

Klimagutachten

Bebauungsplan Nr. 263 (Maisfeld), Regensburg

April 2020

Auftraggeber (AG)

Immobilien Zentrum Regensburg GmbH
Thurmayerstraße 4
93049 Regensburg



Ansprechpartner

Frau Luise Rappel
Tel.: +49 941 60407 77
E-Mail: l.rappel@immobilienzentrum.de

Auftragnehmer (AN)

Burghardt und Partner, Ingenieure
Am Sonnenhang 4
34128 Kassel



BPI

Burghardt und Partner, Ingenieure

Ansprechpartner

Dr. René Burghardt
Tel.: +49 561 76678963
E-Mail: info@lp-kassel.de

Gestattungserklärung / Erklärung des Verfassers:

Hiermit überträgt der Auftragnehmer dem Auftraggeber die Nutzungsrechte hinsichtlich der vorliegenden Ausarbeitung

KLIMAGUTACHTEN - BEBAUUNGSPLAN NR. 263 (MAISFELD), REGENSBURG
uneingeschränkt, zur öffentlichen Verwendung.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Infofern nicht anders angegeben gilt für alle Abbildungen und Tabellen als Quelle:
Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI)

Unterschrift

Dr. René Burghardt

Stempel

BPI

Burghardt und Partner, Ingenieure
Am Sonnenhang 4, D - 34128 Kassel
fon: +49 561 76678963 | fax: +49 561 9698855
info@lp-kassel.de | www.lp-kassel.de

Kassel, den 27.04.2020

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	1
I.1 Auftragsgegenstand	1
I.2 Geografische Beschreibung des Untersuchungsraums	2
I.2.1 Naturraum	2
I.2.2 Geografische Lage	2
I.2.3 Flächennutzung	3
I.3 Klimatische Beschreibung Region Regensburg	5
I.3.1 Stadtklimatische Charakteristik	5
I.3.2 Temperatur, Sonne, Niederschlag Region Regensburg	5
I.4 Planungsgebiet	9
I.4.1 Gebietsbeschreibung IST- und PLANUNGS-Zustand	9
II. Fachliche Grundlagen	10
II.1 Stadtklima	10
II.2 Temperatur und die städtische Wärmeinsel	11
II.3 Vegetation und städtisches Grün	12
II.4 Wind und der städtische Luftstrom	14
II.5 Kaltluft	16
II.6 Solare Einstrahlung	18
III. Methodik	19
III.1 Solare Einstrahlung	19
III.2 Kaltluftproduktion und -abfluss	20
III.3 Windfeldberechnungen	20
IV. Software	20
IV.1 Softwareumgebung - GIS	20
IV.2 KLAM_21	22
IV.3 Airflow Analyst	23
V. Analyse der klimatischen Situation für den Bestandsfall	24
V.1 Solare Einstrahlung	24
V.2 Kaltlufthöhe & Kaltluftransport	29
V.3 Durchlüftung am Tag (3D-Windfeld)	31
VI. Analyse der klimatischen Situation für den Planungsfall	34
VI.1 Solare Einstrahlung	34
VI.2 Kaltlufthöhe & Kaltluftransport	39
VI.3 Durchlüftung am Tag (3D-Windfeld)	41

VII. Bewertung der Veränderung (Differenzen) der klimatischen Situation im Untersuchungsraum (zwischen Bestands- und Planungsfall).....	44
VII.1 <i>Solare Einstrahlung – Differenz Planung zu Bestand</i>	44
VII.2 <i>Kaltluftsimulation – Differenz Planung zu Bestand.....</i>	46
VII.3 <i>Durchlüftung am Tag – Differenz Planung zu Bestand</i>	48
VIII. Gesamtbeurteilung und Maßnahmenvorschläge.....	51
VIII.1 <i>Liste potentieller Pflanzen für Dachbegrünung.....</i>	52
VIII.2 <i>Räumlich verortete Maßnahmenvorschläge (die Zahlen beschreiben die Zuordnung in Abbildung 34)</i>	
	54
IX. Anlagen.....	56
IX.1 <i>Abkürzungsverzeichnis.....</i>	56
IX.2 <i>Glossar</i>	57
IX.3 <i>Abbildungsverzeichnis.....</i>	61
IX.4 <i>Tabellenverzeichnis</i>	62
IX.5 <i>Literaturverzeichnis.....</i>	63

I. Einleitung

Die voranschreitende globale Klimaerwärmung trifft lokal auf unterschiedliche geografische und siedlungsspezifische Gegebenheiten.

In städtischen Gebieten und in Bezug auf die menschliche Gesundheit ist die zunehmende Hitzebelastung einer der bedeutendsten Effekte des Klimawandels. Die zunehmende Anzahl von Sommertagen ($\geq 25^{\circ}\text{C}$) sowie die ebenfalls steigende Anzahl der Tropennächte ($\geq 20^{\circ}\text{C}$) zeigen bereits heute, in mittel großen Städten deutliche Auswirkungen. Durch Akkumulierung kommt es in der Folge zur verstärkten Ausprägung von städtischen Wärmeinseln, die wiederum zu einer verstärkten thermischen und bioklimatischen Belastung für den Menschen führen.

Neben neuen Maßnahmen (z.B. Gebäudebegrünung oder Schattenplätze) zur Reduzierung der Hitzebelastung und zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität, spielt außerdem die Vermeidung von Eingriffen, die die Problematik der Hitzebelastung unterstützen würden, eine wichtige Rolle. Kritisch für den städtischen Bereich ist insbesondere die Zerschneidung von Luftleit- und/oder Durchlüftungsbahnen durch bspw. bauliche Maßnahmen, die zu einer Verschlechterung der Belüftungssituation führen und so das Überwärmungsrisiko begünstigen. Auch können wichtige und sehr sensible Flurwindsysteme, welche den nächtlichen Transport von Kaltluft in die überwärmten städtischen Gebiete fördern, schon durch geringfügige Änderungen in der städtischen Bebauungsstruktur beeinträchtigt oder aufgelöst werden. Dementsprechend kommt der Berücksichtigung der potentiellen Belüftungsveränderung durch städtische Nachverdichtung ein hoher Stellwert zu.

Um in den urbanen Gebieten dieser fortschreitenden klimatischen Entwicklung stadtplanerisch nachhaltig zu begegnen tragen Stadtplanungsämter oder vergleichbare Institutionen die Verantwortung für eine stadtökologisch vorradschauende Entwicklung. In Abhängigkeit der Planungsebene (siehe Abbildung 1) sind unterschiedliche klimatische Fragestellungen von Relevanz. Dennoch besteht zwischen dem Mesoklima bis zum Mikroklima eine sich gegenseitig bedingenden Wechselwirkung, die bei städtebaulichen und landschaftsplanerischen Planungen berücksichtigt werden müssen.

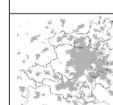
administrativer Bezug	Planungsebene	klimatische Einordnung	klimatische Fragestellung	Auflösung
 Region	Regionalplan > M 1: 100.000	Mesoklima	regionale Luftaustauschprozesse und Klimafunktionen	Rastergröße 100 m
 Stadt	Flächennutzungsplan > M 1: 10.000	Mesoklima	Wärmeinseleffekt, Belüftungsstrukturen (Rauhigkeiten)	Rastergröße 25 - 50 m
 Ortsteil	Bebauungsplan M 1: 5.000	Lokalklima	Übergang von Klimatop- zu Mikroklimaanalyse	Rastergröße 10 m
 Block	Bebauungsplan M 1: 1.000	Mikroklima	Mikroklimatische Untersuchungen, thermischer Komfort	Rastergröße 2 - 5 m
 Gebäude	Bauplan/ Objekt M 1: 200	Mikroklima/ Gebäudeklima	Strahlungs- und Gebäudeumströmungen	Rastergröße > 0 - 2 m

Abbildung 1: Unterschiedliche Planungsebenen mit entsprechender klimatischer Einordnung (Burghardt und Campe 2015)



I.1 Auftragsgegenstand

Für das Gebiet östlich der Galgenbergstraße, zwischen Otto-Hahn-Straße und Johann-Hösl-Straße, soll der Bebauungsplan Nr. 263, Südlich der Otto-Hahn-Straße, aufgestellt werden. Der räumliche Geltungsbereich des Bebauungsplans ergibt sich aus dem städtebaulichen Konzept/Bebauungsplan-Vorentwurf vom 23.05.2018. In diesem Bebauungsplan soll entsprechend den Darstellungen im Flächennutzungsplan ein Wohngebiet ausgewiesen werden.

Die Fläche des Auftragsgegenstandes liegt im Stadtbezirk 12, (Galgenberg) und ist ca. 400 m von der im Süden verlaufenden BAB 3 entfernt. Gleichzeitig grenzt die BAB 3 die städtische Bebauung vom locker besiedelten Umland ab.

Es ist zu prüfen in wie weit mesoklimatische (stadtklimatische) aber auch mikroklimatische (kleinklimatische) Veränderungen durch die geplante Bebauung zu erwarten sind.

Im Rahmen des anstehenden Bebauungsverfahrens des B-Plan Nr. 263 wird eine Grundfläche von ca. 3,6 ha beplant.

Die Fläche wird unter klimaökologischen Aspekten untersucht, modelliert und bewertet. Besondere Aufmerksamkeit kommt dabei der Einflussnahme auf die nächtliche Kaltluftproduktion und –Entstehung sowie der Durchlüftung und Frischluftzufuhr zu.

Durch die Lage der Fläche im Übergangsgebiet zwischen städtebaulichen Innenbereich und städtebaulichen Außenbereich ist ebenso die Untersuchung des nächtlichen Flurwindpotentials für die klimatische Bewertung zielführend.

I.2 Geografische Beschreibung des Untersuchungsraums

I.2.1 Naturraum

Die Stadt Regensburg liegt insgesamt am geographisch nördlichsten Punkt des Donaulaufes (südlich des Stadtteils Niederwinzer), am Zusammenfluss von Naab und Regen mit der Donau. Die Einmündung der Naab befindet sich heute etwa 5 km westlich des Stadtzentrums, während der Fluss bis 1304 noch im Bereich der heutigen Regenmündung in den Regen floss. Altmühl und Weiße Laber münden etwa 20 bzw. 10 km westlich der Stadt in die Donau. Im Nordwesten reichen die Hänge der Fränkischen Alb, im Nordosten die Höhenzüge des Bayerischen Waldes bis an das Ufer der Donau. Im Süden schließen die Niederbayerische Ebene und die Hallertau an“ (Stadt Regensburg Abteilung Statistik, 2019).

Das Stadtgebiet befindet in der biogeographischen Region „kontinental“. Im näheren Umfeld des Stadtgebiets treffen drei Großlandschaften mit ihren unterschiedlichen naturräumlichen Untereinheiten aufeinander. Das Stadtgebiet selbst liegt innerhalb der Großlandschaft „Alpenvorland“ D65 Unterbayerisches Hügelland und Isar-Inn-Schotterplatten. Der nördliche Bereich dieses Gebiets zählt zur Untereinheit „Dungau - Donauauen“, welche sich Richtung Osten fortsetzen. Der Südliche Bereich gehört dem „Donau-Isar-Hügelland“ an. Hier liegt auch das Planungsgebiet. Im Bereich der Ortschaft „Burgweinting“ befinden sich Bereiche der „Dungau - Gäulandschaften im Dungau“. Umlaufend von Norden über Westen Richtung Süden um das Stadtgebiet liegt die Großlandschaft „Südwestliches Mittelgebirge / Stufenland“, D61 Fränkische Alb. Innerhalb dieses Gebiets befinden sich die Untereinheiten „Mittlere Frankenalb - Hochfläche der Mittleren Frankenalb“, „Mittlere Frankenalb – Regental“, „Mittlere Frankenalb – Naabtal“, „Südliche Frankenalb – Hochfläche der Südlichen Frankenalb“ und „Fränkische Alb – Südliche Frankenalb“. Nordöstlich der Stadt Regensburg befindet sich die Großlandschaft „Östliche Mittelgebirge“ D63 Oberpfälzer und Bayerischer Wald mit der Untereinheit „Falkensteiner Vorwald – Hügelland des Falkensteiner Vorwaldes“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018).

I.2.2 Geografische Lage

Die Stadt Regensburg befindet sich geografisch südlich in Deutschland, Mitte östlich im Bundesland Bayern auf einer Höhe von etwa 337 m ü. NHN im Regierungsbezirk Oberpfalz. Das Stadtgebiet hat eine Gesamtfläche von 8.070 ha (siehe auch Kap. I.2.3 Flächennutzung), die Länge der Stadtgrenze beträgt 62,88 km. Die größte Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 12,18 km, die größte Ost-West-Ausdehnung 12,07 km.

