

SCHALLSCHUTZ + BAUPHYSIK  
AKUSTIK + MEDIENTECHNIK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ  
UMWELTECHNOLOGIE

**PEUTZ**  
CONSULT

## Klimauntersuchung zum vorhabenbezogenen Bebauungsplan Nr. 841 (V) – südlich Uerdinger Straße

Bericht F 9077-1 vom 14.12.2022 / Druckdatum: 13.01.2023

Bericht-Nr.: F 9077-1  
Datum: 14.12.2022 / Druckdatum: 13.01.2023  
Ansprechpartner/in: Herr Siebers/ Frau Zühlke

Dieser Bericht besteht aus insgesamt 102 Seiten,  
davon 50 Seiten Text und 52 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.....	5
2	Bearbeitungsgrundlagen, zitierte Normen und Richtlinien.....	6
3	Örtliche Gegebenheiten.....	9
4	Grundlagen.....	10
4.1	Kaltluft.....	10
4.1.1	Entstehung und Wirkung von Kaltluftabflüssen.....	10
4.1.2	Bewertung von Kaltluftabflüssen.....	11
4.2	Stadtklima.....	11
4.2.1	Lufttemperatur.....	11
4.2.2	Windfeld.....	12
4.2.3	Bioklimatischer Komfort.....	13
5	Klimatische Situation in Krefeld.....	15
5.1	Lokalklima im Umfeld des Planvorhabens.....	15
5.2	Auswirkungen des Klimawandels.....	15
5.3	Windrichtungsverteilung.....	19
6	Themenkomplex Kaltluft.....	20
6.1	Berechnungsmodell.....	20
6.1.1	Modellbeschreibung.....	20
6.1.2	Aufbau und Abgrenzung des Rechengebietes.....	21
6.2	Eingangsdaten.....	22
6.2.1	Digitales Geländemodell.....	22
6.2.2	Landnutzung.....	22
6.3	Ergebnisse der Kaltluftberechnung.....	24
6.3.1	Kaltluftgeschehen zwei Stunden nach Sonnenuntergang.....	24
6.3.2	Kaltluftgeschehen sechs Stunden nach Sonnenuntergang.....	25
7	Themenkomplex Überhitzung und Durchlüftung.....	26
7.1	Berechnungsmodell.....	26
7.1.1	Modellbeschreibung.....	26
7.1.2	Aufbau der Rechengitter.....	26
7.2	Eingangsdaten.....	27
7.2.1	Gebäude.....	27
7.2.2	Vegetation.....	28

7.2.3	Oberflächen.....	28
7.2.4	Initialisierungsparameter.....	30
7.3	Ergebnisse der mikroklimatischen Simulation.....	33
7.3.1	Durchlüftung.....	33
7.3.2	Lufttemperatur.....	35
7.3.2.1	14 Uhr.....	35
7.3.2.2	4 Uhr.....	36
7.3.3	Bioklima (PET).....	37
8	Planungsempfehlungen.....	39
9	Eingangsdaten und Ergebnisse der mikroklimatischen Analyse der optimierten Planvariante.....	42
10	Zusammenfassung.....	44

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4.1: Bewertung der planerischen Auswirkungen von Kaltluftabflüssen [24]..... 11  
Tabelle 4.2: Bewertung des bioklimatischen Komforts mit PET ..... 13  
Tabelle 6.1: Verwendete Landnutzungsklassen im Rechenmodell KLAM\_21 .....22  
Tabelle 7.1: Initialisierungsparameter für die Modellberechnungen.....31

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 5.1: Prognose der Entwicklung der sommerlichen Wärmebelastung am Plangebiet in Krefeld..... 18  
Abbildung 7.1: Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit beim Simple-Forcing..... 30



## 1 Situation und Aufgabenstellung

Im Krefelder Stadtteil Bockum ist südlich der Uerdinger Straße auf dem 2,5 ha großen Grundstück eines Hotels die Aufstellung des vorhabenbezogenen Bebauungsplans Nr. 841 (V) – südlich Uerdinger Straße vorgesehen. Das derzeitige Hotelgebäude wird aufgrund des hohen Sanierungsbedarfs zurückgebaut. Auf dem Grundstück soll neben dem neu errichteten Hotel ein Wohnquartier mit sechs Gebäuden entstehen. Das Quartier wird durch eine KiTa und einige Gewerbeflächen ergänzt.

Im Rahmen des Bebauungsplanverfahrens sind die stadtklimatischen Auswirkungen des Vorhabens zu untersuchen.

Vor dem Hintergrund, dass eine veränderte Bebauung des Plangebietes das lokale Kaltluftgeschehen beeinflussen kann, soll geprüft werden, wie sich die Neuentwicklung des Grundstücks auf das Kaltluftgeschehen auswirkt. Zu diesem Zweck werden Kaltluftberechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM\_21 in der aktuellen Version 2.012 ([8], [9]) unter Berücksichtigung des Reliefs, der Landnutzung sowie der Bebauungssituation im Umfeld des Planvorhabens durchgeführt. Die Beurteilung der Veränderung erfolgt anhand eines Vergleichs der im Modell berechneten Kaltluftkenngrößen.

Zusätzlich soll beurteilt werden, wie sich das Planvorhaben auf das lokale Mikroklima auswirkt. Die Veränderungen der thermischen Belastungssituation und der Durchlüftungsverhältnisse werden anhand von Simulationsrechnungen mit dem mikroskaligen Stadtklimamodell ENVI-met in der Version 5.0.3 (Summer Release 2022) für die Bestands- und Plansituation für eine Hauptwindrichtung an einem heißen Sommertag bestimmt. 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 10,5 m über Grund ausgewertet und dargestellt.

Aufbauend auf den Simulationsergebnissen des Ist- und Planfalls werden Planungsempfehlungen zur klimatischen Optimierung des Planvorhabens gegeben. Deren Wirksamkeit wird mit einer weiteren mikroklimatischen Simulationsrechnung („optimierter Planfall“) überprüft.

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

## 2 Bearbeitungsgrundlagen, zitierte Normen und Richtlinien

Titel / Beschreibung / Bemerkung		Kat.	Datum
[1]	Neuer Krefelder Hof – Geltungsbe- reich Bebauungsplan	Stadt Krefeld (zur Verfügung gestellt durch den Auftragge- ber)	P Juli 2020
[2]	Entwurfplanung „Krefelder Höfe“ Lageplan E-L-01	Form A Architekten GbR	P 12.09.2022
[3]	Lagepläne, Geschosspläne, An- sichten	Form A Architekten GbR	P 12.09.2022
[4]	Entwurfsplanung Zukunftsfähigkeit E-L-03	Form A Architekten GbR	P 30.05.2022
[5]	Vorentwurfsplan Krefelder Höfe	KRAFT.RAUM. Landschaftsar- chitektur/ Stadtentwicklung	P 13.12.2022
[6]	Baumkataster Stadt Krefeld	Datenportal der Stadt Krefeld	P 22.07.2022
[7]	Gesamtstädtische Klimaanalyse Krefeld	Stadt Krefeld	P 2003
[8]	Das Kaltluft-Abfluss-Modell KLAM_21. Theoretische Grundla- gen und Handhabung des PC-Pro- gramms	Deutscher Wetterdienst	Lit. 2008
[9]	Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21	Deutscher Wetterdienst	Lit. November 2017
[10]	Urban Atlas LCLU 2018	European Environment Agency (EEA) under the framework of the Copernicus programme: <a href="https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018">https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018</a>	P 2022
[11]	Klimaatlas NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nord- rhein-Westfalen: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas">https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas</a>	Abruf am: 15.09.2022
[12]	Zeitreihe der Windrichtung und -geschwindigkeit der LANUV-Stati- on Düsseldorf-Flughafen aus dem Zeitraum 2011-2020	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nord- rhein-Westfalen	P 2022
[13]	LOD2-Modell des Untersuchungs- gebietes im CityGML-Format	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[14]	Normalisiertes digitales Oberflä- chenmodell (NDOM) des Untersu- chungsgebietes	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022

Titel / Beschreibung / Bemerkung		Kat.	Datum
[15]	Digitales Geländemodell (DGM) – Gitterweite 2 m	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[16]	Digitales Geländemodell (DGM) – Gitterweite 20 m	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[17]	Digitale Orthophotos (DOP)	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[18]	Amtliche Basiskarte (ABK) des Untersuchungsgebietes	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[19]	INSPIRE-WFS NW Bodenbedeckungsvektor ALKIS	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[20]	BK 50; Bodenkarte von NRW 1:50.000	Geoportal NRW: <a href="https://www.geoportal.nrw/">https://www.geoportal.nrw/</a>	P 2022
[21]	Rechenmodell ENVI-met, Version 5.0.3 - Summer Release 2022	ENVI_MET GmbH <a href="https://www.envi-met.com/">https://www.envi-met.com/</a>	Lit. 2022
[22]	GALK-Straßenbaumliste	GALK e.V., Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz: <a href="http://strassenbaumliste.galk.de/">http://strassenbaumliste.galk.de/</a>	P 2022
[23]	VDI 3787, Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung.	Verein Deutscher Ingenieure	RIL 2008
[24]	VDI 3787 Blatt 5 Lokale Kaltluft	Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL	RIL 2003
[25]	VDI 3787, Blatt 8. Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel	Verein Deutscher Ingenieure	RIL 2022
[26]	Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels	A. Matzarakis, in Umweltmeteorologie, Nr. 3, 2013	Lit. 2013
[27]	Stadtklima	S. Henninger & S. Weber, 2019	Lit 2019
[28]	Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-Verbraucherschutz NRW	Lit 2011
[29]	Meteorologie	H. Häckel, 4. Auflage	Lit 1999
[30]	Klimatologie	W. Kuttler, 2. Auflage	Lit 2013

Titel / Beschreibung / Bemerkung		Kat.	Datum
[31] 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
[32] 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
[33] Beaufort-Skala	Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes: <a href="https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&amp;lv2=100310&amp;lv3=100390">https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&amp;lv2=100310&amp;lv3=100390</a>	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 Planvorhaben liegt im Stadtteil Krefeld-Bockum an der Uerdinger Straße. Die aktuellen Hotelgebäude liegen mittig auf dem Grundstück, welches über die Uerdinger Straße erschlossen ist. Abgesehen von Geh- und Fahrwegen weist das Plangebiet einen hohen Vegetationsbestand auf. Sowohl auf den Flächen nördlich als auch auf den Flächen südlich der Hotelgebäude befindet sich Bäume und Sträucher. Freiflächen sind mit Rasen bewachsen. Nördlich des Grundstücks verläuft die Uerdinger Straße, die durch eine Freifläche vom Hotel getrennt ist.

Von Norden bis Osten grenzen an das Plangrundstück hauptsächlich Wohngebiete mit Ein- und Mehrfamilienhäusern und angeschlossenen Gärten. Im Osten und Südosten liegen in 200 bis 300 m Entfernung ein Kinderheim, eine Waldorfschule sowie ein Altenheim. Im Süden schließt ein Gewerbe- und Industriegebiet an. Im Westen und Südwesten liegen eine Sportanlage, Schrebergärten sowie der Sprödenalplatz. Abgesehen von dem Gewerbegebiet weist die Umgebung des Planvorhabens einen hohen Durchgrünungsgrad auf.

Im weiteren Umfeld des Plangebietes liegt ca. 1,4 km nördlich des Hotels der Krefelder Stadtwald. Etwa 800 m östlich befinden sich der Krefelder Zoo, das Grotenburg-Stadion und der Schönhausenpark. Im Süden verläuft die B 57 in ca. 400 m Entfernung.

Anlage 1 zeigt die derzeitige Bestandssituation.

Die geplante Entwicklung des Grundstücks ist in Anlage 2 dargestellt.

Die Planung sieht den vollständigen Rückbau der Bestandsbebauung und die Errichtung von insgesamt sieben Gebäuden vor. Dazu gehören das neu zu bauende Hotel im Norden des Geländes an der Uerdinger Straße sowie sechs Wohngebäude mit einer angeschlossenen KiTa. Die Entwurfsplanung [2] sieht Gebäude mit maximal acht Geschossen vor. Diese sind laut den Geschossplänen [3] zum Teil mit einer extensiven Dachbegrünung ausgestattet.

Das Plangebiet ist an die Uerdinger Straße angeschlossen. Hier ist eine Zufahrt für das Hotel und dessen Anlieferung sowie für die KiTa geplant. Zudem ist eine Rampe für die Tiefgarage vorgesehen. Das Grundstück kann, abgesehen von diesen Zufahrten, nur zu Fuß oder mit dem Fahrrad durchquert werden. Auf den Freianlagen zwischen den Gebäuden liegen Spielplätze. Insgesamt weist das geplante Quartier einen hohen Begrünungsgrad auf.

## 4 Grundlagen

Die beschriebenen örtlichen Gegebenheiten werden für die klimatischen Untersuchungen in Modelle überführt, deren Ergebnisse im Anschluss quantitativ und qualitativ bewertet werden. Zur Einordnung der Ergebnisse ist die Kenntnis der zugrunde liegenden Vorgänge im Kaltluftgeschehen sowie der Größen, welche das städtische Mikroklima beeinflussen entscheidend. Daher werden die Grundlagen beider Themenkomplexe im Folgenden erläutert.

### 4.1 Kaltluft

Für den Themenkomplex Kaltluft ist das Wissen um die Entstehung und die Wirkung von Kaltluftabflüssen für die Ergebnisinterpretation wichtig. Auf diese wird daher im Folgenden eingegangen. Darüber hinaus wird die Ergebnisbewertung entsprechend der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 [24] erläutert.

#### 4.1.1 Entstehung und Wirkung von Kaltluftabflüssen

In wolkenarmen, windschwachen Nächten (Strahlungsnächten) bildet sich durch die negative Strahlungsbilanz über Freiflächen eine bodennahe Kaltluftschicht aus. Im topographisch gegliederten Gelände fließt diese Kaltluft entsprechend der Neigung des Geländes hangabwärts. Damit nennenswerte Kaltluftabflüsse entstehen, sollte die Hangneigung erfahrungsgemäß wenigstens 1 bis 2 Grad betragen.

Die Mächtigkeit einer solchen Kaltluftschicht kann in Abhängigkeit des Nachtzeitpunktes, der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes sowie den meteorologischen Rahmenbedingungen stark schwanken. Im Allgemeinen beträgt sie zwischen 1 und 50 m. Staut sich der Kaltluftabfluss an Hindernissen oder in Senken, bildet sich ein sogenannter Kaltluftsee, in dem die Kaltluft zum Stehen kommt. In solchen Kaltluftseen kann die Kaltluftschichtdicke auch deutlich größere Mächtigkeiten annehmen. Die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb eines Kaltluftabflusses liegt typischerweise in der Größenordnung zwischen 1 und 3 m/s. Aufgrund der oftmals nur sehr flachen Ausprägung und den geringen Strömungsgeschwindigkeiten sind Kaltluftabflüsse sehr störanfällig, sodass Hindernisse wie Gebäude, Wälle oder Lärmschutzwände unter gewissen Randbedingungen zu einem Strömungsabbruch führen können.

Die Produktionsrate von Kaltluft hängt stark von der Landnutzung ab: Freilandflächen weisen die höchsten Kaltluftproduktionsraten (zwischen 10-20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h) auf, für Waldflächen schwanken die Literaturangaben sehr stark (zwischen 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h in ebenem Gelände und 30-40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h am Hang). Besiedelte, versiegelte Gebiete verhalten sich bezüglich der Kaltluftproduktion neutral bis kontraproduktiv (städtische Wärmeinsel).

Unter Umweltgesichtspunkten werden Kaltluftabflüssen sowohl positive als auch negative Auswirkungen zugewiesen. Zum einen kann Kaltluft nachts für Belüftung und damit Abkühlung thermisch belasteter Siedlungsgebiete sorgen. Zum anderen sorgt Kaltluft, die aus Reinluftgebieten kommt, für die nächtliche Belüftung schadstoffbelasteter Siedlungsräume. Kaltluft kann aber auch auf ihrem Weg Luftbeimengungen (Autoabgase, Geruchsstoffe etc.) aufnehmen und transportieren. Nimmt sie zu viele Schadstoffe auf, kann ihr Zufluss von Schaden sein.

#### 4.1.2 Bewertung von Kaltluftabflüssen

Zur Quantifizierung von Kaltluftabflüssen und der Bewertung von planungsbedingten Veränderungen wird in der Regel der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Gemäß [24] ist der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Kaltluftsäule sowie der Kaltluftschichtdicke und gibt an, wie viel Kaltluft in einer definierten Zeit (z.B. Sekunde) durch einen 1 m breiten Querschnitt strömt. Der Kaltluftvolumenstrom ist somit ein lokal gültiges Maß und damit für die Messung, die Bewertung und die Modellrechnung sehr gut geeignet.

Die Bewertung der planbedingten Veränderungen im Kaltluftgeschehen erfolgt gemäß der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 „Lokale Kaltluft“ [24]. Diese Richtlinie schlägt vor, als Maß der Beeinflussung die prozentuale Änderung eines Parameters gegenüber dem Istzustand sowie die Häufigkeit des Auftretens heranzuziehen. Zur Bewertung einer planbedingten Veränderung wird daher in dieser Untersuchung die in Tabelle 4.1 dargestellte Skala verwendet.

Tabelle 4.1: Bewertung der planerischen Auswirkungen von Kaltluftabflüssen [24]

Prozentuale Änderung gegenüber dem Ist-Zustand	≤ 5 %	≤ 10 %	> 10 %
Auswirkung	gering	mäßig	hoch

## 4.2 Stadtklima

Für die Untersuchung des lokalen Mikroklimas ist das Wissen um die Ausbildung des städtischen Klimas notwendig. 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 [31].

### 4.2.1 Lufttemperatur

Durch die Überwärmung von Stadtgebieten, die im Allgemeinen als städtische Wärmeinsel bezeichnet wird, sind im Vergleich zur ländlichen Umgebung bodennah höhere Lufttempera-

turen zu verzeichnen. Im Jahresmittel beträgt der Temperaturunterschied zwischen 1 und 2 K, in den Sommermonaten kann die Differenz mehr als 10 K betragen [29]. 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 [31].

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 ihrer Wärmeleitfähigkeit tagsüber die einfallende kurzwellige 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 Lufttemperaturen 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 [27].

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.

#### **4.2.2 Windfeld**

Neben der Lufttemperatur wird auch das Windfeld durch städtische Strukturen beeinflusst. 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 [29].

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 [27]. 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 [30].

### 4.2.3 Bioklimatischer 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 [26]. 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 [23] werden verschiedene Methoden zur Quantifizierung des bioklimatischen Komforts aufgeführt. Im Folgenden wird zur Beurteilung des Bioklimas die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) herangezogen. Die PET beschreibt das bioklimatische Empfinden bei wechselnden Umgebungsbedingungen. Eine bioklimatische 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 bioklimatischen Komforts sind in der nachfolgenden Tabelle 4.2 dargestellt:

Tabelle 4.2: Bewertung des bioklimatischen Komforts mit PET

PET	Bioklimatisches Empfinden	Thermophysiological Belastungsstufe
< 4 °C	sehr kalt	extreme Kältebelastung
4 °C – 8 °C	kalt	starke Kältebelastung
8 °C – 13 °C	kühl	mäßige Kältebelastung

<b>PET</b>	<b>Bioklimatisches Empfinden</b>	<b>Thermophysiologische Belastungsstufe</b>
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

## **5 Klimatische Situation in Krefeld**

### **5.1 Lokalklima im Umfeld des Planvorhabens**

Zur stadtklimatologischen Einordnung des Plangebietes wird ein Auszug aus der Klimaanalyse der Stadt Krefeld aus dem Jahr 2003 herangezogen [7]. Grundlage dieser Klimaanalyse sind stationäre und mobile Messungen im gesamten Stadtgebiet. Aus den Messergebnissen wurden unter anderem eine synthetische Klimafunktionskarte sowie eine Planungshinweiskarte abgeleitet. Auszüge der Klimafunktionskarte für das Umfeld des Plangebietes sind in Anlage 3 dargestellt. Anlage 4 zeigt die Klimahinweiskarte für das Plangebiet und dessen Umgebung.

In der Klimafunktionskarte in Anlage 3 wird das Plangrundstück als „Gartenstadt-Klimatop“ eingeordnet. Dieses zeichnet sich laut der zugehörigen Legende durch eine teilweise geschlossene Bebauung mit einem hohen Grünflächenanteil aus. Durch die Bebauungsstruktur und die vorhandene Durchgrünung ist laut der Klimafunktionskarte nur mit einer mäßigen nächtlichen Überwärmung zu rechnen. Aufgrund von Gebäude und Vegetation ist der Luftaustausch gegenüber dem unbebauten Umland jedoch eingeschränkt. Entlang von Hauptverkehrsstraßen kann die Luftqualität daher schlecht sein.

Nördlich und westlich des Plangebietes befinden sich Bereiche, die als „Stadt-Klimatop“ klassifiziert werden, welche sich durch Blockbebauung mit großen Innenhöfen auszeichnen. Aufgrund der Bebauungsstruktur kann sich an übergeordneten Straßen eine verminderte Luftqualität einstellen. Durch die vorhandene Begrünung ist in diesen Gebieten jedoch nur mit einer mäßigen nächtlichen Überwärmung zu rechnen. Südwestlich des Plangebietes liegt ein „Grünanlagen-Klimatop“ vor, in welchem das nächtliche Temperaturniveau geringer ist als in bebauten Gebieten. Allerdings ist aufgrund der Größe der Grünfläche nicht mit einer nennenswerten klimatischen Fernwirkung zu rechnen.

Abgeleitet aus der Klimafunktionskarte wird für das Plangebiet als „Übergangsraum“ in der Planungshinweiskarte (s. Anlage 4) die Empfehlung gegeben, bei weiteren Bebauungsmaßnahmen auf die Vernetzung von Grünflächen zu achten. Zudem sollen vorhandenen Grünflächen erhalten und wenn möglich versiegelte Flächen entsiegelt werden.

### **5.2 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 Kli-

schutz- 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 [11] 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 berücksichtigen 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 bis Ende des Jahrhunderts die Anzahl der Heißen Tage in etwa verdoppelt und die Anzahl der Tropennächte mehr als verdreifacht

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

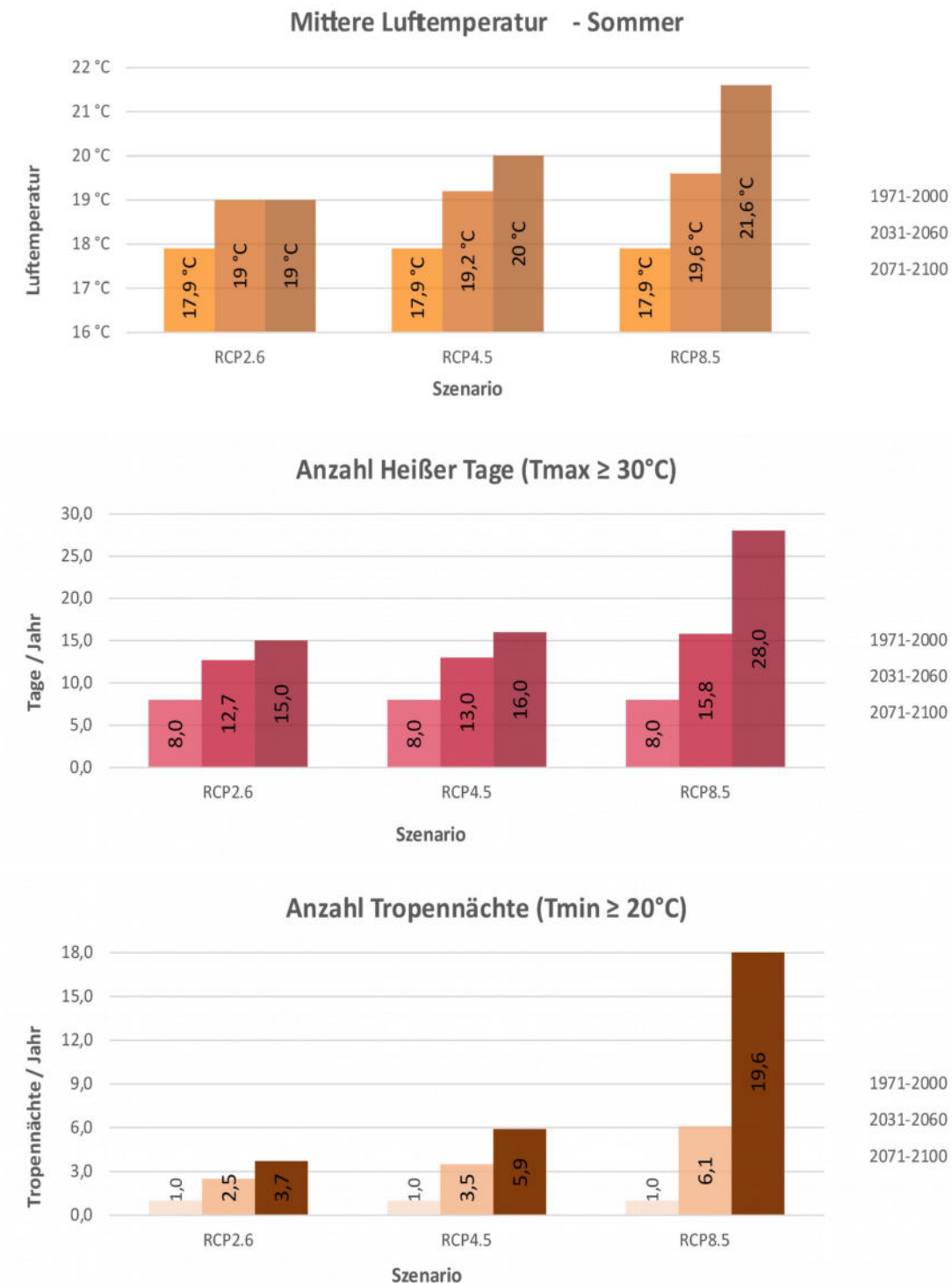
- die mittlere Lufttemperatur im Sommer von 17,9 °C auf 20,0 °C in der „fernen“ Zukunft ansteigt,
- die Anzahl der Heißen Tage bis zum Jahr 2100 von 8 auf 16 ansteigt und im Schnitt 5,9 Tropennächte pro Jahr auftreten.

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

- sich die sommerlichen Temperaturen im Mittel um 1,7 °C (2031-2060) bzw. um 3,7 °C (2071-2100) erhöhen
- sich bis zum Ende des Jahrhunderts die Anzahl der Heißen Tage mehr als verdreifacht und im Mittel 19,6 Tropennächte pro Jahr auftreten werden.

Jedes der Szenarien verdeutlicht, dass die sommerliche Hitzebelastung in der Zukunft zum Teil drastisch zunehmen wird. Bei der Planung von Bauvorhaben sollten daher klimatische Belange berücksichtigt und falls notwendig Optimierungen vorgesehen werden, um auch in Zukunft gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse gewährleisten zu können.

Abbildung 5.1: Prognose der Entwicklung der sommerlichen Wärmebelastung am Plangebiet in Krefeld



### **5.3 Windrichtungsverteilung**

Die Windrichtungsverteilung im Untersuchungsgebiet wurde auf Grundlage von Wetterdaten der DWD-Station Düsseldorf-Flughafen aus dem Zeitraum 2011 – 2020 abgeleitet [12]. Die Station liegt etwa 12,5 km südöstlich des Untersuchungsgebietes.

Anlage 5 zeigt die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung an dieser Station in allen Situationen des Auswertezitraumes (links) sowie für heiße Tage mit einer Maximaltemperatur > 30 °C (rechts).

Die Windrichtungsverteilung für den gesamten Auswertezitraum (2011-2020) zeigt, dass der Wind an der Station bevorzugt aus einer südöstlichen Richtung weht. Ein weiteres Maximum ergibt sich aus südwestlicher Richtung. Anströmungen aus verbleibenden Windrichtungen treten vergleichsweise selten auf.

Die Windrichtungsverteilung an Hitzetagen unterscheidet sich deutlich von der Windrichtungsverteilung des gesamten Auswertezitraumes. So weht der Wind an Hitzetagen überwiegend aus südöstlicher Richtung mit einem deutlichen Maximum bei 140°. Ein sekundäres Windrichtungsmaximum entfällt auf nordöstliche Anströmungsrichtungen. Die in allen Situationen des Auswertezitraums relativ häufig auftretenden südwestlichen Windrichtungen sind in der Hitze-Windrose fast nicht mehr vertreten.

## **6 Themenkomplex Kaltluft**

### **6.1 Berechnungsmodell**

#### **6.1.1 Modellbeschreibung**

Die Kaltluftberechnungen wurden mit der aktuellen Version des vom Deutschen Wetterdienst entwickelten Kaltluftabflussmodells KLAM\_21 [9] durchgeführt.

KLAM\_21 ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet. Über diese Fläche wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Gitterabstände sind dabei 20 bis 50 m.

Die Modellgebietsgröße wird in der Regel so gewählt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst sind. Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsklasse wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine Rauigkeit als Maß für den aerodynamischen Widerstand. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z.B. Einzelgebäude, Dämme, Schallschutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst überwunden werden, wenn sie eine bestimmte Höhe erreicht hat. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft.

Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Zu diesem Zeitpunkt wird eine Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Lufttemperatur und der Luftdichte vorhanden sind. Es werden während der gesamten Nacht gleichbleibend gute Ausstrahlungsbedingungen, also ein wolkenloser Himmel angenommen.

KLAM\_21 ist in der Lage, Kaltluftbewegungen in ihrer Dynamik und zeitlichen Entwicklung flächendeckend wiederzugeben.

Die physikalische Basis des Modells bilden eine vereinfachte Bewegungsgleichung und eine Energiebilanzgleichung, mit der der Energieverlust und damit der „Kälteinhalt“ der Kaltluftschicht bestimmt wird. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten.



## 6.1.2 Aufbau und Abgrenzung des Rechengebietes

Zur korrekten Quantifizierung der Kaltluftabflüsse im Plangebiet muss sichergestellt werden, dass das gesamte Kaltlufteinzugsgebiet oberhalb des Plangebietes in den Berechnungen berücksichtigt wird. Daher wurde vor Beginn der Berechnungen eine Geländeanalyse erstellt und das Untersuchungsgebiet entsprechend großzügig dimensioniert. Das Untersuchungsgebiet entspricht in seinen Ausmaßen dem in Anlage 6 dargestellten Bereich. Die Abmessungen des gesamten Untersuchungsraumes betragen 16 km in x- und 15 km in y-Richtung. In den äußeren Bereichen des Rechengebietes wurde eine horizontale Gitterauflösung von 27,5 m realisiert.

Bei den zu erwartenden Auswirkungen des Planvorhabens handelt es sich eher um kleinräumige Effekte. Um diese Auswirkungen sichtbar zu machen, ist es sinnvoll, die Gebäudestrukturen innerhalb des Plangebietes sowie in dessen Umfeld explizit abzubilden und als Strömungshindernisse zu berücksichtigen.

Das Rechenmodell KLAM\_21 gestattet eine explizite Gebäudeberücksichtigung mithilfe eines „Nesting“ des Modellgebietes, d. h. die Einbettung eines (oder mehrerer) hoch aufgelöster „Kernbereiche“ in einen gröber aufgelösten „Einflussbereich“. Ein solches Nesting ist dann von Vorteil, wenn das eigentliche Untersuchungsgebiet relativ klein ist, dabei aber einen großen Einflussbereich besitzt, der bei einer angemessenen Simulation des Kaltluftgeschehens mit berücksichtigt werden muss. Innerhalb des Nestinggebietes wird die Gitterauflösung des gröbereren Einflussbereichs um den Faktor 5 erhöht.

Die Lage des in dieser Untersuchung verwendeten Nestingbereiches, in dem die Gebäudestrukturen explizit aufgelöst wurden, zeigt Anlage 6. In diesem Bereich wurde eine horizontale Gitterauflösung von 5,5 m realisiert. Die Abmessungen des Nestinggebietes betragen etwa 2,1 km in Ost-West- und etwa 2,0 km in Nord-Süd-Richtung.

Für die Berechnung wurde eine Strahlungsnacht ohne übergeordneten Regionalwind angenommen, d. h. die Berechnungsergebnisse zeigen das reine, thermisch bedingte Kaltluftgeschehen.

## 6.2 Eingangsdaten

### 6.2.1 Digitales Geländemodell

Die für die Berechnung notwendigen Informationen zur Geländehöhe wurden aus einem frei verfügbaren digitalen Geländemodell von Deutschland mit einer Gitterweite von 20 m abgeleitet. Innerhalb des Nestinggebietes wurden die Geländehöhen dem hochaufgelösten, vom Land NRW kostenfrei zur Verfügung gestellten digitalen Geländemodell (DGM) [15] entnommen. Das hochaufgelöste DGM wurde dem 20 m-DGM [16] aufgeprägt und das Gesamt-DGM in eine einheitliche horizontale Gitterauflösung von 5,5 m überführt. Anlage 6 zeigt die Geländehöhen im gesamten Untersuchungsraum.

Für die fachgerechte Berücksichtigung des Gebäudeeinflusses innerhalb des Nestinggebietes müssen die Gebäudehöhen auf das digitale Geländemodell aufgeprägt werden (vgl. Kapitel 6.2.2). Hierzu wurde für die Bestandsbebauung ein vom Land NRW kostenfrei zur Verfügung gestelltes 3D-Gebäudemodell [13] herangezogen.

Lage und Höhe der geplanten Bebauung innerhalb des Plangebietes wurden der Entwurfsplanung [1] [2] entnommen.

