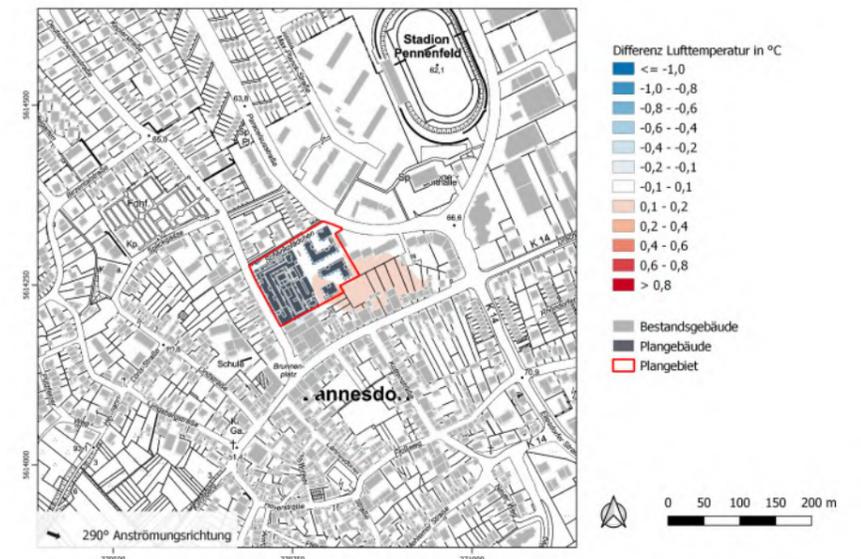
Differenz mit 120° Anströmungsrichtung



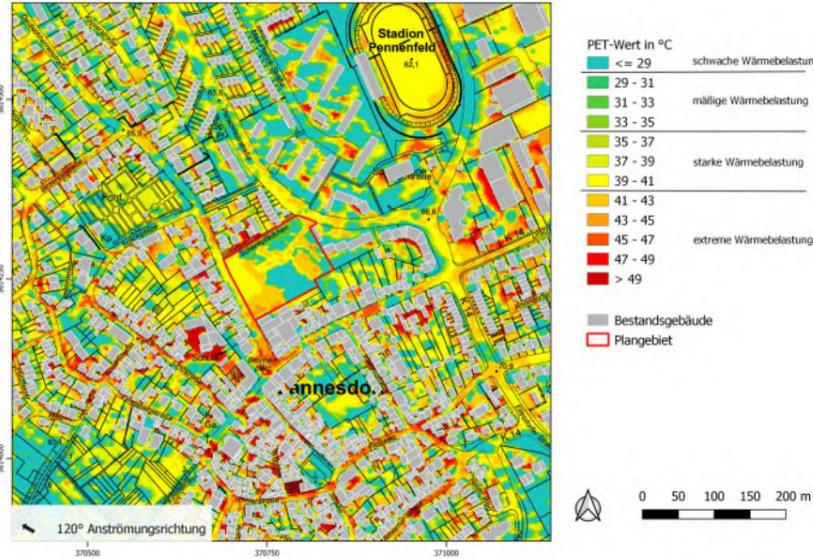
Istfall mit 290° Anströmungsrichtung



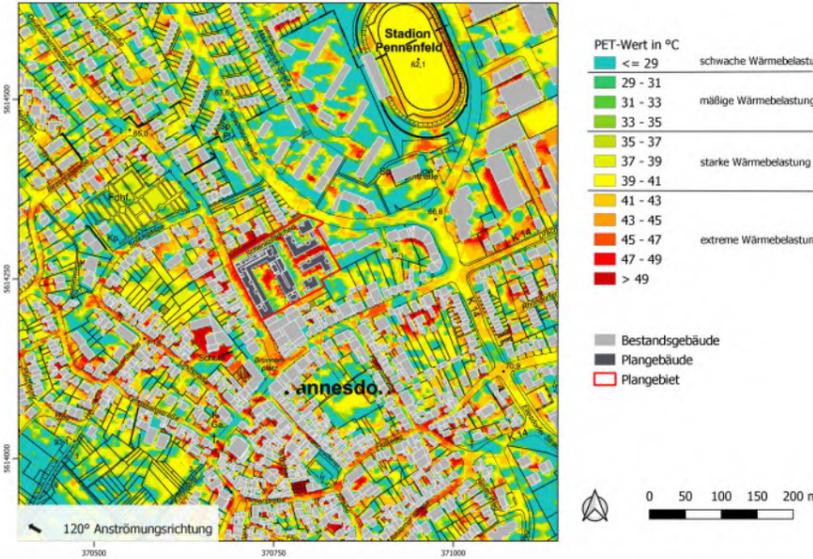
Planfall mit 290° Anströmungsrichtung



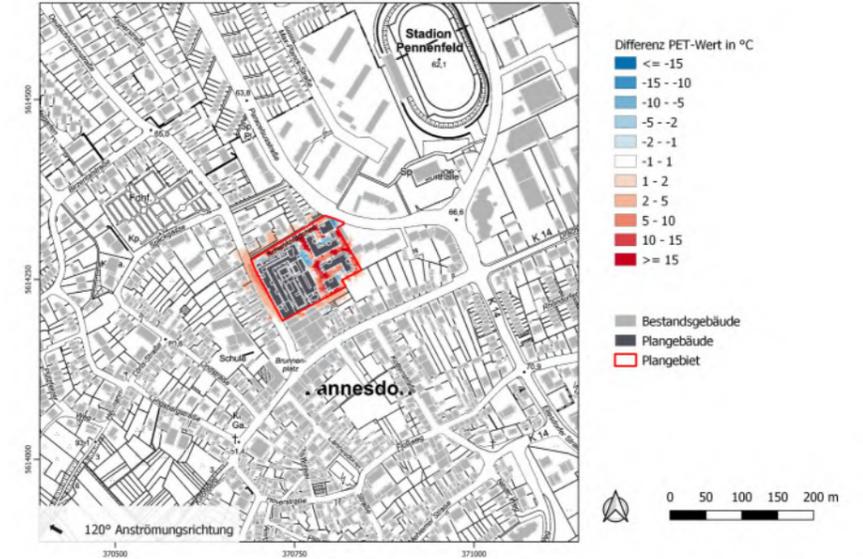
Differenz mit 290° Anströmungsrichtung