Die Stadt gliedert sich in 18 Stadtbezirke:

- Innenstadt
- Stadtamhof
- Steinweg-Pfaffenstein
- Sallern-Gallingkofen
- Konradsiedlung-Wutzlhofen
- Brandlberg-Keilberg
- Reinhäusen
- Weichs
- Schwabelweis

- Ostenviertel
- Kasernenviertel
- Galgenberg
- Kumpfmühl - Ziegetsdorf - Neuprüll
- Großprüfening-Dechbetten-Königswiesen
- Westenviertel
- Ober-/Niederwinzer-Kager
- Oberisling-Leoprechting-Graß
- Burgweinting-Harting

(Stadt Regensburg Abteilung Statistik, 2019)

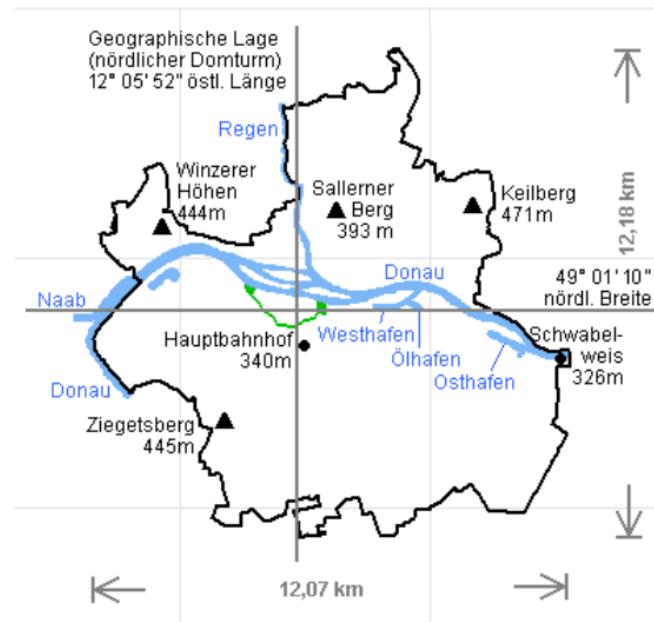


Abbildung 2 Schematische Übersicht geografische Lage
Stadt Würzburg (Quelle: Amt für Stadtentwicklung, Abt. Statistik)

Die Stadt Regensburg liegt inmitten des Landkreis Regensburg. Die an sie direkt angrenzenden Gemeinden sind (von Norden im Uhrzeigersinn) Zeitlarn, Wenzenbach, Tegernheim, Barbing, Neutraubling, Obertraubling, Pentling, Sinzing, Pettendorf, Lappersdorf

Das zu untersuchende Planungsgebiet befindet sich im innerstädtischen Bereich, südlich am Stadtrand im Stadtbezirk „Galgenberg“. Es ist umgeben von Flächen, welche den Industriegebieten zugeordnet werden können. Siehe auch Kap. I.2.3 Flächennutzung.

I.2.3 Flächennutzung

Das Stadtgebiet ist insgesamt durch eine dichte Bebauung geprägt. Insbesondere im Osten (nördlich und südlich der Donau) und Süden der Stadt sind Industrieflächen und Flächen mit gemischter Nutzung großflächig vorzufinden. Der Innenstadtkern kann den urbanen Strukturen zugeordnet werden, welcher von einem „Grüngürtel“ mit unterschiedlichen Parkanlagen eingegrenzt wird. Insgesamt kann das Stadtgebiet Regensburg als durchwachsen bezeichnet werden. Die Siedlungsflächen werden meist durch Grün- und Industrieflächen unterbrochen. Nur der nördliche Bereich der Stadt, nördlich der Donau und eine größere städtische Fläche im Südwesten, südlich der Donau können als homogene Siedlungsflächen bezeichnet werden. Im nördlichen Bereich durchfließt die Donau mit dem aus Norden kommenden Gewässer Regen als größte Gewässerfläche von Westen nach Osten Regensburg. Südlich der Donau befindet sich eine Bahnstrecke, welche in Ost-West-Richtung verläuft. In der weiteren Umgebung der Stadt befinden sich mehrere Ortschaften, Waldgebiete und landwirtschaftlich genutzte Flächen.

Die Fläche des Planungsraums selbst wird im Ist-Zustand den landwirtschaftlich genutzten Flächen (Ackerfläche) zugeordnet werden. In der näheren Umgebung befinden sich im Süden gelegen zumeist Industrieflächen. Weiterhin finden sich Umfeld des Planungsraums Wohnbebauung, Grünflächen, sowie Kleingärten und Sport- und Freizeitflächen. Südlich des Planungsraums befindet sich die BAB 3, welche den Übergang vom städtischen zum ländlichen Gebiet markiert.

I.3 Klimatische Beschreibung Region Regensburg

I.3.1 Stadtklimatische Charakteristik

In der weltweiten Klassifizierung der Klimate nach Wladimir Köppen (1846-1940) gehört Deutschland zum feuchttemperierten, warm gemäßigten Regenklima. Seine Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sind hierfür ausschlaggebend. Laut Köppen liegt das Stadtgebiet Regensburg im Bereich des Cfb-Klimas (Ozeanklima) auch als „Buchenklima“ bezeichnet.

In Regensburg ist das Klima also gemäßigt warm. Der Niederschlag in Regensburg ist hoch, auch während des trockensten Monats.

I.3.2 Temperatur, Sonne, Niederschlag Region Regensburg

In der nachfolgenden Tabelle 1 des DWD können die Mittel- und Extremwerte in °C sowie die Jährliche Anzahl der Sommertage, heißen Tage, Frosttage und Eistage im Stadtgebiet Regensburg abgelesen werden.

Allgemein ist zu erkennen, dass die Temperaturmaxima (Sommer- und heiße Tage) vermehrt in der jüngsten Vergangenheit stattfanden wohingegen die Temperaturminima häufiger in der älteren Vergangenheit (Frosttage und Eistage) liegen. Auch die Extremwerte liegen bei hohen Temperaturen in der jüngeren Vergangenheit wohingegen die der niedrigen Temperaturen in der älteren Vergangenheit aufgezeichnet werden konnten.

Tabelle 1 Lufttemperatur in Regensburg, 01.01.1947 - 02.09.2019

Mittel- und Extremwerte	extrem kalt		normal	extrem warm	
	Minimum	Datum	Mittel	Maximum	Datum
Jahresmittel (°C)	6,6	1956	8,9	10,8	2018
absolut niedrigstes und höchstes Monatsmittel (°C)	-10,9	Feb 1956	-	22,9	Aug 2003
absolute Minima und Maxima (°C)	-25,8	10. Feb 1956*	-	39,0	27. Jul 1983
Jährliche Anzahl	Minimum	Datum	Mittel	Maximum	Datum
Sommertage (Tmax ≥ 25 °C)	21	1965	52,5	105	2018
Heiße Tage (Tmax ≥ 30 °C)	0	1978*	11,6	41	2018*
Jährliche Anzahl	Maximum	Datum	Mittel	Minimum	Datum
Frosttage (Tmin < 0 °C)	130	1996	96,1	60	1974
Eistage (Tmax < 0 °C)	77	1963	28,9	4	2014

Hinweis: Alle Mittel beziehen sich auf den Zeitraum 01.01.1981 bis 31.12.2010 und alle Extrema auf den Zeitraum 01.01.1947 bis 02.09.2019. Ist ein Minimum oder Maximum mehrfach aufgetreten, wird nur das Datum für das letztmalige Auftreten genannt und mit * gekennzeichnet.

Abbildung 3 des DWD zeigt auf, dass die Monate Juni bis August im Mittel die wärmsten in Regensburg sind. Im Vergleich zum Jahresmittel der einzelnen Monate von 1981 bis 2010 waren alle Monate (September 2018 bis August 2019), bis auf den Mai wärmer als der genannte Durchschnitt.

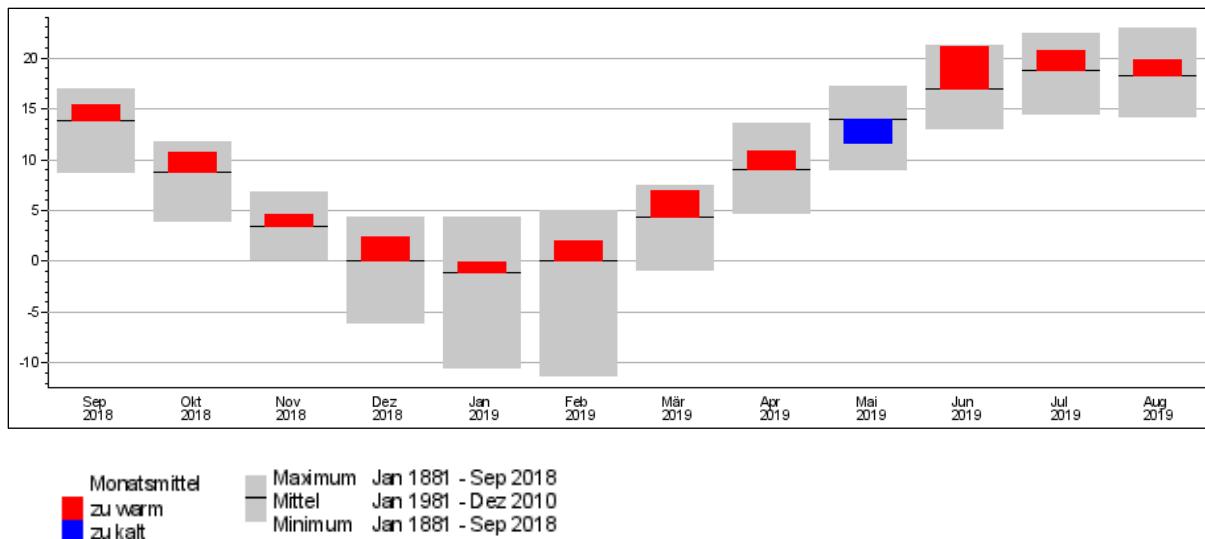


Abbildung 3 Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur in Regensburg in °C

Tabelle 2 des DWD zeigt die Niederschlagshöhen in Regensburg mit seinen Mittel- und Extremwerten auf. Die mittlere Niederschlagshöhe im Zeitraum 01.01.1981 bis 31.12.2010 beträgt 657 mm. In diesem Zeitraum konnte das Jahr 2002 als ein extrem nasses Jahr identifiziert werden wohingegen das Jahr 1953 ein extrem trockenes Jahr war. Auf den Monat betrachtet konnte der November 2011 als der Monat mit den absolut geringsten Niederschlagsmengen identifiziert werden, der Monat Juli 1954 als einer mit den höchsten Niederschlagsmengen im Aufzeichnungszeitraum 1947 bis 2019.

Tabelle 2 Niederschlagshöhen in Regensburg, 01.01.1947 - 02.09.2019

Mittel- und Extremwerte	extrem trocken		normal	extrem nass	
	Minimum	Datum	Mittel	Maximum	Datum
Jahressummen (mm)	375,0	1953	657,0	949,6	2002
absolut niedrigste und höchste Monatssumme (mm)	1,1	Nov 2011	-	234,8	Jul 1954
absolut niedrigste und höchste Tagssumme (mm)	0,0	-	-	70,1	08. Jul 1954

Hinweis: Alle Mittel beziehen sich auf den Zeitraum 01.01.1981 bis 31.12.2010 und alle Extrema auf den Zeitraum 01.01.1947 bis 02.09.2019. Ist ein Minimum oder Maximum mehrfach aufgetreten, wird nur das Datum für das letztmalige Auftreten genannt und mit * gekennzeichnet. Für die niedrigste Tagessumme (0,0 mm) wird kein Datum angegeben, da niederschlagsfreie Tagen relativ häufig vorkommen.

Betrachtet man Abbildung 4 des DWD konnten die Monate Dezember 2018 und Juni und August 2019 als die Monate mit den höchsten Niederschlagsmengen der vergangenen Monate September 2018 bis August 2019 identifiziert werden. Der Juli war im Vergleich zum Monatsmittel (Januar 1981 bis Dezember 2010) eher trocken. Der genannte Dezember war im Vergleich zum Monatsmittel sehr nass. Vergleicht man diese Werte mit denen der Lufttemperaturen aus Abbildung 3 zeigt sich, dass trotz relativ hoher Lufttemperaturen im Juni und August 2019 in diesen Monaten ein recht hoher Niederschlag erfasst wurde.

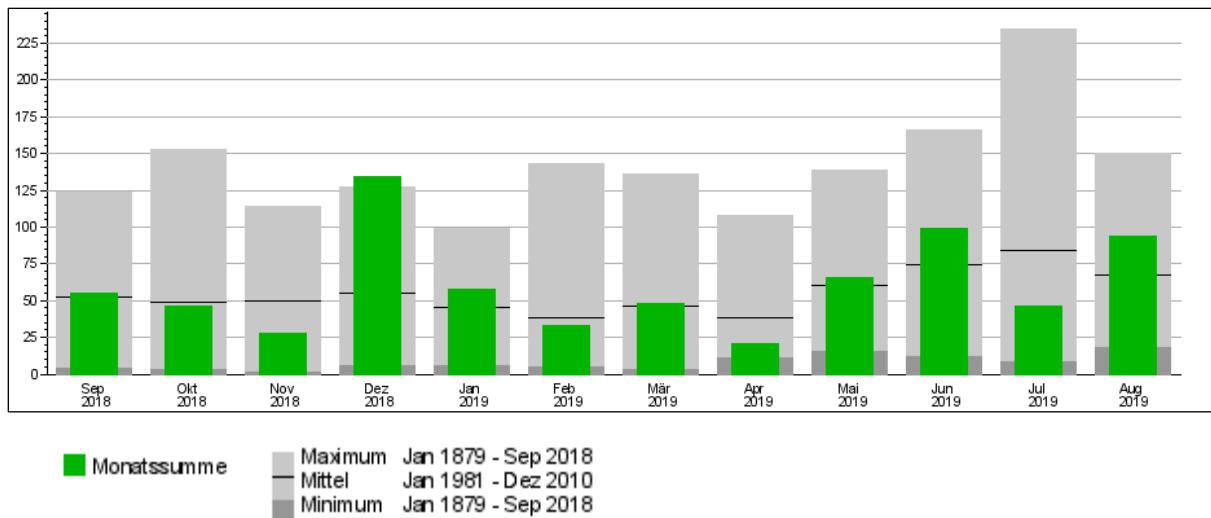


Abbildung 4 Monatliche Niederschlagshöhen in mm in Regensburg

Tabelle 3 des DWD zeigt die Sonnenscheindauer in Regensburg mit seinen Mittel- und Extremwerten auf. Die mittlere Sonnenscheindauer im Zeitraum 01.01.1981 bis 31.12.2010 beträgt 1655 Std im Jahr. In diesem Zeitraum konnte das Jahr 2003 als das Jahr mit der höchsten Sonnenscheindauer identifiziert werden wohingegen das Jahr 2013 ein Jahr mit extrem wenigen Sonnenstunden war. Auf den Monat betrachtet konnte der November 1958 als der Monat mit den absolut wenigsten Sonnenstunden identifiziert werden, der Monat Juli 2006 als einer mit den meisten Sonnenstunden im Aufzeichnungszeitraum 1947 bis 2019.