### 6.2.2 Landnutzung

Die zur Bestimmung von Kaltluftproduktionsraten und Rauigkeiten benötigten Informationen zur Landnutzung im Untersuchungsraum wurden mithilfe des von der EU zur Verfügung gestellten Datensatzes Urban-Atlas mit Stand 2018 [10] abgeleitet. Dieser Dienst stellt sehr hoch aufgelöste Landnutzungsdaten, die aus Satellitenbildern abgeleitet werden, für europäische Ballungsgebiete zur Verfügung. Der Vorteil dieses Datensatzes gegenüber anderen Datenquellen zur Landbedeckung (z.B. Corine und ALK) besteht darin, dass in den Siedlungsbereichen nach verschiedenen Versiegelungsgraden unterschieden wird und somit die Rauigkeit und Kälteproduktion innerhalb von Siedlungsgebieten in den KLAM-Berechnungen deutlich genauer erfasst werden kann.

Da die Landnutzungsklassen des Urban Atlas, bzw. des Corine-Katasters nicht den in KLAM\_21 verwendeten Landnutzungsklassen entsprechen, mussten zunächst die jeweiligen Landnutzungsklassen-Klassen in die standardmäßig vorgegebenen KLAM-Klassen reklassifiziert werden. Anlage 8 zeigt die in den Berechnungen berücksichtigte Landnutzung im Umfeld des Plangebietes im Istfall.

Die in den Kaltluftberechnungen verwendeten Landnutzungsklassen mit den entsprechenden Parametern können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 6.1: Verwendete Landnutzungsklassen im Rechenmodell KLAM\_21

Nutzungen	z0g	grz	hg	wai	bg	hv	xlai	a	vsg
Wald	0,4	0,0	0,0	0,0	0,9	20,0	6,0	0,56	0,0
halb vers. Fläche	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,5
Park	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	20,0	6,0	1,0	0,05
unvers. Freifläche	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
versiegelte Fläche	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-99	1,0
Wasser	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bahnfläche	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,75	0,0
Siedlungsstrukturen Versiegelungsgrad > 80%	0,1	0,6	12,0	3,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,9
Siedlungsstrukturen Versiegelungsgrad 50 - 80%	0,1	0,4	10,0	4,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,65
Siedlungsstrukturen Versiegelungsgrad 30 - 50%	0,1	0,2	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,4
Siedlungsstrukturen Versiegelungsgrad 10 - 30%	0,1	0,1	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,2
Siedlungsstrukturen Versiegelungsgrad < 10%	0,1	0,05	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,1
Isolierte Strukturen	0,1	0,2	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	-99	0,4
Industrie – und Gewerbegebiete	0,1	0,6	12,0	0,9	0,0	0,0	0,0	-99	0,9

Mit:

- z0g(i)** Rauigkeitslänge des Bodens in m ohne Beachtung explizit spezifizierter Bebauung oder Bewaldung
- grz(i)** Grundflächenzahl, Anteil der bebauten Fläche an der Gesamtfläche
- hg(i)** mittlere Gebäudehöhe in m
- wa(i)** Wandflächenindex, mittleres Verhältnis der Wandfläche eines Gebäudes zu dessen Grundfläche
- bg(i)** mittlerer Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen
- xlai(i)** Blattflächenindex, über die Höhe aufsummierte einseitige Blattfläche eines Baumes im Verhältnis zu seiner Kronenquerschnittsfläche
- hv(i)** mittlere Baumhöhe in m
- a(i)** relativer Wirkungsgrad der effektiven Ausstrahlung im Vergleich zu einer optimalen Abkühlungsfläche (Bei einem Wert von -99 wird a als Funktion von Bebauung und Versiegelung berechnet [9])
- vsg(i)** Versiegelungsgrad der Gesamtfläche einschließlich der bebauten Flächenanteile

### **6.3 Ergebnisse der Kaltluftberechnung**

Die Kaltluftsimulationen wurden ohne übergeordneten Regionalwind durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse zeigen somit ausschließlich das thermisch bedingte Kaltluftgeschehen. Im Folgenden wird die Kaltluftsituation (Kaltfluthöhe und Kaltluftvolumenstrom) zu zwei Zeitpunkten ausgewertet und dargestellt. Der erste Auswertzeitpunkt ist zwei Stunden nach Sonnenuntergang und der zweite Auswertzeitpunkt sechs Stunden nach Sonnenuntergang. Erfahrungen zeigen, dass nach sechs Stunden das Kaltluftgeschehen stationär wird, d. h. dass sich ab diesem Zeitpunkt kaum noch Änderungen im Strömungsgeschehen ergeben.

Bei der Interpretation der Darstellungen des Kaltluftvolumenstroms ist zu beachten, dass die Windpfeile die mittlere Strömung innerhalb der gesamten Kaltluftsäule angeben.

#### **6.3.1 Kaltluftgeschehen zwei Stunden nach Sonnenuntergang**

Anlage 10 bis Anlage 17 zeigen das Kaltluftgeschehen im Ist- und Planfall sowie die aus dem Planvorhaben resultierenden prozentualen und absoluten Veränderungen der Kaltfluthöhe und des Kaltluftvolumenstroms zum Zeitpunkt zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

Anlage 10 zeigt die Mächtigkeit der Kaltluftschicht innerhalb des Nestinggebietes im Istfall. Diese bewegt sich hauptsächlich zwischen 10 m und 15 m. Vereinzelt zeigen sich Bereiche in denen die Mächtigkeit bis zu 20 m beträgt. Innerhalb des Plangebietes liegt die Kaltflutschichtdicke zwischen 10 m und 15 m. Die hier anzutreffende Kaltluftschicht resultiert insbesondere aus der auf den innerstädtischen Freiflächen lokal gebildeten Kaltluft. Ein vom Umland in das Plangebiet wirkender Kaltluftstrom liegt nicht vor.

Anlage 14 zeigt den Kaltluftvolumenstrom in den frühen Nachtstunden für den Bestandsfall. Dieser beträgt in einem Großteil des Nestinggebietes weniger als  $2 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ . Nur vereinzelt zeigen sich in Bereichen mit geringen Rauigkeiten (z.B. Straßen) Volumenströme von bis zu  $4 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ . Innerhalb des Plangebietes liegt ein nur sehr geringer Kaltluftvolumenstrom von  $< 1 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$  vor. Der geringe Kaltluftvolumenstrom resultiert aus den örtlichen Gegebenheiten. Da das gesamte Untersuchungsgebiet nahezu kaum Höhenunterschiede aufweist und aufgrund der Gebäude eine hohe Rauigkeit vorliegt, kann Kaltluft weder von außerhalb des Nestinggebietes einfließen noch fließt die im Gebiet gebildete Kaltluft ab.

Anlage 11 und Anlage 15 zeigen die Kaltfluthöhe sowie den Kaltluftvolumenstrom im Planfall. Anlage 12 und Anlage 16 zeigen die aus der Realisierung des Planvorhabens resultierenden prozentualen Veränderungen. In Bezug auf die Kaltfluthöhe ergeben sich aus dem Planvorhaben keine signifikanten Veränderungen. Für den Kaltluftvolumenstrom werden jedoch innerhalb des Plangebietes sowie insbesondere auf dem östlich an das Plangebiet angrenzende Grundstück prozentuale Zu- und Abnahmen von mehr als 10 % ausgewiesen. Es ergeben sich sowohl Ab- als auch Zunahmen sowohl auf dem Plangebiet als auch in dessen

Umfeld. Die Veränderungen werden durch die neue Gebäudestellung im Planfall hervorgerufen, welche ein geringfügig verändertes Abflussverhalten der innerhalb des Plangebietes gebildeten Kaltluft hervorrufen.

Zur besseren Einordnung der Veränderungen wurden neben den prozentualen auch die absoluten Differenzen für die Kaltfluthöhe (s. Anlage 13) und den Kaltluftvolumenstrom (s. Anlage 17) dargestellt. Hier zeigt sich, dass aus dem Planvorhaben weder für die Kaltfluthöhe noch für den Kaltluftvolumenstrom signifikante, spürbare Veränderungen resultieren.

Ein relevanter Einfluss des Planvorhabens auf das ohnehin nur sehr schwach ausgeprägte Kaltluftgeschehen in den frühen Nachtstunden kann daher aufgrund der Rechenergebnisse ausgeschlossen werden.

### **6.3.2 Kaltluftgeschehen sechs Stunden nach Sonnenuntergang**

Anlage 18 bis Anlage 25 zeigen das Kaltluftgeschehen im Ist- und Planfall sowie die aus dem Planvorhaben resultierenden prozentualen und absoluten Veränderungen sechs Stunden nach Sonnenuntergang.

Die Berechnungsergebnisse zeigen für die Kaltfluthöhe im Bestandsfall (s. Anlage 18), dass deren Mächtigkeit in der zweiten Nachthälfte weiter angewachsen ist. In einem Großteil des Nestinggebietes ergeben sich Kaltfluthöhen von bis zu 30 m.

Auch die Kaltluftvolumenstromdichte im Bestand (s. Anlage 22) erhöht sich in der zweiten Nachthälfte. Über Freiflächen und Straßen ergeben sich Werte von bis zu  $7 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ . Diese leichte Erhöhung des Kaltluftvolumenstroms wird durch die mächtigere Kaltluftschicht im Bereich des Nestinggebietes hervorgerufen. Diese kann aufgrund ihrer Höhe über die Bebauung hinweg strömen und fließt in Richtung der westlich des Nestinggebietes gelegenen Innenstadt ab, da die Kaltluftschichtdicke aufgrund des höheren Gebäude- und geringeren Begrünungsanteils hier geringer ist.

Wie bereits in der ersten Nachthälfte zeigt die prozentuale Differenz der Kaltfluthöhe in Anlage 20, dass durch das Planvorhaben keine Veränderungen hervorgerufen werden. Die prozentualen Veränderungen im Kaltluftvolumenstrom (s. Anlage 24) betragen wie bereits zum Zeitpunkt zwei Stunden nach Sonnenuntergang mehr als 10 %. Dies gilt sowohl für die Zu- als auch für die Abnahmen. In der Darstellung der absoluten Veränderungen in Anlage 25 zeigen sich jedoch keine Veränderungen des Kaltluftvolumenstroms.

Insgesamt zeigen sich analog zur Situation in den frühen Nachtstunden nur geringfügige planbedingte Veränderungen im direkten Umfeld des Plangebietes. Eine durchgreifende Verschlechterung der Durchlüftung in den angrenzenden Wohngebieten kann auch für die zweite Nachthälfte ausgeschlossen werden.

## **7 Themenkomplex Überhitzung und Durchlüftung**

### **7.1 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) für die nachfolgend aufgeführten Varianten mit der bei sommerlichen Wetterlagen auftretenden Hauptwindrichtung Südost durchgeführt:

- Istfall: Bestandsbebauung, aktueller Vegetationsbestand und aktuelle Oberflächenbeschaffenheit
- Planfall: Zukünftige Bebauungssituation nach Realisierung der Planung entsprechend der Entwurfsplanung [2] sowie der Lagepläne, Geschosspläne und Ansichten [3]

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

#### **7.1.1 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 26.

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.

#### **7.1.2 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 802 m in x- und 850 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 10 m erhöht sich die vertikale Zellausdehnung um jeweils 14 %. Bei einer Anzahl von 30 Gitterzellen in z-Richtung ergibt sich hieraus eine maximale Modellhöhe von 113,77 m.

## **7.2 Eingangsdaten**

### **7.2.1 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 für das gesamte Untersuchungsgebiet wurden aus dem vom Land NRW zu Verfügung gestellten LOD2-Gebäudemodell [13] abgeleitet. Anlage 27 zeigt hierzu den berücksichtigten Gebäudebestand im Istfall. Anlage 28 enthält den Gebäudebestand sowie die Plangebäude im Planfall, welche auf Grundlage der Entwurfsplanung [2] abgeleitet wurden. Für einen Teil der Plangebäude fließt entsprechend der Darstellung in den Geschossplänen [3] zudem eine extensive Dachbegrünung mit einer Substratdicke von 12 cm und einem aufliegenden Bewuchs von 10 cm in die Berechnung ein. Die Dachbegrünung ist in Anlage 28 dargestellt.

Neben der Lage und Höhe müssen den Gebäuden in ENVI-met auch thermische und strahlungstechnische Eigenschaften zugewiesen werden. In den Berechnungen wurde allen Dächern und Fassaden der ENVI-met Standardaufbau (moderate Isolierung) zugeordnet. Nur das Reflexionsvermögen (Albedo) der äußeren Schicht wurde angepasst. Hier wurde bei den Gebäudewänden und -dächern der Bestandsbebauung nach dunklen und hellen Oberflächen unterschieden. Den Plangebäuden wurde im Sinne eine Worst-case-Einschätzung ein dunkles Oberflächenmaterial zugewiesen. Die Rauminnentemperatur beträgt bei allen Gebäuden zum Startzeitpunkt der Simulationsrechnung 20 °C.

### **7.2.2 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 Bäume und ihrer Wuchsform im öffentlichen und privaten Raum erfolgte mithilfe des hochaufgelösten digitalen Oberflächenmodells (NDOM) [14].

Mit Hilfe des Baumkatasters der Stadt Krefeld [6] konnte zudem die Baumart verschiedener Bäume im Umfeld des Plangebietes ermittelt werden. Auf Grundlage der im Internet veröffentlichten Straßenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz [22] 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 Krefeld erfassten Bäume wurde pauschal ein „dichter“ Belaubungsgrad zugewiesen.

Für die Berechnungen zum Planfall wurden die Standorte der Baumneupflanzungen aus der Entwurfsplanung „Zukunftsfähigkeit“ [4] sowie der Entwurfsplanung [2] abgeleitet. Für die geplanten Bäume wurde in Abstimmung mit dem Architekturbüro form A eine Höhe von 7 m und ein „dichter Belaubungsgrad“ angenommen.

Unversiegelten Bereichen im Untersuchungsgebiet ohne Baumbewuchs wurde im Ist- und Planfall pauschal ein niedriger Bewuchs (Gras, Rasen) mit einer Wuchshöhe von 10 cm zugewiesen.

In Anlage 27 und Anlage 28 sind die in die Berechnungen eingehenden Vegetationsbestände für beide Planungssituationen dargestellt.

### **7.2.3 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. Über versiegelten Flächen erfolgt zudem eine stärkere Wärmespeicherung der einfall-



lenden kurzwelligen 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)“ [20] abgeleitet.

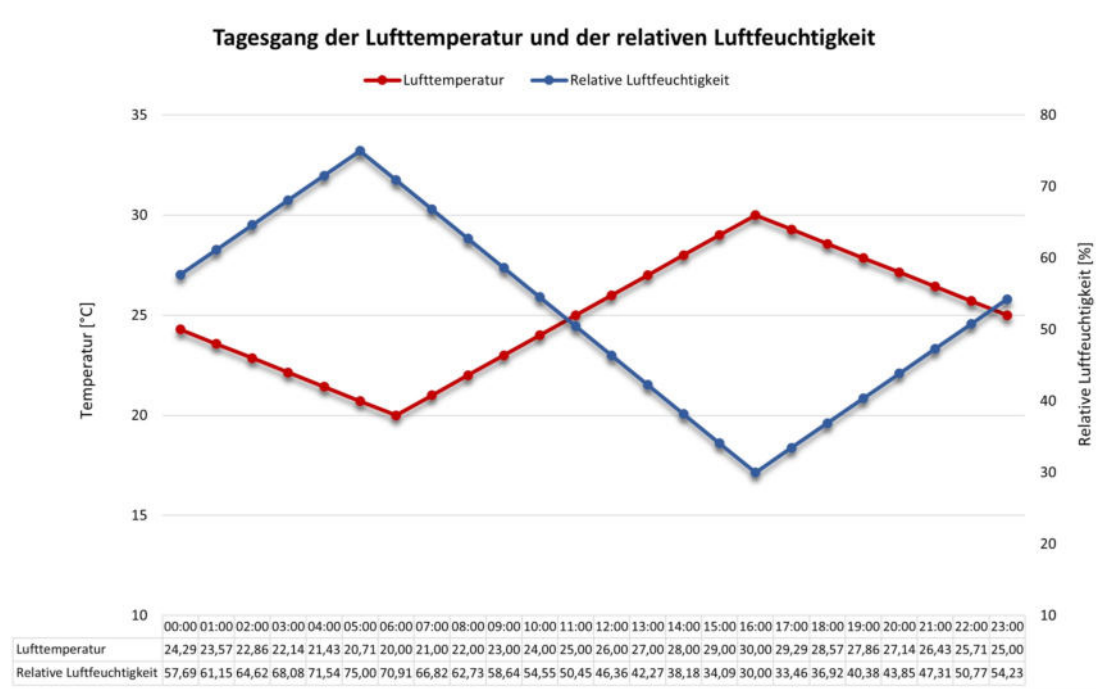
Die versiegelten Flächen im Bestand inner- und außerhalb des Plangebietes wurden anhand aktueller Orthofotos [17] sowie anhand von ALKIS - Bodenbedeckungsdaten des Landes NRW [19] erfasst. Für Straßen wurde hierbei Asphalt, für weitere versiegelte Flächen wie z.B. Parkplätze Beton bzw. Pflaster als Versiegelungsmaterial vorgegeben. Die Ableitung der Oberflächenarten im Planfall erfolgte auf Grundlage der Entwurfsplanung [2]. Grundsätzlich wird in beiden Planungssituationen den unversiegelten Vegetationsflächen unterhalb der angesetzten Rasenfläche die zugrunde liegende Bodeneigenschaft zugewiesen.

Anlage 29 und Anlage 30 zeigen die ins Modell einfließenden Oberflächenbeschaffenheiten für den Ist- und Planfall.

## 7.2.4 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 7.1 entnommen werden:

Abbildung 7.1: 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, das heißt, dass noch ausreichend Wasser für Verdunstungsprozesse im Boden vorhanden ist. Dies repräsentiert die typischen Verhältnisse an einem Sommertag, dem wenige Tage zuvor Regenfälle vorausgegangen sind. 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 zu einem geringeren Unterschied zwischen versiegelten und unversiegelten Flächen führen würde. Im Gegensatz dazu ist ein gesättigter Boden nach anhal-

tendem sommerlichen 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. Aufgrund der Windrichtungsverteilung an Hitzetagen (vgl. Abschnitt 5.3 und Anlage 5) wird die Hauptanströmungsrichtung Südost (140°) in der Simulationsrechnung 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 [32]. 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 84,5 W. Weiterhin wird ein Bekleidungsindex von 0,9 einbezogen, was einem leichten Anzug entspricht.

Die nachfolgende Tabelle 7.1 dokumentiert die wichtigsten Initialisierungsparameter der Simulationsrechnungen:

Tabelle 7.1: Initialisierungsparameter für die Modellberechnungen

Initialisierungsparameter	Startwert
Geographische Position	51,33°N, 6,58°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	140° (Südost)
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

Initialisierungsparameter	Startwert
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 %

### **7.3 Ergebnisse der mikroklimatischen Simulation**

Die Berechnungen wurden mit den dokumentierten Eingangsdaten für den Ist- und den Planfall für die Hauptanströmungsrichtung an Hitzetagen durchgeführt. Zur Bestimmung der thermischen Belastung wurden die beiden Kenngrößen Lufttemperatur und PET-Wert analysiert. Dabei wird die Lufttemperatur 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 10,5 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 7.2.4) repräsentieren. Änderungen der aufgeführten Initialisierungsparameter würden zu abweichenden Ergebnissen führen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass an den jeweiligen Einströmrändern oftmals unrealistisch hohe oder niedrige Werte auftreten. Dies sind modellbedingte Randeffekte und dürfen nicht interpretiert werden. Verlässliche Ergebnisse sind etwa ab Entfernungen von 100 m zum Einströmrand zu erwarten.

#### **7.3.1 Durchlüftung**

Anlage 31 bis Anlage 36 zeigen die simulierten Windgeschwindigkeiten für den Ist- und Planfall sowie die aus der Planung resultierenden Windgeschwindigkeitsdifferenzen für die untersuchte Windrichtung (140°) in zwei Bezugsniveaus (1,5 m und 10,5 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 [33] 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 (s. Anlage 31) 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 damit als üblich anzusehen. Unbebaute Freiflächen wie beispielsweise der Sprödentplatz westlich des Plangebietes fungieren mit Windgeschwindigkeiten von zum Teil mehr als 1,25 m/s als Belüftungsleitbahnen.

Innerhalb des Plangebietes reduziert sich aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung sowie des Vegetationsbestandes die Windgeschwindigkeiten auf Werte zwischen 0,25 m/s und 1,0 m/s. Die höchsten Windgeschwindigkeiten zeigen sich über der Freifläche zwischen der Uerdinger Straße und dem Bestandsgebäude sowie auf einer Parkplatzfläche östlich der Bestandsbebauung. Die niedrigsten Geschwindigkeiten ergeben sich im Nahbereich des Bestandsgebäudes. Im Vergleich mit den umliegenden zum Teil dichter bebauten Wohngebieten ist die Durchlüftungssituation als günstig zu bewerten.

Durch die Realisierung des Planvorhabens (s. Anlage 32) sinkt die Windgeschwindigkeit aufgrund der dichteren Bebauung innerhalb des Plangebietes zum Teil deutlich. Aufgrund der lückigen Bauungsstruktur ist das Plangebiet bei Südostwinden am westlichen und östlichen Rand sowie über den zentralen Fuß- und Radweg aber weiterhin ausreichend durchströmbar.

Anlage 33 zeigt die planungsbedingten Differenzen für das bodennahe Niveau. Die stärksten Abnahmen treten vor allem in Bereichen auf, die zwischen zwei Gebäuden und quer zur Anströmungsrichtung liegen. Weiterhin wird deutlich, dass sich Veränderungen der bodennahen Durchlüftung weitestgehend auf das Plangebiet und dessen direktes Umfeld beschränken. Geringfügige Geschwindigkeitsabnahmen außerhalb des Plangebietes ergeben sich nur an wenigen Gebäuden der Uerdinger Straße im Bereich zwischen Gneisenau- und Waldhofstraße. Dahinter nimmt die Windgeschwindigkeit wieder das ursprüngliche Niveau an. Signifikante Windgeschwindigkeitsminderungen, die deutlich über das Plangebiet hinausgehen, können daher ausgeschlossen werden.

Das Windfeld im Überdachniveau in der Istsituation (s. Anlage 34) zeigt grundsätzlich ein ähnliches Bild wie das bodennahe Windfeld. Aufgrund der insgesamt geringeren Hinderniswirkung in diesem Auswertenniveau liegen höhere Windgeschwindigkeiten als im bodennahen Bereich vor.

Ähnlich wie im bodennahen Bereich sinken durch die neuen Gebäude auch im höheren Auswertenniveau die Windgeschwindigkeiten (vgl. Anlage 35). Die Durchströmbarkeit des Gebietes ist aber auch nach Realisierung der Planung weiterhin gegeben.

Auch im Überdachniveau reichen die planbedingten Veränderungen kaum über die Plangebietsgrenzen hinaus (vgl. Anlage 36). Daher können signifikante Änderungen außerhalb des Plangebietes infolge der Planung auch in dieser Höhe ausgeschlossen werden.

### **7.3.2 Lufttemperatur**

Anlage 37 bis Anlage 42 zeigen die simulierten Lufttemperaturen zu den zwei Auswertezeiten für den Ist- und Planfall. Zusätzlich wird jeweils die planbedingte Temperaturdifferenz ausgegeben.

#### **7.3.2.1 14 Uhr**

Anlage 37 bis Anlage 39 zeigen die simulierten Lufttemperaturen in 1,5 m Höhe für die untersuchte Hauptwindrichtung (140 °) an Hitzetagen für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Temperaturdifferenzen zum nachmittäglichen Auswertzeitpunkt 14 Uhr.

Die Rechenergebnisse zum Istfall (s. Anlage 37) zeigen, dass das Temperaturfeld im Untersuchungsgebiet an sommerlichen Strahlungstagen in den Bereichen mit Wohnbebauung relativ homogen ist. Die Temperaturen liegen in diesem Gebiet hauptsächlich zwischen 27,4 °C und 28,4 °C. Höhere Temperaturen sind im Bereich des Sprödentalplatzes sowie der angrenzenden Schrebergärten im Westen des Rechengebietes zu erwarten. Hier liegt das Temperaturniveau zwischen 28,4 °C und 29,0 °C.

Die geringeren Temperaturen im Bereich der Wohnbebauung resultieren aus dem hohen Vegetationsanteil sowohl auf den Straßen als auch in den vorhandenen Gärten. Die Vegetation entzieht der Luft durch Transpiration Energie. Bäume sorgen zudem für Verschattung, wodurch sich darunter liegende Flächen weniger stark aufheizen als unverschattete Freiflächen. Auf versiegelten Flächen mit fehlender Vegetation wie zum Beispiel auf dem Sprödentalplatz werden hingegen erkennbar höheren Temperaturen erreicht.

Auf dem Plangebiet wird mit Temperaturen zwischen 27,8°C und 28,4°C aufgrund des hohen Vegetationsanteils ein ähnlich günstiges Temperaturniveau wie in den umliegenden Wohngebieten prognostiziert.

Durch die Realisierung verändert sich das Temperaturniveau sowohl innerhalb als auch außerhalb des Plangebietes infolge der neuen Bauungsstruktur (s. Anlage 39). Im südlichen Teil des Plangebietes, im Luv der geplanten Gebäude nimmt die Lufttemperatur um bis zu 0,6 °C zu. Im nördlichen Bereich hingegen resultieren aus der Planung Abkühlungen von bis zu 0,4 °C. Diese Temperaturminderungen reichen über das Plangebiet hinaus und sind in etwa bis zur Germaniastraße nachweisbar.

Die Temperaturzunahmen ergeben sich aus dem geringeren Vegetationsbestand sowie den neuen Gebäuden im Süden des Plangebietes. Durch den Wegfall von Bäumen sinkt die Transpirationsleistung und der Anteil verschatteter Freiflächen. Zusätzlich bilden die neuen Gebäude größere Barriere für den Wind als die Bestandsbebauung, wodurch sich die einströmende Luft staut und infolge der von der Sonne beschienenen warmen Fassaden erwärmt wird.

Im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes ergeben sich hingegen Temperaturminderungen, da die Plangebäude für zusätzlichen Schatten sorgen. Zudem entziehen Gebäude der Umgebungsluft am Tag Energie und speichern diese, wodurch die Lufttemperatur in ihrem Umfeld sinkt.

Aus der Neuplanung ergeben sich insbesondere im Süden des Plangebietes zusätzliche thermische Belastungen. Da hiervon auch sensible Aufenthaltsbereiche betroffen sind, sollte planerisch auf die Reduktion der Erwärmung hingewirkt werden. Für Bereiche außerhalb des Plangebietes ergeben sich auf Grundlage der durchgeführten Simulation keine Hinweise auf eine planbedingte Erhöhung des nachmittäglichen Temperaturniveaus.

#### **7.3.2.2 4 Uhr**

Anlage 40 bis Anlage 42 zeigen die simulierten Lufttemperaturen in 1,5 m Höhe für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Temperaturdifferenzen für die untersuchte Anströmungsrichtung um 4 Uhr.

In der Nacht zeigt sich ein deutlich geringeres Temperaturniveau als am Tag. Die Temperaturen in der Bestandssituation (s. Anlage 40) liegen zwischen 23,2 °C und 24,4 °C. Innerhalb des Plangebietes werden Temperaturen zwischen 23,6 °C und 24,2 °C ausgewiesen.

Anders als am Nachmittag resultieren aus der Planung am Morgen (s. Anlage 41) ausschließlich leichte Temperaturabnahmen von bis zu 0,4 °C. Außerhalb des Plangebietes erreichen diese die Bebauung gegenüber des Plangebietes an der Uerdinger Straße sowie Gebäude die im Nordosten an das Plangebiet grenzen.

Die Minderungen werden durch den Wegfall von Bäumen auf dem Plangebiet hervorgerufen. Bäume und Baumgruppen mit einer hohen Belaubungsdichte dämpfen den Temperaturverlauf im Tagesgang. Tagsüber ist die Lufttemperatur in ihrer Nähe geringer als in unverschatteten Bereichen, da sie die Lufttemperatur in ihrer Umgebung durch Transpiration und Verschattung senken. In der Nacht hingegen reflektiert das Blattwerk die vom Boden ausgehende langwellige Strahlung, sodass die bodennahe nächtliche Abkühlung gegenüber einer Freifläche ohne Baumbewuchs in der Regel geringer ausfällt. Über den zusätzlichen Freiflächen im Planfall kann die Luft in der Nacht daher schneller auskühlen. Die aufgrund der



Wärmeabgabe der Gebäude zu erwartende Erhöhung der Lufttemperatur in der Nacht wird durch diesen gegenläufigen Effekt abgemildert.

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse können zusätzliche, durch das Planvorhaben hervorgerufene, nächtliche thermische Belastungen sowohl innerhalb als auch außerhalb des Plangebietes ausgeschlossen werden.

### **7.3.3 Bioklima (PET)**

Anlage 43 bis Anlage 45 zeigt die simulierten PET-Werte für den Ist- und Planfall sowie die sich hieraus ergebenden planungsbedingten Differenzen für die untersuchte Windrichtung 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 4.2) 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.

Durch die Realisierung der Planung steigt die bioklimatische Belastung in Teilen des Plangebietes gegenüber der Istsituation (s. Anlage 43) an, was insbesondere auf die geringeren Windgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Extreme Wärmebelastungen im Planfall (s. Anlage 44) ergeben sich in Bereichen, die im ausgewerteten Zeitraum die meiste Zeit in der Sonne liegen und in denen zudem eine geringe Durchlüftung vorliegt. Das ist beispielsweise an dem südlichst gelegenen Plangebäude der Fall.

In der Differenzdarstellung (s. Anlage 45) werden die zusätzlichen Wärmebelastungen deutlich. In Bereichen, die im Istfall verschatten waren und im Planfall nun unverschattet sind, muss zum Teil mit einer Zunahme der bioklimatischen Belastung von mehr als 10 °C gerechnet werden. Die höchsten Zunahmen im PET-Wert ergeben sich in unverschatteten Bereichen vor beschienenen Fassaden.

Zum Teil sind auch Verringerungen der bioklimatischen 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 bioklimatischen Belastung hauptsächlich auf das Plangebiet. Es ergeben sich jedoch auch außerhalb des Plangebietes an der direkt angrenzenden Nachbarbebauung sowie auf dem Gehweg entlang der Uerdinger Straße Verschlechterungen der bioklimatischen Belastungssituation um bis zu 5 °C. Betroffene sen-

sible Bereiche sind das Gebäude, welches im Nordosten an das Plangebiet angrenzt sowie Gebäude die an der westlichen Grenze des Plangebietes liegen. 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.

## 8 Planungsempfehlungen

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich Verschlechterungen des lokalen Klimas weitestgehend auf das Plangebiet und dessen nahes Umfeld beschränken. Dies trifft sowohl auf die Durchlüftung und die bioklimatische Belastung als auch auf das Lufttemperaturniveau zu.

Aufgrund der verminderten Durchlüftung und der Wärmeabstrahlung der Gebäude bilden sich innerhalb der Plangebietsgrenzen sowie an den direkt angrenzenden Wohnnutzungen allerdings Bereiche mit zum Teil sehr hohen bioklimatischen Belastungen sowie einem erhöhten Temperaturniveau aus. Da hiervon auch Aufenthaltsbereiche wie Terrassen und Spielflächen zwischen den Plangebäuden betroffen sind, sollte nach Möglichkeit planerisch auf die Reduktion der thermischen und bioklimatischen Belastung abgezielt werden, um die Aufenthaltsqualität in den Außenbereichen 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 Abkühlung 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 bioklimatische Belastung durch zusätzliche Baumstandorte reduziert werden. Hierfür bietet sich z.B. die stark belastete am südlichst gelegenen Plangebäude 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 [25] 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 Allergiepotential 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 zusätzlichen 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 sie 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 und mit hohem Bewuchs versehen werden um Versickerung und Verdunstung zu gewährleisten [25].

### **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 Energie 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. Bewegtes 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.

### **Schaffung von Regenrückhalteflächen**

Zum Erhalt der Kühlleistung der Fläche sollte eine wassersensible Oberflächengestaltung in Form von Tiefbeeten und Mulden sowie Rigolen umgesetzt werden. Ziel sollte es sein, das anfallende Niederschlagswasser komplett versickern zu lassen bzw. zwischenzuspeichern. Dieses Reservoir stellt einen längerfristigen Wasserspeicher für die Vegetation dar, sodass während warmer Trockenphasen die Verdunstungsleistung der Vegetation und der Böden aufrechterhalten werden kann.

### **Grünflächenbewässerung**

Während langer Hitzeperioden trocknen die Böden aus. Diese 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. bei Starkregen) das anfallende Wasser zwischenzuspeichern, damit es dann in Hitzeperioden wieder abgegeben werden kann.

## **9 Eingangsdaten und Ergebnisse der mikroklimatischen Analyse der optimierten Planvariante**

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden realisierbare Maßnahmen erarbeitet, mit denen den Erwärmungstendenzen, welche auf dem Plangebiet zu erwarten sind, entgegengewirkt werden kann. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen wurde eine weitere mikroklimatische Simulationsrechnung („optimierter Planfall“) durchgeführt. Anlage 46 zeigt die Plangrundlage [5] für diese Simulation.

Hierbei wurden folgende Optimierungsmaßnahmen berücksichtigt:

- Fassadenbegrünung (20 % über alle Fassaden verteilt)
- Helle Fassaden
- Bewässerung der Rasenflächen und der Vegetation auf dem Plangebiet
- Brunnen und Wasserspiele
- Verschattung von belasteten und sensiblen Bereichen durch einen veränderten Baumbestand sowie mit Sonnensegeln und begrünten Pergolen

Die Anlage 47 und Anlage 48 zeigen die vorgesehenen Begrünungsmaßnahmen und die Oberflächenbeschaffenheiten im optimierten Planfall.

Die Veränderungen, welche durch die Optimierungsmaßnahmen gegenüber dem Planfall hervorgerufen werden, sind in Anlage 49 bis Anlage 52 für die betrachteten klimatologischen Parameter (Lufttemperatur um 14 und 4 Uhr und PET-Wert am Nachmittag) dargestellt.