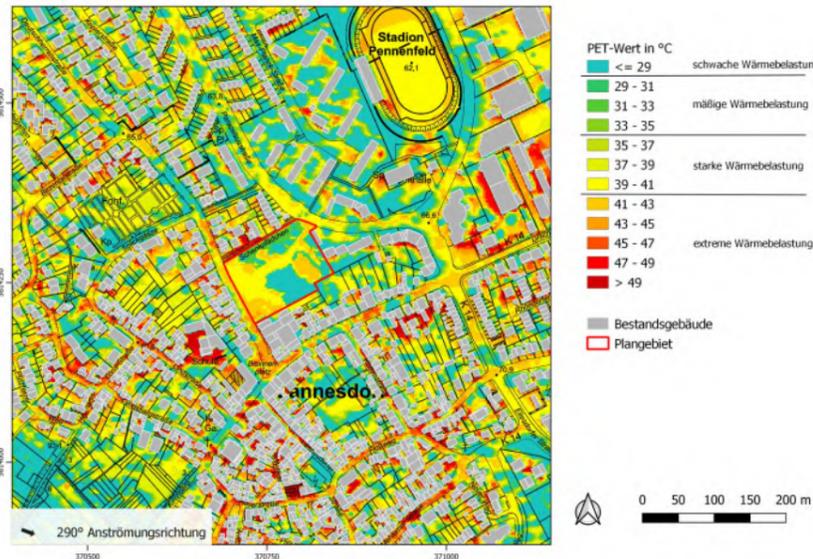
Istfall mit 120° Anströmungsrichtung



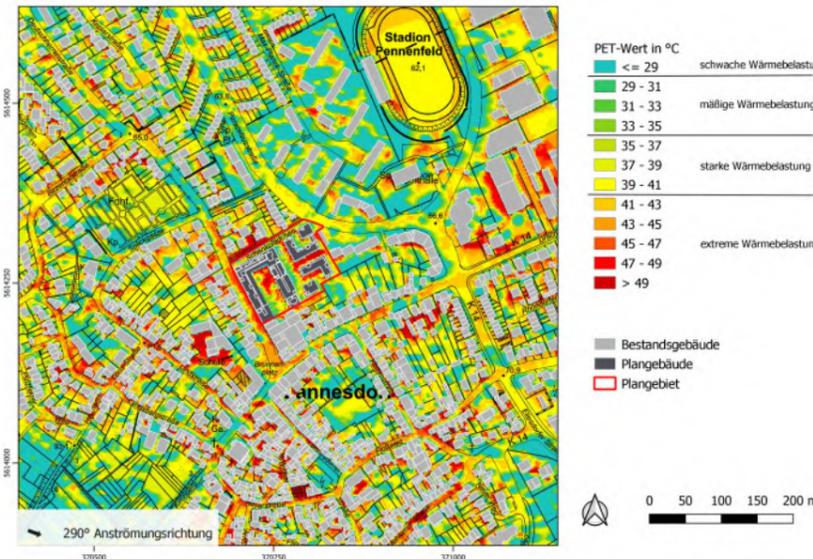
Planfall mit 120° Anströmungsrichtung



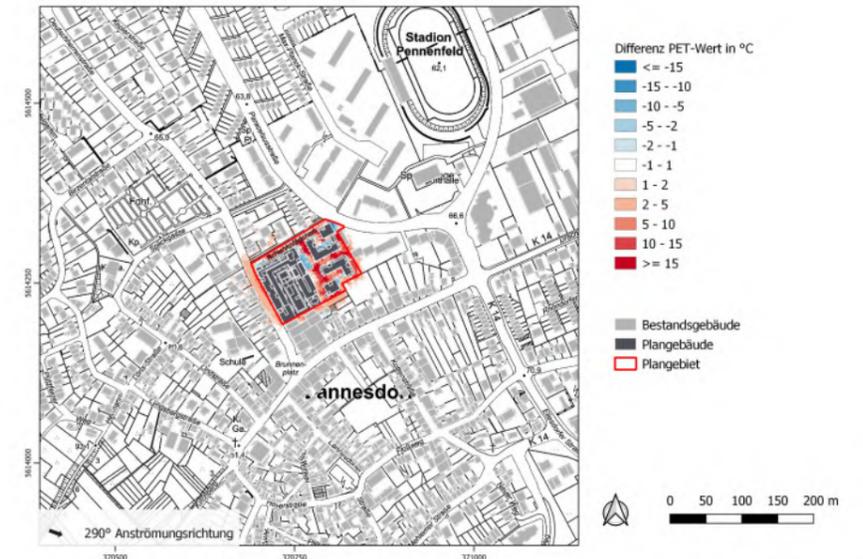
Differenz mit 120° Anströmungsrichtung



Istfall mit 290° Anströmungsrichtung



Planfall mit 290° Anströmungsrichtung



Differenz mit 290° Anströmungsrichtung