Tabelle 3 Sonnenscheindauer in Regensburg, 01.12.1947 - 02.09.2019

Mittel- und Extremwerte	extrem sonnenscheinarm		normal	extrem sonnenscheinreich	
	Minimum	Datum	Mittel	Maximum	Datum
Jahressummen (Stunden)	1451,4	2013	1655,0	2091,8	2003
absolut niedrigste und höchste Monatssumme (Stunden)	9,2	Nov 1958	-	335,2	Jul 2006

Hinweis: Alle Mittel beziehen sich auf den Zeitraum 01.01.1981 bis 31.12.2010 und alle Extrema auf den Zeitraum 01.01.1947 bis 02.09.2019. Ist ein Minimum oder Maximum mehrfach aufgetreten, wird nur das Datum für das letztmalige Auftreten genannt und mit * gekennzeichnet. Die absolut niedrigste Tagessumme der Sonnenscheindauer beträgt 0 Stunden. Die absolut höchste Tagessumme des Sonnenscheindauer erreicht an allen Stationen des DWD etwa die maximale astronomische Sonnenscheindauer: in Süddeutschland ca. 16 Stunden und in Norddeutschland ca. 17 Stunden.

Betrachtet man Abbildung 5 des DWD konnten die Monate April sowie Juni bis August 2019 als die Monate mit den meisten Sonnenstunden der vergangenen Monate September 2018 bis August 2019 identifiziert werden. Die Monate September und Oktober 2018 sowie Februar und April 2019 und insbesondere der Juni 2019 waren im Vergleich zum Monatsmittel (Januar 1981 bis Dezember 2010) sehr sonnenscheinreich. Im Mai 2019 schien die Sonne ungewöhnlich wenig und kann daher als eher sonnenscheinarm bezeichnet werden. Die Monate November und, leicht erhöht, der Dezember 2019 sowie Januar 2019 waren dem Trend folgend eher sonnenscheinarm. Vergleicht man diese Werte mit denen der Lufttemperaturen aus Abbildung 3 spiegelt sich die Sonnenscheindauer auch in den Lufttemperaturen wider. Gut erkennbar ist

dies in den Monaten Mai 2019 mit im Mittelwert eher niedrigen Temperaturen und, wie bereits erwähnt, wenigen Sonnenstunden und dem Monat Juni 2019 mit im Mittelwert eher hohen Temperaturen und einer hohen Anzahl an Sonnenstunden.

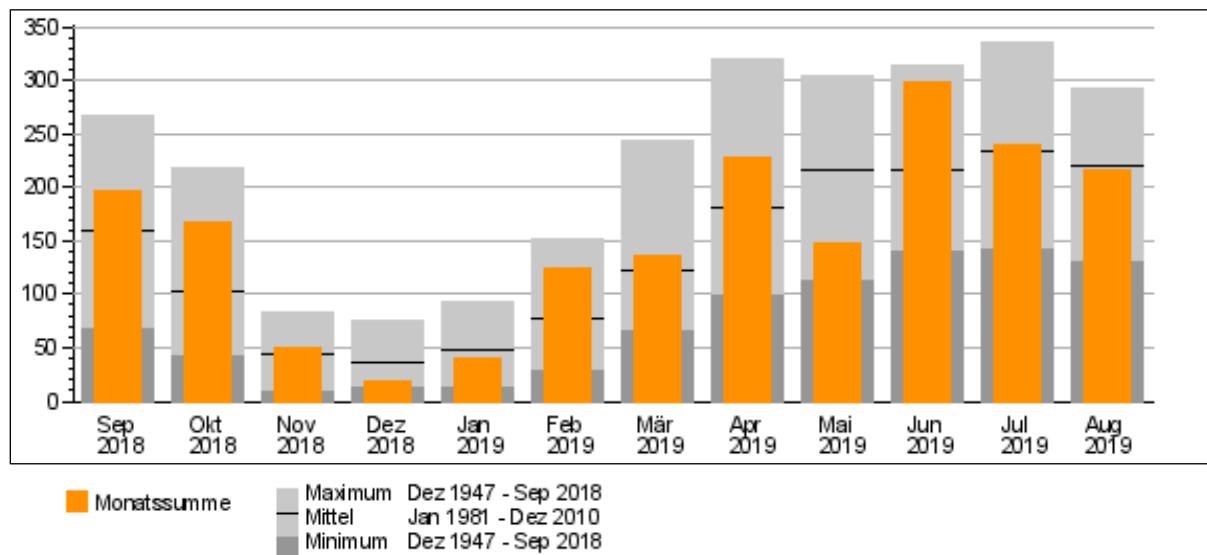


Abbildung 5 Monatliche Sonnenscheindauer in Stunden in Regensburg

1.4 Planungsgebiet

1.4.1 Gebietsbeschreibung IST- und PLANUNGS-Zustand

Im Rahmen des hier untersuchten Planungsvorhabens findet die Transformation einer landwirtschaftlich genutzten Fläche hin zu einer bebauten Siedlungsfläche mit hohem Grünanteil statt. Der Planungsraum umfasst eine Flächengröße von ca. 4 ha. Innerhalb dieser Fläche werden 6 Baufelder definiert. Das Baufeld 1 liegt parallel zu Galgenbergstraße und stellt den westlichen Abschluss der Fläche dar. Das Baufeld 2 liegt orthogonal zur Gelgenbergstraße an der geplanten Erweiterung der Humboldtstraße. Die Baufelder 3, 4 & 5 stellen Kernbebauungsstruktur im mittleren und nördlichen Bereich des Planungsraum dar. Auf den Freiflächen zwischen den Baufelder 1 & 4 ist ein Kinderspielplatz geplant. Abschließend befindet sich im Süden, südlich der Humboldtstraße das Baufeld 6 auf dessen Fläche ein Jugendspielplatz geplant ist.

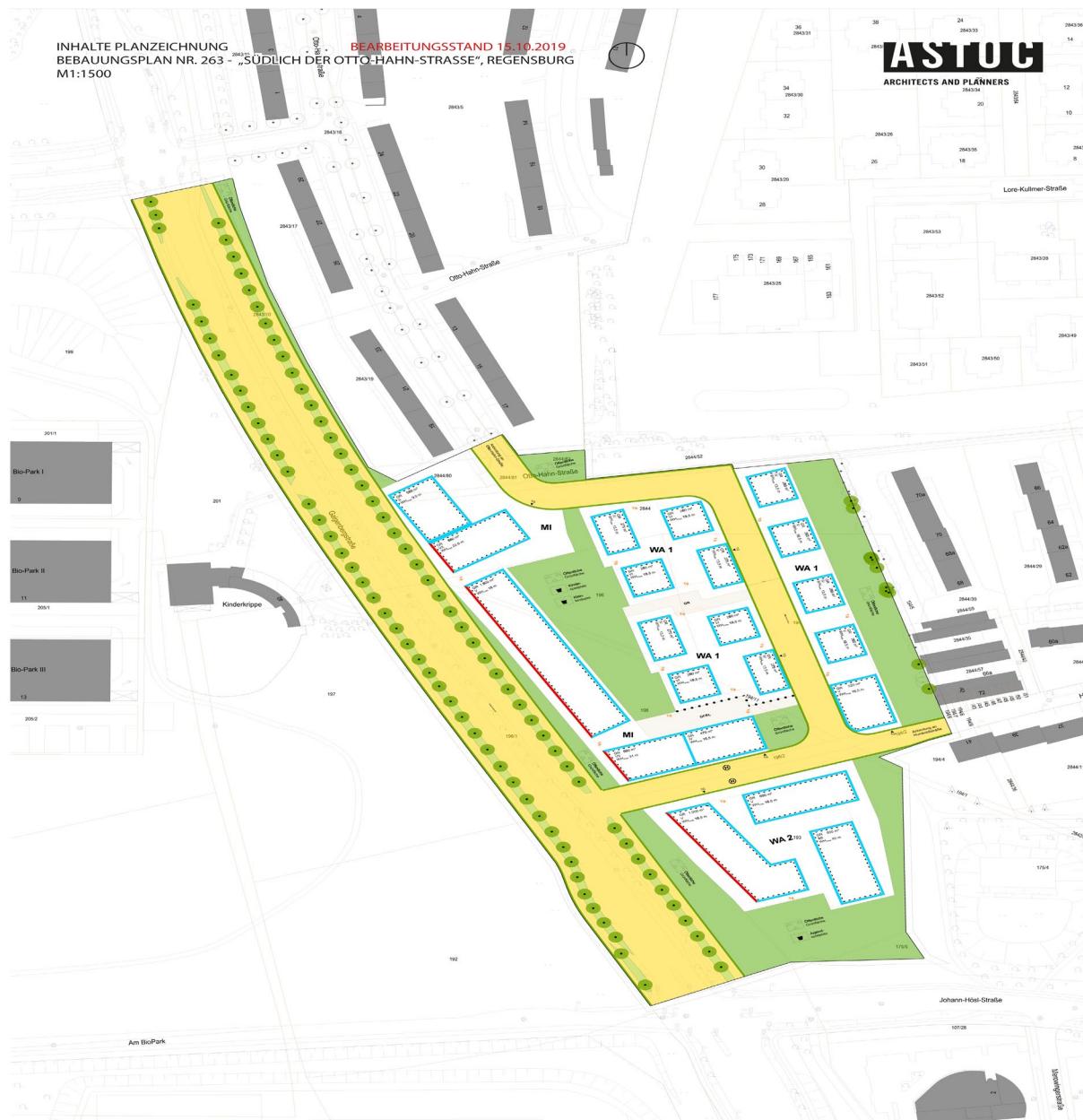


Abbildung 6 Entwurf Planungsstand 15.10.2019 (ASTOC, 2019)

II. Fachliche Grundlagen

II.1 Stadtklima

Der städtische Siedlungsraum verursacht im Vergleich zu seiner nicht bebauten Umgebung mikro- und mesoklimatische Veränderungen, die allgemein unter dem Begriff Stadtklima zusammengefasst werden. Es handelt sich hierbei um eine anthropogene Klimamodifikation, die durch die Wechselwirkung mit der Bebauung sowie durch Abwärme und Luftbeimengungen hervorgerufen wird (Hupfer und Kuttler 1998).

Einige dieser Klimaelemente unterscheiden sich stadtteilbezogen nur wenig (z.B. Sonneneinstrahlung, Niederschlag), während andere, bspw. bedingt durch das Wärmespeichervermögen von Baustoffen, der Versiegelung des Bodens sowie durch anthropogene Abwärme, zum Teil recht große räumliche Unterschiede aufweisen (z.B. in Temperatur und Windverhältnisse). Kleinräumliche Unterschiede sind im Bereich von Gebäuden, Straßenzügen und Grünanlagen zu finden (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Beispiele für typische Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkung (rechte Spalte) im städtischen Raum

Parameter Ursache	Wirkung Risiko
Beeinflussung durch Oberflächengeometrie, die aerodynamische Rauigkeit sowie durch den Wärmeinseleffekt	Windfeldveränderung, Turbulenzen
Oberflächenversiegelung, geringer Grünflächenanteil	reduzierte Verdunstung
Oberflächenversiegelung	reduzierte Retentionsfähigkeit (kumulativ)
reduzierte Retentionsfähigkeit	Gefahr von Überschwemmungen
Reduzierte Verdunstung & erhöhte Wärmespeicherung durch Bebauung	Temperaturerhöhung
Temperaturerhöhung	Vorhandensein wärmeliebender Pflanzenarten
Temperaturerhöhung	Hitzestress, thermische Belastung
Temperaturerhöhung	Anstieg der hitzebezogenen Vulnerabilität unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen
..	..

II.2 Temperatur und die städtische Wärmeinsel

Hinsichtlich der Temperatur tragen Städte stets zu einer Erwärmung bei, was jedoch nicht als eine generell negative Eigenschaft des Stadtclimas verstanden werden muss. Städte sind im Jahresmittel um 1 bis 2 Grad Celsius wärmer als die sie umgebende Landschaft (Matzarakis et al. 2008; Kuttler 2011).

Bebauung und die damit einhergehende Bodenversiegelung beeinflusst langfristig den Mittelwert der Lufttemperatur. Eine 10%ige Erhöhung des Versiegelungsgrads in einem Quartier resultiert beispielsweise in einer langfristigen Anhebung des Lufttemperaturmittelwerts um ca. 0,2°C gegenüber der unbebauten Umgebung. Einzelne Tageswerte (Lufttemperaturminimum und -maximum) bei Strahlungswetterlagen unterliegen einer noch größeren Steigerung (Bründl et al. 1986).

Neben der eigentlichen Bebauung spielen auch die Materialeigenschaften (Absorptionsvermögen, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Verdunstungsfähigkeit) der unterschiedlichen Oberflächen sowie die Anordnung (Verschattung, Verringerte Wärmeabstrahlung) und Ausmaße von Gebäuden in Bezug auf die Temperaturverhältnisse im urbanen Gebiet eine wichtige Rolle.

Ein Ergebnis der Wechselwirkungen dieser unterschiedlichen Faktoren und Effekte ist die städtische Wärmeinsel. Sie zeichnet sich durch eine starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts wieder.