Anlage 49 zeigt, dass das Temperaturniveau am Nachmittag infolge der geplanten Maßnahmen auf dem gesamten Plangebiet sinkt. Dies ist vor allem auf die gesteigerte Verdunstung aufgrund der Bewässerung der Rasenflächen zurückzuführen. Die durch das Planvorhaben in Teilen des Plangebietes hervorgerufene thermische Belastung am Nachmittag (vgl. Anlage 39) kann durch die getroffenen Optimierungen deutlich reduziert werden.

In den frühen Morgenstunden wurde durch das Planvorhaben auch ohne Optimierungsmaßnahmen bereits ein leichter Temperaturrückgang gegenüber der Istsituation prognostiziert (vgl. Anlage 42). Wie in Anlage 50 zu sehen ist, verändert sich das Temperaturniveau durch die geplanten Maßnahmen kaum. Eine Erhöhung der Lufttemperatur am Morgen infolge der Optimierungen kann daher ausgeschlossen werden.

Anlage 52 zeigt die Veränderung der bioklimatischen Belastungssituation infolge der Realisierung der oben aufgeführten Minderungsmaßnahmen. In Bereichen, die durch zusätzliche Bäume, Sonnensegel oder Pergolen verschattet werden, sinkt die bioklimatische Belastung um bis zu 10 °C. In Bereichen in denen Verschattung in Form von Bäumen entfällt, steigt die

Belastung. Insgesamt überwiegen jedoch die positiven Effekte der im Modell berücksichtigten Maßnahmen. Somit kann der zusätzlichen, durch die Planung hervorgerufenen Belastung auf dem Plangebiet (vgl. Anlage 45) entgegengewirkt werden. Der Rückgang der Belastung zeigt sich auch in den absoluten PET-Werten in Anlage 51. In Bereichen, wie dem Innenhof des südlichsten Plangebäudes, sinkt dieser von zum Teil mehr als 49 °C (vgl. Anlage 44) größtenteils auf unter 40 °C. Darüber hinaus wird deutlich, dass vor allem sensibel Bereiche wie die Spielplätze auf dem Plangebiet durch die in der Planung vorgesehene gezielte Verschattung profitieren.

## 10 Zusammenfassung

Im Krefelder Stadtteil Bockum ist südlich der Uerdinger Straße auf dem 2,5 ha großen Grundstück eines Hotels die Aufstellung des vorhabenbezogenen Bebauungsplans Nr. 841 (V) – südlich Uerdinger Straße vorgesehen. Das derzeitige Hotelgebäude wird aufgrund des hohen Sanierungsbedarfs zurückgebaut. Auf dem Grundstück soll neben dem neu errichteten Hotel ein Wohnquartier mit sieben Gebäuden entstehen. Das Quartier wird durch eine KiTa und einige Gewerbeflächen ergänzt.

Im Rahmen des Bebauungsplanverfahrens waren die stadtklimatischen Auswirkungen des Vorhabens zu untersuchen.

Vor dem Hintergrund, dass eine veränderte Bebauung des Plangebietes das lokale Kaltluftgeschehen beeinflussen kann, wurde geprüft, wie sich die Neuentwicklung des Grundstücks auf das Kaltluftgeschehen auswirkt. Zu diesem Zweck wurden Kaltluftberechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM\_21 in der aktuellen Version 2.012 ([8], [9]) unter Berücksichtigung des Reliefs, der Landnutzung sowie der Bebauungssituation im Umfeld des Planvorhabens durchgeführt. Die Beurteilung der Veränderung erfolgte anhand eines Vergleichs der im Modell berechneten Kaltluftkenngrößen.

Zusätzlich sollte beurteilt werden, wie sich das Planvorhaben auf das lokale Mikroklima auswirkt. Die Veränderungen der thermischen Belastungssituation und der Durchlüftungsverhältnisse wurden anhand von Simulationsrechnungen mit dem mikroskaligen Stadtklimamodell ENVI-met in der Version 5.0.3 (Summer Release 2022) für die Bestands- und Plansituation für eine Hauptwindrichtung an einem heißen Sommertag bestimmt. 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 10,5 m über Grund ausgewertet und dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse der Kaltluftsimulation zeige, dass das Planvorhaben aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Kaltluftgeschehen hat. In der Kaltfluthöhe zeigen sich keine Veränderungen durch die Realisierung des Planvorhabens. Die absoluten Veränderungen im Kaltluftvolumenstrom beschränken sich vollständig auf das Plangebiet und sind auch dort vernachlässigbar klein.

Aus den Berechnungsergebnissen der mikroklimatischen Simulation geht hervor, dass sich insbesondere auf Grund des hohen Durchgrünungsgrades kaum signifikante negativen Auswirkungen in Bezug auf die sommerliche Hitzebelastung ergeben. Veränderungen der untersuchten Parameter beschränken sich weitestgehend auf die Plangebietsgrenzen. Innerhalb



des Plangebietes bilden sich allerdings in Folge der verminderten Durchlüftung und der Wärmeabstrahlung der Gebäude Bereiche mit zum Teil sehr hohen bioklimatischen Belastungen sowie einem erhöhten Temperaturniveau aus.

Da hiervon auch Aufenthaltsbereiche wie Terrassen und Spielflächen 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 Temperaturniveaus sowie der bioklimatischen Belastungssituation beitragen:

- Erhöhung der Verschattungswirkung und Verdunstungskühlung durch zusätzliche Baumstandorte, Sonnensegel oder bewachsene Pergolen
- weitere Gebäudebegrünung in Form von intensiver Dachbegrünung und Fassadenbegrünung zur Reduktion der nachmittäglichen Wärmeaufnahme und Gebäudereflexion sowie Erhöhung der Verdunstungskühlung
- Künstliche Bewässerung der Grün- und Rasenflächen, um die Verdunstungskühlung auch während langer Hitze- bzw. Trockenperioden aufrechtzuerhalten (möglichst mit Regenwasser)
- Schaffung von offenen Wasserflächen zur Förderung der Verdunstungskühlung in thermisch belasteten Bereichen

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden realisierbare Maßnahmen erarbeitet, mit denen den Erwärmungstendenzen, welche auf dem Plangebiet zu erwarten sind, entgegenge wirkt werden kann. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen wurde eine weitere mikroklimatische Simulationsrechnung („optimierter Planfall“) durchgeführt.

Hierbei wurden folgende Optimierungsmaßnahmen berücksichtigt:

- Fassadenbegrünung (20 % über alle Fassaden verteilt)
- Helle Fassaden
- Bewässerung der Rasenflächen und der Vegetation auf dem Plangebiet
- Brunnen und Wasserspiele
- Verschattung von belasteten und sensiblen Bereichen durch einen veränderten Baumbestand und mit Sonnensegeln sowie begrünten Pergolen

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass mit den Optimierungsmaßnahmen die zu erwartenden nachmittäglichen thermischen Belastungen deutlich reduziert werden können. In den Nachtstunden ergeben sich leichte Minderungen der Lufttemperatur, sodass die nächtlichen

Abkühlungseffekte, welche schon durch die nicht optimierte Planvariante hervorgerufen werden, bestehen bleiben.

In Bezug auf die bioklimatische Belastungssituation nehmen extreme Wärmebelastungen durch die Realisierung der Maßnahmen innerhalb des Plangebietes ab. Insbesondere durch die zusätzliche, gezielte Verschattung (Bäume, Sonnensegel, Pergolen) kann die Belastung in Bereichen mit einer sensiblen Nutzung gesenkt werden. Den verbleibenden sehr hohen Belastungen in einzelnen Bereichen kann ebenfalls mit gezielter Verschattung entgegengewirkt werden.

Zur Gewährleistung gesunder Wohnverhältnisse - auch an den in Zukunft immer häufiger auftretenden heißen Tagen - empfehlen wir daher die Umsetzung der aufgeführten Minderungsmaßnahmen.

Peutz Consult GmbH



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



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

Anlagenverzeichnis

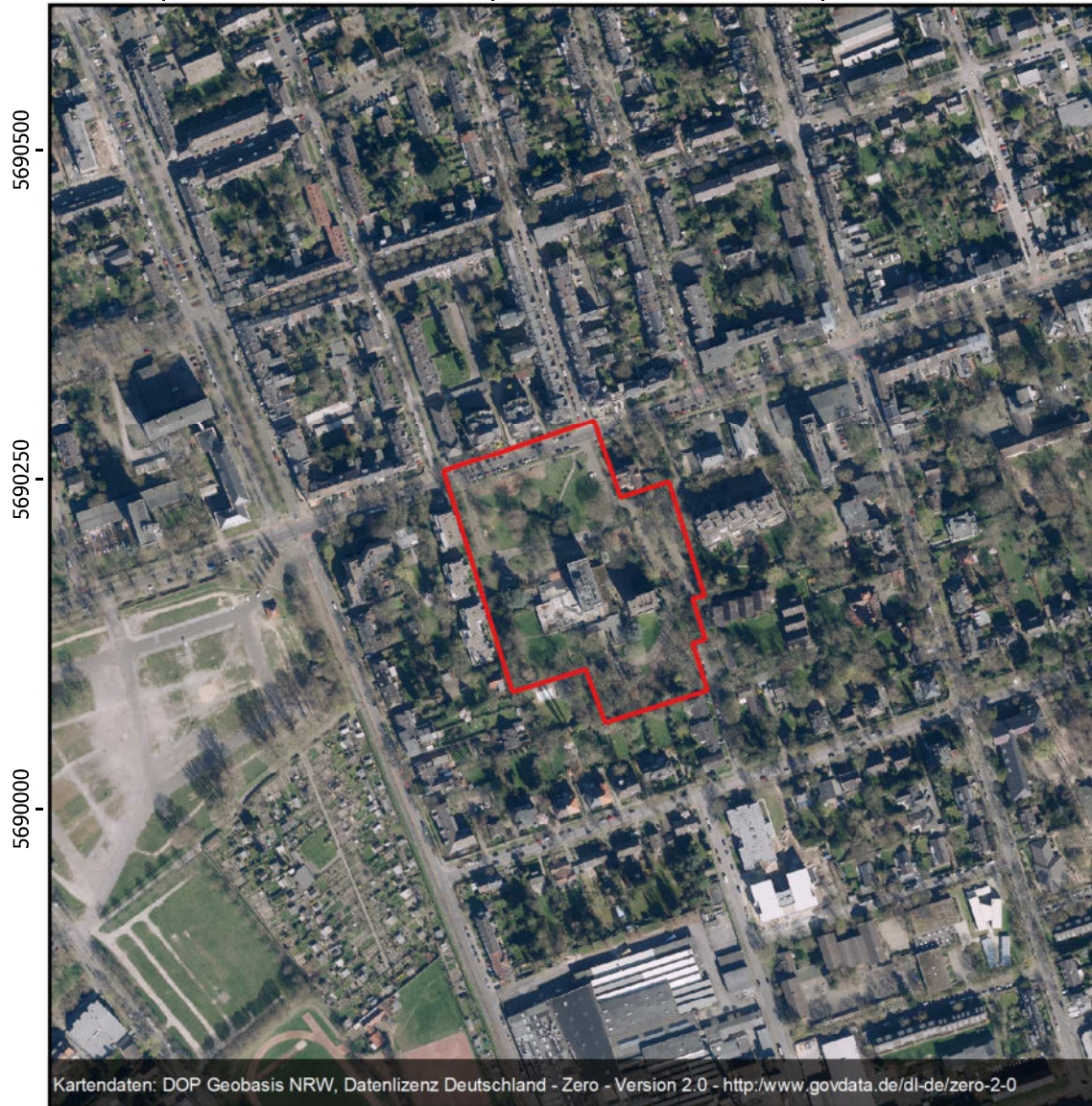
- Anlage 1 Übersichtslageplan Istfall
- Anlage 2 Übersichtslageplan Planfall
- Anlage 3 Auszug aus der Klimaanalyse der Stadt Krefeld – Klimafunktionskarte
- Anlage 4 Auszug aus der Klimaanalyse der Stadt Krefeld – Planungshinweiskarte
- Anlage 5 Windrichtungs- und geschwindigkeitsverteilung an der LANUV-Station Düsseldorf-Flughafen im Zeitraum 2011-2020 (links: Allgemein; rechts: Tmx > 30 °C)
- Anlage 6 Geländehöhen für die KLAM-Berechnung (Übersicht)
- Anlage 7 Landnutzung für die KLAM-Berechnung (Übersicht)
- Anlage 8 Landnutzung im Istfall im Umfeld des Plangebietes
- Anlage 9 Landnutzung im Planfall im Umfeld des Plangebietes
- Anlage 10 Mächtigkeit der Kaltluftschicht zwei Stunden nach Sonnenuntergang – Istfall
- Anlage 11 Mächtigkeit der Kaltluftschicht zwei Stunden nach Sonnenuntergang – Planfall
- Anlage 12 Prozentuale Änderung der Kaltluftmächtigkeit zwei Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 13 Absolute Änderung der Kaltluftmächtigkeit zwei Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 14 Kaltluftvolumenstrom zwei Stunden nach Sonnenuntergang – Istfall

- Anlage 15 Kaltluftvolumenstrom zwei Stunden nach Sonnenuntergang – Planfall
- Anlage 16 Prozentuale Änderung des Kaltluftvolumenstroms zwei Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 17 Absolute Änderung des Kaltluftvolumenstroms zwei Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 18 Mächtigkeit der Kaltluftschicht sechs Stunden nach Sonnenuntergang – Istfall
- Anlage 19 Mächtigkeit der Kaltluftschicht sechs Stunden nach Sonnenuntergang – Planfall
- Anlage 20 Prozentuale Änderung der Kaltluftmächtigkeit sechs Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 21 Absolute Änderung der Kaltluftmächtigkeit sechs Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 22 Kaltluftvolumenstrom sechs Stunden nach Sonnenuntergang – Istfall
- Anlage 23 Kaltluftvolumenstrom sechs Stunden nach Sonnenuntergang – Planfall
- Anlage 24 Prozentuale Änderung des Kaltluftvolumenstroms sechs Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 25 Absolute Änderung des Kaltluftvolumenstroms sechs Stunden nach Sonnenuntergang
- Anlage 26 ENVI-met Modell-Architektur
- Anlage 27 Vegetation im Istfall
- Anlage 28 Vegetation im Planfall

- Anlage 29 Oberflächenbeschaffenheit im Istfall
- Anlage 30 Oberflächenbeschaffenheit im Planfall
- Anlage 31 Windfeld in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr - Istfall
- Anlage 32 Windfeld in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr - Planfall
- Anlage 33 Windfeld in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr – Planfall minus Istfall
- Anlage 34 Windfeld in 10,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr - Istfall
- Anlage 35 Windfeld in 10,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr -Planfall
- Anlage 36 Windfeld in 10,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr – Planfall minus Istfall
- Anlage 37 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr - Istfall
- Anlage 38 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr - Planfall
- Anlage 39 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr – Planfall minus Istfall
- Anlage 40 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 4 Uhr - Istfall
- Anlage 41 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 4 Uhr - Planfall
- Anlage 42 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 4 Uhr – Planfall minus Istfall
- Anlage 43 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag - Istfall
- Anlage 44 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag - Planfall
- Anlage 45 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag – Planfall minus Istfall

- Anlage 46 Übersichtslageplan optimierter Planfall
- Anlage 47 Vegetation im optimierten Planfall
- Anlage 48 Oberflächenbeschaffenheit im optimierten Planfall
- Anlage 49 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 14 Uhr – optimierter Planfall minus Planfall
- Anlage 50 Lufttemperatur in 1,5 m Höhe über Grund um 4 Uhr – optimierter Planfall minus Planfall
- Anlage 51 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag – optimierter Planfall
- Anlage 52 PET-Wert in 1,5 m Höhe über Grund am Nachmittag – optimierter Planfall minus Planfall

# Anlage 1: Übersichtslageplan - Istfall





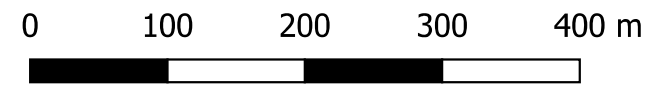
5690500  
5690250  
5690000

Kartendaten: DOP Geobasis NRW, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 - <http://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>

331750                      332000                      332250

## Legende

-  Plangebiet
-  Bestandsgebäude





# Anlage 2: Übersichtslageplan - Planfall



5690500  
5690250  
5690000

Kartendaten: DOP Geobasis NRW, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 - <http://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>;  
Entwurf "Krefelder Höfe", form A