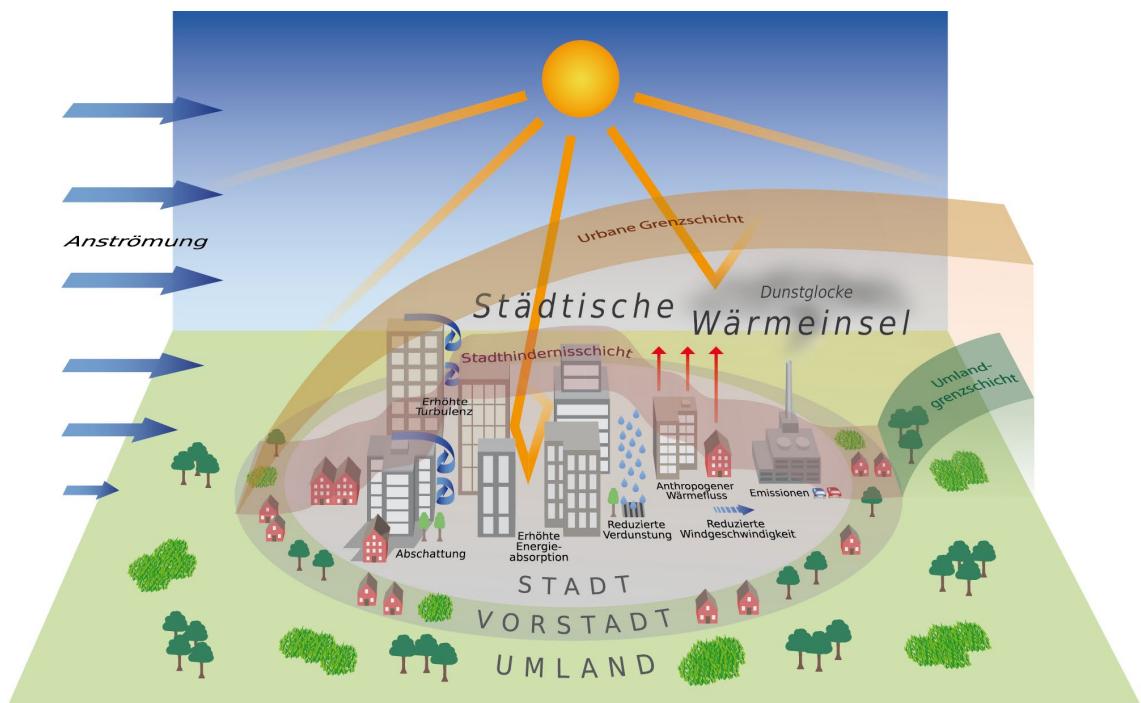


Abbildung 7: Schematische Darstellung unterschiedlicher temperaturrelevanten Faktoren und Effekte im urbanen Raum, die zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel beitragen (DWD 2017).

II.3 Vegetation und städtisches Grün

Urbanes Grün erfüllt Vielzahl verschiedener Funktionen, die das städtische Klima und die Lufthygiene positiv beeinflussen. Auf das Stadtklima bezogen spielt es vor allem bei Verdunstungsprozessen und der Verhinderung der Bodenversiegelung (Retentionseigenschaften) eine wichtige Rolle. Städtische Vegetation bestimmt aber auch die urbane Struktur und hat eine soziale und ästhetische Funktion, wodurch die Identität der Stadt geprägt und die Lebensqualität der Bewohner beeinflusst wird.

Bei typischer urbaner Vegetation handelt es sich in der Regel um

- punktuelle oder flächige Grünstrukturen (Parks, Sportplätze oder Friedhöfe) oder
- lineare Elemente (begrünte Straßen oder Flussläufe),

die wieder zunehmend durch

- Fassadenbegrünungen (boden gebunden oder fassadengebunden) oder
- Dachbegrünungen (extensiv oder intensiv)

ergänzt werden.

Oft wird ein großer Teil des städtischen Grüns von Rasenflächen eingenommen. Bei guter Wasserversorgung weisen diese an Strahlungstagen im Vergleich zu angrenzenden versiegelten Flächen wesentlich niedrigere Oberflächentemperaturen und damit niedrigere Lufttemperaturen auf. Bei schlechter Wasserversorgung heizt sich Kurzgras allerdings stark auf, sodass von einer Kühlwirkung nicht mehr gesprochen werden kann. (Hupfer und Kuttler 1998). Wiesen, d.h. Vegetationsflächen mit größeren Wuchshöhen können den Boden vor einer zu starken Überhitzung schützen. Auch die Oberflächentemperatur ist hier durch Eigenverschattung geringer. Eine extensive Pflege bzw. Mahd ermöglicht ein tieferes Vordringen der Wurzeln in den Boden, um die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen aus tieferen Bodenschichten zu gewährleisten.

Ihre größte thermische Wirkung besitzen Rasenflächen abends und nachts, wenn, aufgrund der isolierenden Wirkung des Grasfilzes der Bodenwärmestrom gering und die Ausstrahlung hoch ist. Diese Rasenareale kühlen dann sehr stark ab und heben sich als innerstädtische Kaltluftflächen heraus. Baum- und strauchbestandene innerstädtische Flächen können, die oben genannten positiven klimatischen Effekte noch weiter verstärken, da sie neben ihrer Transpiration auch durch ihren Schattenwurf tagsüber für niedrigere Temperaturen sorgen. Nachts hingegen stellen sich dort höhere Temperaturen als auf einer Rasenfläche ein. Die relative Luftfeuchte ist in einem Stadtwald höher als über einer urbanen Rasenfläche. Die Ursache hierfür liegt in der Lufttemperatur und der Windstille im Baumbestand. Baumbestandene Flächen transpirieren im Vergleich zu Kurzgras mit 40 % - 70 % (je nach Baumart) deutlich mehr. Außerdem weisen sie nach Niederschlägen wegen ihres größeren Interzeptionsvolumens eine höhere Evapotranspirationsraten als Rasenflächen auf. Da der größte Teil der Globalstrahlung bereits vom Kronendach absorbiert wird, steht tagsüber weniger Energie für die Bodenerwärmung und Speicherung zur Verfügung als bei Rasenflächen, Wiesen oder gar versiegelte Oberflächen. Ferner bewirken Baumbestände eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit, wodurch Aerosole und Stäube, aber auch Gase aus der vorbeiströmenden Luft ausgefiltert werden können (Hupfer und Kuttler 1998).

Unter klimatischen Gesichtspunkten nehmen bereits kleinräumige Grünflächen Einfluss auf das Mikroklima. Ab wann jedoch ein deutlicher „Abstrahlungseffekt“ entsteht hängt von vielen

unterschiedlichen Faktoren ab. Dimoudi und Nikolopoulou (2003) haben die Klimarelevanz für Vegetationsflächen von min. 10m x 10m untersucht und nachgewiesen.

II.4 Wind und der städtische Luftstrom

Die Unterscheidung zwischen ländlichem und städtischem Gebiet spielt im Hinblick auf den Faktor Wind eine große Rolle. Morphologische sowie thermische Charakteristika des urbanen Raums führen dort zu einer Veränderung der Windverhältnisse hinsichtlich der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung.

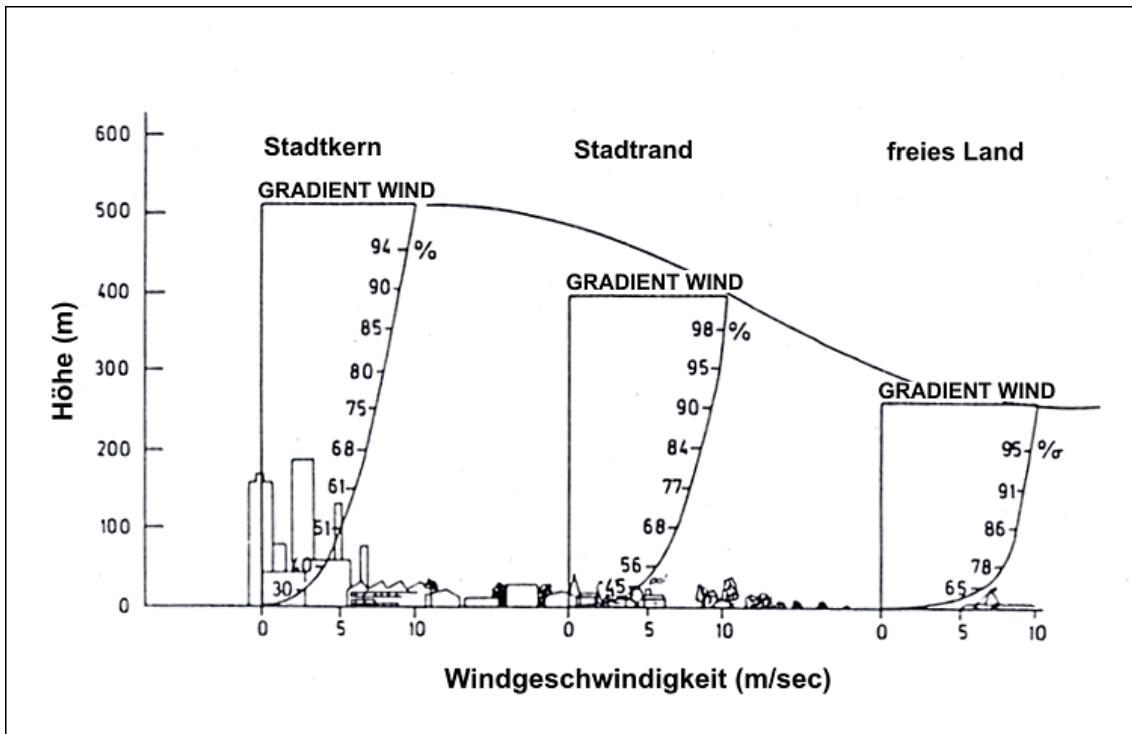


Abbildung 8: Vertikales Windprofil über der Innenstadt, dem Stadtrand und dem Freiland (Robel et al., 1978)

Gleichfalls können lokale Windsysteme, die sich besonders bei schwachem überregionalem Wind ausbilden, die Luftbewegungen in der Stadt beeinflussen. Hierbei wird zwischen topographisch bedingten Systemen und durch Bebauung bedingten Windsystemen unterschieden (VM BW 2012).

Stark durch das vorliegende Relief geprägte Windsysteme (topographisch) sind z.B. Hang-winde sowie Berg- und Talwinde (siehe Abbildung 9). Vor allem bei Städten in Tal- und Kessellagen sind diese Zirkulationssysteme von Bedeutung, da sie die Frischluftzufuhr und den Abluftabtransport (z.B. hinsichtlich Schadstoffe) fördern.

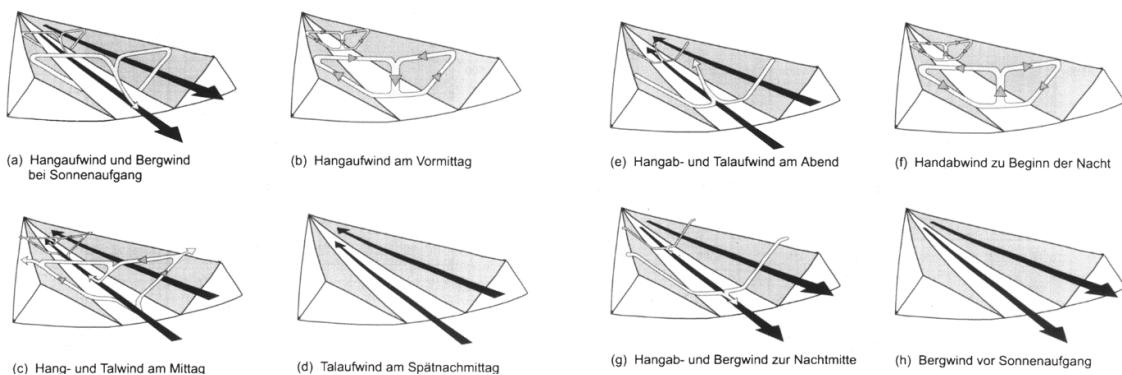


Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Zirkulation von Hang- sowie Berg- und Talwinden in Abhängigkeit zur Tageszeit (Liljequist und Cehak 1979).

Das Flurwindsystem beschreibt Druckausgleichströmungen zwischen verschiedenen Fluren (z.B. Stadt-Umland) wodurch das - durch Bebauung bedingten Windsystem - in diese Kategorie fällt. Ursächlich für dieses Windsystem sind Druckausgleichsströmungen die aus den höherem Temperaturniveau der Stadt (kondensierte Bebauung, städtische Wärmeinsel) und dem kühleren Umland resultieren (siehe Abbildung 10).

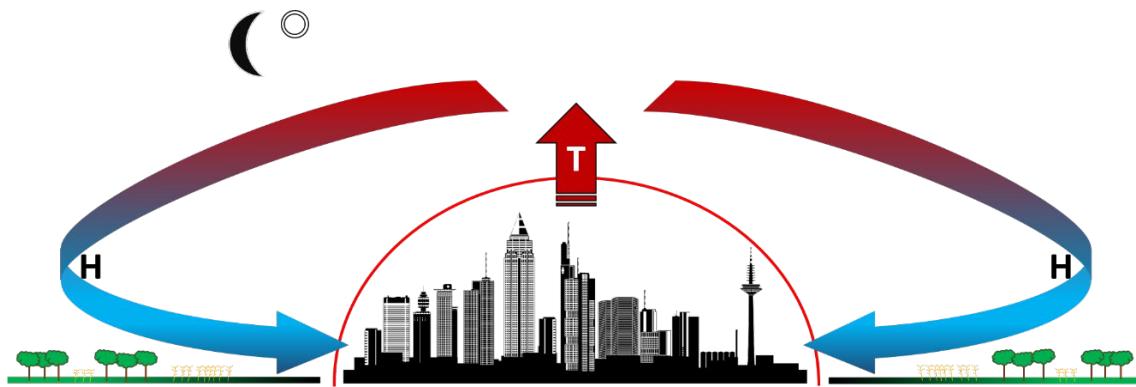


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland Windsystems. Die wärmere "Stadtluft" steigt wegen ihrer geringeren Dichte auf während sich die kühlere "Landluft" absinkt. Durch diesen Luftdruckgegensatz resultiert ein Wind vom Land in die Stadt.

Im Gegensatz zu den topographischen Windsystemen ist dieses System eher in Städten mit einem flachen Relief zu finden. Es unterstützt aber gleichfalls die Frischluftzufuhr und den Abluftabtransport, allerdings sind Flurwinde in der Regel schwächer ausgeprägt.

II.5 Kaltluft

Auf mikro- und mesoskaliger Ebene beschreibt die Kaltluftentstehung den nächtlichen Abkühlungsprozess der bodennahen Luftsichten. Die Entstehung der Kaltluft beginnt während des Sonnenuntergangs, bedingt durch die fehlende solare Einstrahlung sowie die gleichzeitige thermische Ausstrahlung der oberen Bodenschicht, und dauert bis in die frühen Morgenstunden an.

Durch die höhere Dichte der erkalteten Luft verhält sie sich ähnlich einer Flüssigkeit und strömt in Abhängigkeit vom Gefälle in tiefere Regionen (siehe Abbildung 11). Eine signifikante Strömungsdynamik entwickelt sich ab ca. 1° bis 2° Gefälle und wird von der Rauigkeit der überströmten Bodenschichten (siehe Abbildung 11) beeinflusst.

Das Entstehungsgebiet sowie die Kaltluftproduktionsrate werden von dem vorhandenen Untergrund bestimmt. Hierbei fördern besonders unversiegelte Freifläche (z.B. Wiesen, Brachen, Grünflächen etc.) mit einer niedrigen Vegetationshöhe die Kaltluftproduktion. Liegen diese Areale in einem reliefierten Gebiet (z.B. unbebaute Hänge), werden die Kaltluftmassen über die topographischen Windsysteme (Hang- und Bergwinde) abgeleitet. Allerdings können Hindernisse, in Abhängigkeit ihrer Ausprägung, den Kaltluftabfluss behindern oder auch komplett zum Stoppen bringen (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13).

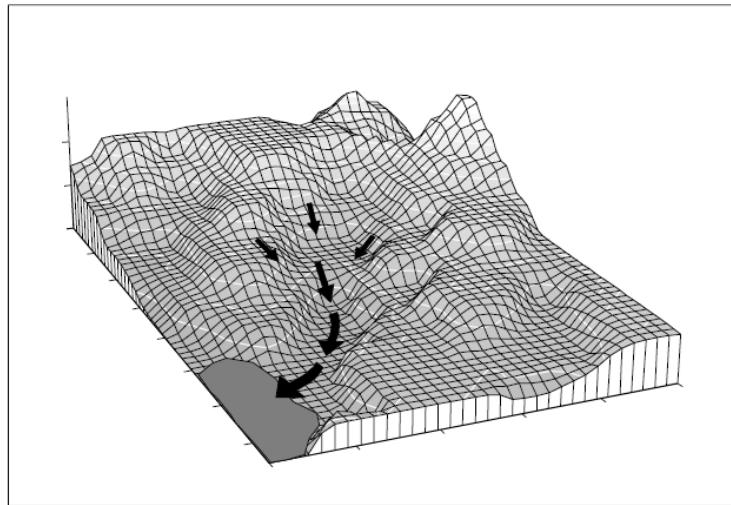


Abbildung 11: Topografisch bedingtes Kaltluft-Abflussregime (Zenger 1998)

Fehlendes Gefälle bei diesen Kaltluftentstehungsflächen reduziert die Kaltluftproduktion nicht, limitiert allerdings den Wirkbereich durch den fehlenden Kaltluftabfluss. Unter Umständen können die Sogwirkungen vorhandener Flurwinde den Kaltlufttransport unterstützen. Waldgebiete auf stark geneigten Flächen (LANUV NRW 2018) tragen ebenfalls zur Kaltluftproduktion bei. Durch die Neigung des Geländes wird die Durchströmung des kühleren Stammraums (Aufheizung wird durch die Baumkronen verringert) unterstützt, wodurch der Kaltluftabfluss aus dem bodennahen Waldbereich möglich wird. In Abhängigkeit von Gefälle, Dauer und Einzugsgebiet kann eine Kaltluftschicht bis zu einer Höhe von über 30 Metern anwachsen.

In Tabelle 5 werden Ergebnisse verschiedener Studien zur Kaltluftentstehung in Abhängigkeit von Boden zu Volumen auf Fläche und Zeit wiedergegeben. Trotz der abweichenden Angaben zu den einzelnen Produktionsraten kann zusammenfassend abgeleitet werden, dass die bereits oben genannten natürlichen, unversiegelten Untergründe für die Kaltluftentstehung entscheidend sind. Zudem kann eine geringe Bodenrauheit (keine bodennahen Hindernisse wie z.B. Mauern, dichte Büsche, etc.) zu einem besseren Abflussverhalten am Hang führen, wodurch der Einflussbereich steigt. Im Durchschnitt wird den Acker- und Wiesenflächen das höchste Kaltluftentstehungspotential zugeordnet.

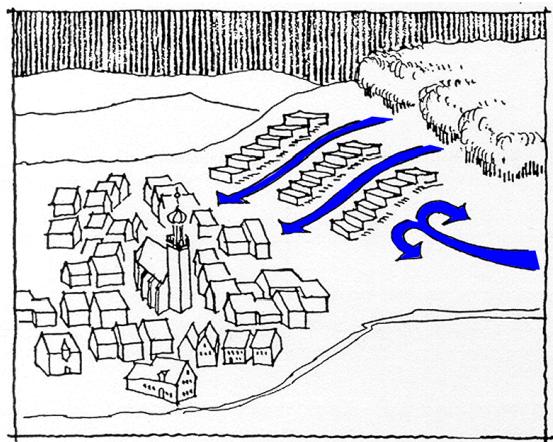


Abbildung 12: Beispiel für eine Hangbebauung mit talparalleler Riegelwirkung (VM BW 2012)

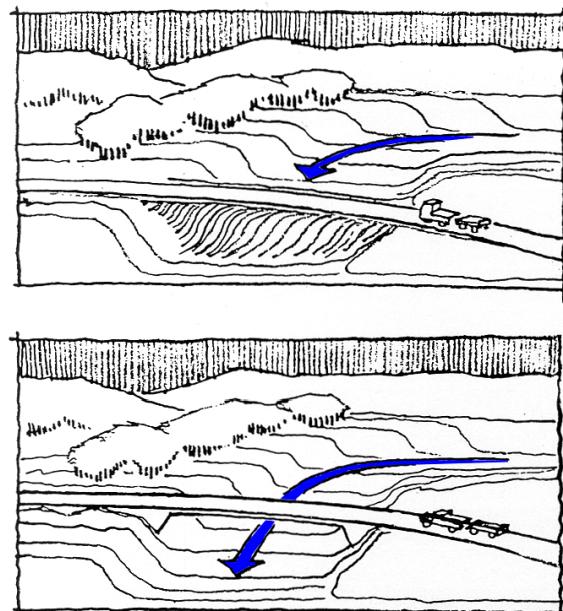


Abbildung 13: Beispiel für die Blockadewirkung eines Straßendamms (oben) und die Durchlässigkeit einer Brücke (unten) in Bezug auf einen Kaltluftstrom (VM BW 2012)

Tabelle 5: Zusammenstellung verschiedener Kaltluftentstehungsraten aus unterschiedlichen Studien in Abhängigkeit zur Art des Untergrunds

	Kubikmeter Kaltluft pro Quadratmeter Boden pro Stunde ($m^3/m^2/h$)			
	Acker	Wiese	Wald	Siedlung
King (1973)	/	12	/	/
Gross (1987, 1989)	11	11	13	/
GEONet (2002)	10 - 20	/	5 - 40	/
GEONet (2011)	10 - 15	20	15	1

In der Regel handelt es sich bei diesen Luftmassen um weniger stark belastete Luft, weshalb sie auch im Zusammenhang mit dem städtischen Luftaustausch als „Frischluft“ bezeichnet wird.

Besonders für urbane Räume in Kessel- oder Hanglagen ist die Kaltluftentstehung und deren Transport für die thermische Regulierung des Stadtklimas und der Luftreinhaltung von großer Wichtigkeit. Die Richtlinie 3787 Blatt 5 des VDI (VDI 2003) unterstreicht diese Bedeutung mit der Forderung, Kaltluftentstehung und Kaltluftabflüsse in der Stadt- und Regionalplanung zu berücksichtigen.

II.6 Solare Einstrahlung

Die solare Einstrahlung ist eine der wichtigsten thermischen Komponenten. Über sie wird bestimmt, wieviel Energie auf ein Objekt / Fläche einwirkt und dieses erwärmt.

Als Globalstrahlung wird der aufsummierte Energiefluss (Watt/m^2) aus direkter Einstrahlung, diffuser Einstrahlung und reflektierender Einstrahlung verstanden (siehe Abbildung 14). Direkte Strahlung ist der Teil der Globalstrahlung, welcher ungehindert, auf direktem Wege auf die Erdoberfläche trifft. Bei der diffusen Strahlung handelt es sich um den Anteil, welcher durch Bestandteile in der Atmosphäre gestreut wird (z.B. Wolken, Staub). Während die direkte Strahlung richtungsgebunden ist, erreicht die diffuse Strahlung die Erdoberfläche von allen Himmelsrichtungen. Der größte Bestandteil der Gesamtstrahlung ist im Allgemeinen die direkte Strahlung, gefolgt von der diffusen Strahlung und reflektierenden Strahlung.

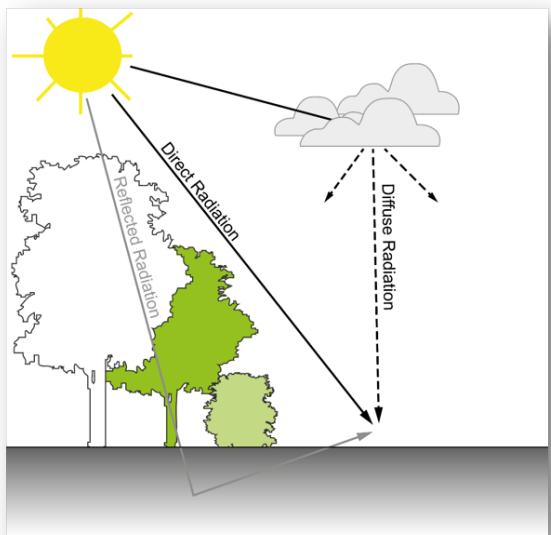


Abbildung 14: Solare Einstrahlung – schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Strahlungstypen (direkte, diffuse und reflektierte Strahlung)

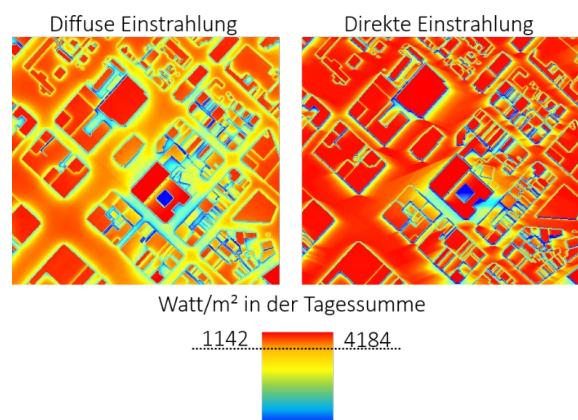


Abbildung 15: Beispiel eines Vergleichs der Beleuchtungsstärke (W/m^2) bei diffuser und direkter Einstrahlung im Sommer (21.06.)

Über die solare Exposition von Oberflächen und / oder Gebäudeelementen (z.B. Fassaden) wird unter anderem die Anzahl der direkten Sonnenstunden berechnet. In Anbetracht der Tatsache, dass 60 % (im Jahresmittel für die Bundesrepublik Deutschland) der einfallenden Globalstrahlung auf die direkte solare Einstrahlung zurückzuführen sind, kann die Anzahl der direkten Sonnenstunden als wichtige Entscheidungshilfe zur Positionierung und Ausrichtung von Flächen und Gebäuden im Außenbereich dienen. Während im Sommer, bedingt durch den hohen Sonnenstand, die direkte Sonneneinstrahlung überwiegt, verändert sich dieses Verhältnis in den Wintermonaten zum Vorteil der diffusen Sonneneinstrahlung.

III. Methodik

III.1 Solare Einstrahlung

Für die Berechnung der Globalstrahlung innerhalb des Geoinformationssystems wird ausschließlich auf die direkte und diffuse Strahlung zurückgegriffen. Da in der Regel nur ein kleiner Teil der Globalstrahlung der reflektierenden Strahlung zugeordnet wird, ist dessen Berücksichtigung für das Untersuchungsgebiet nicht notwendig. Die reflektierende Strahlung gewinnt dann an Bedeutung, wenn Situationen mit stark reflektierenden Bedingungen (z.B. Schnee oder stark spiegelnde Glasfassaden) das Untersuchungsgebiet dominieren.

Bei der Berechnung werden neben der Topographie auch die bestehende und geplante Bebauung sowie vorhandene höhere Vegetationsstrukturen (z.B. Bäume) berücksichtigt. Insbesondere sind auch die geographische Position sowie die Höhe über NN von Bedeutung, da diese Faktoren substanziell für die korrekte Abbildung des Sonnenstandes sind.

III.2 Kaltluftproduktion und -abfluss

Zur Berechnung der Kaltluftproduktionsraten bzw. des Kaltluftabflusses wird die lizenzierte Software KLAM_21 des Deutschen Wetterdienst verwendet (vgl. IV.2).

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Berechnungen mit Hilfe des Klam_21 Simulationsprogramms auf Grundlage von offiziellen Landnutzungsklassifizierungen, Topographie und Bebauung durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall in Regensburg werden die Landnutzungsklassen vereinfacht (entsprechend der Standartvorgaben im Simulationsprogramm) aufgelöst, wodurch in den Ergebnissen zur Kaltluftproduktion / -höhe Unschärfen gegenüber der Realität auftreten können. Diese Unschärfen hängen von der tatsächlichen Durchgrünung der in der Landnutzung definierten Siedlungsräume ab.

Die Ergebnisse werden ins GIS implementiert und mit weiteren Untersuchungsergebnissen verschnitten.

III.3 Windfeldberechnungen

Um die Interaktionen der vielen unterschiedlichen Faktoren realitätsnah zu simulieren, werden Windfeldsimulationen primär mit numerischen Strömungsmechanik-Modellen (CFD Computer Fluid Dynamics) durchgeführt.

Durch die Verwendung der international evaluierten Softwareerweiterung „Airflow Analyst“ ist es möglich das Windfeld direkt innerhalb des Geoinformationssystems zu berechnen. Bei der Berechnung des Windfeldes wird eine räumliche Auflösung von 1 m zugrunde gelegt. Da das berechnete Windfeld den 3-dimensionalen Raum abdeckt, können unterschiedlichste Informationen zum Windfeld zu jeder beliebigen Höhe abgefragt werden. Dies ist insbesondere dann von größerem Interesse, wenn zu überprüfen ist, inwieweit vertikale und horizontale Veränderungen (z.B. durch neue Gebäudestrukturen, Vegetation o.ä.) im Windfeld auftreten.