331750                      332000                      332250

## Legende

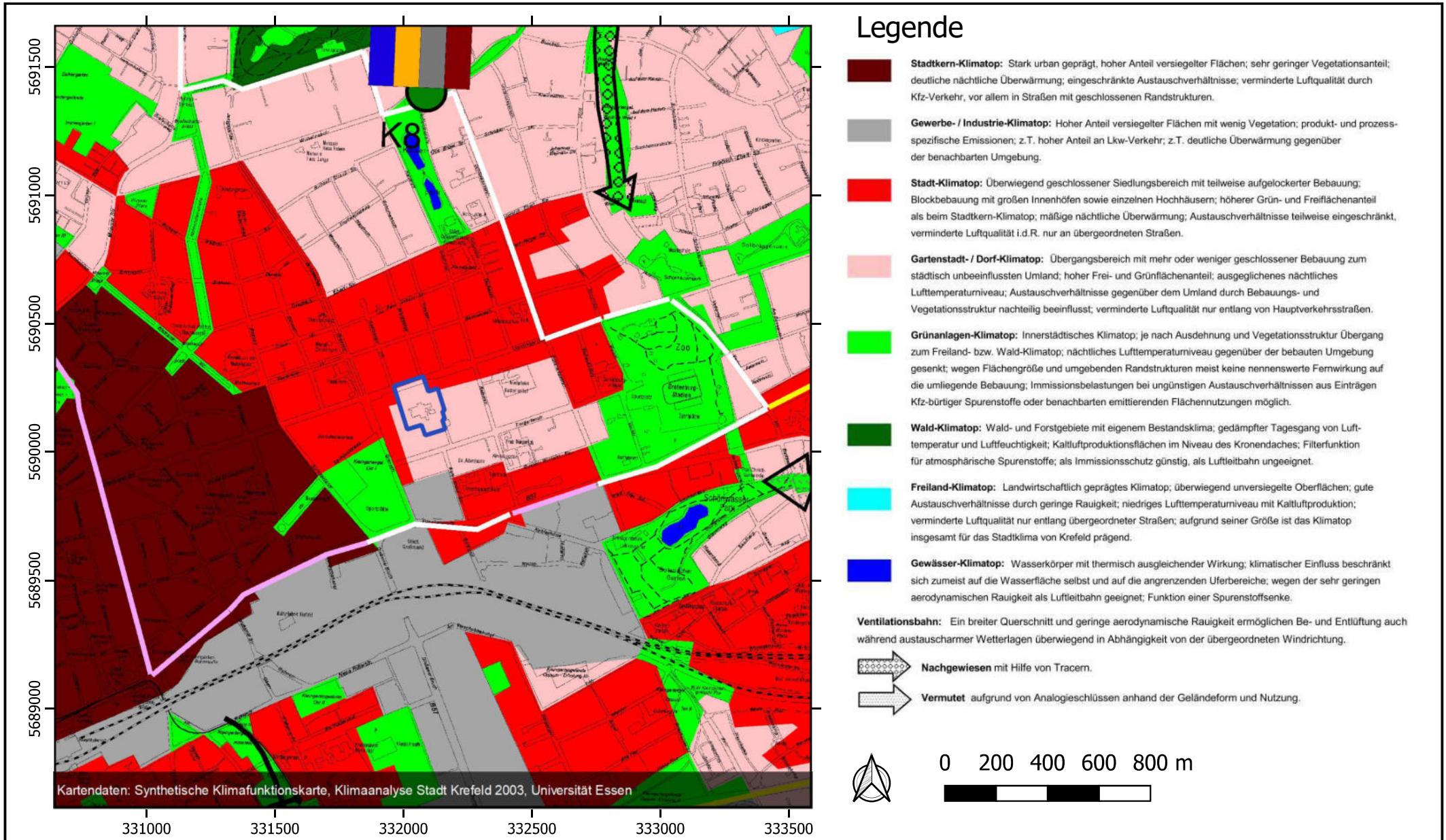
 Plangebiet



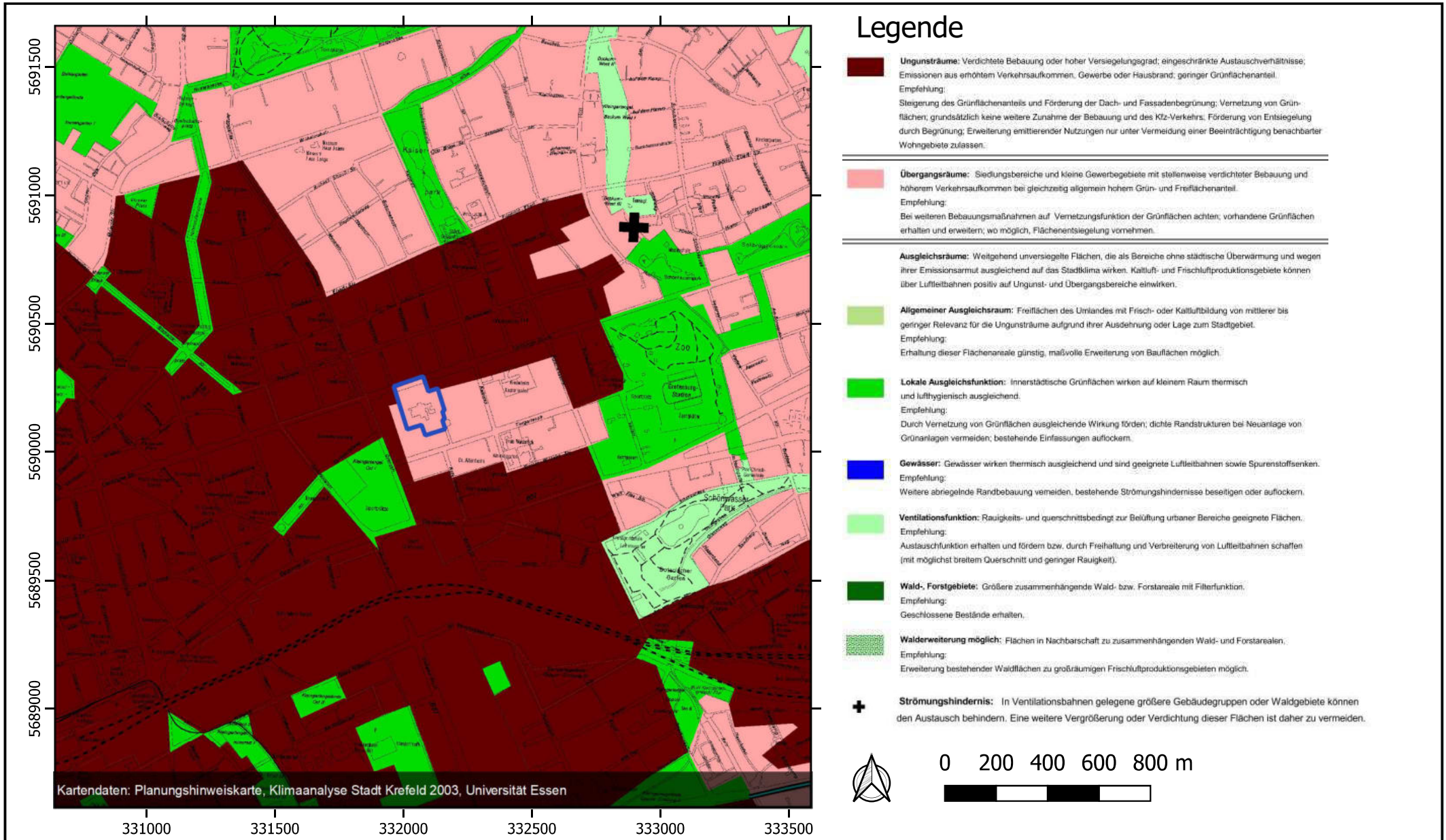
0      100      200      300      400 m



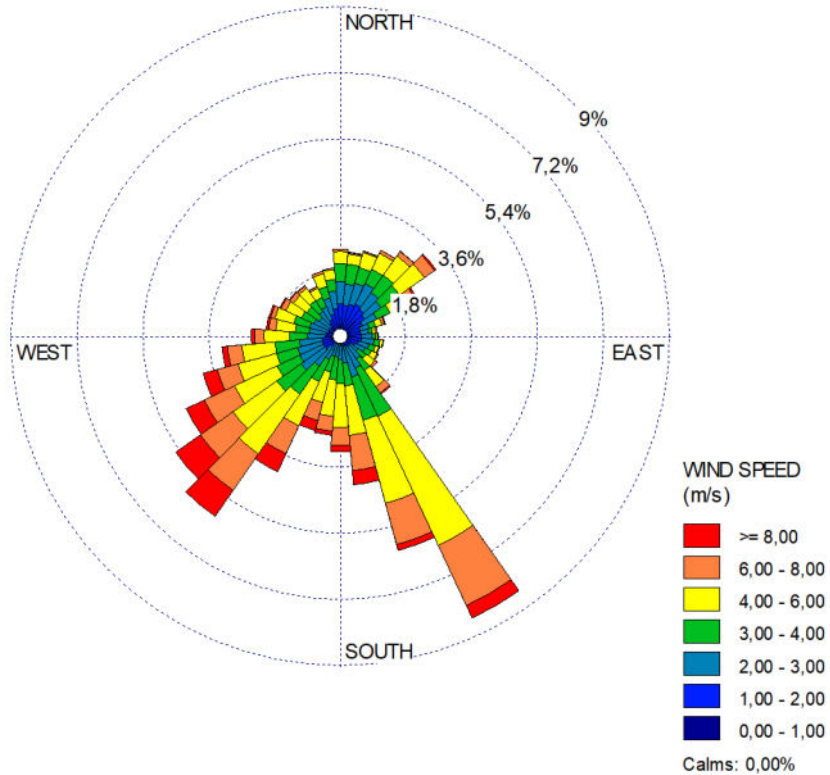




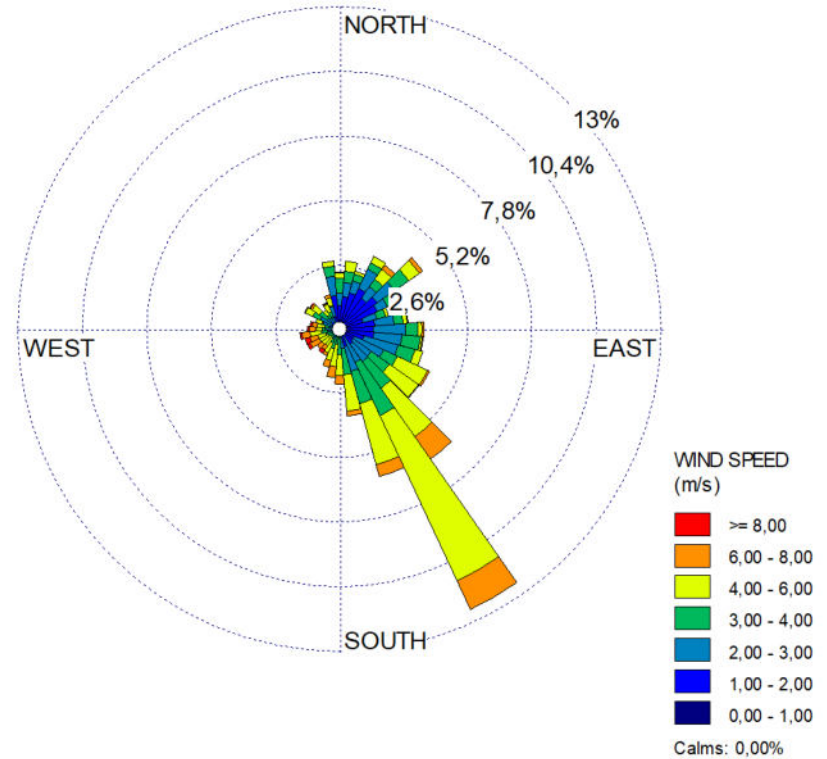




- alle Situationen -

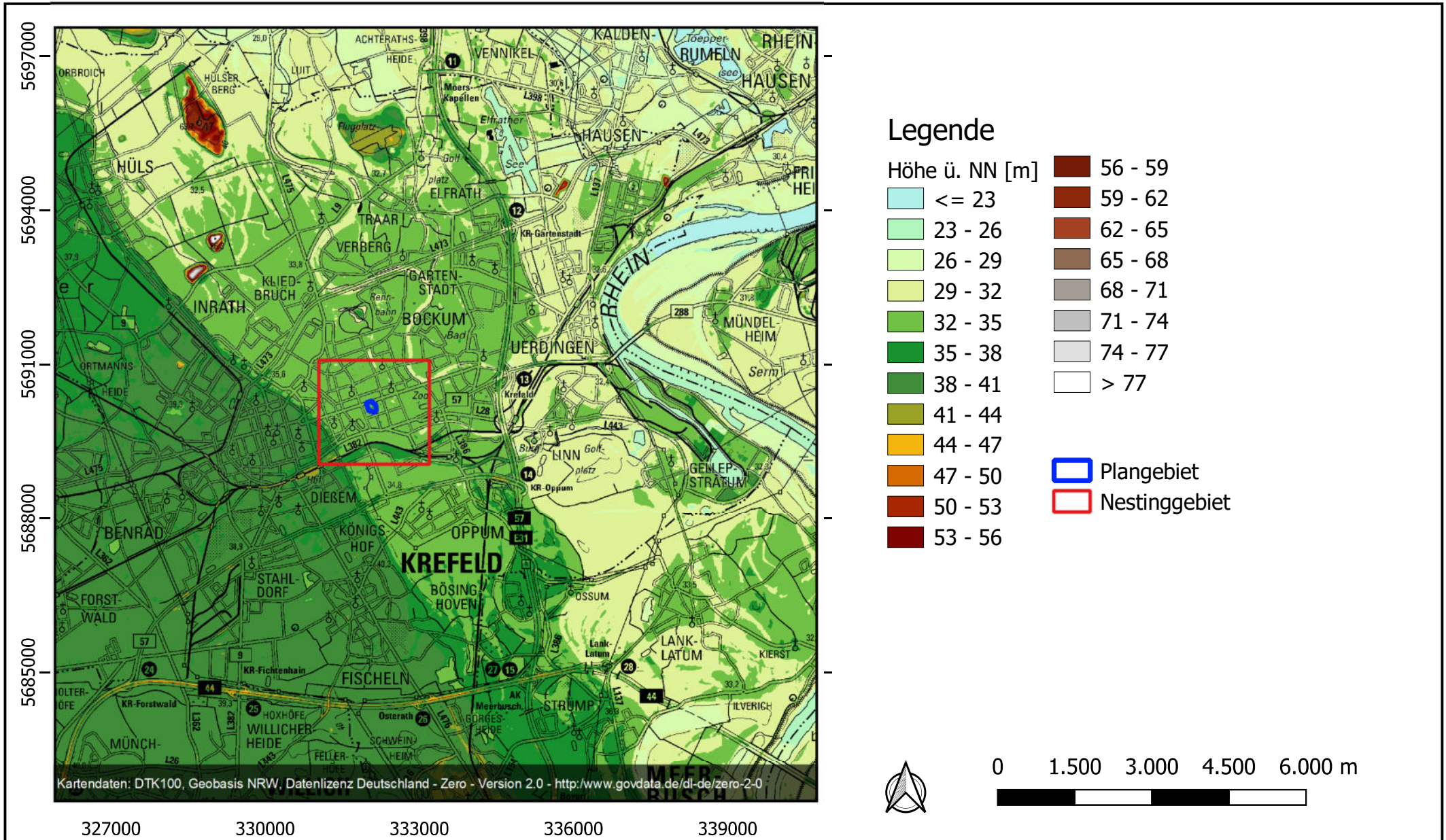


- Tage mit Tmx > 30°C -



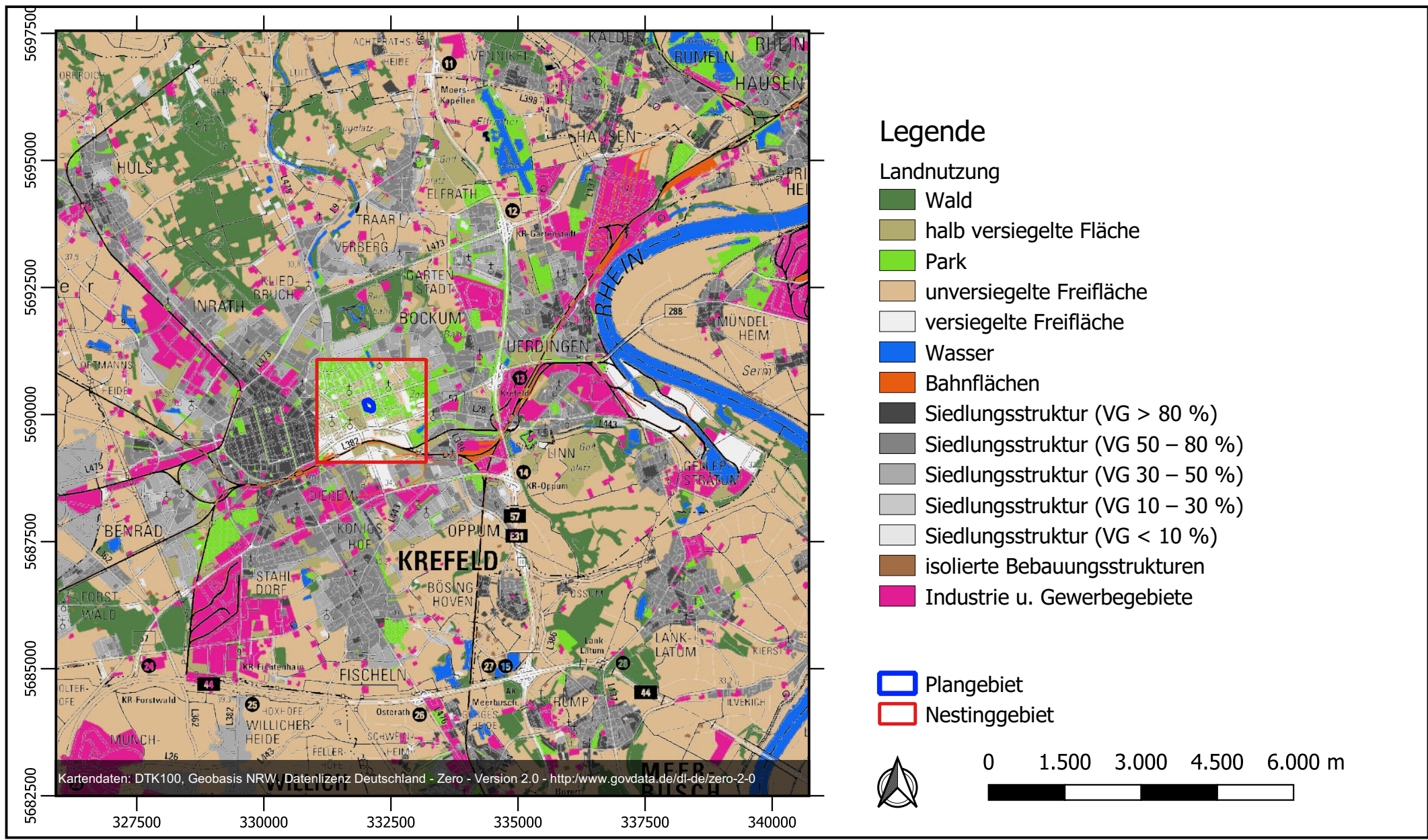


# Anlage 6: Geländehöhen und Lage des Nestinggebietes



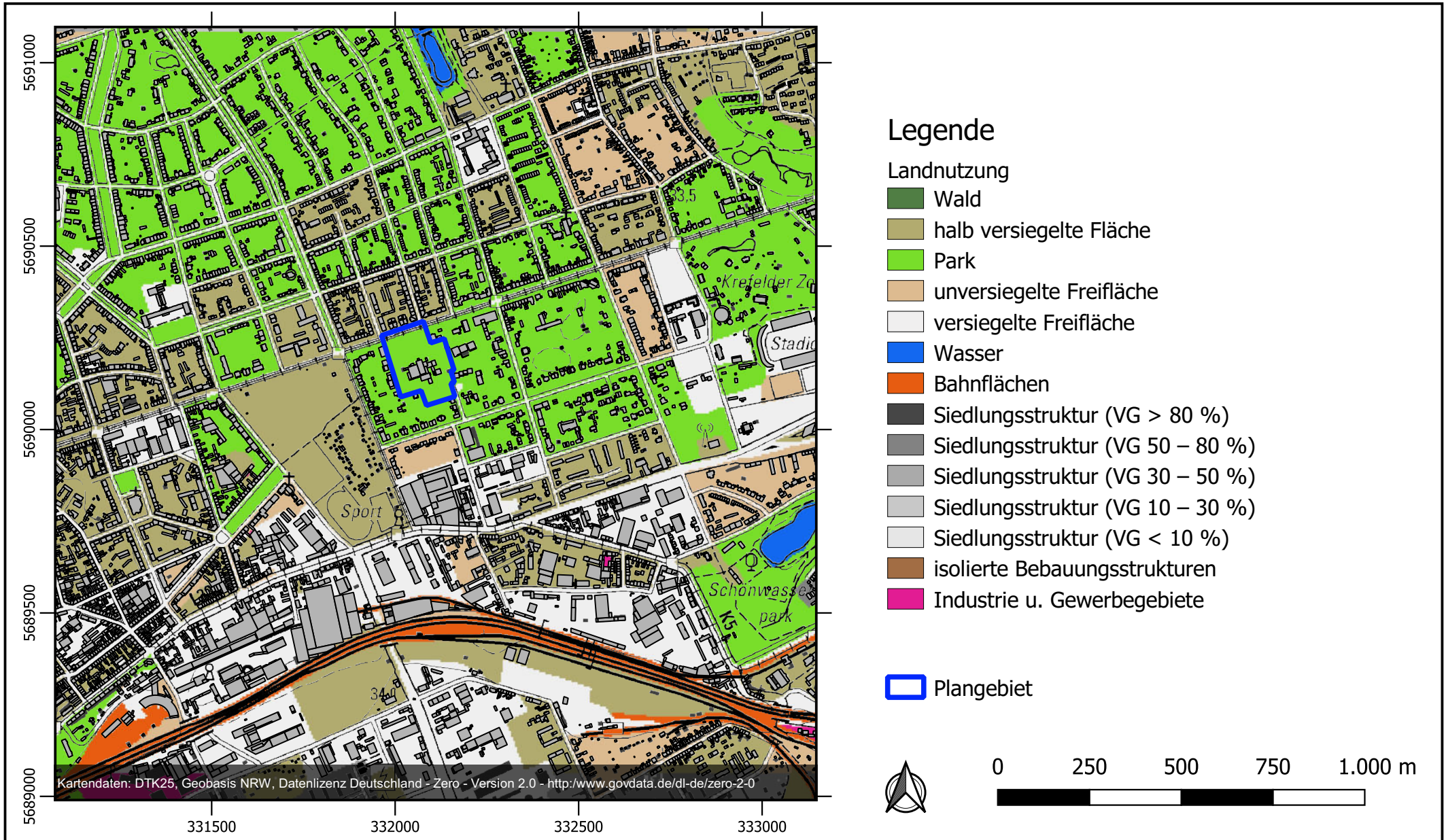


# Anlage 7: Landnutzung und Lage des Nestinggebietes



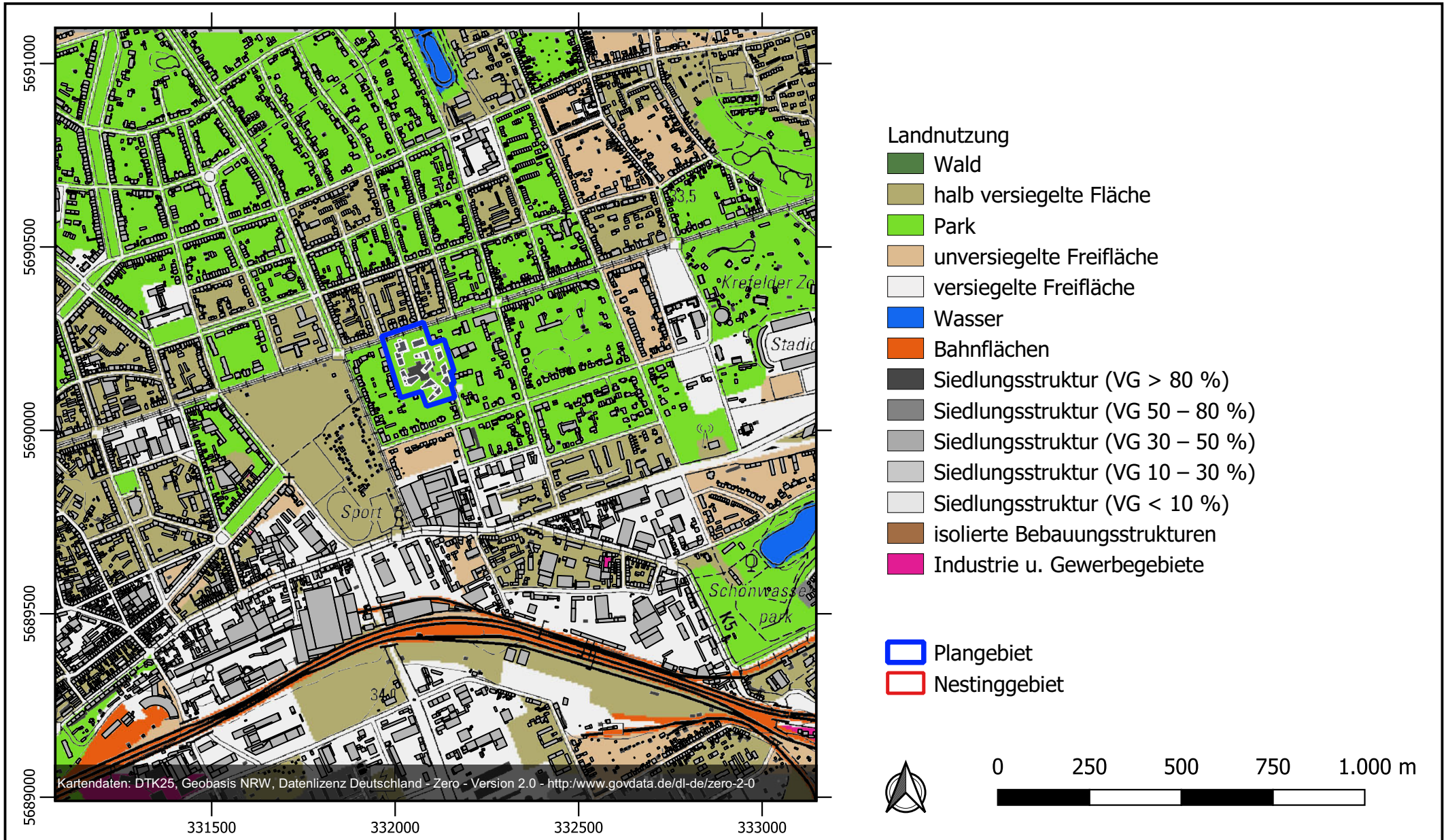


# Anlage 8: Landnutzung im Nestinggebiet im Istfall



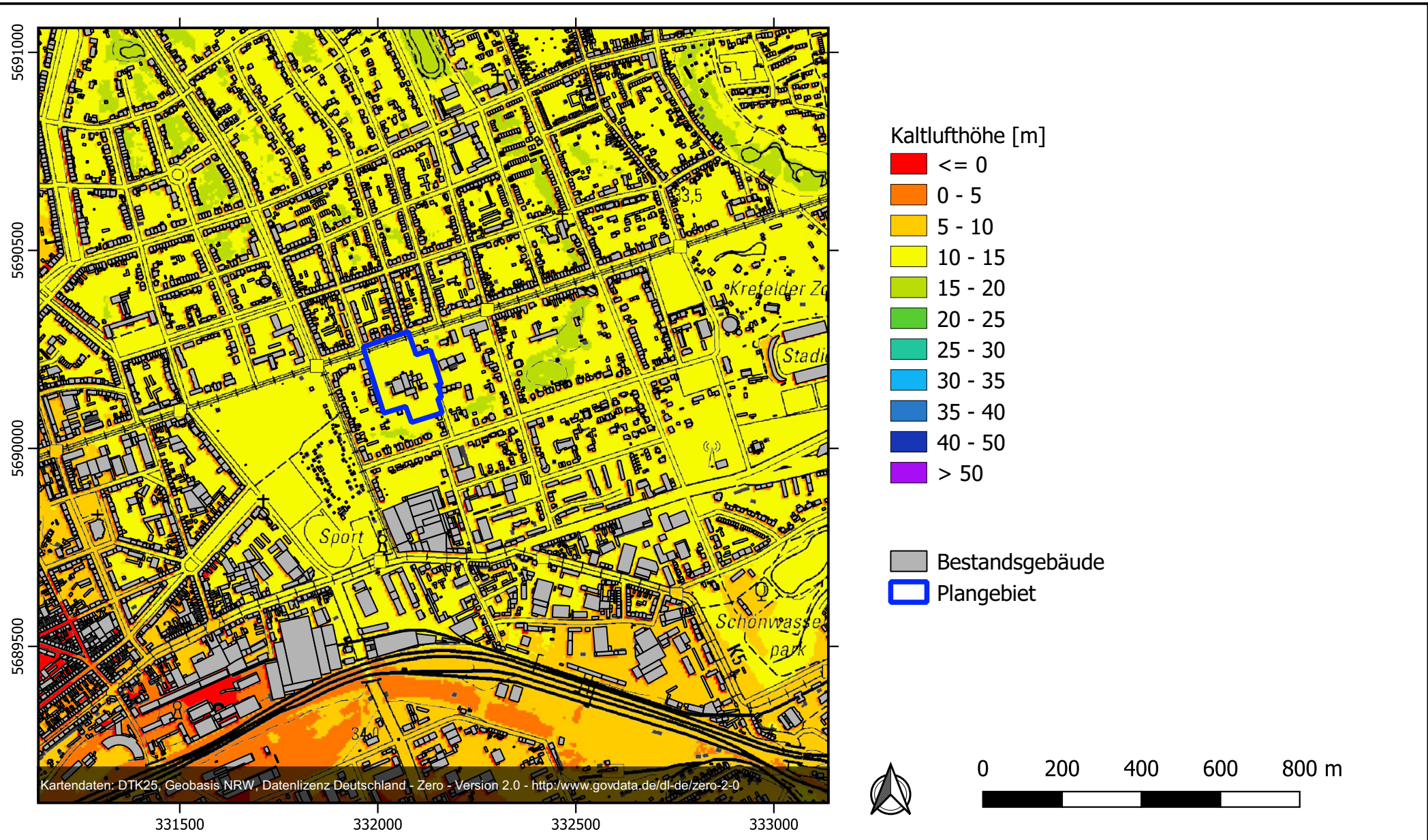


# Anlage 9: Landnutzung im Nestinggebiet im Planfall



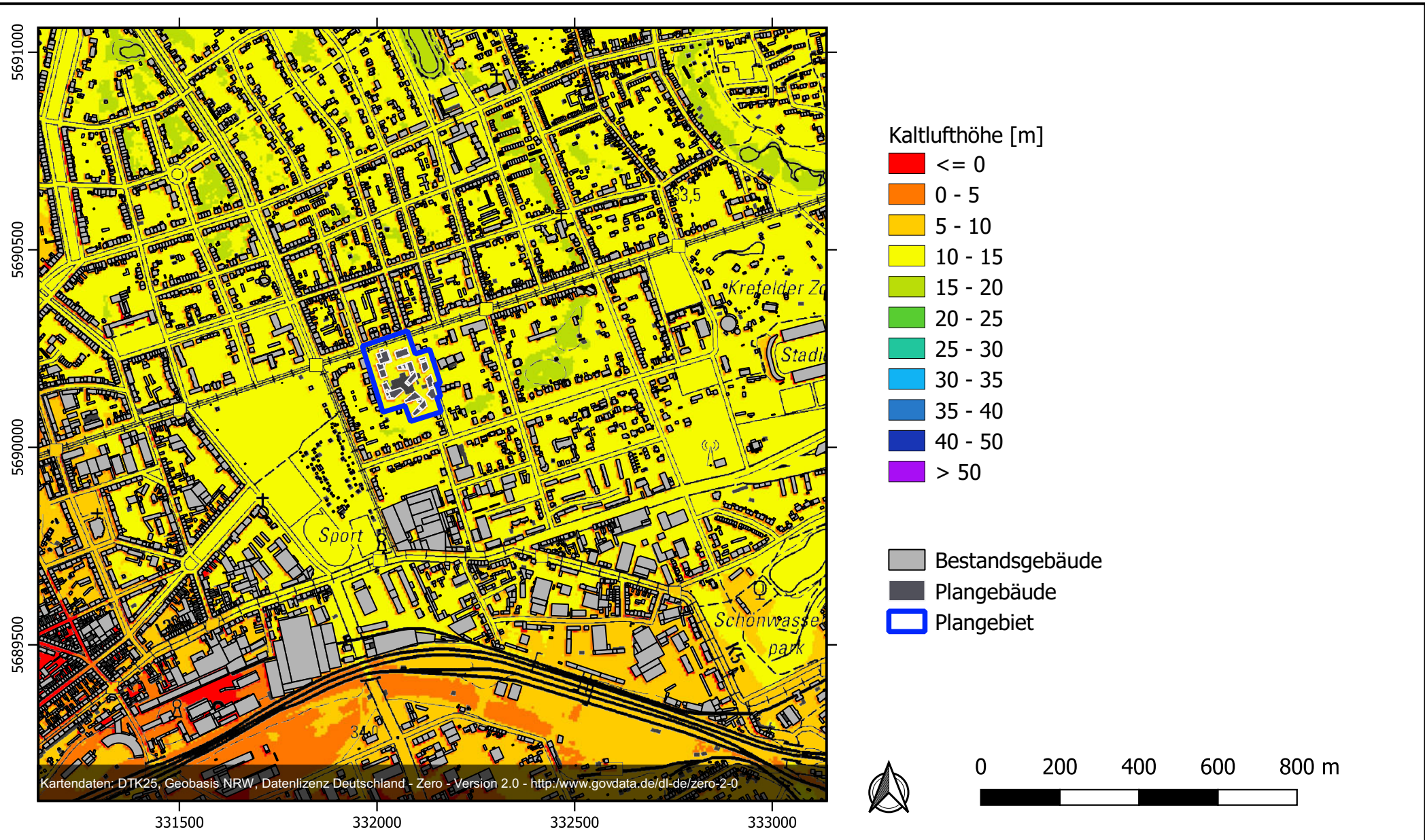


# Anlage 10: Kaltluflhöhe Istfall - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



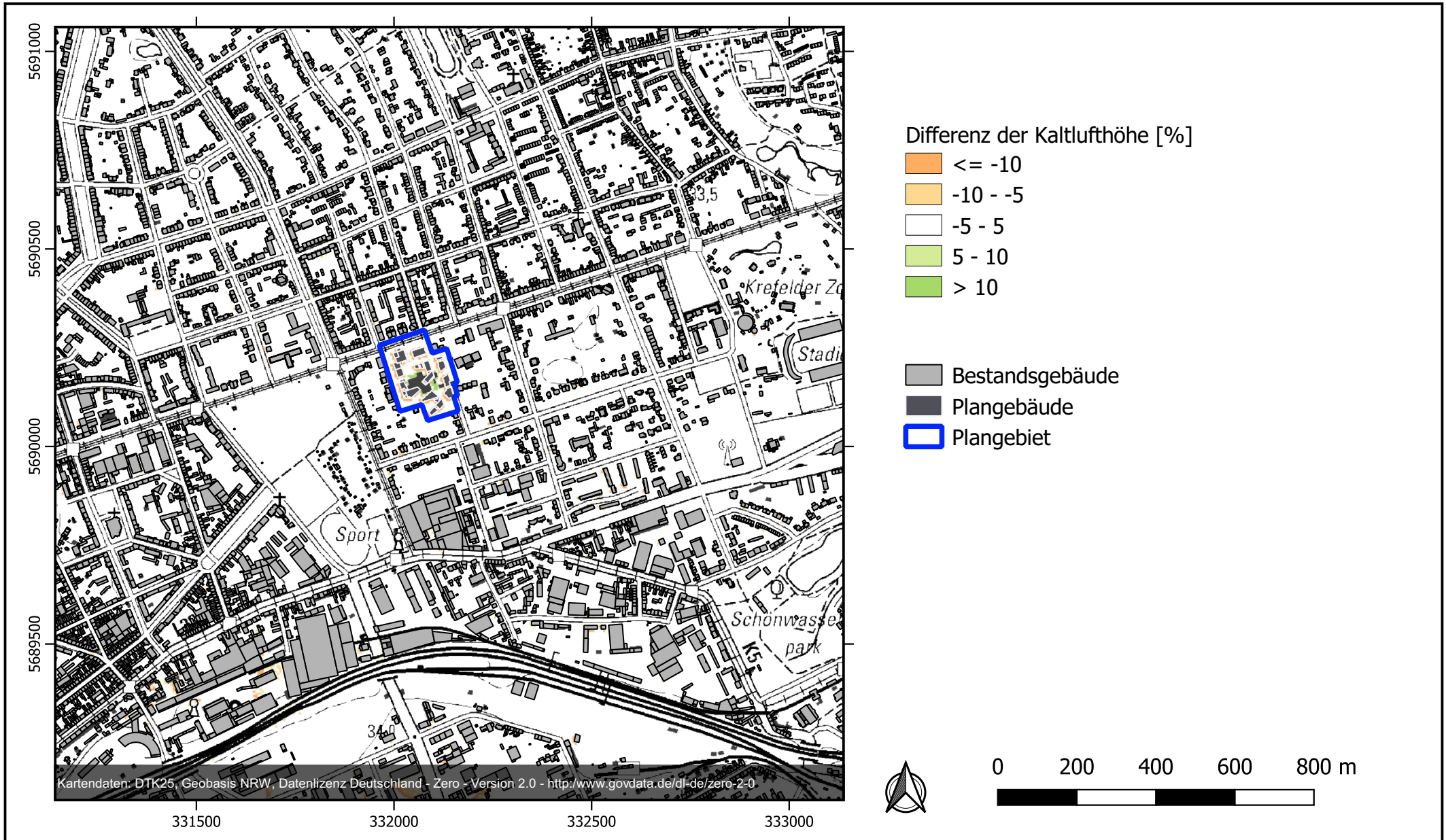


# Anlage 11: Kaltlufthöhe Planfall - 2 Stunden nach Sonnenuntergang

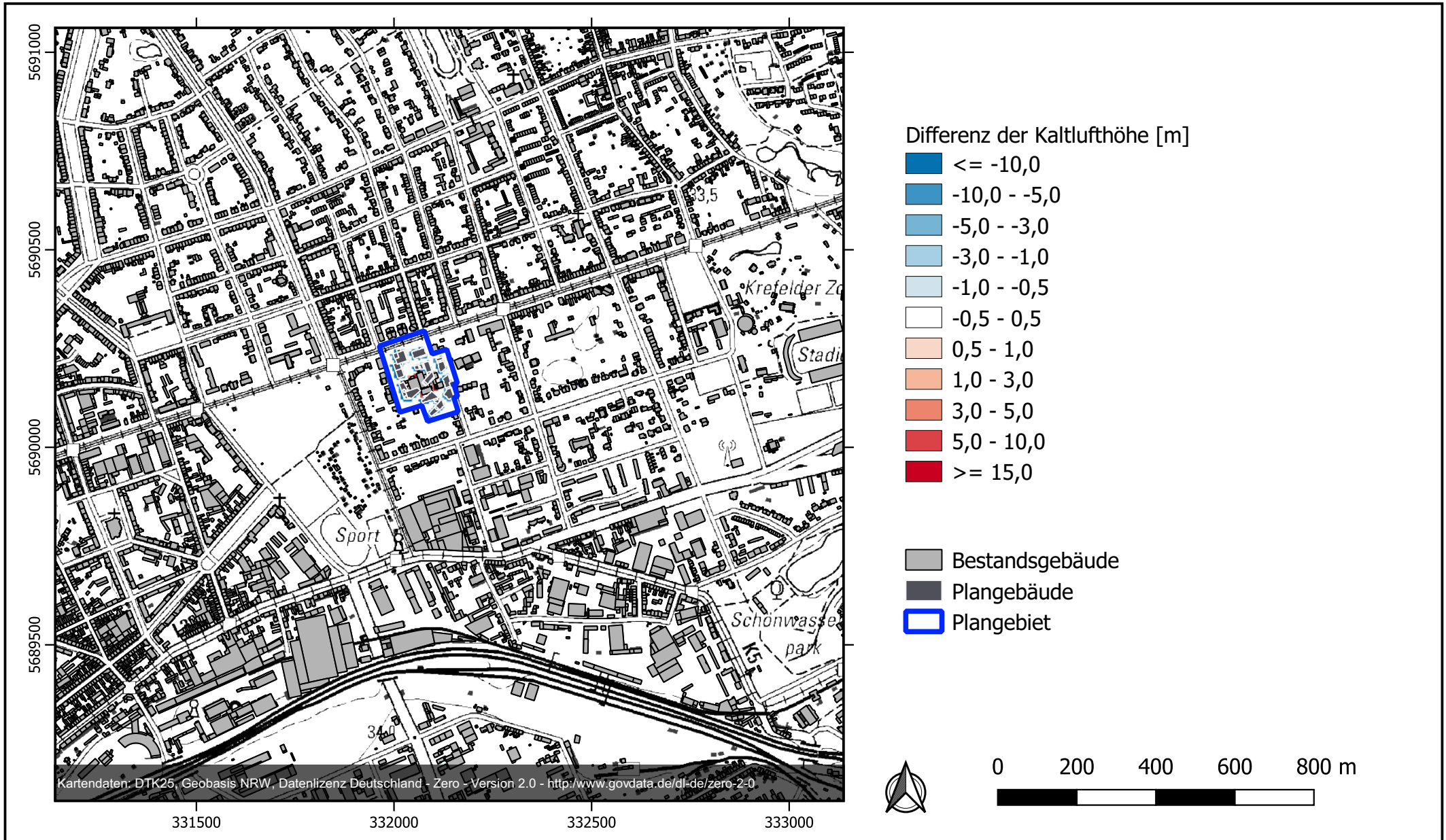




# Anlage 12: Prozentuale Differenz der Kaltluflhöhe - 2 Stunden nach Sonnenuntergang

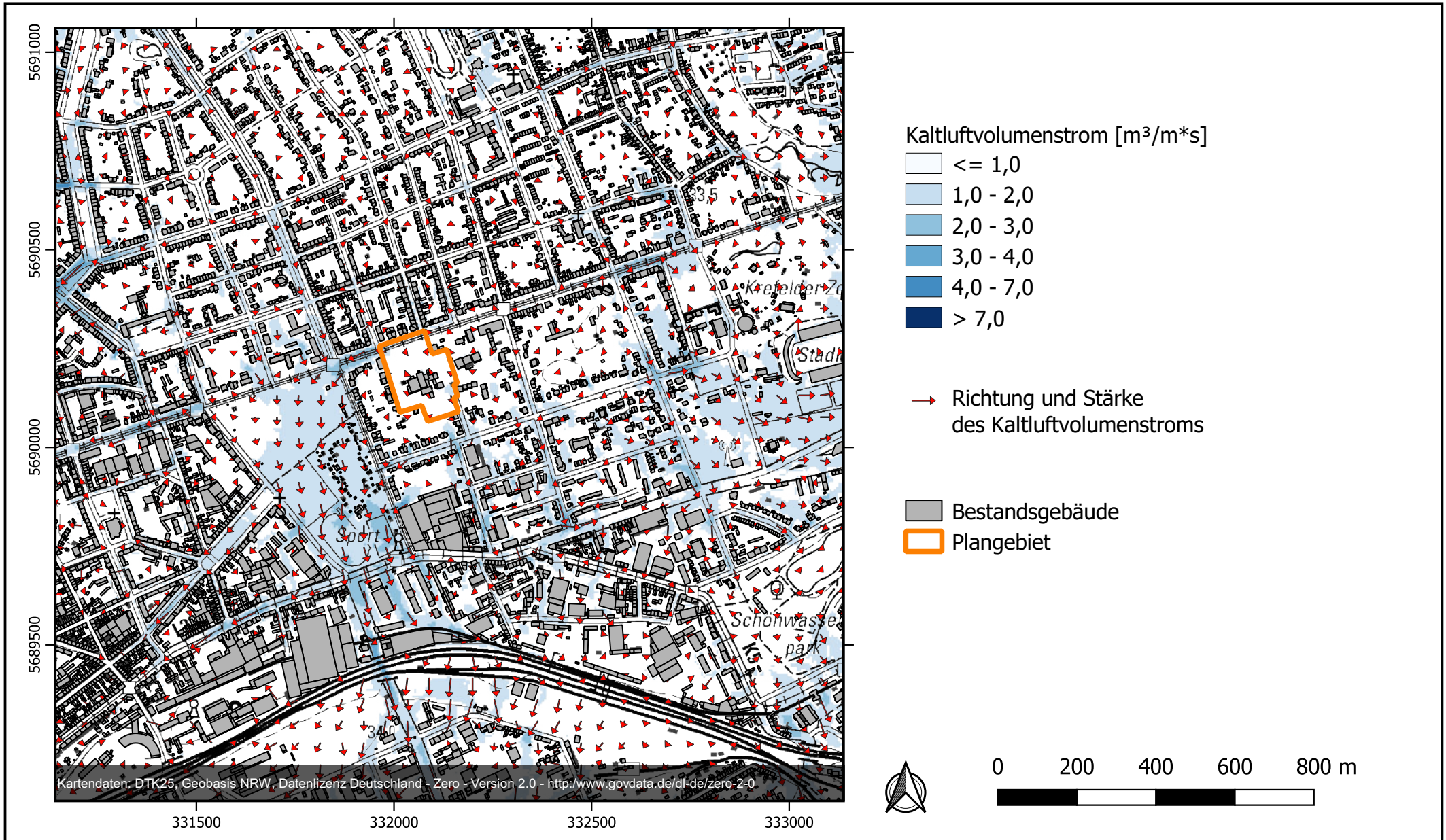


# Anlage 13: Absolute Differenz der Kaltluflhöhe - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



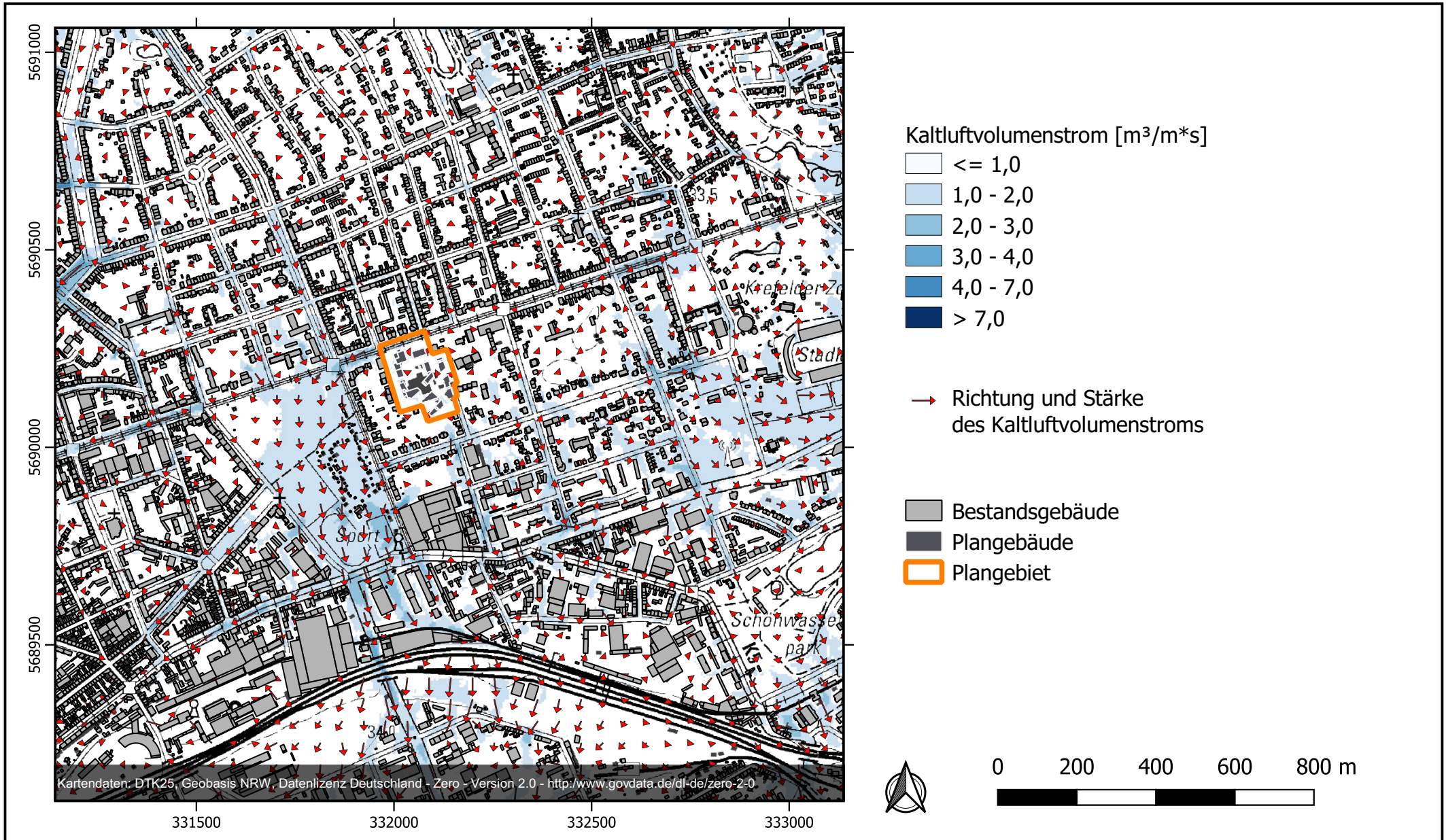


# Anlage 14: Kaltluftvolumenstrom im Istfall - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



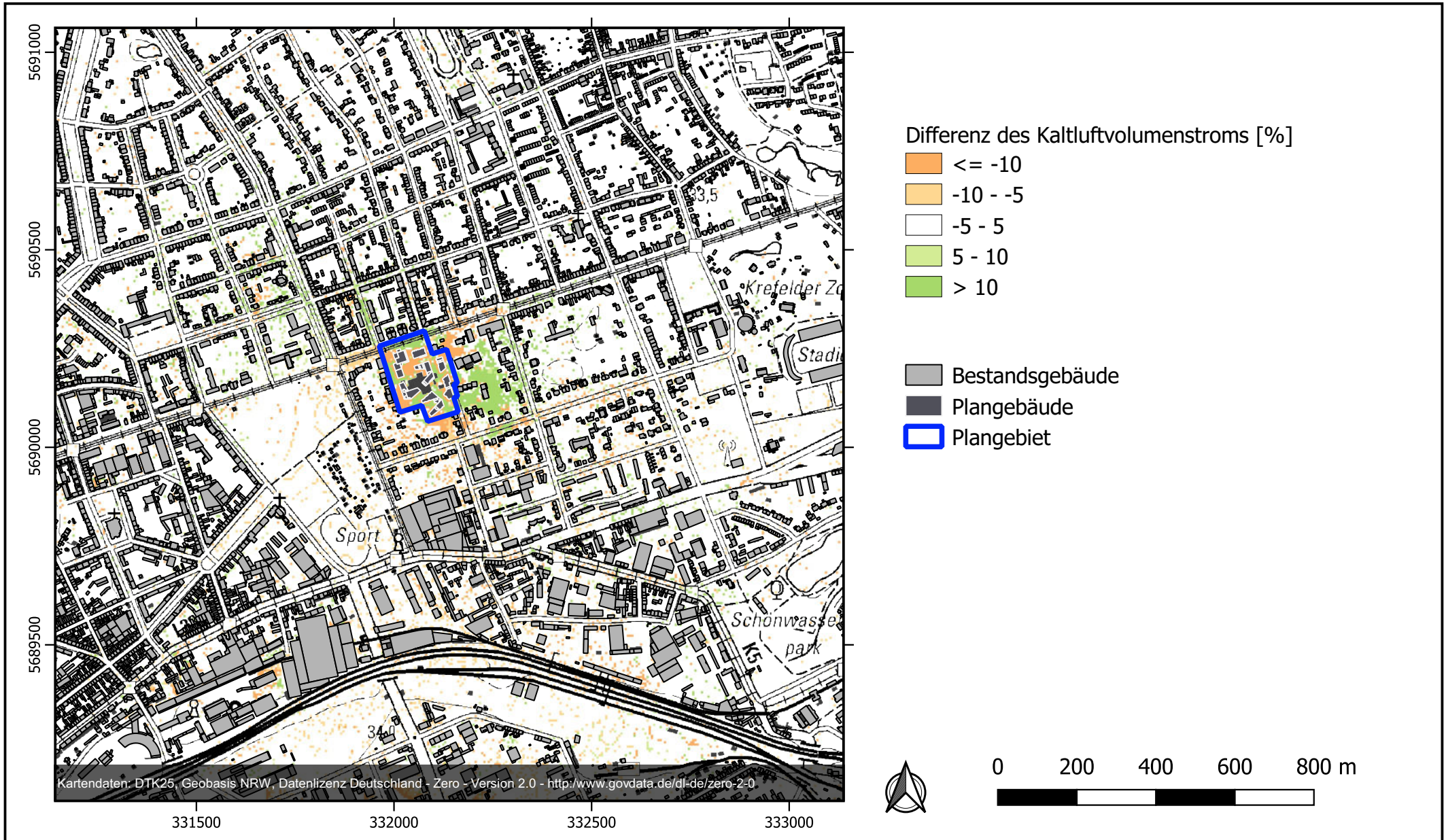


# Anlage 15: Kaltluftvolumenstrom Planfall - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



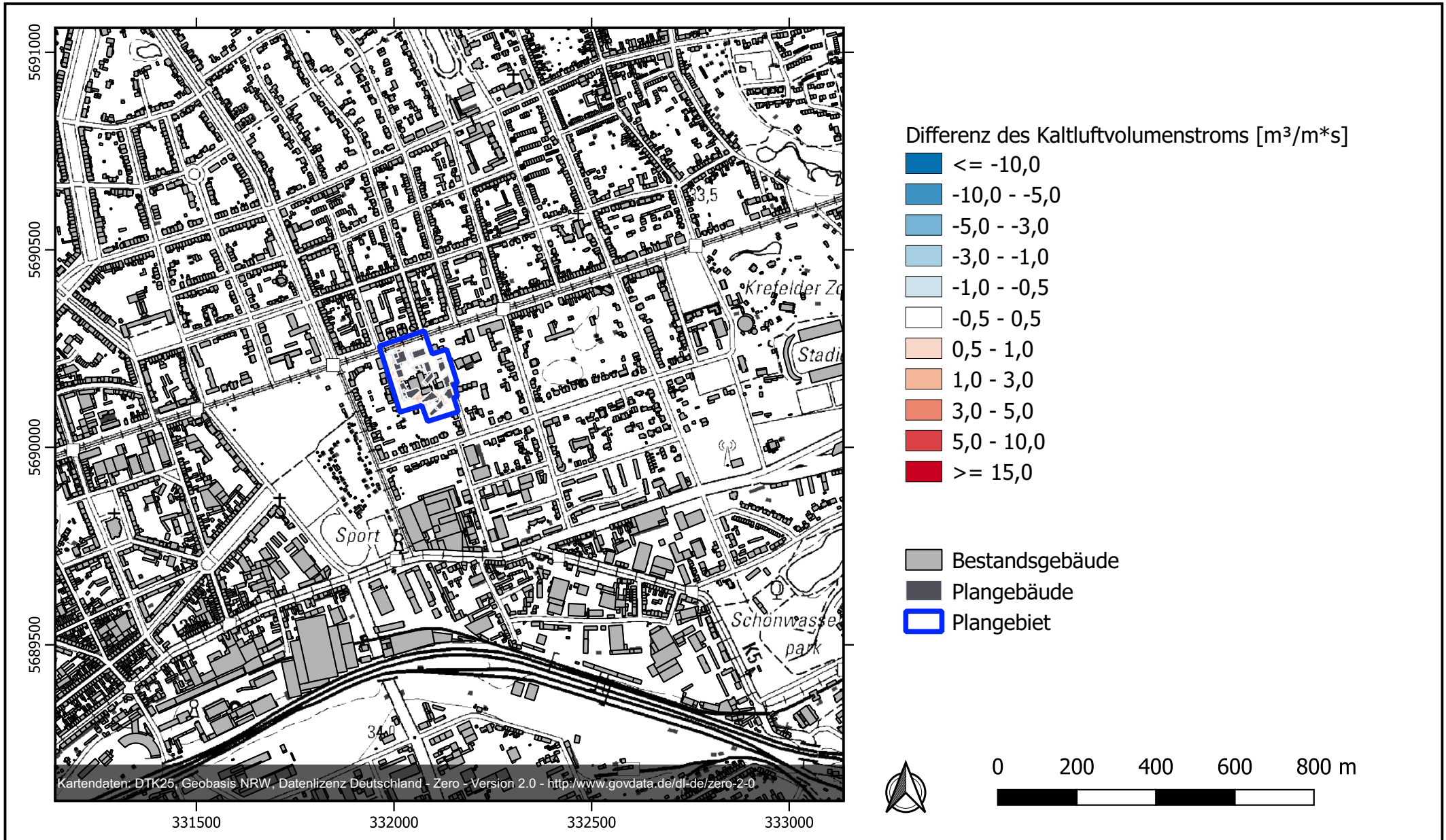


# Anlage 16: Prozentuale Differenz des Kaltluftvolumenstroms - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



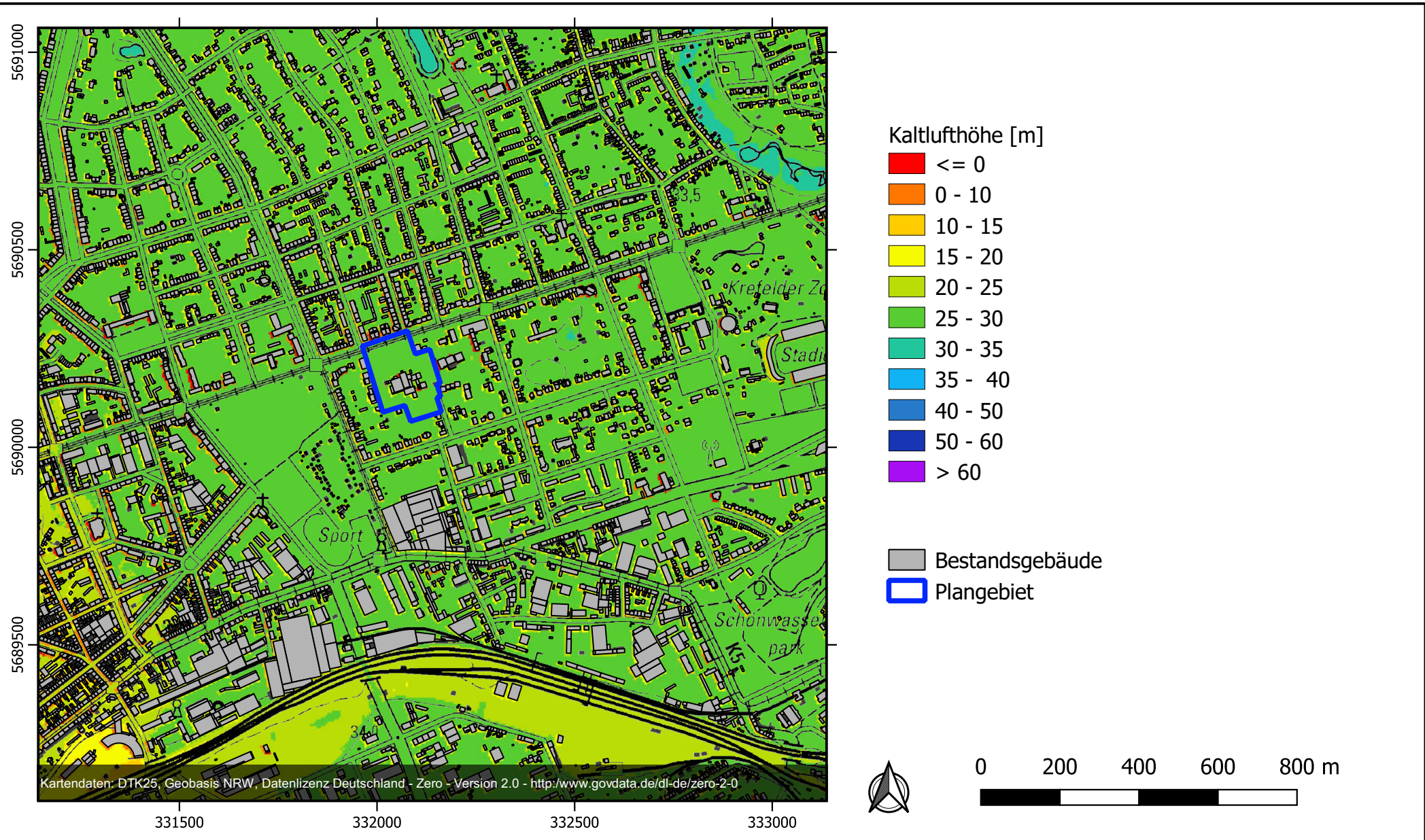


# Anlage 17: Absolute Differenz des Kaltluftvolumenstroms - 2 Stunden nach Sonnenuntergang



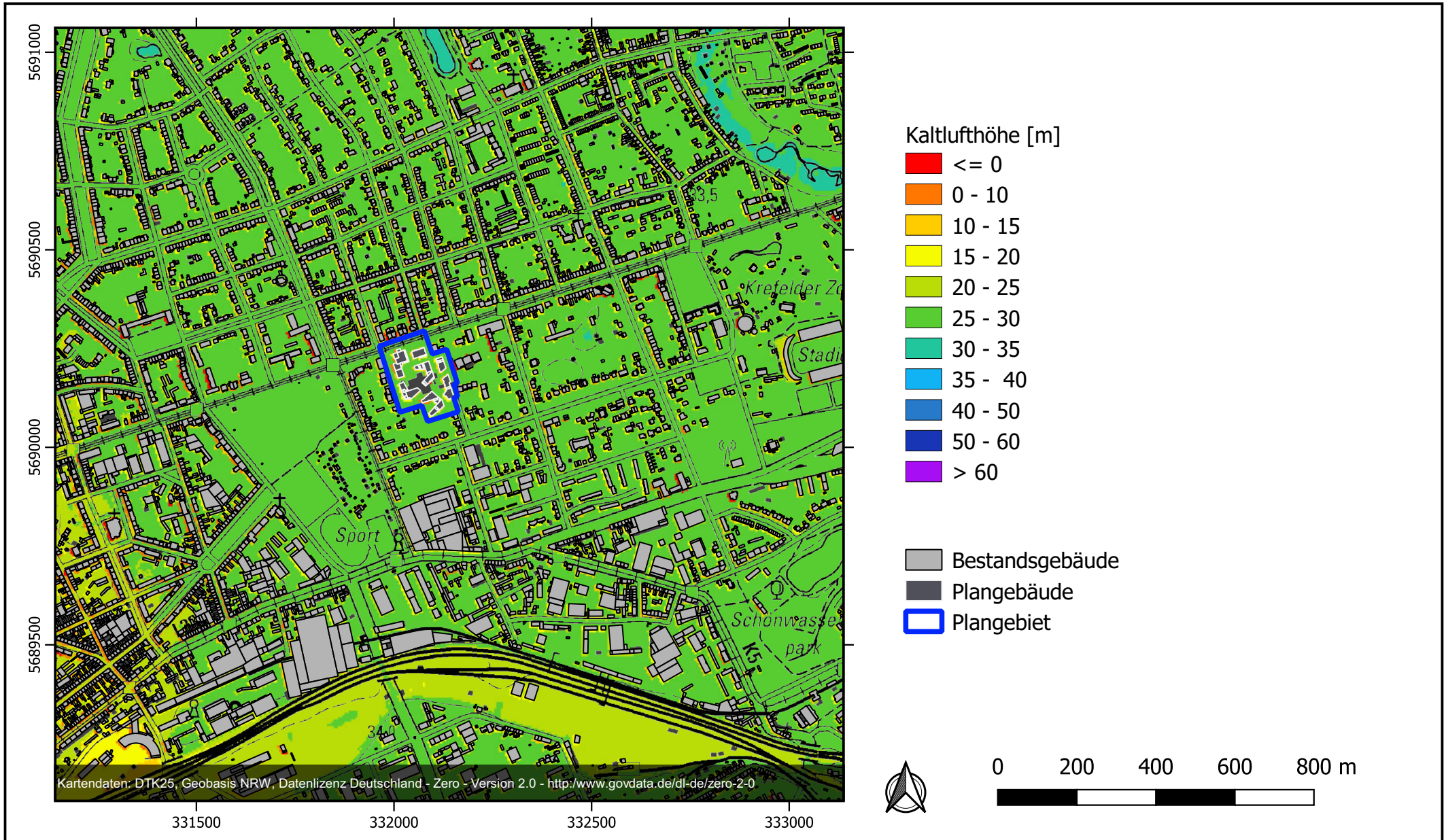


# Anlage 18: Kaltlufthöhe im Istfall - 6 Stunden nach Sonnenuntergang



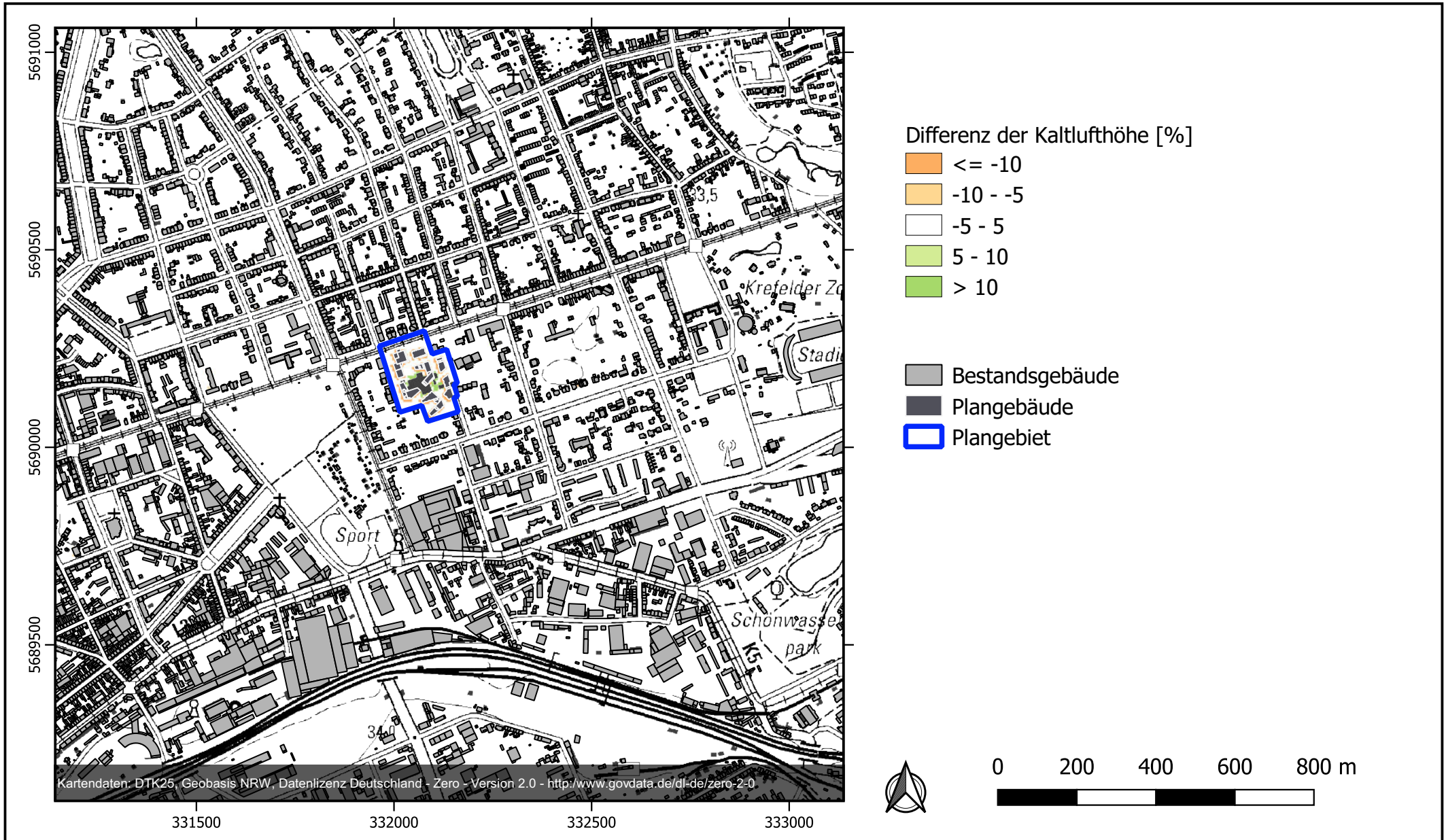


# Anlage 19: Kaltlufthöhe Planfall - 6 Stunden nach Sonnenuntergang

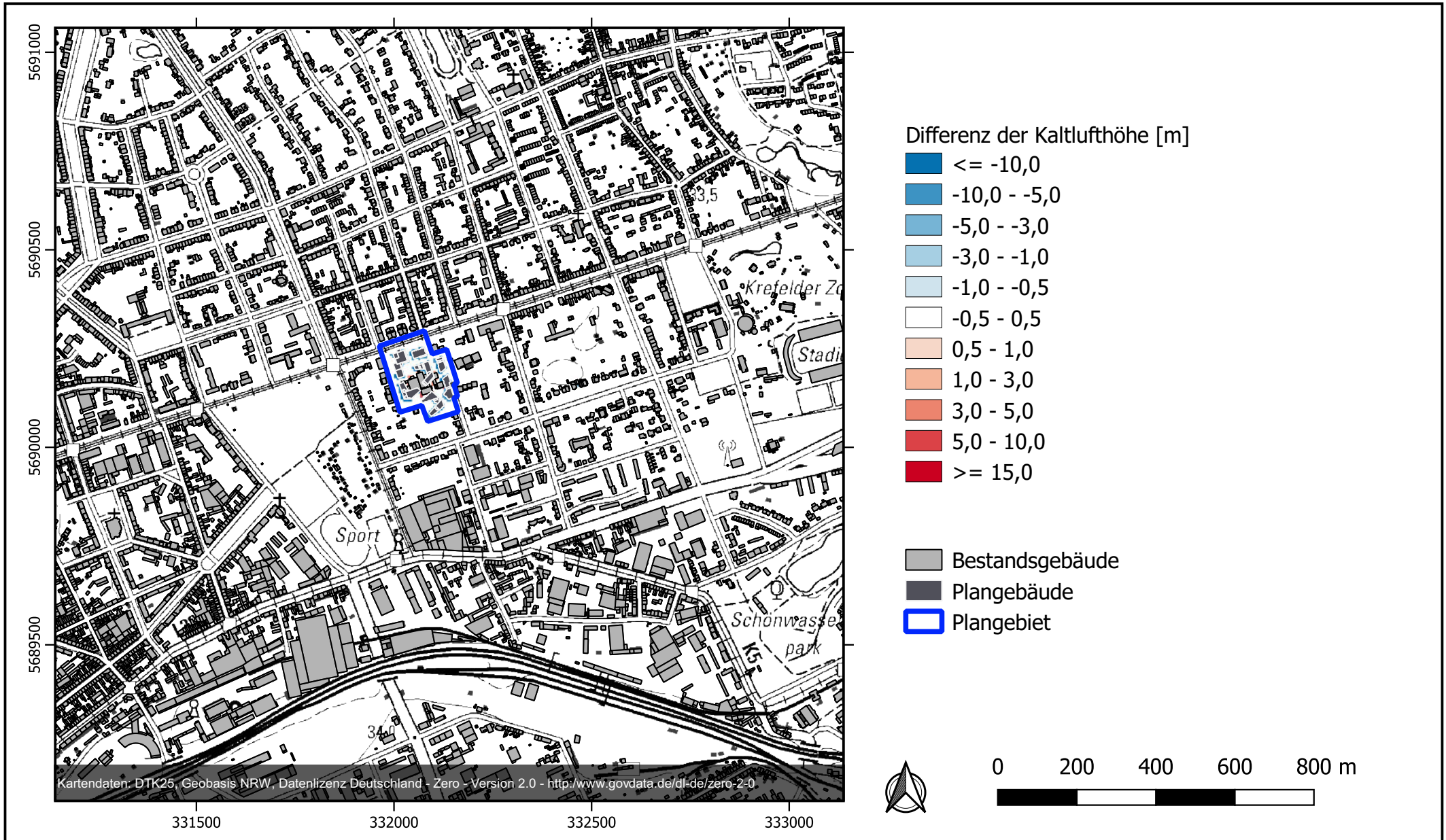




# Anlage 20: Differenz der Kaltluflhöhe - 6 Stunden nach Sonnenuntergang

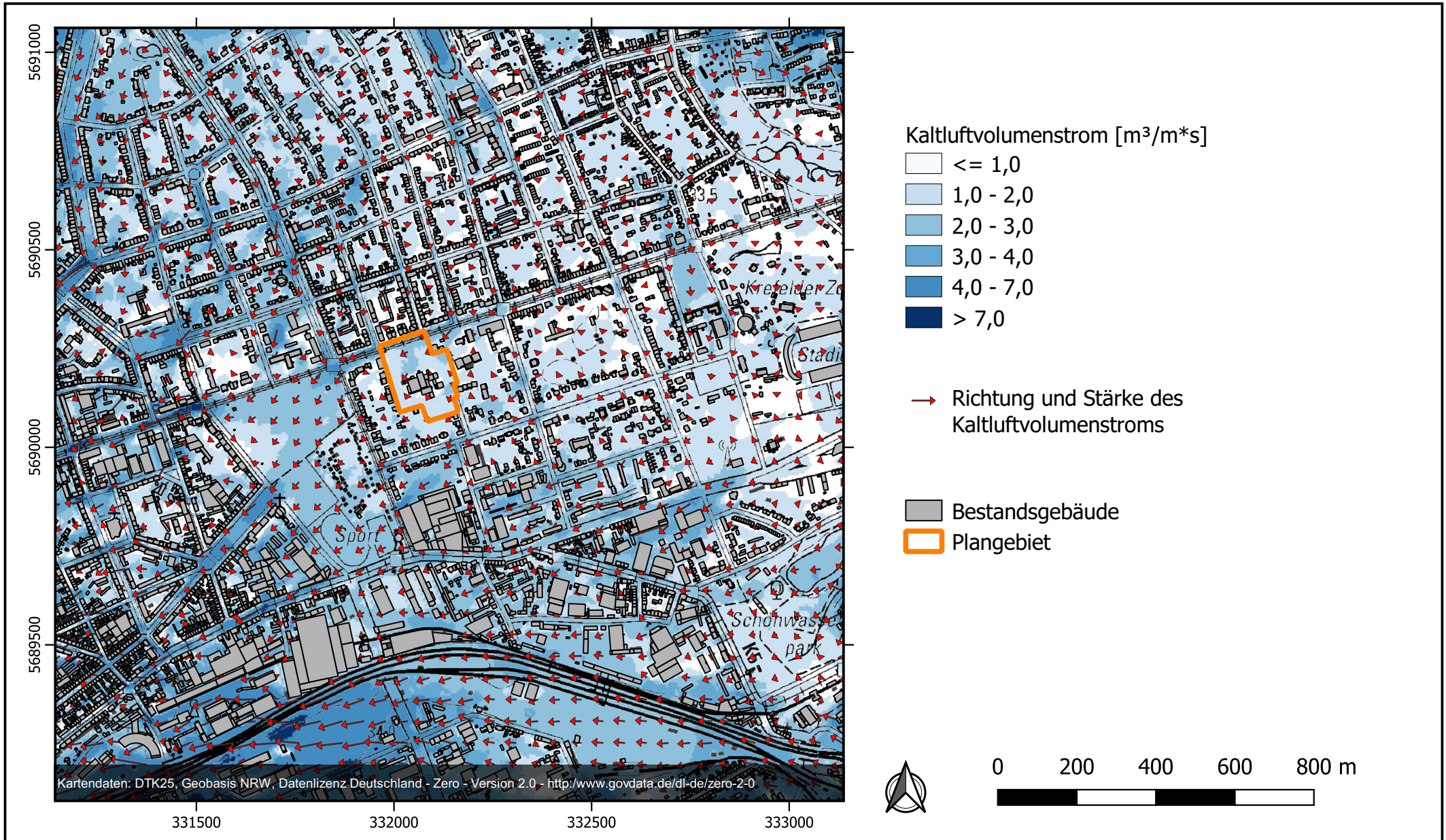


# Anlage 21: Absolute Differenz der Kaltluflhöhe - 6 Stunden nach Sonnenuntergang



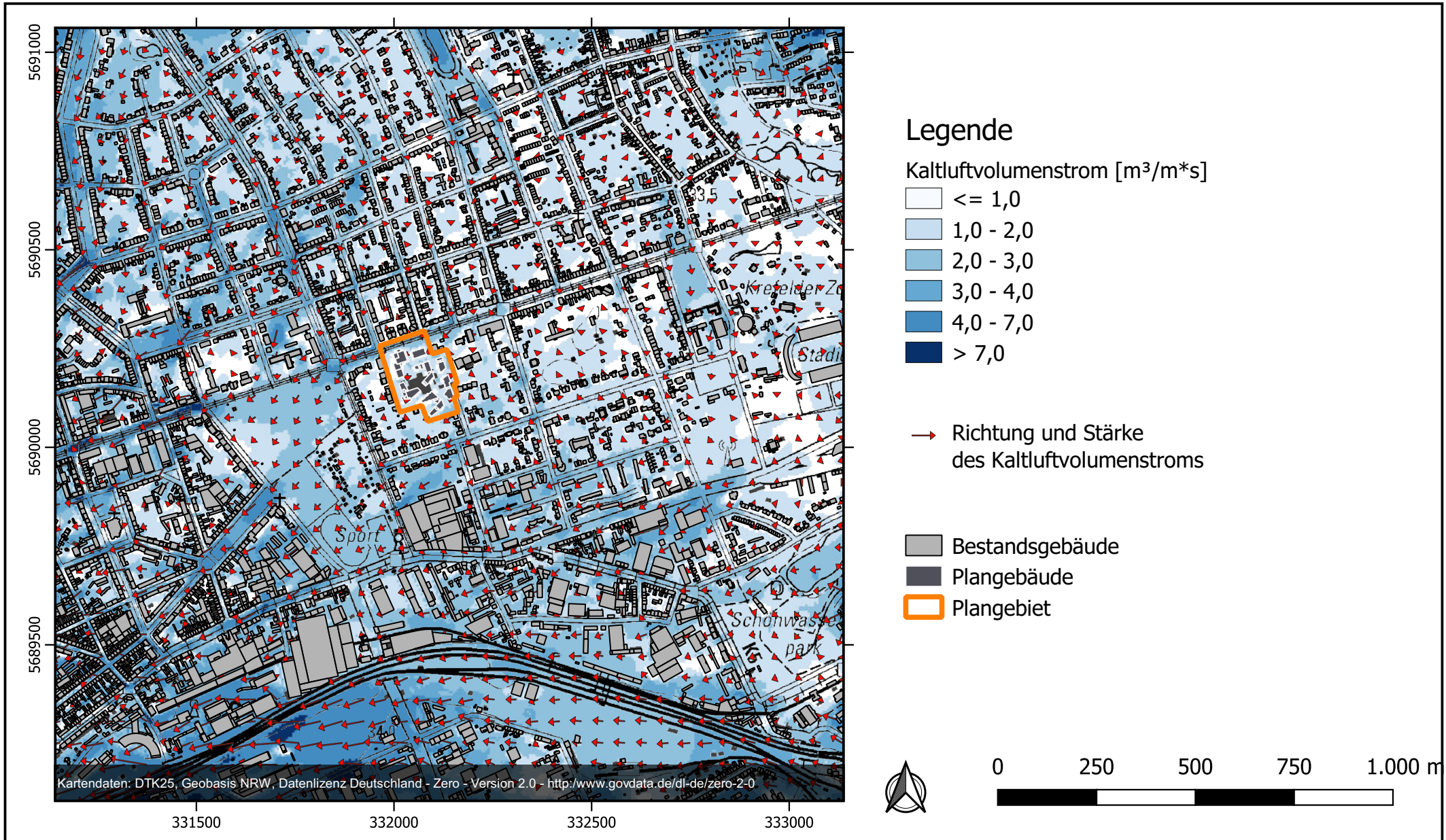