Innerhalb des Geoinformationssystems kann die Simulationssoftware numerische Analysen turbulenter Strömungen über komplexer Topographie im urbanen und ruralen Raum durchführen. Als Eingangsparameter werden eine gitterartige Beschreibung der Geländehöhe, Rauheit sowie Windbeobachtungsdaten oder ein alternatives Grenzschichtprofil, welches in einer Datei vorliegt verwendet. Das Windfeld wird in einem 3D-Raster berechnet und ermöglicht die Nachbearbeitung der Ergebnisse sowie den Export von Daten in ein GIS-konformes Austauschformat.

IV. Software

IV.1 Softwareumgebung - GIS

Das Geoinformationssystem ArcGIS-Pro der Firma Esri Inc. wird zur Modellierung des Untersuchungsraums genutzt. Alle Analysedaten werden innerhalb des eingesetzten GIS zusammengeführt. Als zentrale Schnittstelle können so über das GIS alle für die mikroklimatische Analyse eingesetzten Softwareinstanzen mit einheitlichen und gleichbleibenden Datensätzen versorgt und für den Post-Process wieder zurückgeführt werden. Ergänzend werden einzelne mikroklimatisch relevante Analyseschritte direkt innerhalb der GIS Umgebung durchgeführt.

Simulationsparameter

Die nachfolgende Tabelle listet alle durchgeführten Berechnungen auf, und verweist auf die verwendeten Parameter sowie die finale räumliche Auflösung des Analyseergebnisses. Alle Berechnungen wurden auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten durchgeführt.

Tabelle 6: Simulationsparameter der durchgeführten Berechnungen

Simulation / Analyse	Parameter	Räumliche Auflösung
<i>Windfeldsimulation</i>		
Windrichtung aus 157.5° (Süd Südost)	2 m/s auf 1.5 m über Grund	2 m
<i>Kaltluftproduktion & Kaltlufttransport</i>		
Strahlungsnacht ohne regionale Überströmung	Topographie, Landnutzung, Bebauung	3 m
<i>Solare Exposition</i>		
Solare Exposition / solarer Eintrag in kWh/m ² /Tag	Tagesmittelwerte für die Monate März Juni September Dezember	1 m

IV.2 KLAM_21

Kaltluftproduktion und -abfluss

„KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch 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 Gitterpunktabstände sind dabei 20 bis 50 m. Die Modellgebietsgröße wird in der Regel so gewählt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst sind. Bei 50 m Gitterabstand beträgt z. B. die maximale Größe 22.500 km². Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung (schematisiert in 9 Nutzungsklassen, Sondernutzungen können bei Bedarf ergänzt werden) sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsklasse wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand sowie gegebenenfalls eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit von bebauten Flächen. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z. B. Einzelgebäude, Dämme, Schallschutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende 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 annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Lufttemperatur und der Luftdichte vorhanden sind. Es werden während der gesamten Nacht gleichbleibend gute Ausstrahlungsbedingungen, das heißt eine geringe Bewölkung, angenommen. Möglich ist die Vorgabe einer schwachen, durch regionale Luftdruckunterschiede hervorgerufenen Grundströmung des Windes. Der Simulationszeitraum von 8 Stunden entspricht der mittleren Andauer einer Sommernacht. Im Gegensatz zu stark vereinfachenden Modellen, die auf einer „statischen“ Analyse des Reliefs und der Landnutzung beruhen, können mit KLAM_21 Kaltluftbewegungen in ihrer Dynamik und zeitlichen Entwicklung flächendeckend wiedergegeben werden. 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 Kaltlufthöhe errechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten. Der Vergleich von IST- und Planungszuständen wird mit Differenzenkarten oder zeitlichen Animationen der Kaltlufthöhe, der Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme visualisiert.“ (DWD 2016)

IV.3 Airflow Analyst

3D-Windfeld und Partikelausbreitung

Airflow Analyst ist eine lizenzierte Software, die GIS (Geographic Information System) und räumliche Daten verwendet, um komplexe Luftströmungsbewegungen in einem bestimmten Bereich zu simulieren.

Die Software verwendet einen Algorithmus für die Fluideodynamik, ein Kernelement für die Bereitstellung hochpräziser Luftstromanalysen, basiert auf dem RC-GIS-Berechnungsprogramm, das an der Kyushu University entwickelt und getestet wurde. Airflow Analyst ist eine Erweiterungssoftware für "ArcGIS for Desktop", der Firma ESRI Inc.

V. Analyse der klimatischen Situation für den Bestandsfall

V.1 Solare Einstrahlung

Der zu untersuchende Planungsraum zeichnet sich im Gesamtbild durch eine homogene Topographie aus. Die westlich verlaufende Galgenbergstraße liegt leicht erhöht und steigt in südlicher Richtung weiter an. Im Zuge der Analyse der solaren Einstrahlung wurden auch für die aktuelle unbebaute Bestandssituation vier Modellrechnungen durchgeführt. Zur Abbildung eines Jahres wurde die solare Einstrahlung für die Monate März, Juni, September und Dezember berechnet. Die nachfolgenden Abbildungen Abbildung 16 bis Abbildung 19 zeigen die Ergebnisse jeweils im Monatsmittel als kWh/m²/Tag.

Aufgrund der fehlenden Bebauung, der geringen topographischen Charakteristik und den nur eingeschränkt vorhandenen Gehölzstrukturen ist der Großteil des Planungsareals stark solar exponiert. Das führt zu einem maximalen Eintrag von bis zu 5,3 kWh/m²/Tag im Sommermonat Juni. Gleichzeitig steigt der Maximalwert im Winter nicht über 1,5 kWh/m²/Tag.

Die starke solare Exposition sowie die fehlende Verschattung führt zu einem hohen Energieeintrag auf der Fläche. Da es sich bei dieser jedoch um Wiesen- und Ackerfläche handelt kann die (meist) sommerliche Überwärmung durch eine rasche nächtliche Abkühlung (siehe Kapitel V.2) kompensiert werden.

Entsprechend der vorherrschenden Stadt- und Geländemorphologie, sowie unter Berücksichtigung der vier durchgeführten Modellberechnungen für den solaren Eintrag auf der Fläche im Planungsraum, ist dieser bezüglich seiner Exposition als unbedeutsam zu klassifizieren. Vor diesem Hintergrund wird der Umgang mit Aspekten wie Fremd- und Eigenverschattung für die Planung vereinfacht.