# Anlage 22: Kaltluftvolumenstrom im Istfall - 6 Stunden nach Sonnenuntergang



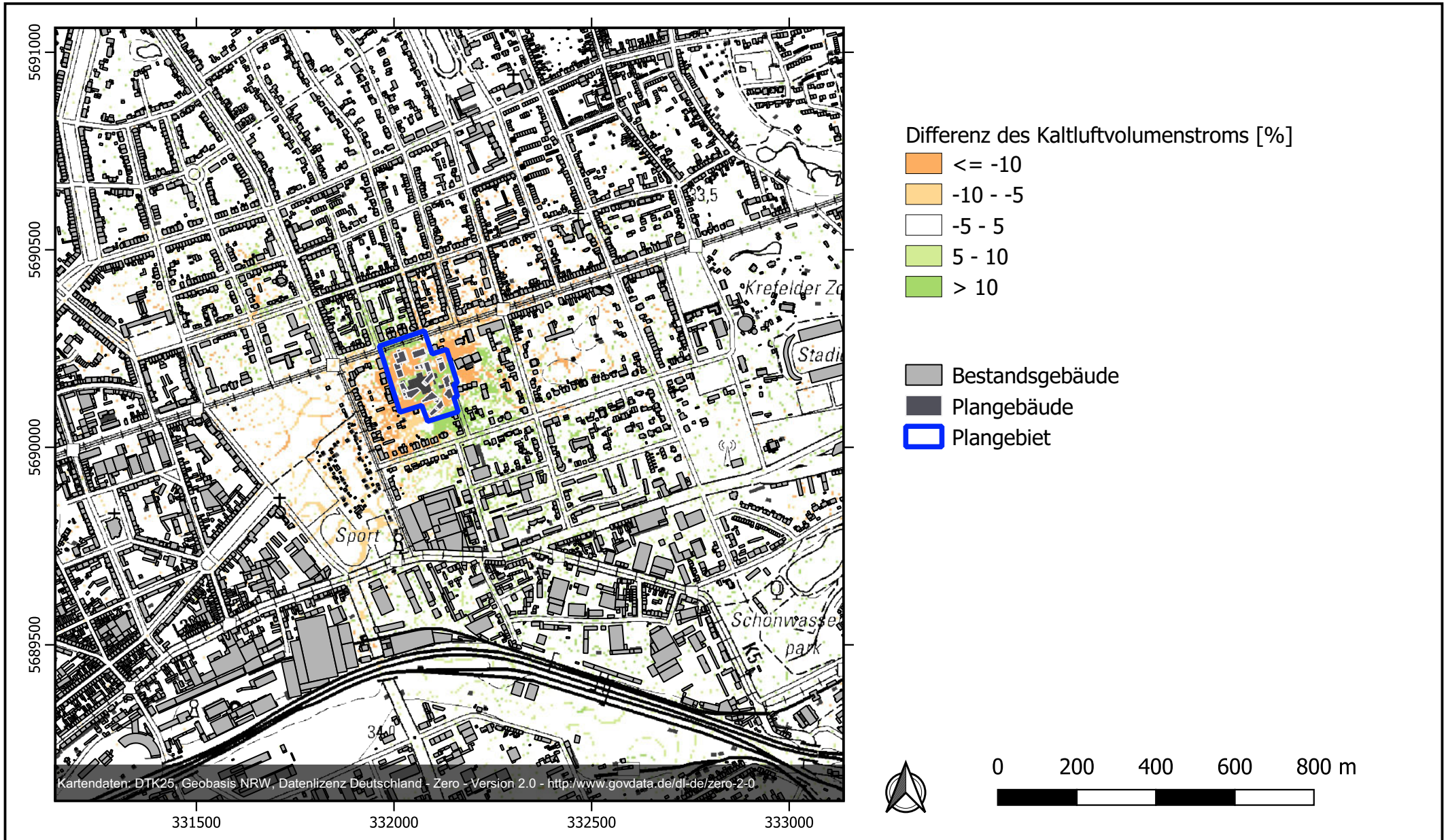


# Anlage 23: Kaltluftvolumenstrom Planfall - 6 Stunden nach Sonnenuntergang

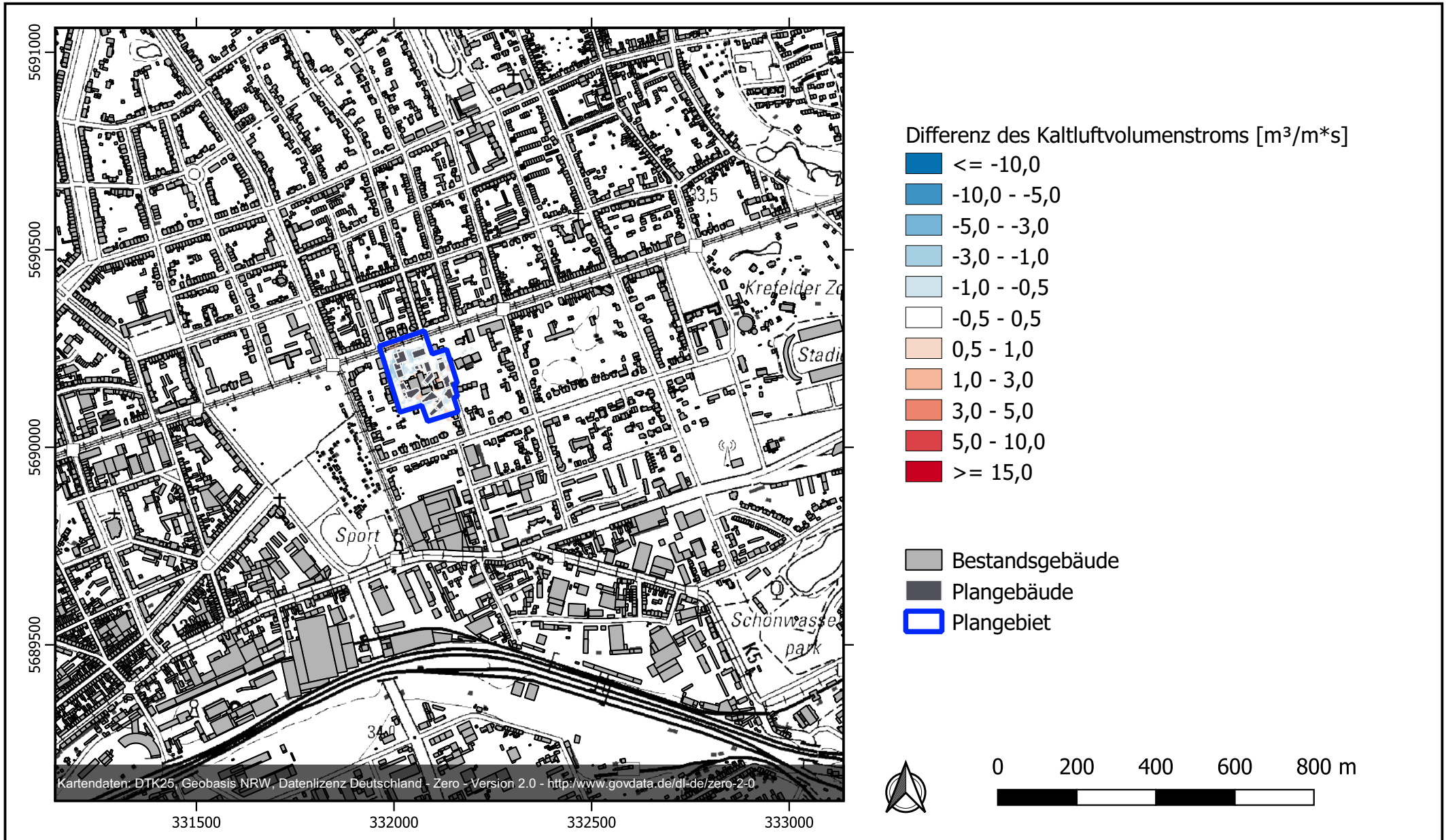




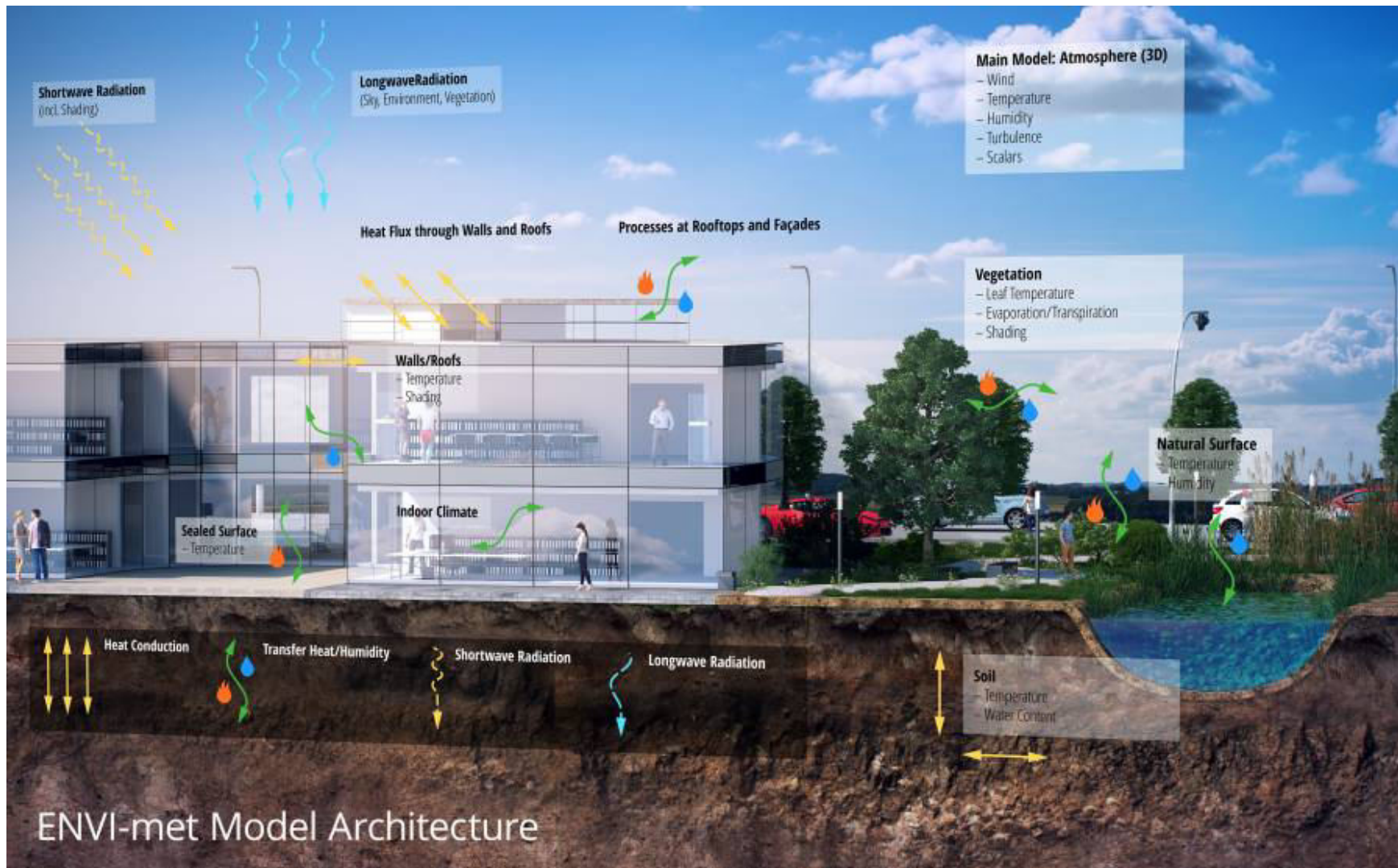
# Anlage 24: Differenz des Kaltluftvolumenstroms - 6 Stunden nach Sonnenuntergang



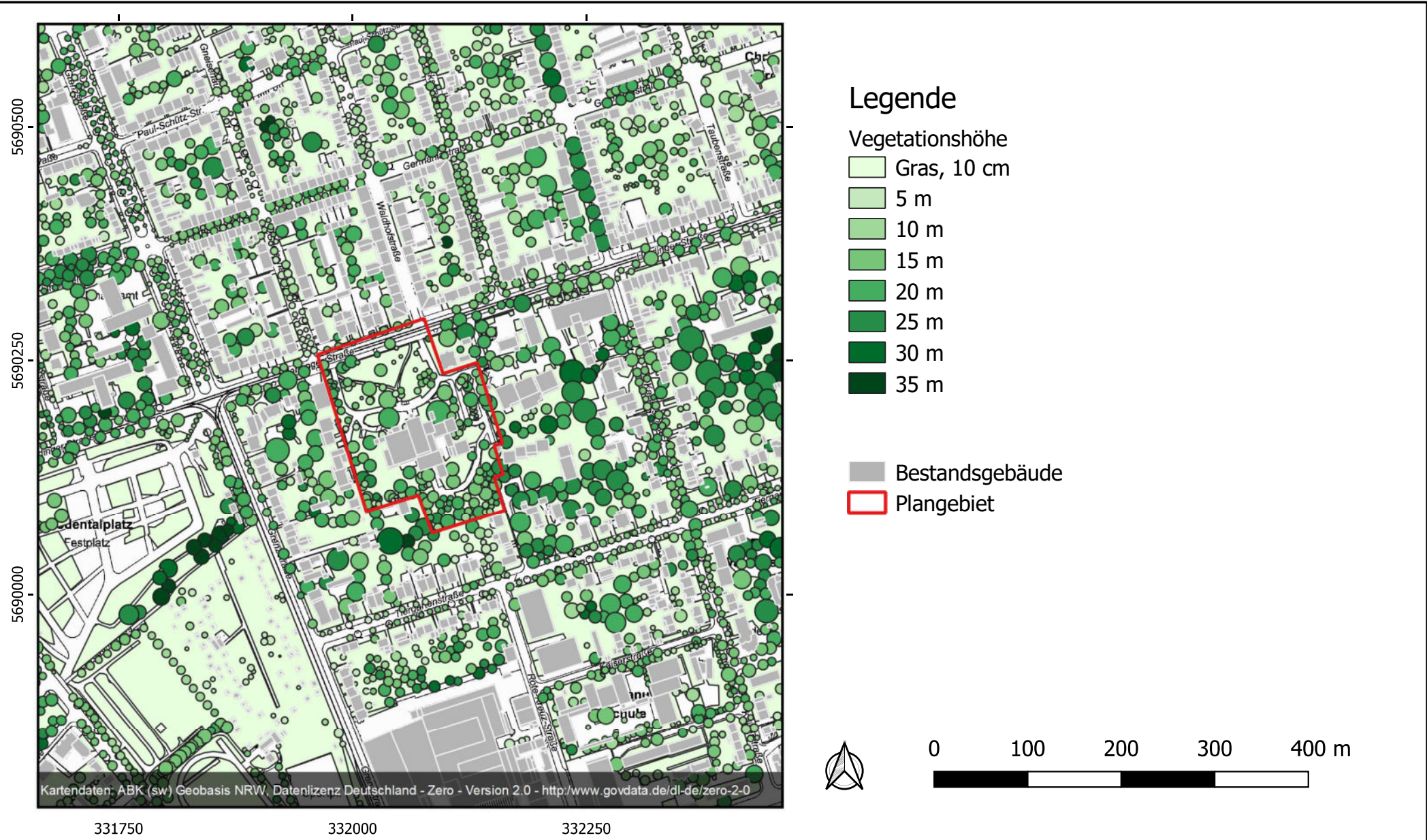
# Anlage 25: Absolute Differenz des Kaltluftvolumenstroms - 6 Stunden nach Sonnenuntergang



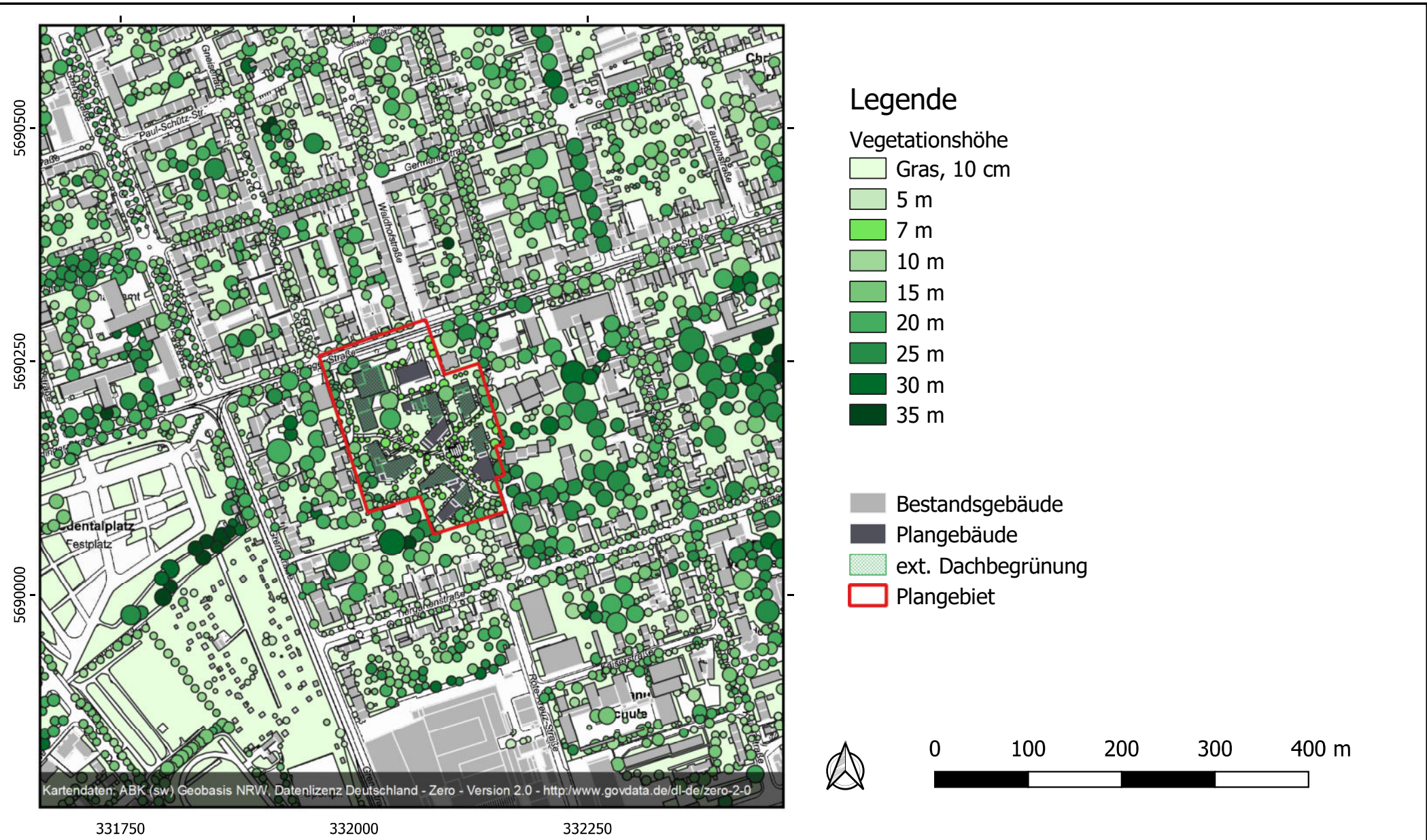




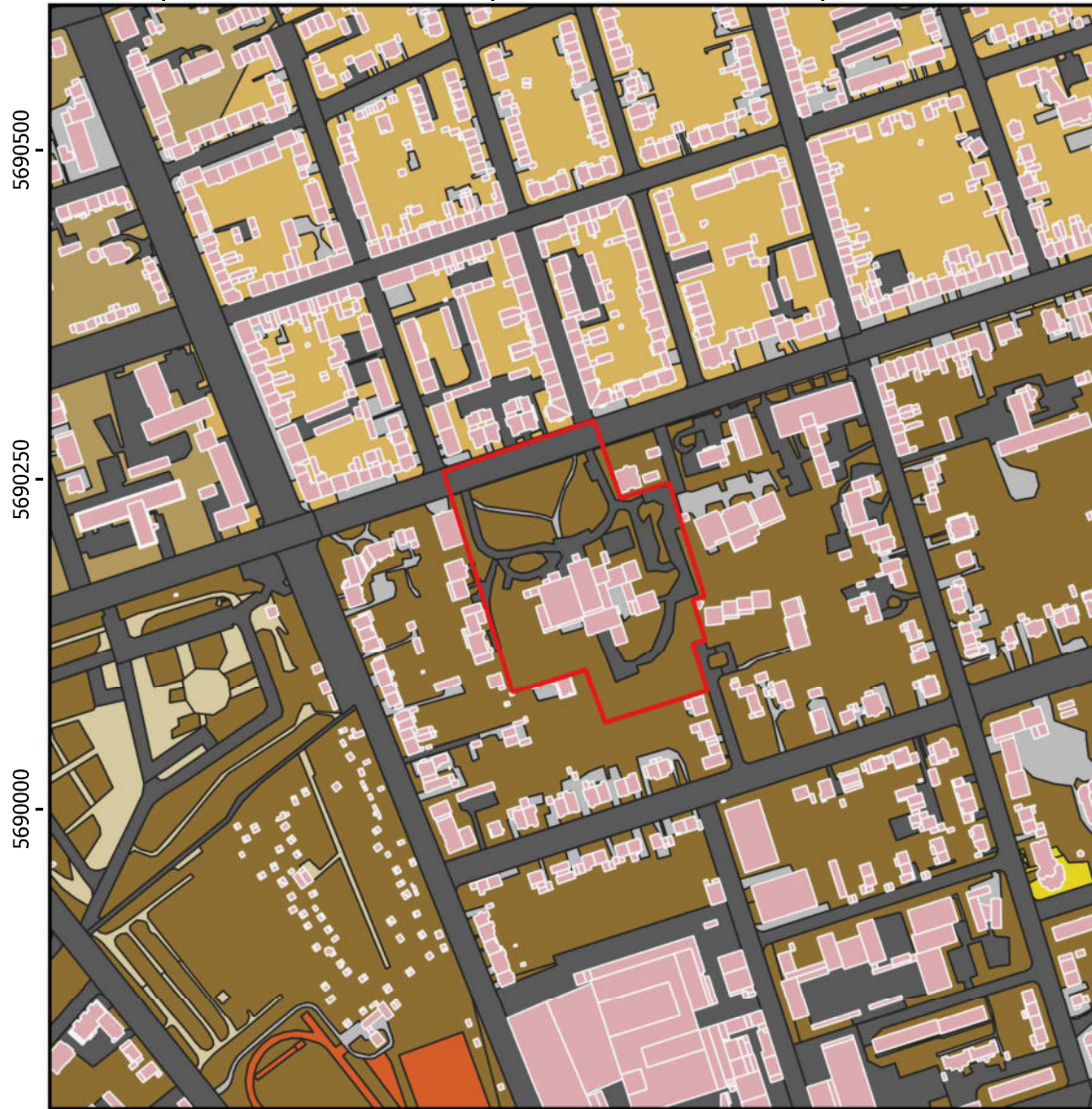




















### Legende

#### Oberflächenbeschaffenheit

-  Sand
-  Ascheplatz
-  tonig-schluffiger Boden
-  stark lehmig-sandiger Boden
-  lehmig-sandiger Boden
-  wasserg. Wegedecke
-  Beton
-  Asphalt

-  Gebäude
-  Plangebiet



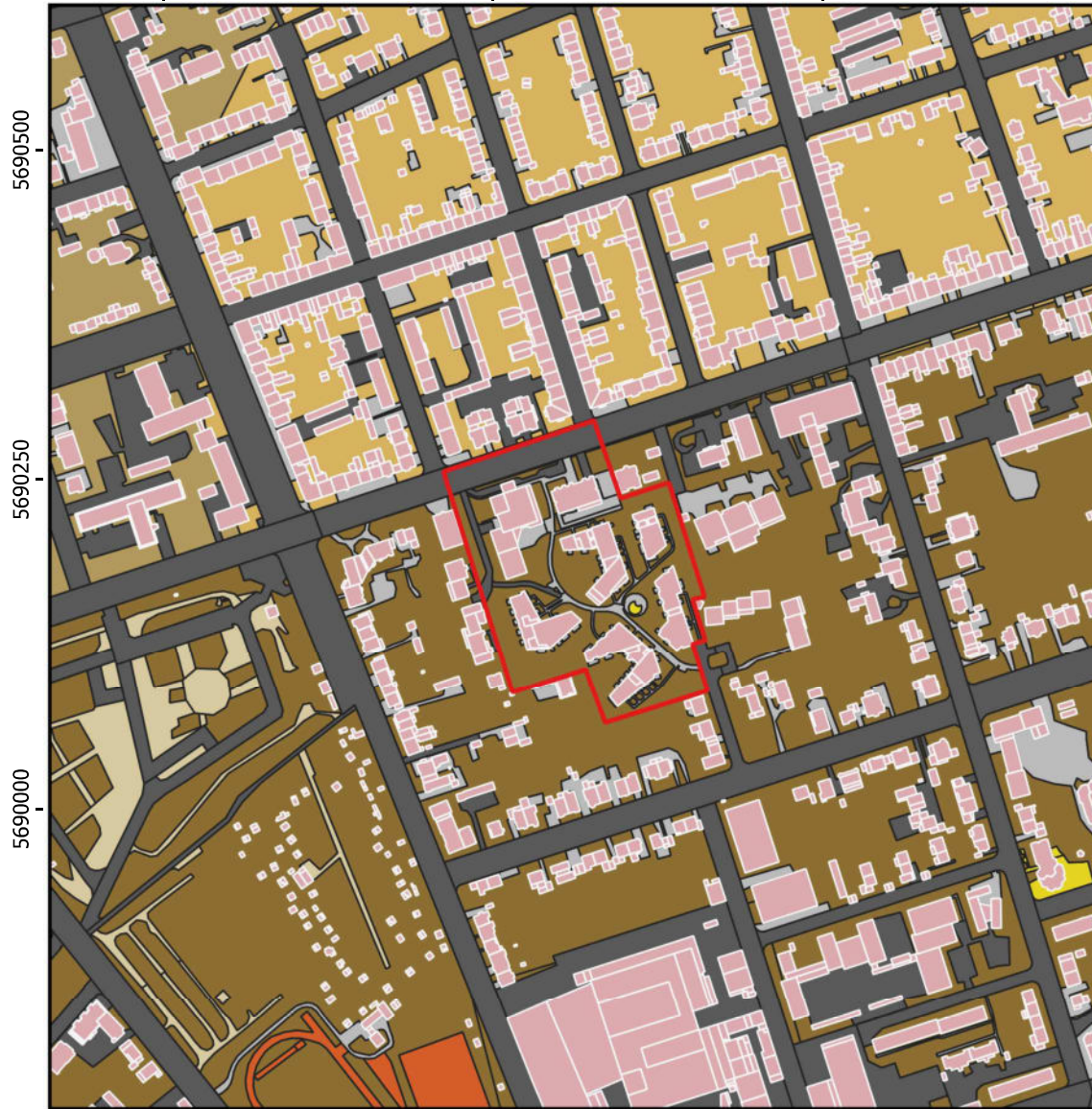
0 100 200 300 400 m



331750









332000

332250



### Legende

#### Oberflächenbeschaffenheit

-  Sand
-  Ascheplatz
-  tonig-schluffiger Boden
-  stark lehmig-sandiger Boden
-  lehmig-sandiger Boden
-  wasserg. Wegedecke
-  Beton
-  Asphalt

-  Gebäude
-  Plangebiet



0 100 200 300 400 m



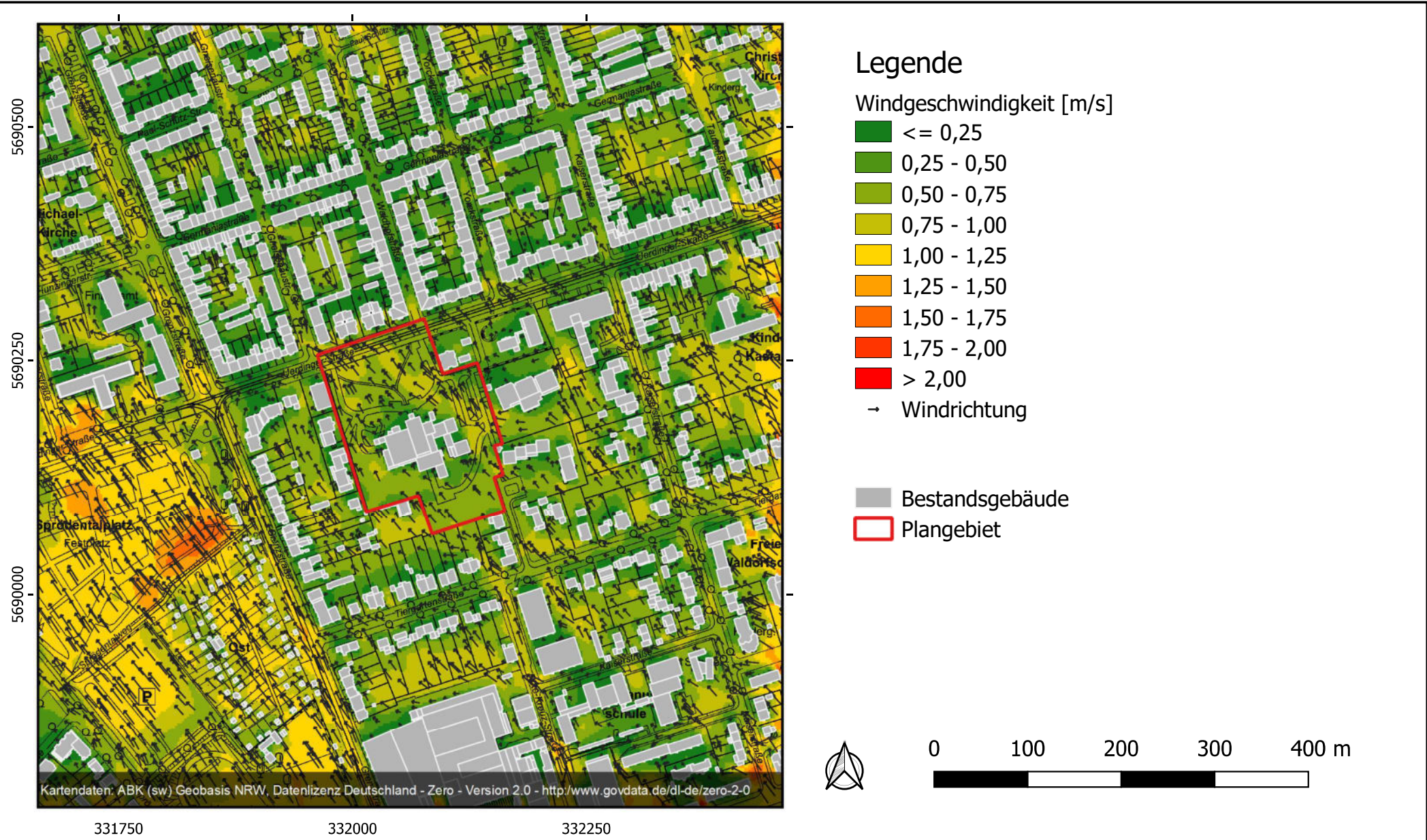
331750

332000

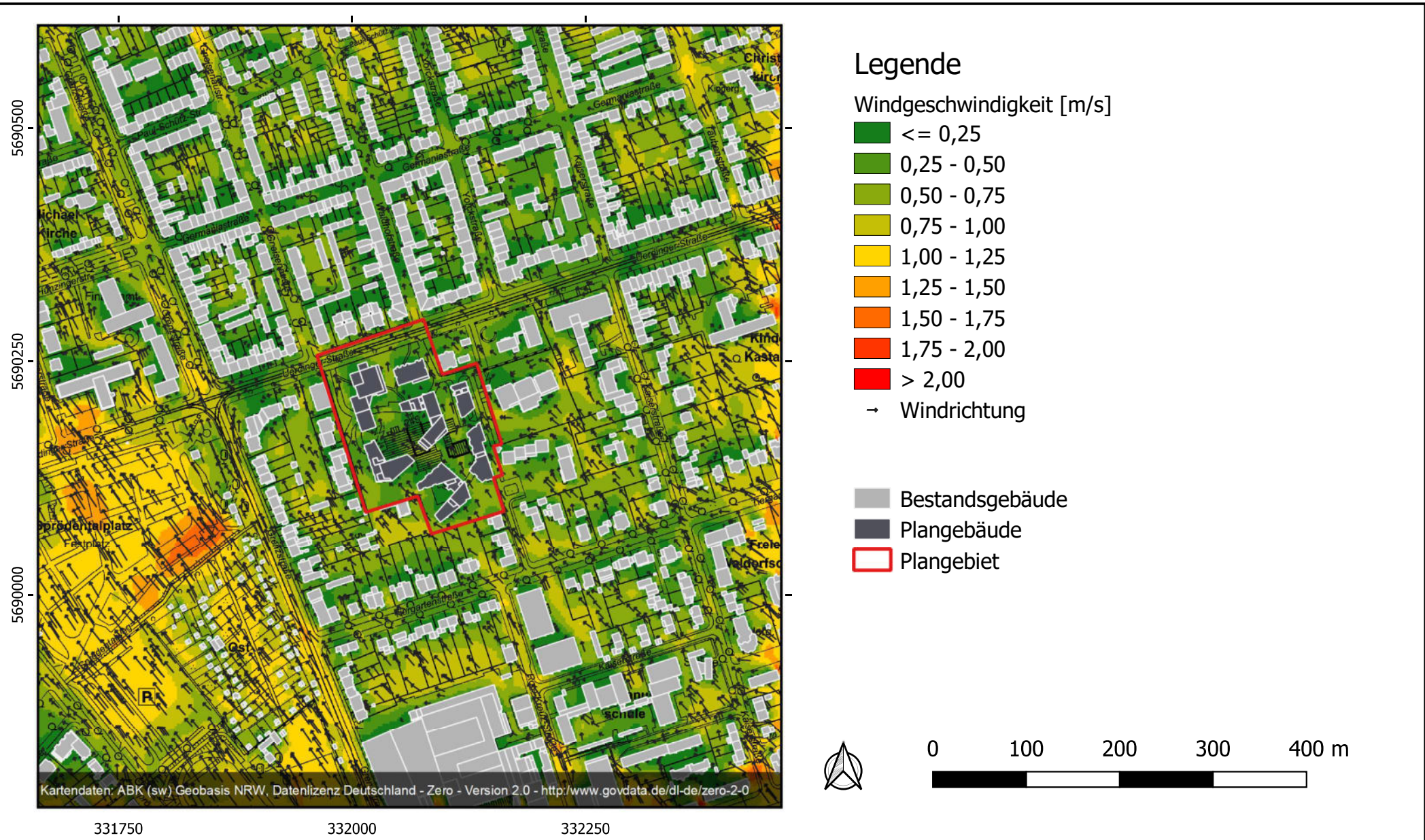
332250



# Anlage 31: Windfeld in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Istfall

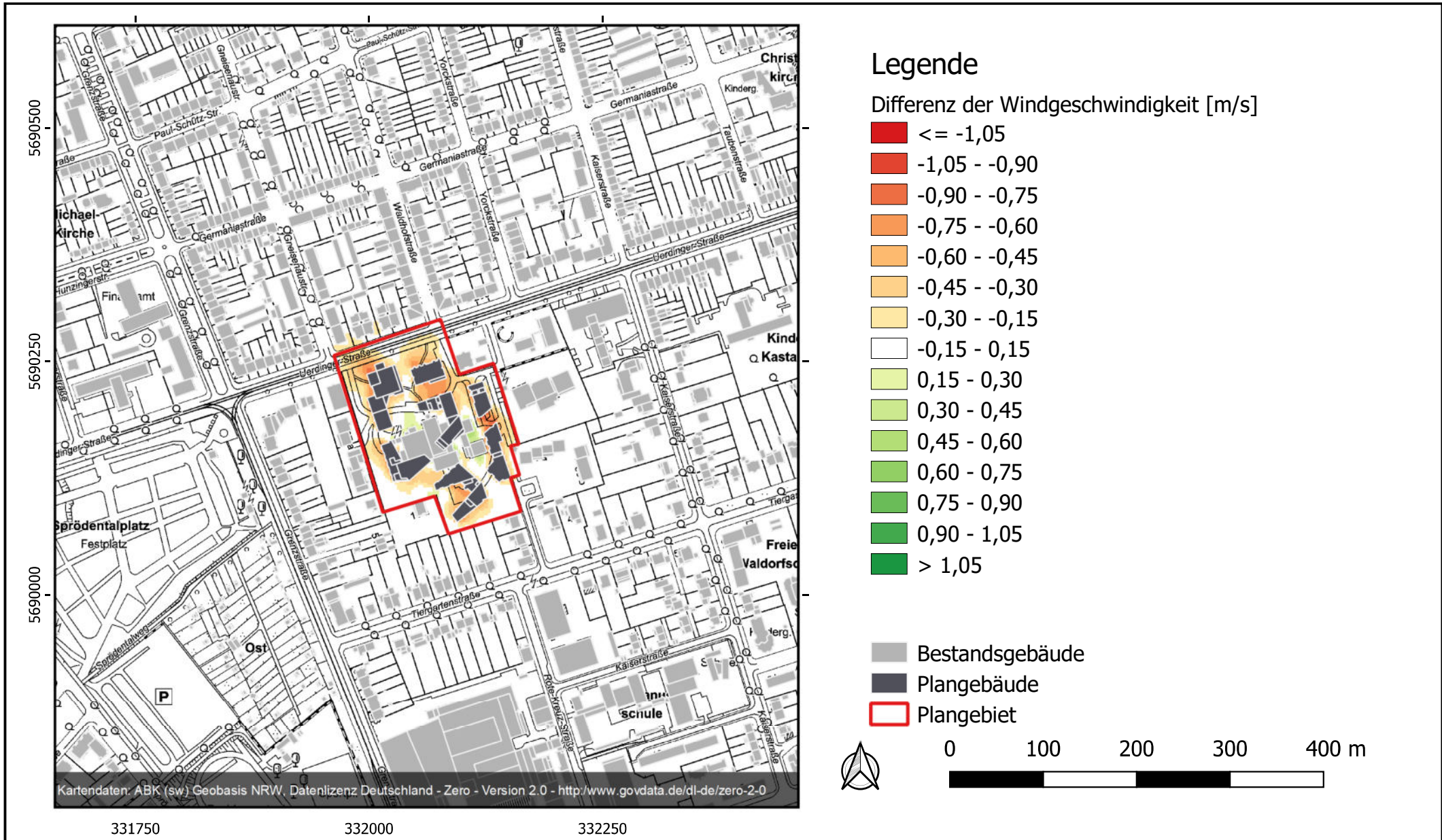






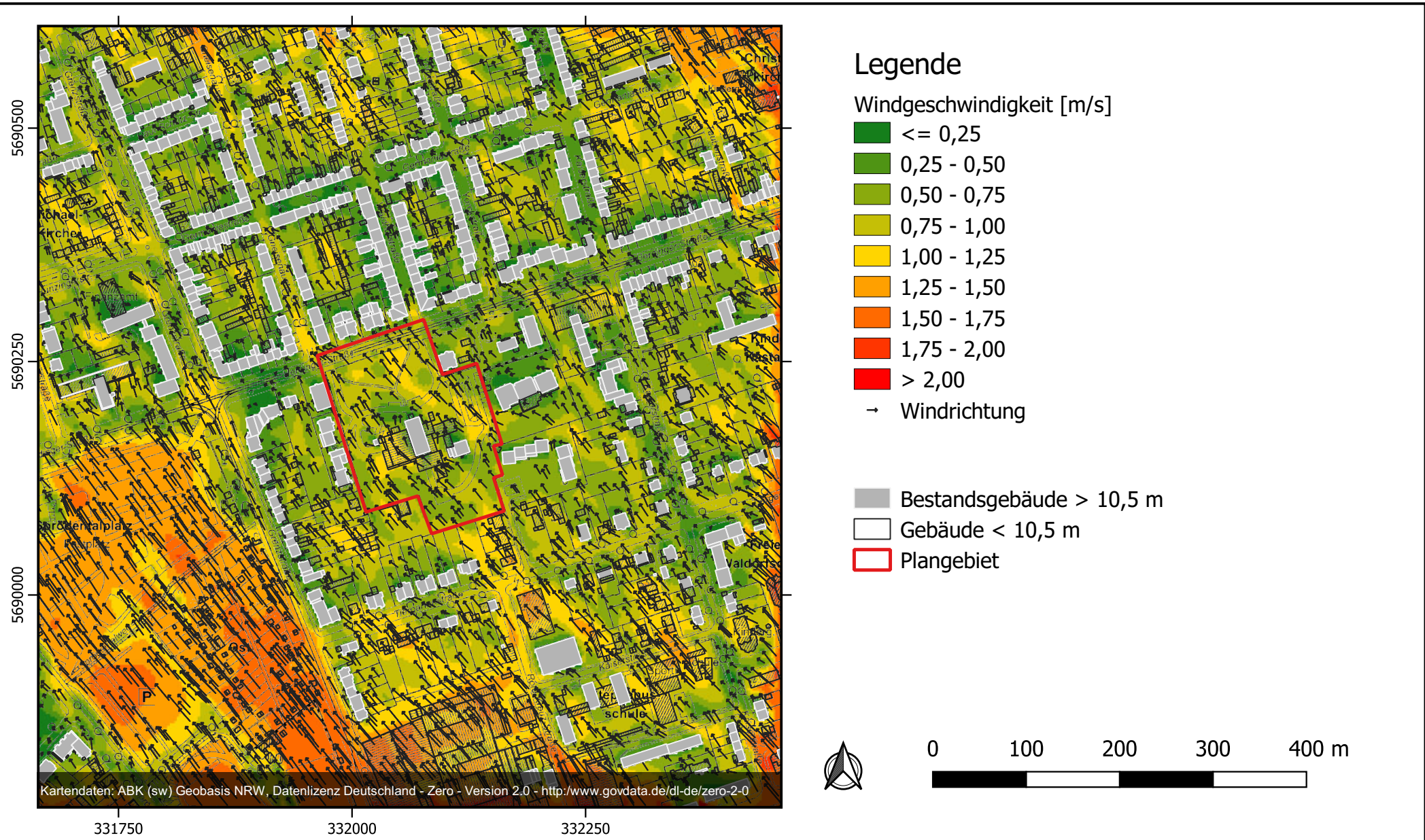


# Anlage 33: Differenz im Windfeld in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall minus Istfall



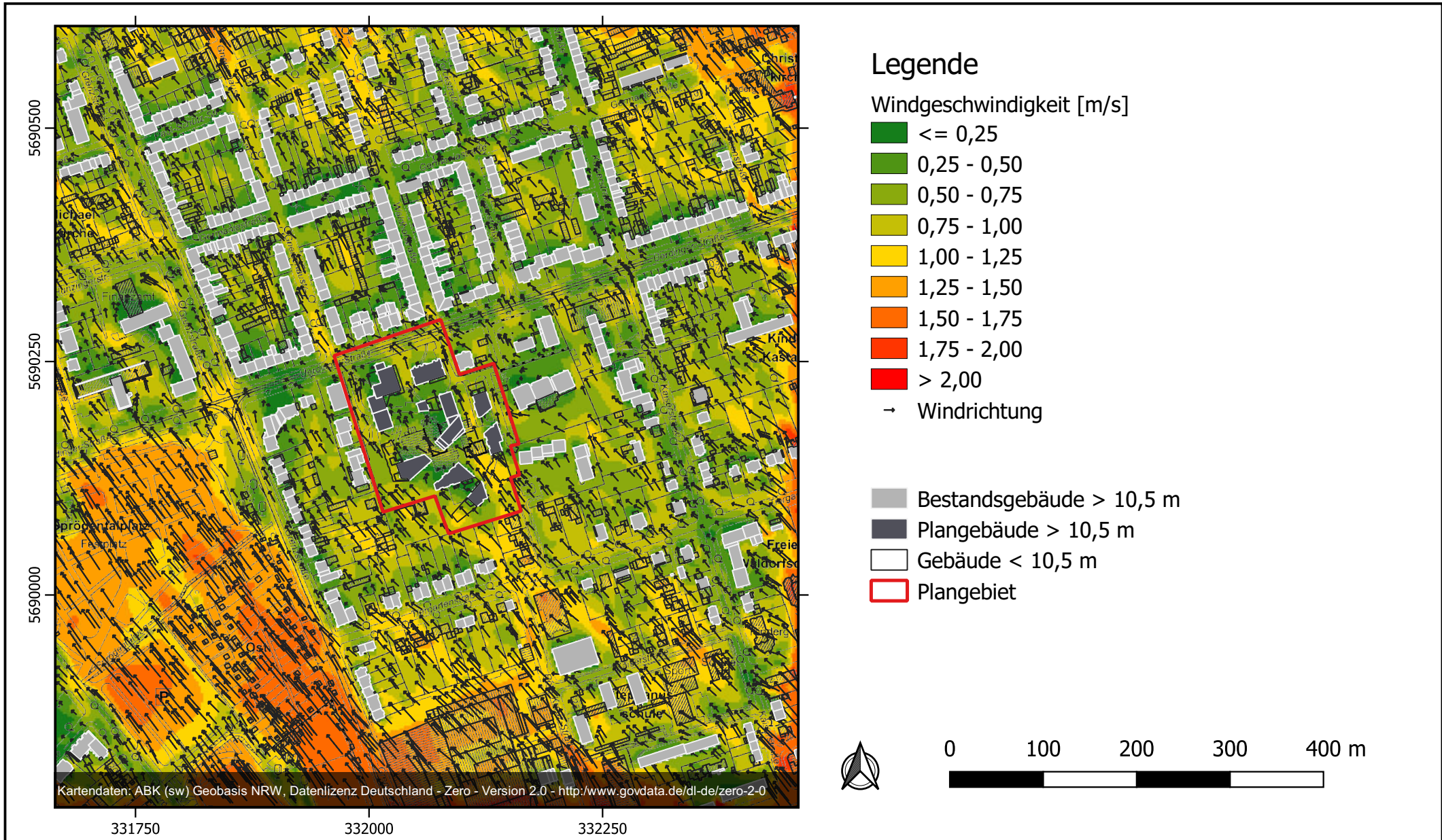


# Anlage 34: Windfeld in 10,5 m Höhe um 14 Uhr - Istfall



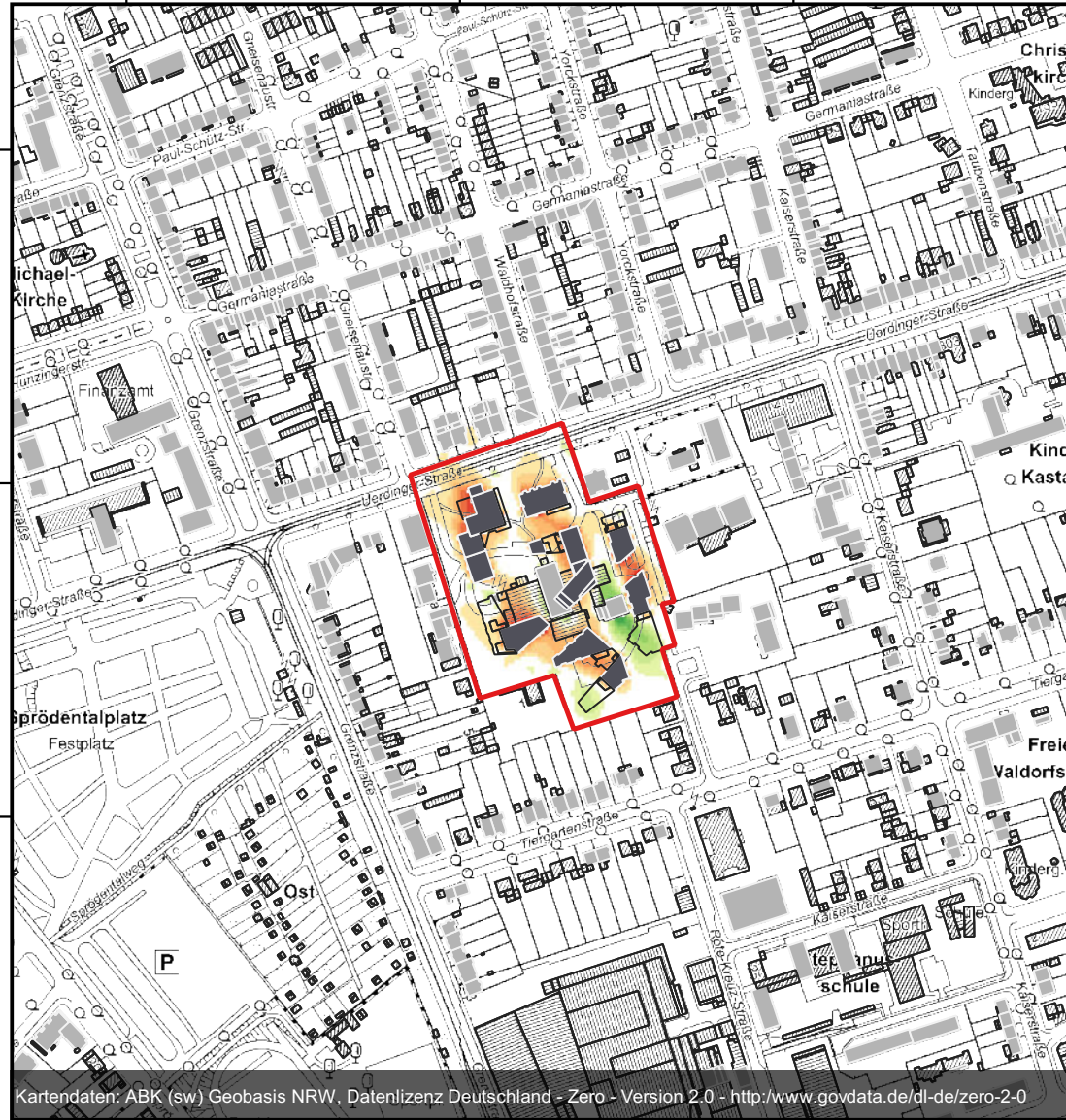


# Anlage 35: Windfeld in 10,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall





# Anlage 36: Differenz im Windfeld in 10,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall minus Istfall



Kartendaten: ABK (sw) Geobasis NRW, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 - <http://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>

## Legende

Differenz der Windgeschwindigkeit [m/s]

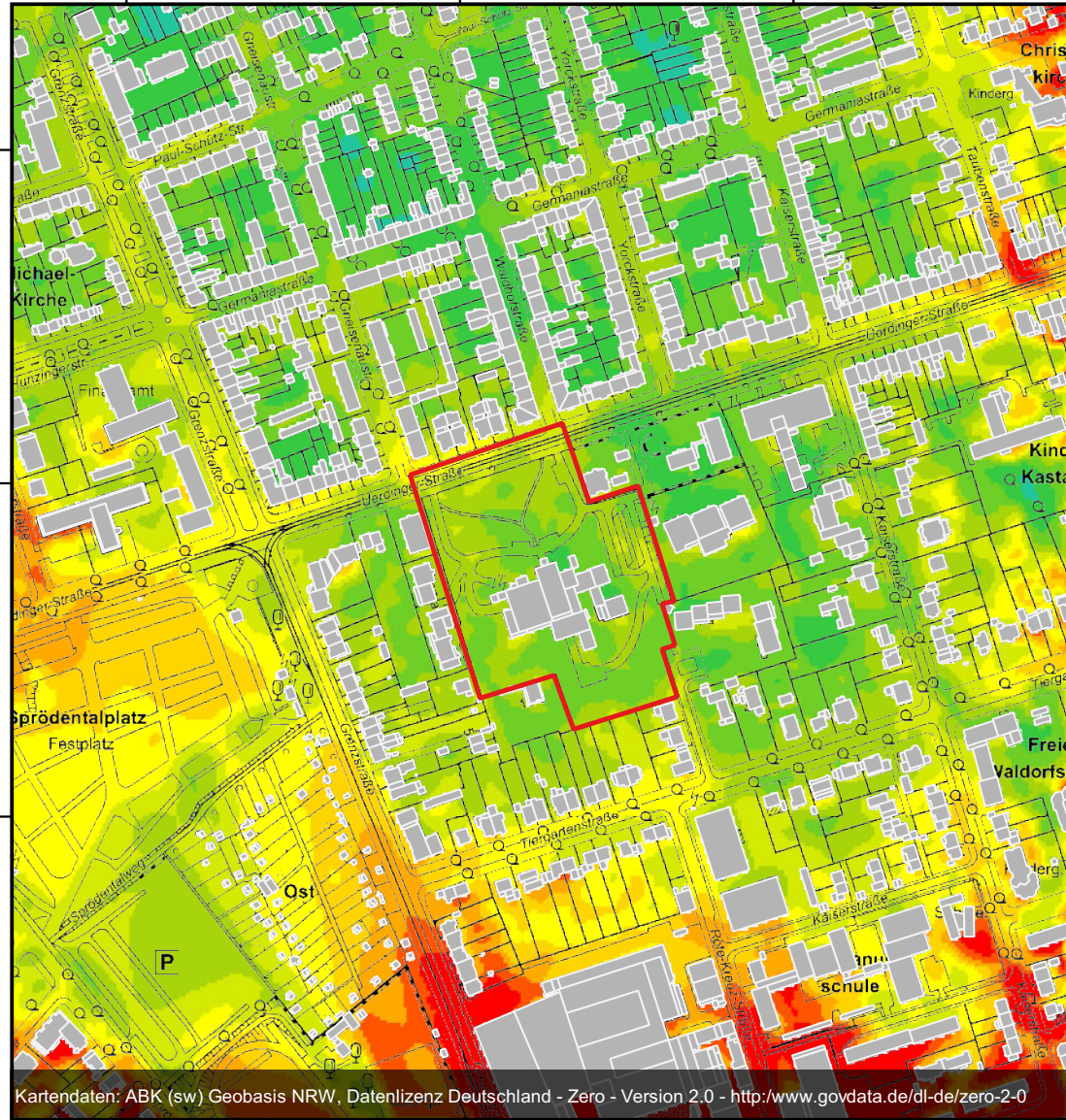
- <= -1,05
- 1,05 - -0,90
- 0,90 - -0,75
- 0,75 - -0,60
- 0,60 - -0,45
- 0,45 - -0,30
- 0,30 - -0,15
- 0,15 - 0,15
- 0,15 - 0,30
- 0,30 - 0,45
- 0,45 - 0,60
- 0,60 - 0,75
- 0,75 - 0,90
- 0,90 - 1,05
- > 1,05

- Bestandsgebäude > 10,5 m
- Plangebäude > 10,5 m
- Gebäude < 10,5 m
- Plangebiet



331750                      332000                      332250

# Anlage 37: Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Istfall



Kartendaten: ABK (sw) Geobasis NRW, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 - <http://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>

## Legende

Temperatur [°C]

- <= 26,60
- 26,60 - 26,80
- 26,80 - 27,00
- 27,00 - 27,20
- 27,20 - 27,40
- 27,40 - 27,60
- 27,60 - 27,80
- 27,80 - 28,00
- 28,00 - 28,20
- 28,20 - 28,40
- 28,40 - 28,60
- 28,60 - 28,80
- 28,80 - 29,00
- 29,00 - 29,20
- > 29,20