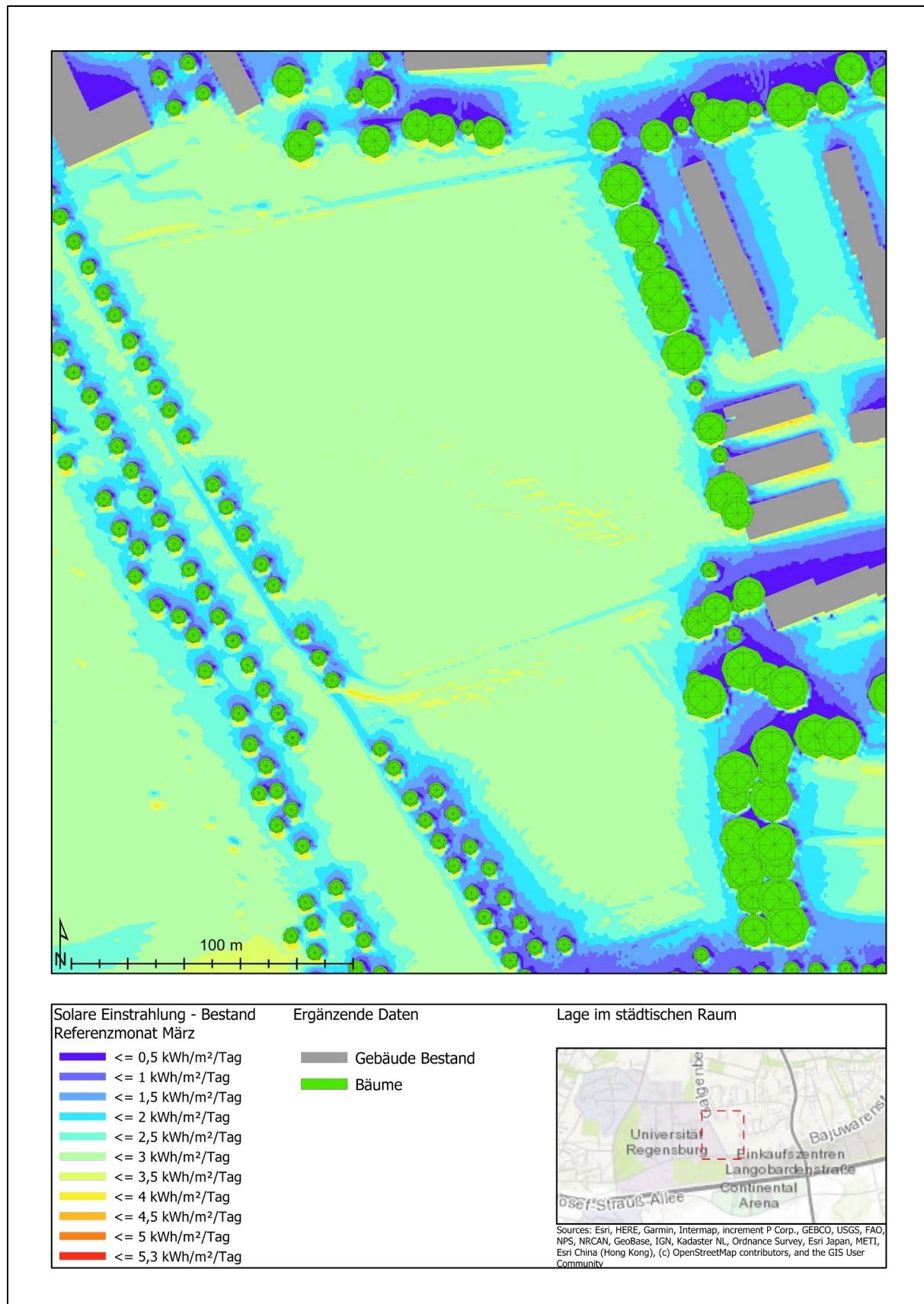


Abbildung 16 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat März

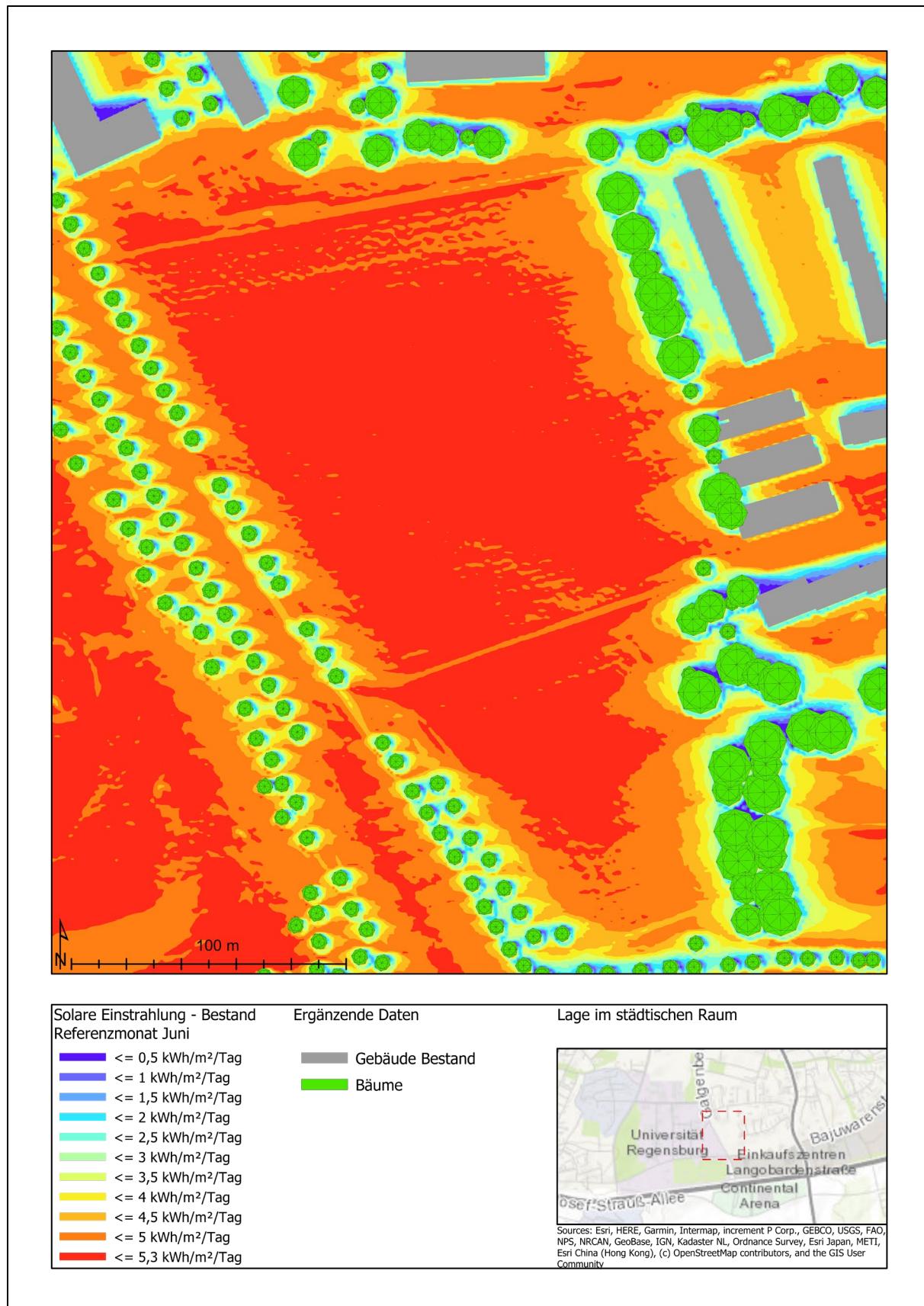


Abbildung 17 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat Juni



Abbildung 18 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat September

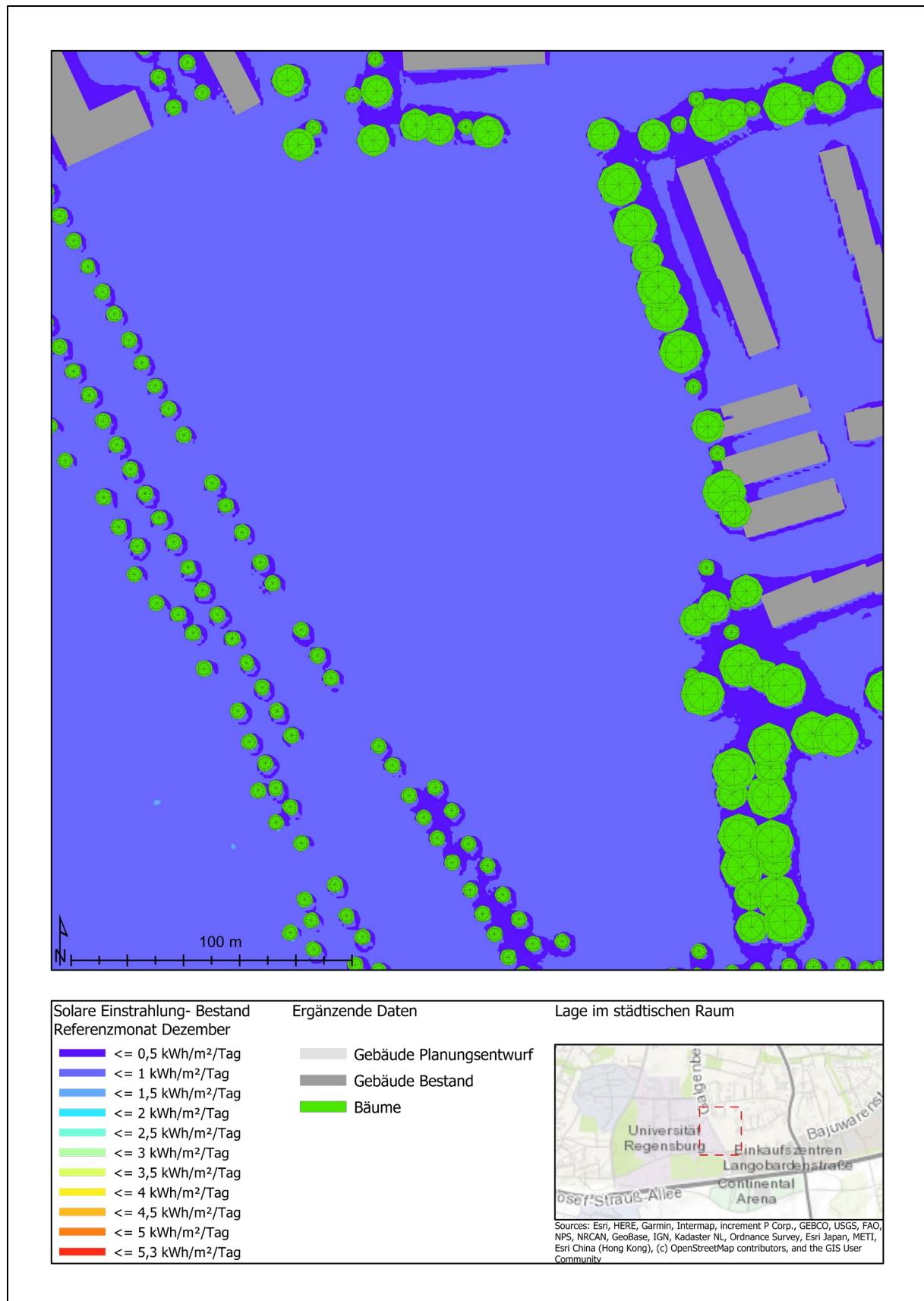


Abbildung 19 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat Dezember

V.2 Kaltlufthöhe & Kaltlufttransport

Wie bereits einleitend in den Kapiteln II.5 und III.2 beschrieben, kann die nächtliche Kaltluftproduktion sowie deren Transport eine für das Stadtklima wichtige Rolle spielen. Insbesondere bei topographisch stärker geprägten urbanen Situationen kann die nächtliche Kaltluft einen bedeutenden Beitrag zur Abkühlung des Siedlungsraums leisten. Um ein realitätsnahes Bild zu berechnen wurde die Kaltluftsimulation für eine Gesamtfläche von 4,4 km² durchgeführt. Unter Berücksichtigung der lokalen topographischen Gegebenheiten bestimmt der Planungsraum weitestgehend den Mittelpunkt des Simulationsraums.

Der untersuchte Planungsraum liegt topographisch günstig, um die in nordöstlicher Richtung angrenzende Siedlungsstrukturen mit dem lokalen (auf der Fläche produzierten Kaltluft) und der aus süd- und südwestlicher Richtung anströmenden Kaltluft zu versorgen. Im dargestellten Modellausschnitt ist die topographische Ausrichtung von Südwest nach Nordost dominierend. Entsprechend prägt sich während austauscharmer Nächte der Kaltlufttransport entlang dieses topographischen Gradienten aus, wodurch der südliche rurale Raum (südlich der BAB 3) für diesen urbanen Raum als Kaltluftproduzent / -versorger keine Rolle spielt.

Während über dem nördlichen Bereich des Planungsraums nur die direkten Siedlungsstrukturen positiv beeinflusst werden (ähnlich einer Blase die sich in sich in den Siedlungsraum ausdehnt, siehe Abbildung 20), stellt der südliche Bereich ein Verbindungselement zu den sich nach Osten ausdehnenden Grünstrukturen dar, die gleichzeitig dem nächtlichen Kaltlufttransport dienen.

Diese Grünstrukturen (meist Kleingärten sowie Bebauung mit hohem Grünflächenanteil) kanalisieren und verstärken die nächtliche Kaltluft und leiten diese in Richtung Unterislinger Weg und Humboldtstraße. Damit können mehrere Siedlungsstrukturen in der Versorgung mit Kaltluft unterstützt werden.

Da der Planungsraum mit > 4 ha nachts selbst Kaltluft produziert und gleichzeitig von weiteren Flächen mit Kaltluft versorgt bzw. durchströmt wird, ergeben sich nach einer 8 stündigen Simulationsnacht Kaltluftschichtdicken zwischen > 6,5 m und < 14 m. Im Maximum wurden Kaltluftschichtdicken bis zu 75,3 m erreicht. Diese Flächen liegen jedoch nicht im direkten Einzugsbereich des Planungsraums. Entsprechend zeigt Abbildung 20 den Simulationsausschnitt, welcher für den Planungsraum von Relevanz ist. Dies wird im späteren Verlauf (siehe Kapitel VII) im Zuge der Differenzermittlung zwischen Bestand und Planung deutlich. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass eine über die lokale Bedeutung hinaus vorhandene Wichtigkeit der Kaltluftentstehung und des -transportes nicht gegeben ist.

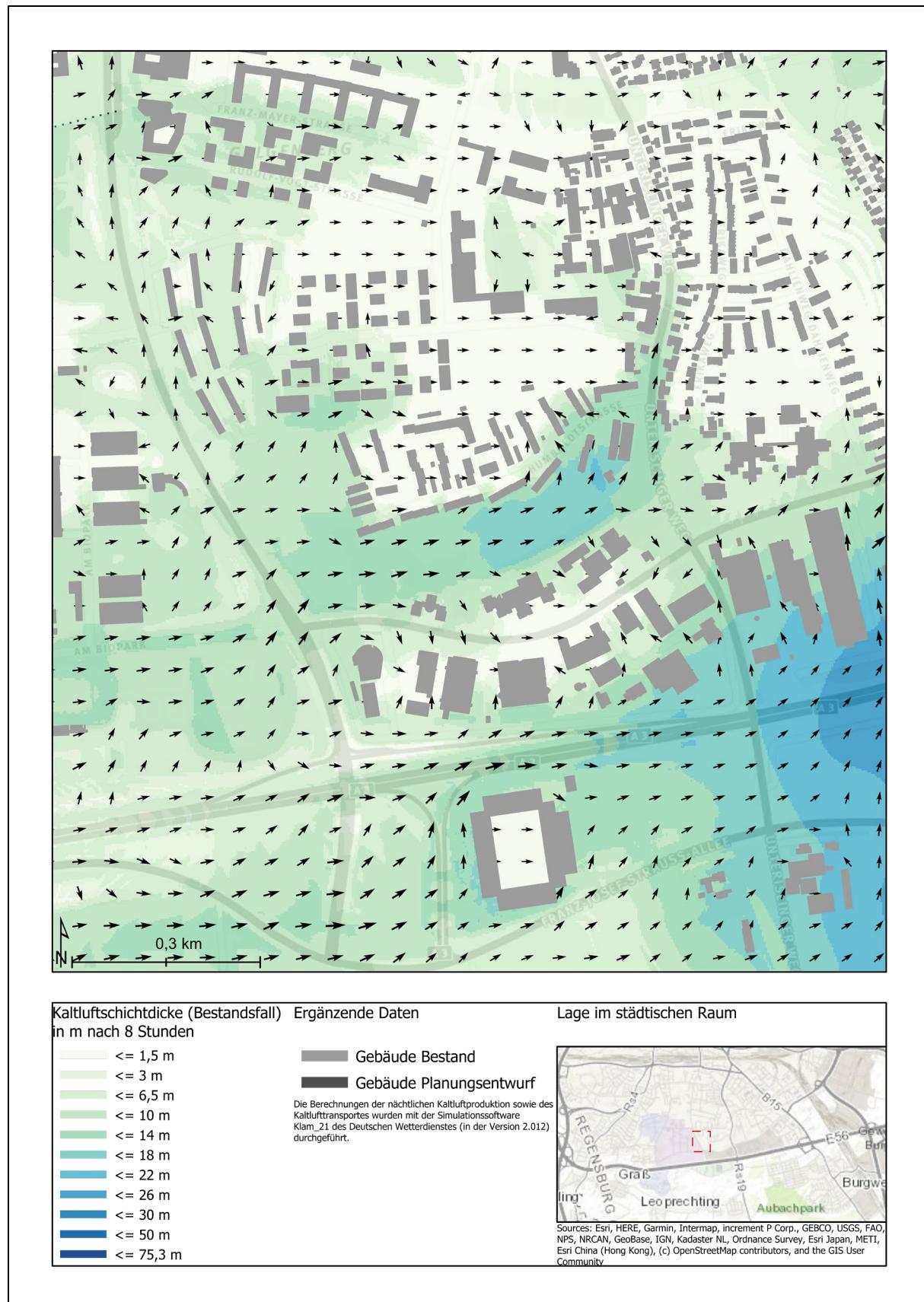


Abbildung 20 Kaltluftschichtdicke in Meter nach 8 Stunden für die Bestands situation

V.3 Durchlüftung am Tag (3D-Windfeld)

Während die Kaltluftproduktion und der -transport nachts (bei fehlenden Überlagerungsströmungen) stattfindet, ist die regionaltypische Anströmung am Tag wichtig für die Durchlüftung der Siedlungsräume. Über poröse und locker gestaltete Siedlungsräder wird Potential erhöht, dass auch stärker verdichtete Kernsiedlungsräume am Tag durchlüftet werden.

Am Standort des Planungsraums ist eine lokal- und regionaltypische Anströmung aus Südsüdost (siehe Kapitel I.3) am Tag dominant. Entsprechend wurde das 3-dimensionale Windfeld für diese Anströmungsrichtung berechnet.

Die Abbildungen Abbildung 21 und Abbildung 22 beschreiben jeweils einen horizontalen Schnitt durch das berechnete Windfeld auf 2 m über Grund und auf 10 m über Grund. Beide Abbildungen zeigen, dass durch die geringen Oberflächenrauigkeiten und die fehlenden baulichen oder topographischen Hindernisse das Strömungsregime im Planungsraum stark ausgeprägt ist. Während auf der geringen Schnitthöhe von 2 m über Grund primär die Einflussnahme durch die topographischen Gegebenheiten im Planungsraum dominierend sind, zeigt sich mit steigender Höhe ein zunehmender Verlust dieser Beeinflussung. Dadurch entsteht auf weiten Teilen des Planungsraums ein homogen stark ausgeprägtes Windfeld. Einzig im südlichen Bereich, wo der Planungsraum an die Johann-Hösl-Straße grenzt, wird das Windfeld auch noch in einer Höhe von 10 m lokal beeinflusst, was zu einer Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit führt. Dies ist auf die dortige steil ansteigende Topographie sowie auf den dort vorhandenen dichten Baumbestand zurückzuführen.

Bedingt durch geringe Oberflächenrauigkeit der Bestandssituation können ankommende Windströmungen aus SSE gut über den Planungsraum geleitet werden. Gleichzeitig sind die direkt (vornehmlich westliche und südwestliche) anschließenden Flächen durch eine relativ große bauliche Offenheit geprägt, wodurch auch dort auf einer Höhe von 10 m über Grund die berechneten Windgeschwindigkeiten hoch sind.