- Bestandsgebäude
- Plangebiet

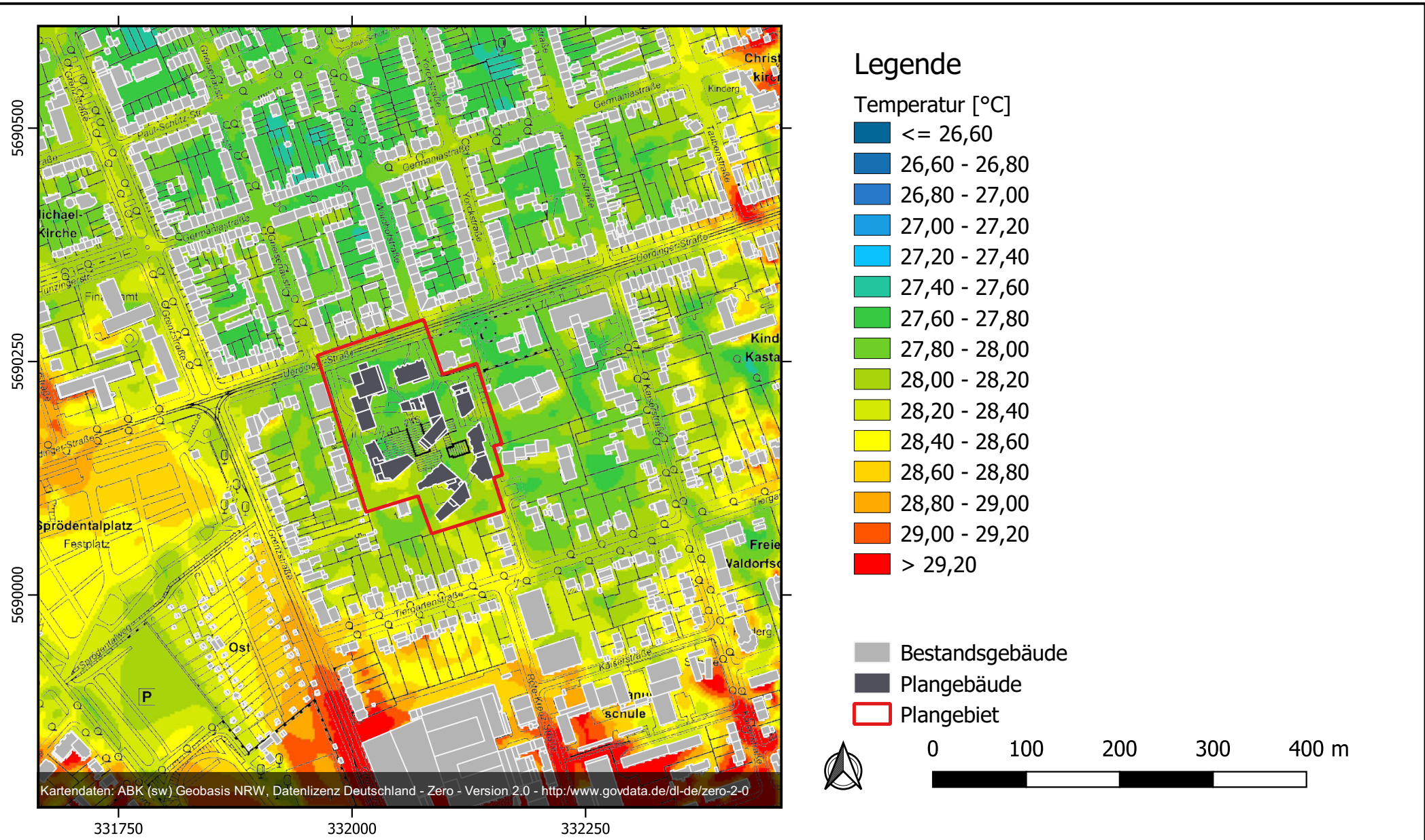


0 100 200 300 400 m

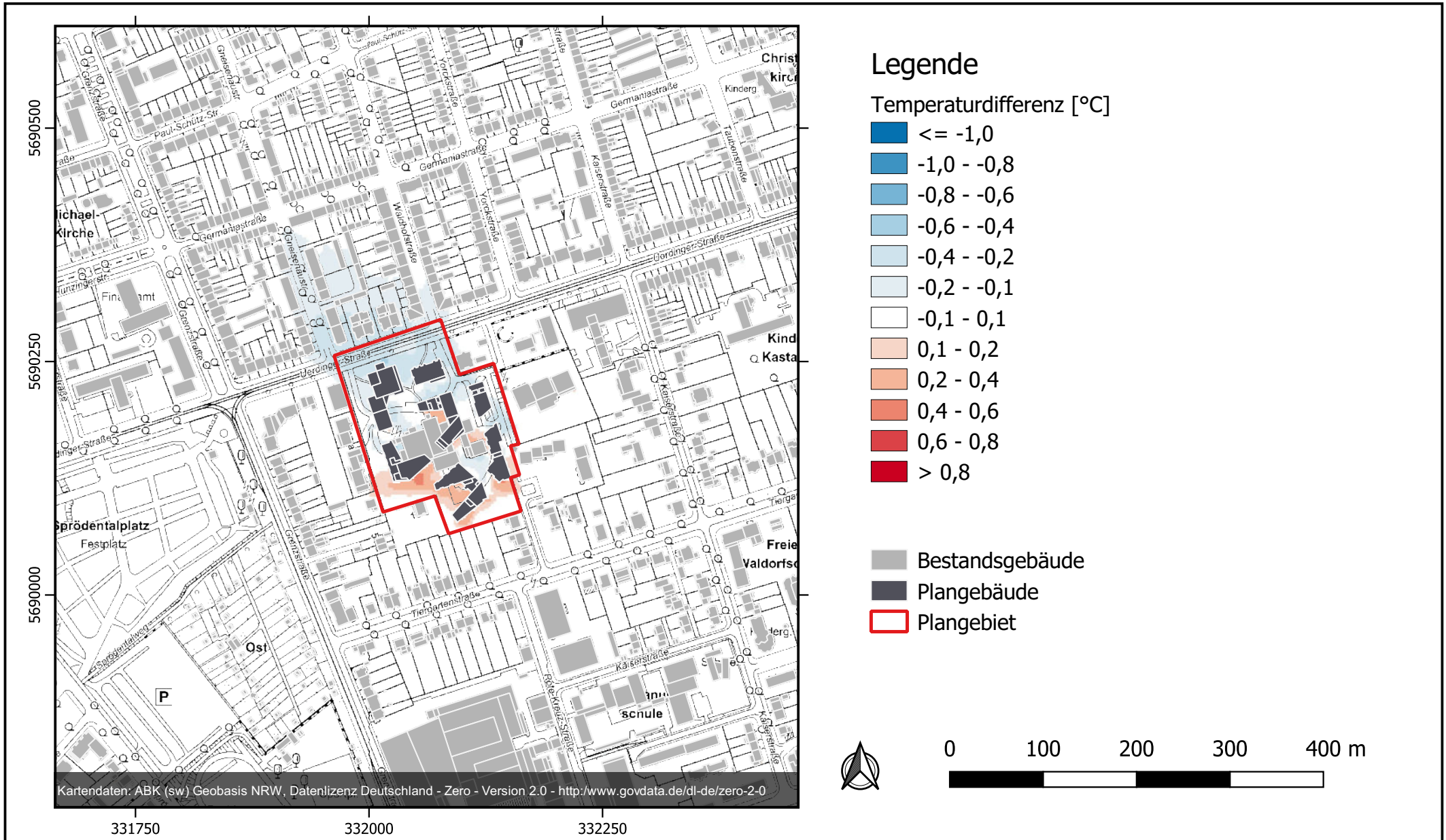




# Anlage 38: Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall

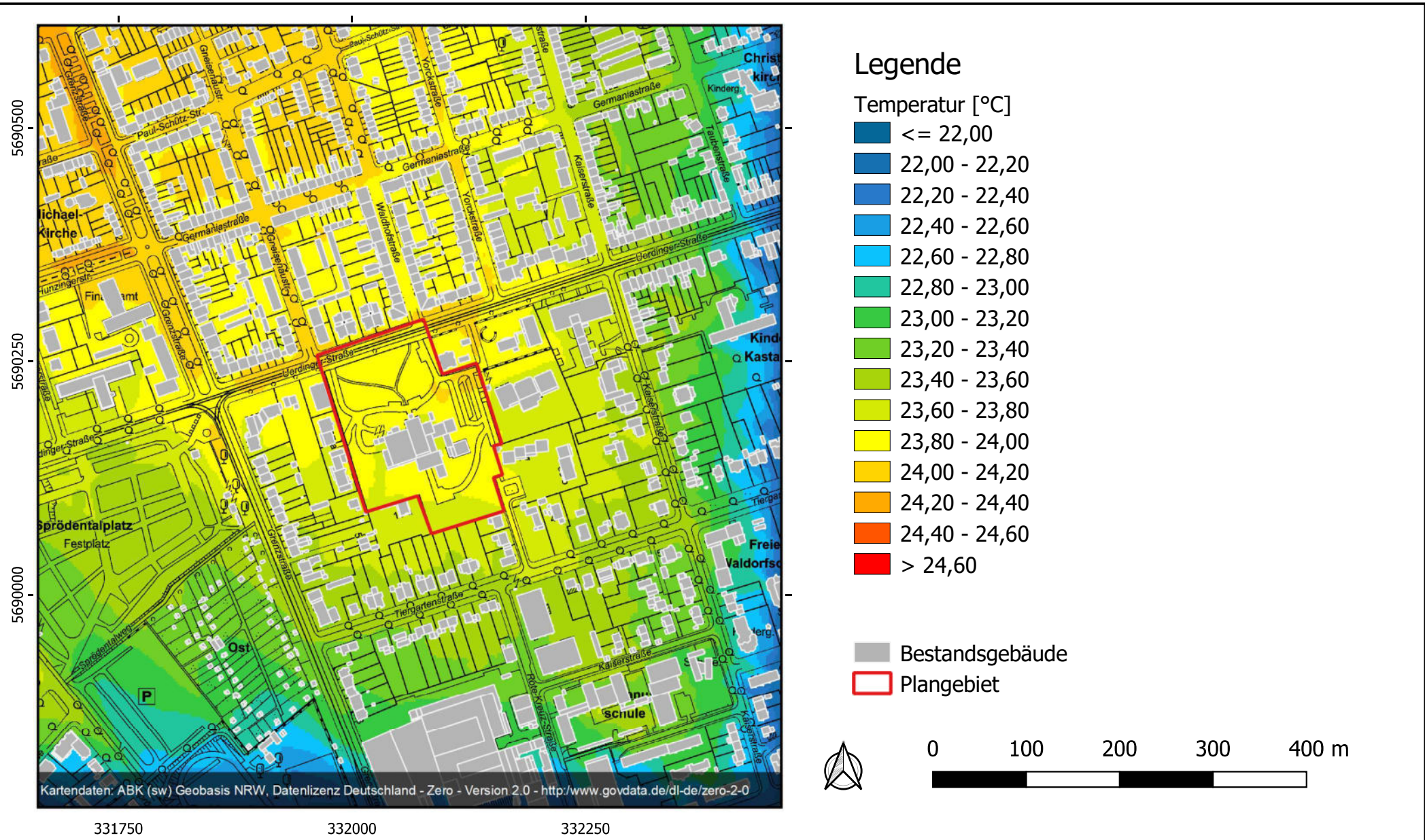


# Anlage 39: Differenz der Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall minus Istfall



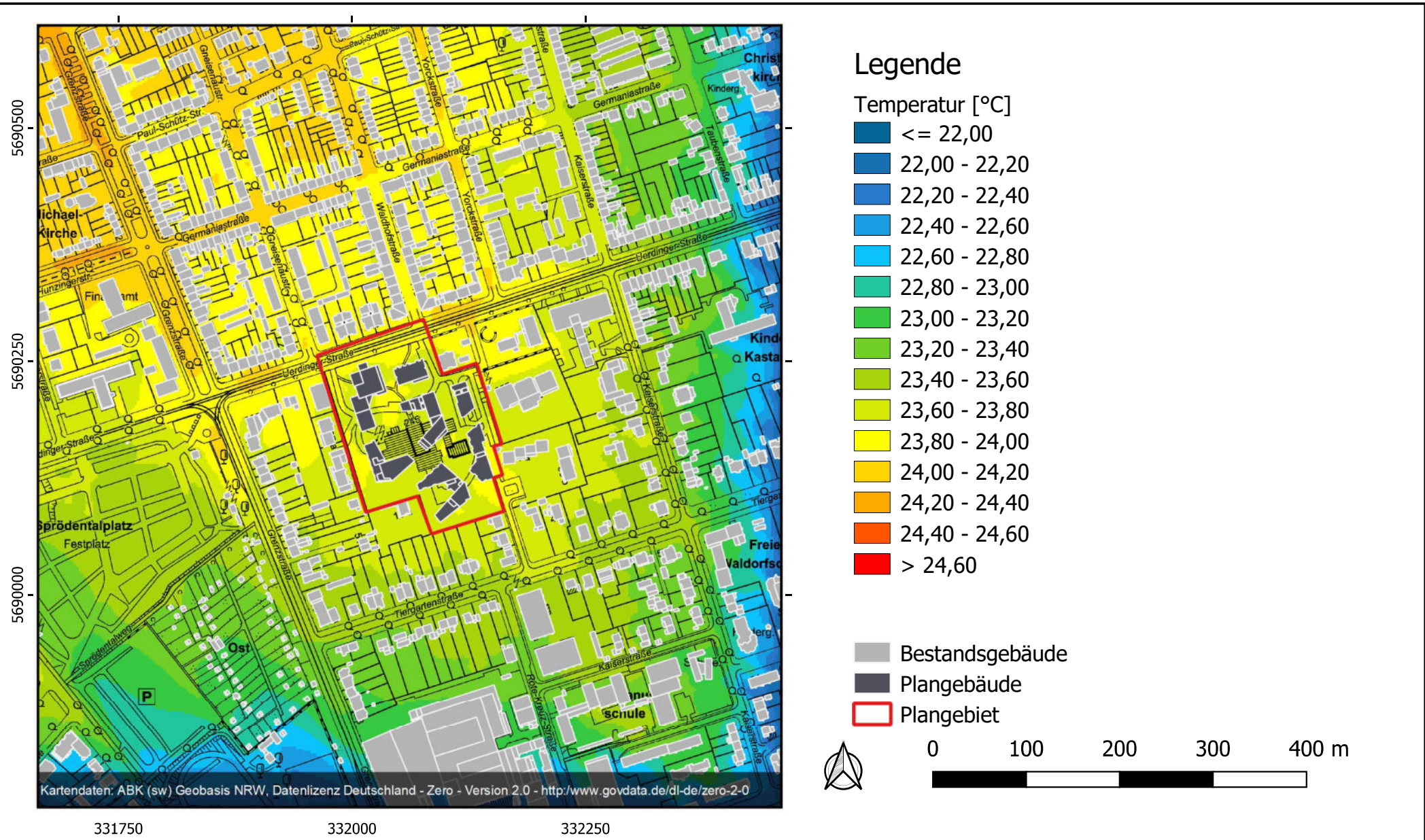


# Anlage 40: Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 4 Uhr - Istfall



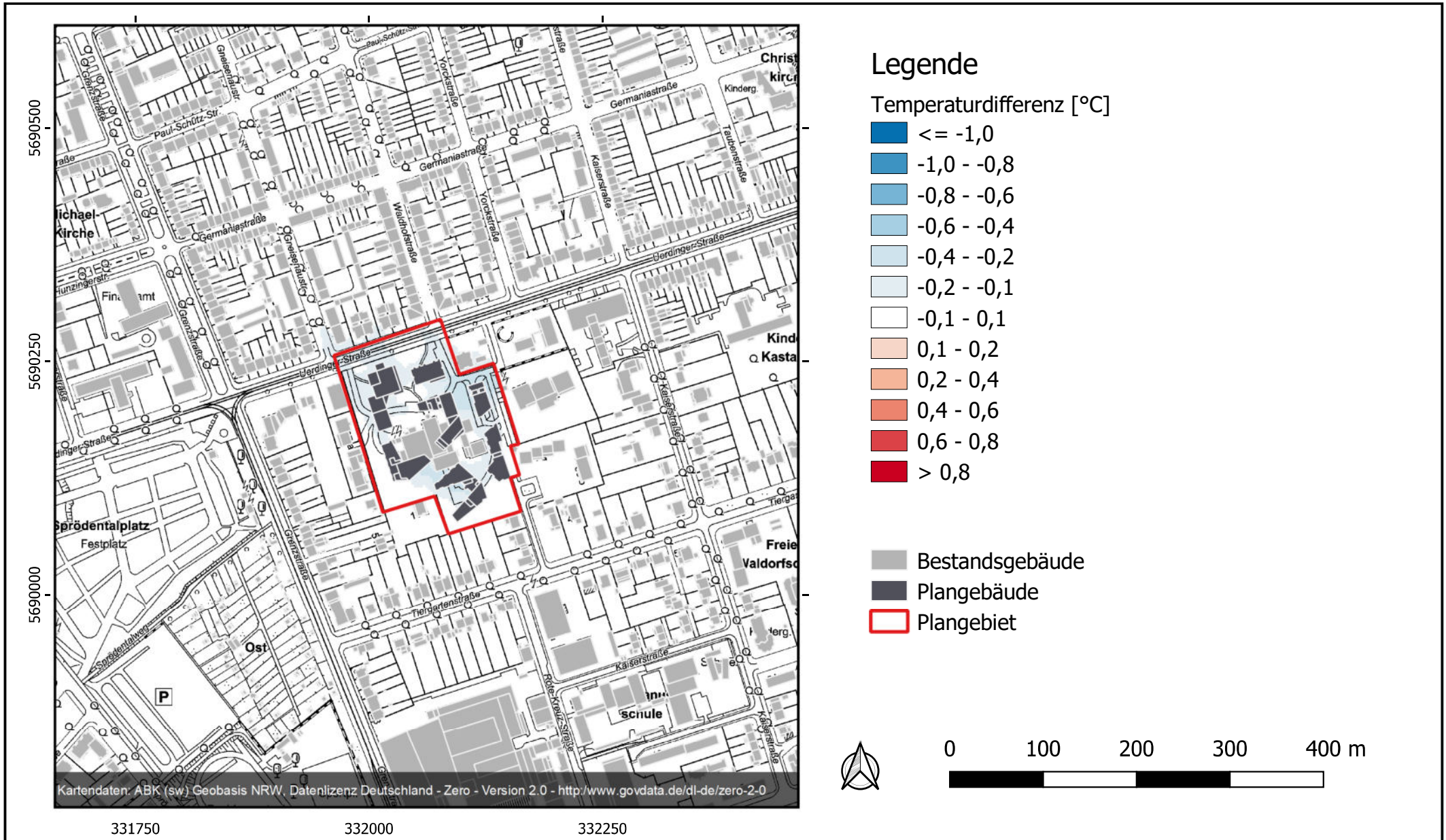


# Anlage 41: Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 4 Uhr - Planfall

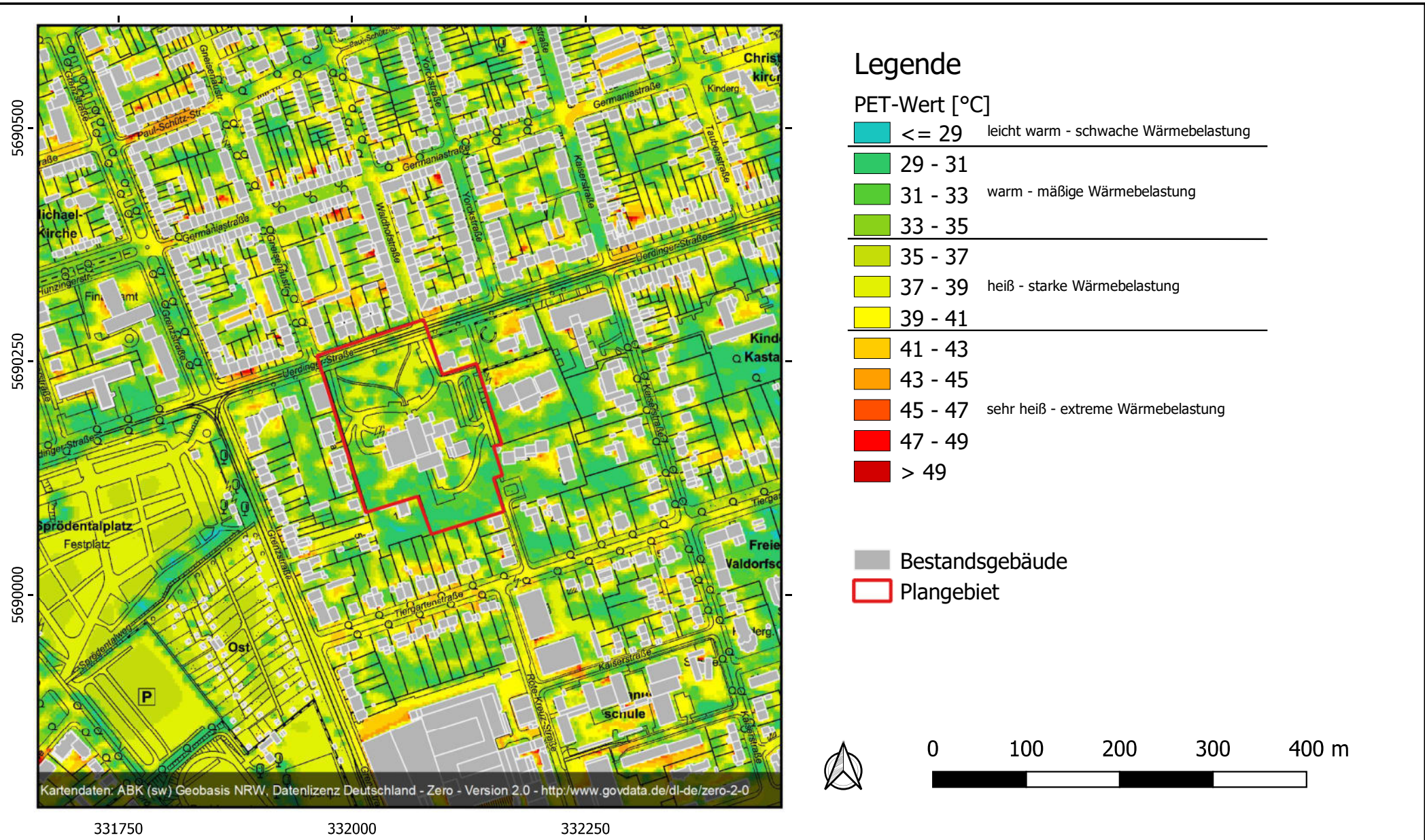




Anlage 42: Differenz der Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 4 Uhr - Planfall minus Istfall

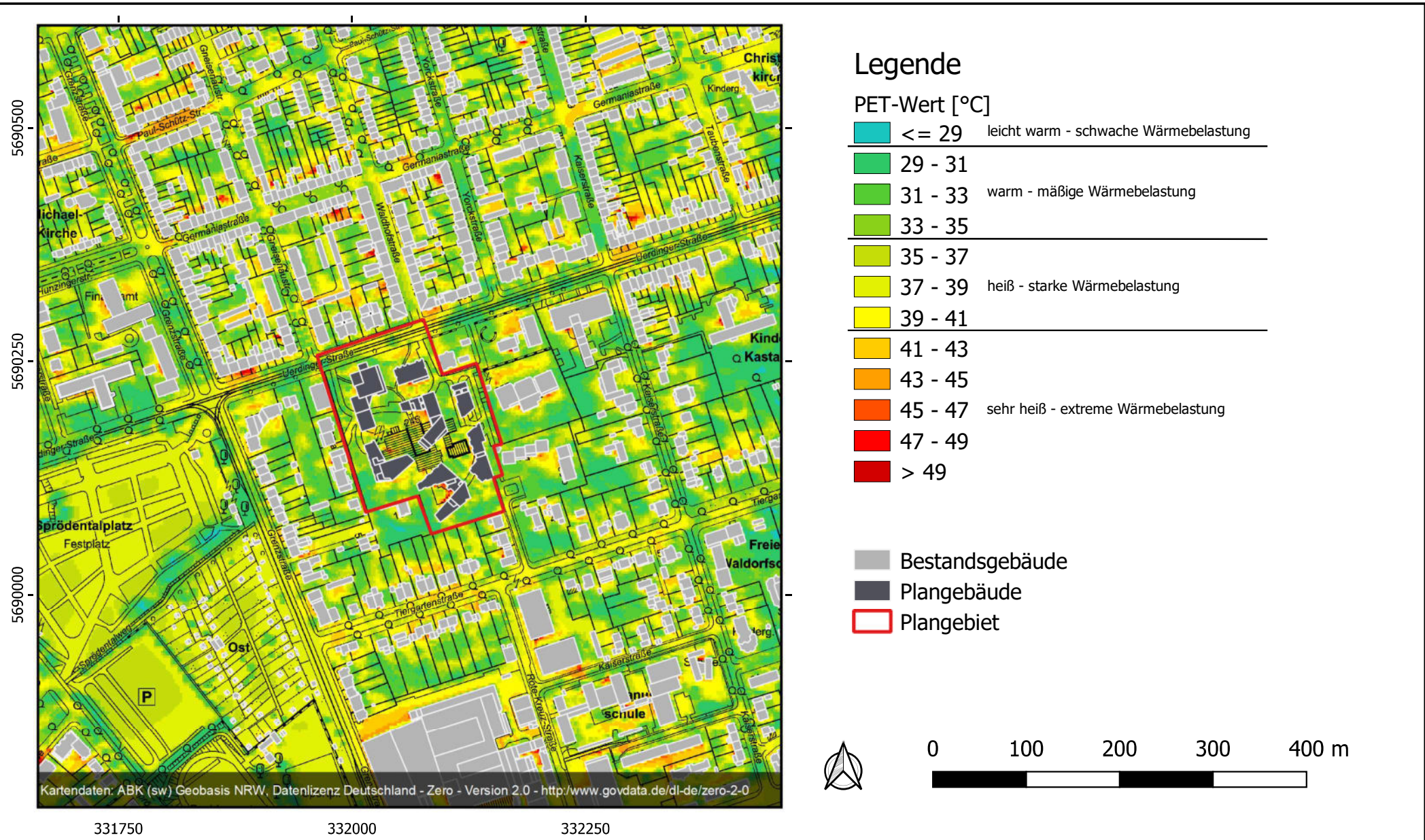






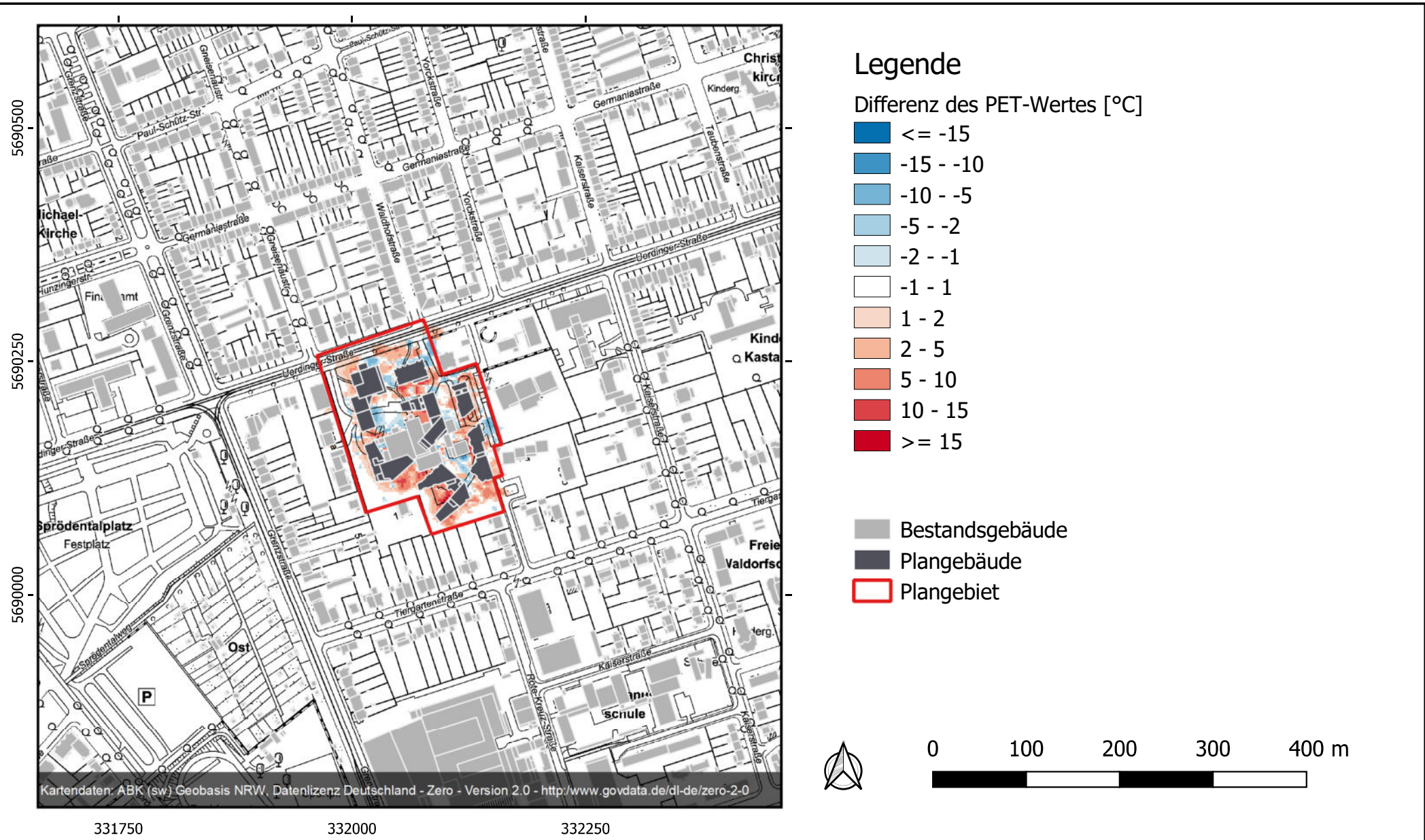


# Anlage 44: PET-Wert in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall





Anlage 45: Differenz des PET-Wertes in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - Planfall minus Istfall





# Anlage 46: Übersichtslageplan - optimierter Planfall



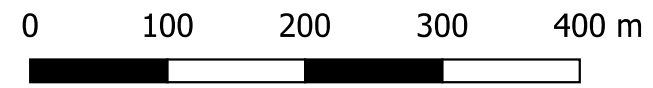
5690500  
5690250  
5690000

Kartendaten: DOP Geobasis NRW, Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 - <http://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>;  
Entwurf "Krefelder Höfe", Kraft.Raum

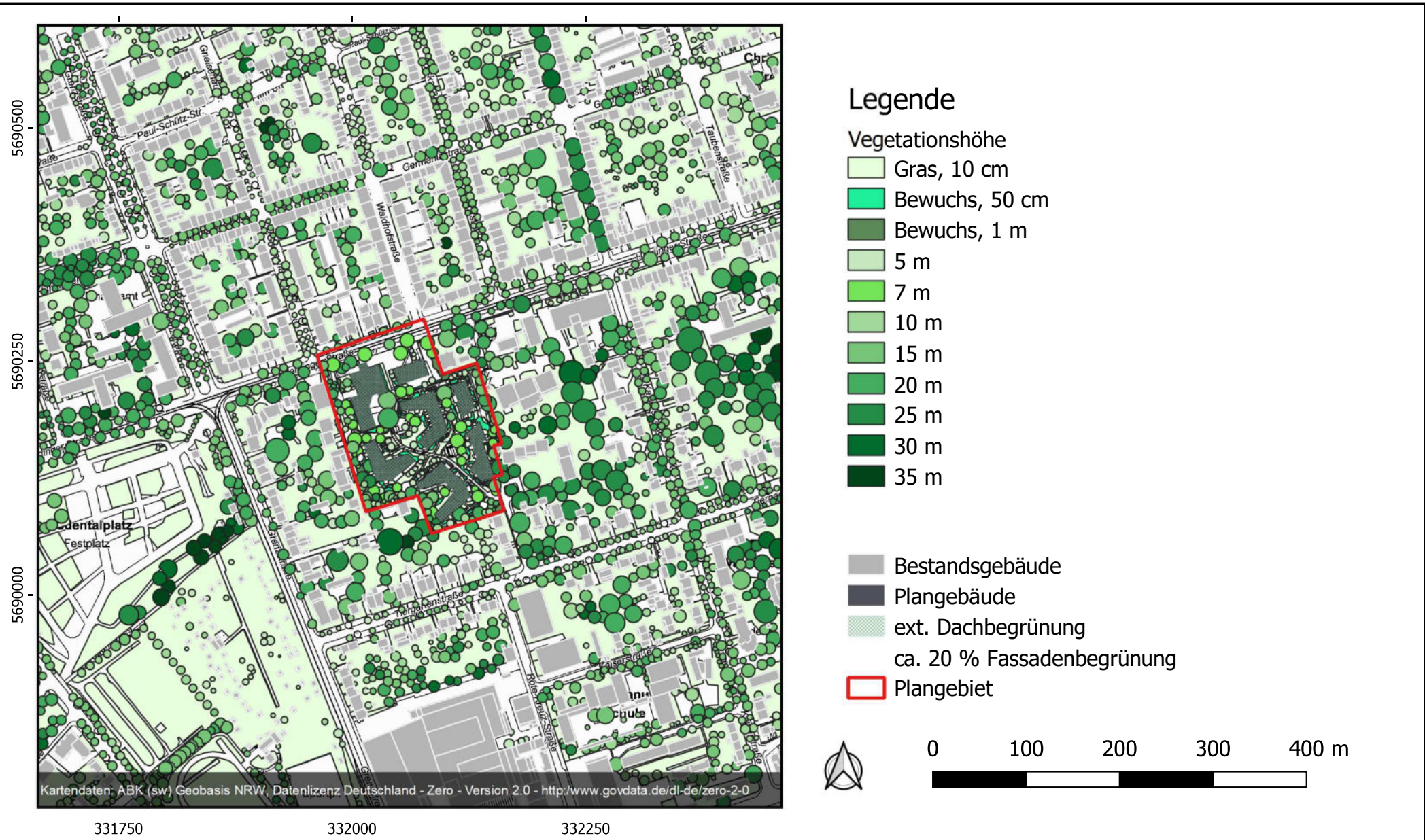
331750                      332000                      332250

## Legende

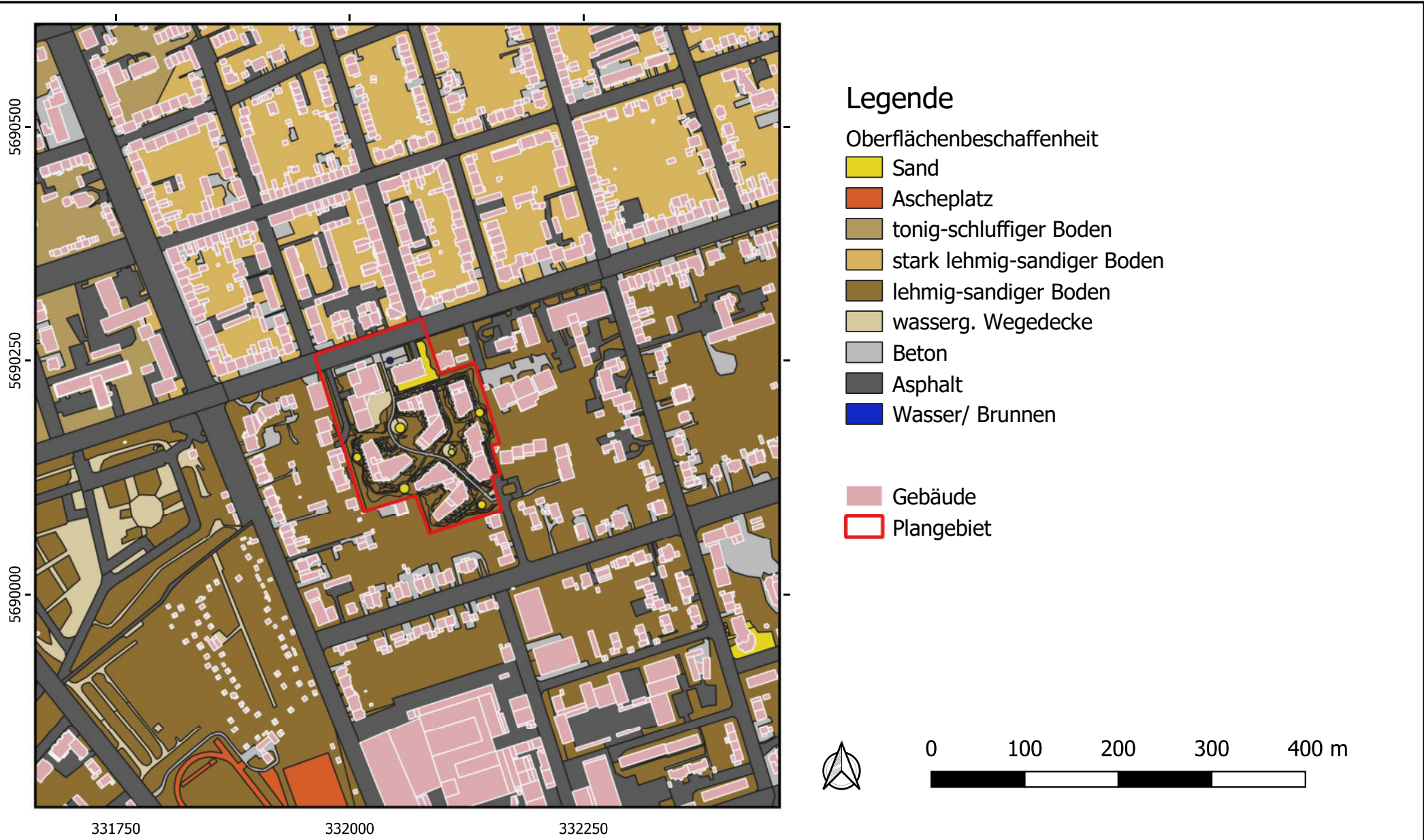
 Plangebiet



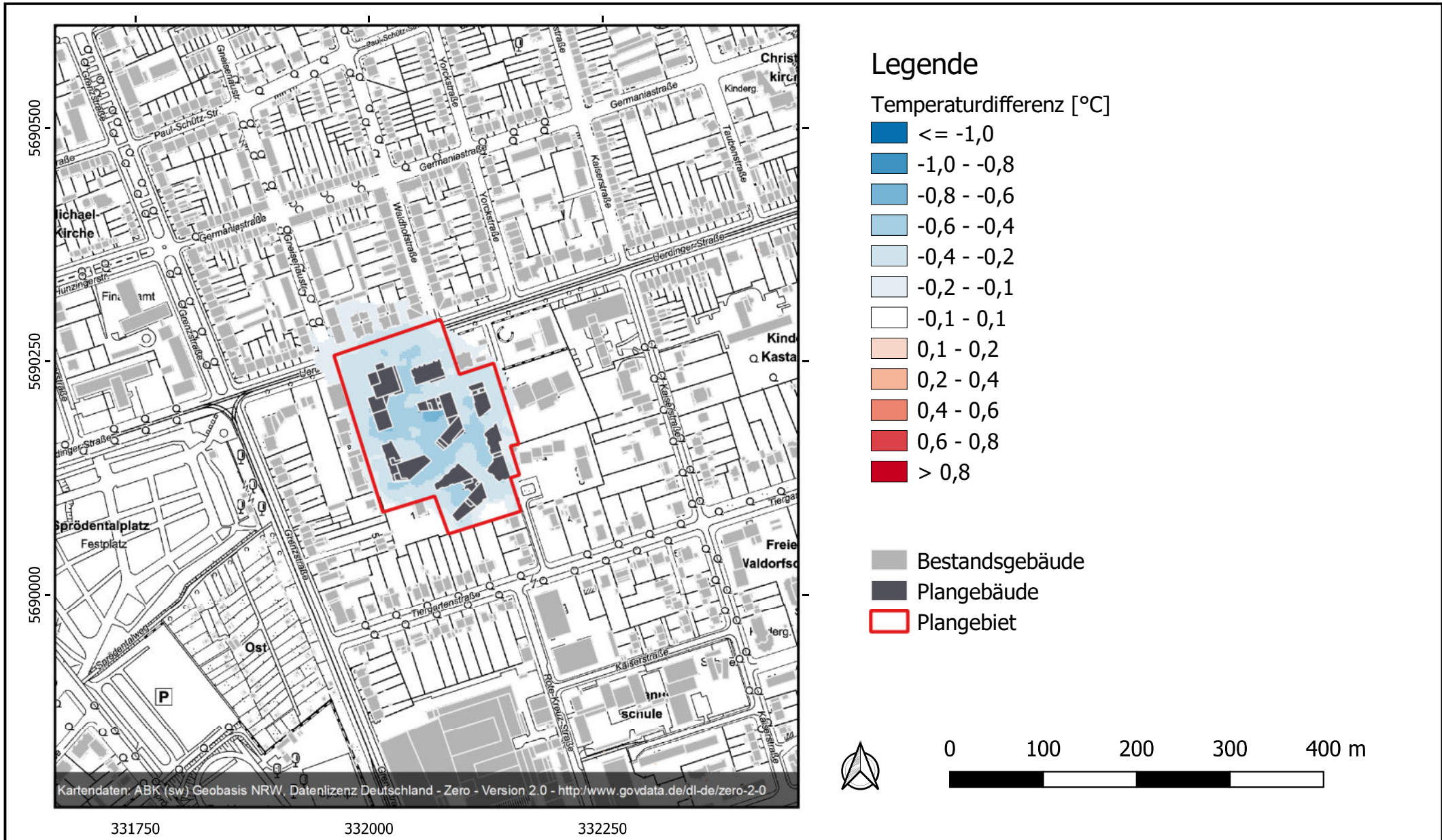






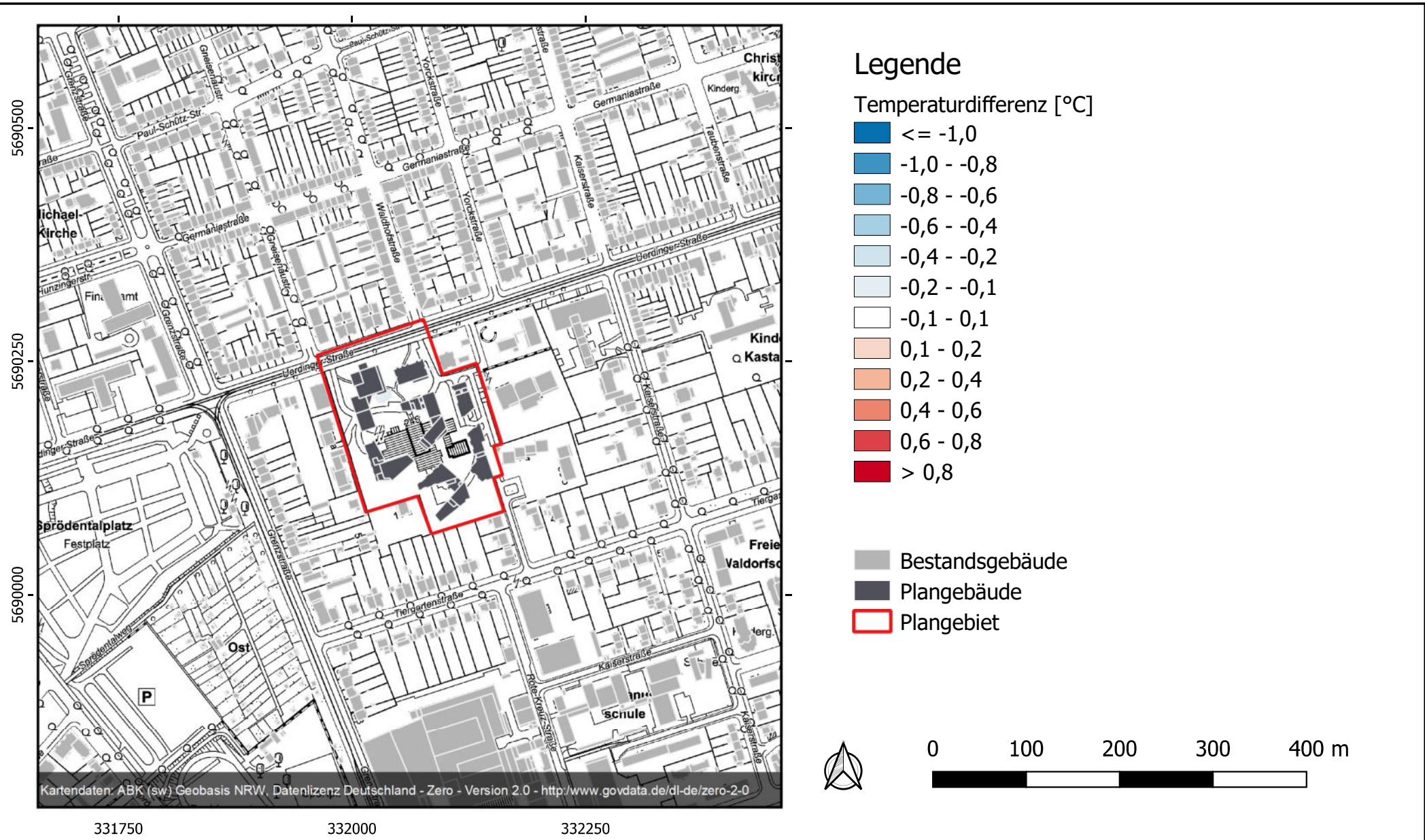


# Anlage 49: Differenz der Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 14 Uhr - optimierter Planfall minus Planfall



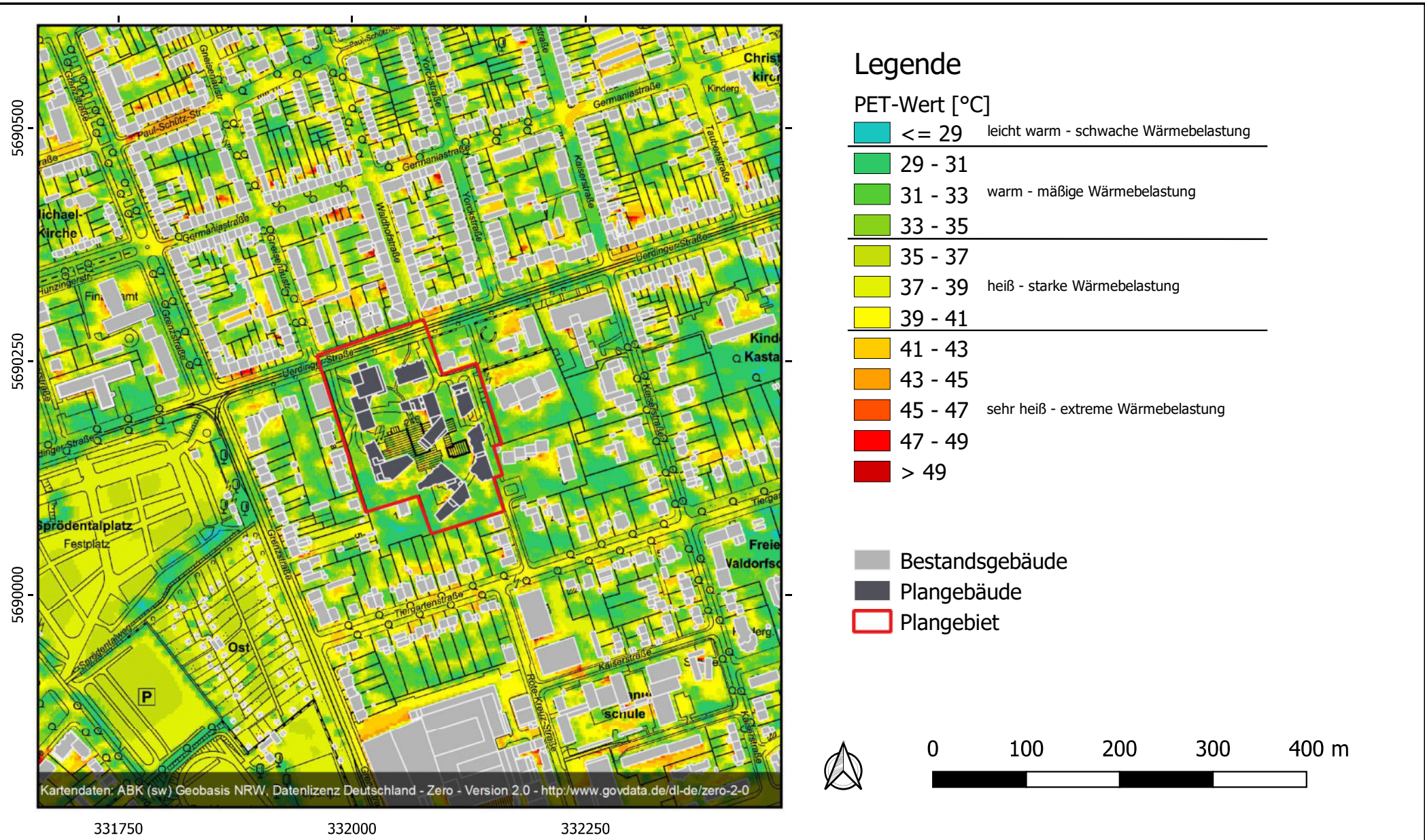


Anlage 50: Differenz der Lufttemperatur in 1,5 m Höhe um 4 Uhr - optimierter Planfall minus Planfall





# Anlage 51: PET-Wert in 1,5 m Höhe am Nachmittag - optimierter Planfall





Anlage 52: Differenz des PET-Wertes in 1,5 m Höhe am Nachmittag - optimierter Planfall minus Planfall