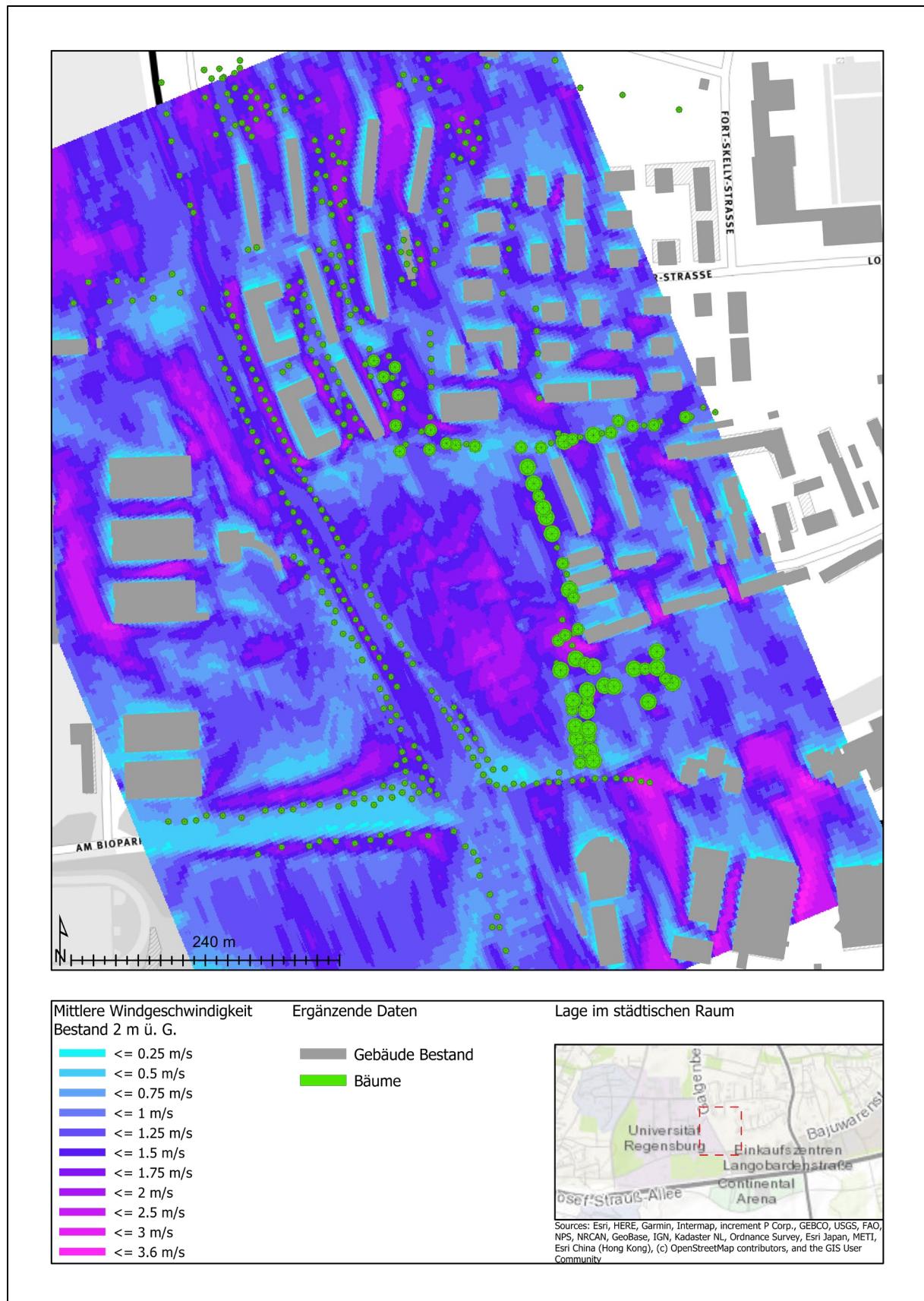


Abbildung 21 Mittlere Windgeschwindigkeit im Bestand auf 2 m über Grund

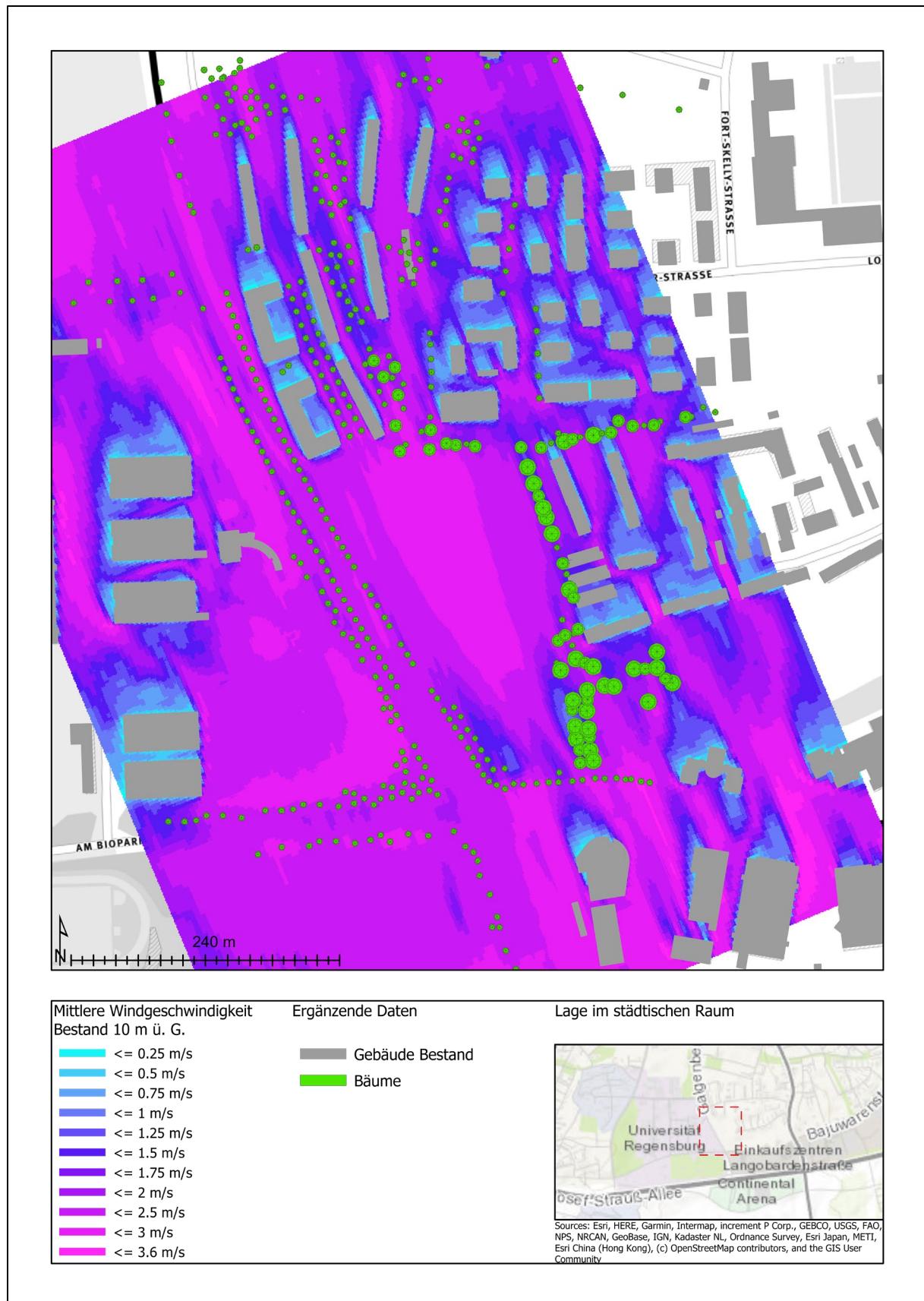


Abbildung 22 Mittlere Windgeschwindigkeit im Bestand auf 10 m über Grund

VI. Analyse der klimatischen Situation für den Planungsfall

VI.1 Solare Einstrahlung

Durch die Bebauung des Planungsraums verändert sich die lokale stadtmorphologische Charakteristik des Gebietes. Bei der Simulation wurden die beiden Lärmschutzwände im Baufeld 1 (Durchgangssituation am jeweiligen Adresshof) als transparente Strukturen behandelt, die nicht zu einer zusätzlichen Verschattung beitragen. Aufgrund der Gebäudehöhen von durchschnittlich 17 m nimmt insgesamt die Verschattung deutlich zu, wodurch sich ein wesentlich heterogeneres Gesamtbild der solaren Exposition für den Planungsfall darstellt. Diese Heterogenität wird zudem auch durch die Gebäudestellung und des Gebäudeabstandes zueinander bestimmt. Trotz der größeren Baumassen, die im Planungsfall generiert und in den Planungsraum eingebracht werden, verhindert die lockere Bebauung (der durchschnittliche Gebäudeabstand liegt bei 15 m) eine flächig geschlossene Verschattung in den Monaten März, Juni und September. Erwartungsgemäß ist die Verschattung im Dezember durch den niedrigen Sonnenstand am stärksten ausgeprägt.

Das auf der Grünfläche (zwischen Baufeld 1 und Baufeld 4) geplante Areal für einen Kinderspielplatz wird größtenteils nicht durch die umliegenden Gebäude und der entsprechend entstehenden Verschattung negativ beeinflusst.

Durch die Abstände zu den vorhandenen Bestandsstrukturen findet keine nennenswerte Flächenverschattung statt. Obwohl in dieser Simulation keine Aussagen über die Verschattung auf vertikalen Strukturen wie Fassadenflächen gegeben wird, kann davon ausgegangen werden, dass diese, bedingt durch den bereits genannten Abstand der geplanten Gebäude zu der umliegenden Bebauung gering bzw. nicht vorhanden sein wird. Vielmehr könnte dieser Effekt zwischen den dichten aneinander platzierten Gebäuden der Baufelder 3, 4 & 5 auftreten.

Durch die Position und Ausrichtung der Bürogebäude 2.1 und 2.2 im Baufeld 2 wird im Jahresgang insbesondere im März, September und Dezember eine große Fläche nördlich der Gebäude stark verschattet, wodurch die klimatische Aufenthaltsqualität in diesem Bereich verringert ist. Insbesondere in den Wintermonaten kann dieser Bereich durch die fehlende solare Einstrahlung zu einem klimatischen Ungunstbereich werden. Verstärkt würde diese Situation, wenn die Windverhältnisse zu dieser Zeit eine stärker östliche Komponente aufweisen, wodurch die Aufenthaltsqualität insgesamt auf dieser Fläche reduziert wird. Es bleibt festzuhalten, dass die Fläche, wie in den Planungsunterlagen dargestellt, als Feuerwehr Angriffsfläche (siehe Planungsunterlagen ASTOC12.07.19) sowie als Transitbereich zwischen dem Adresshof im Westen und dem Baufeld 5 genutzt werden soll.

Das sich im Baufeld 6 befindende höchste Gebäude (ca. 40 m) ist im Kontext der solaren Einstrahlung und Verschattung positiv platziert und ausgerichtet. Durch Ausrichtung und Lage wird so nur ein geringer Teil der angrenzenden Außenflächen beeinflusst. Eine Beeinflussung der öffentlichen Grünfläche und des dort geplanten Jugendspielplatz sowie die anderen Gebäude im Baufeld 6 wird vermieden.

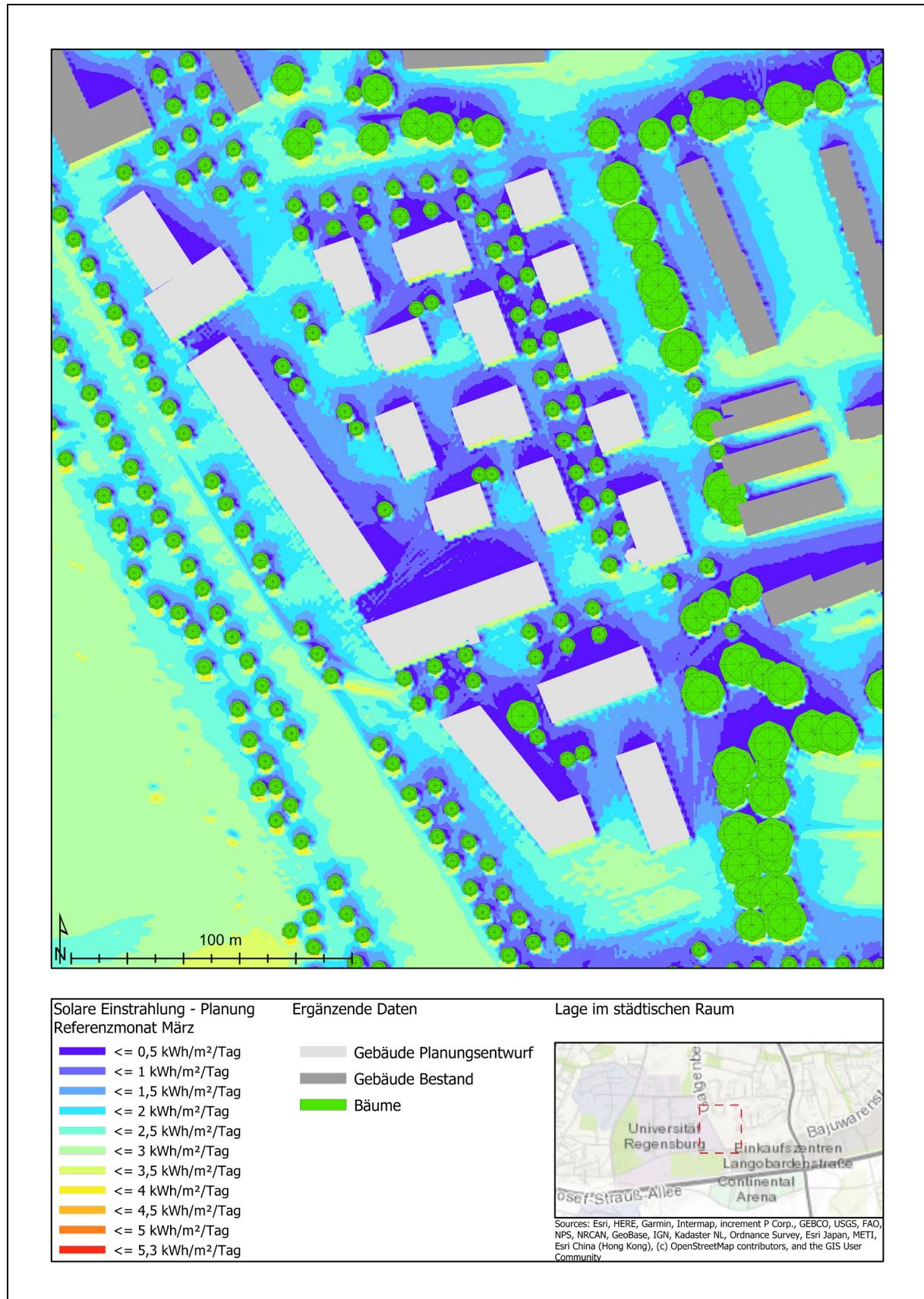


Abbildung 23 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat März



Abbildung 24 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat Juni

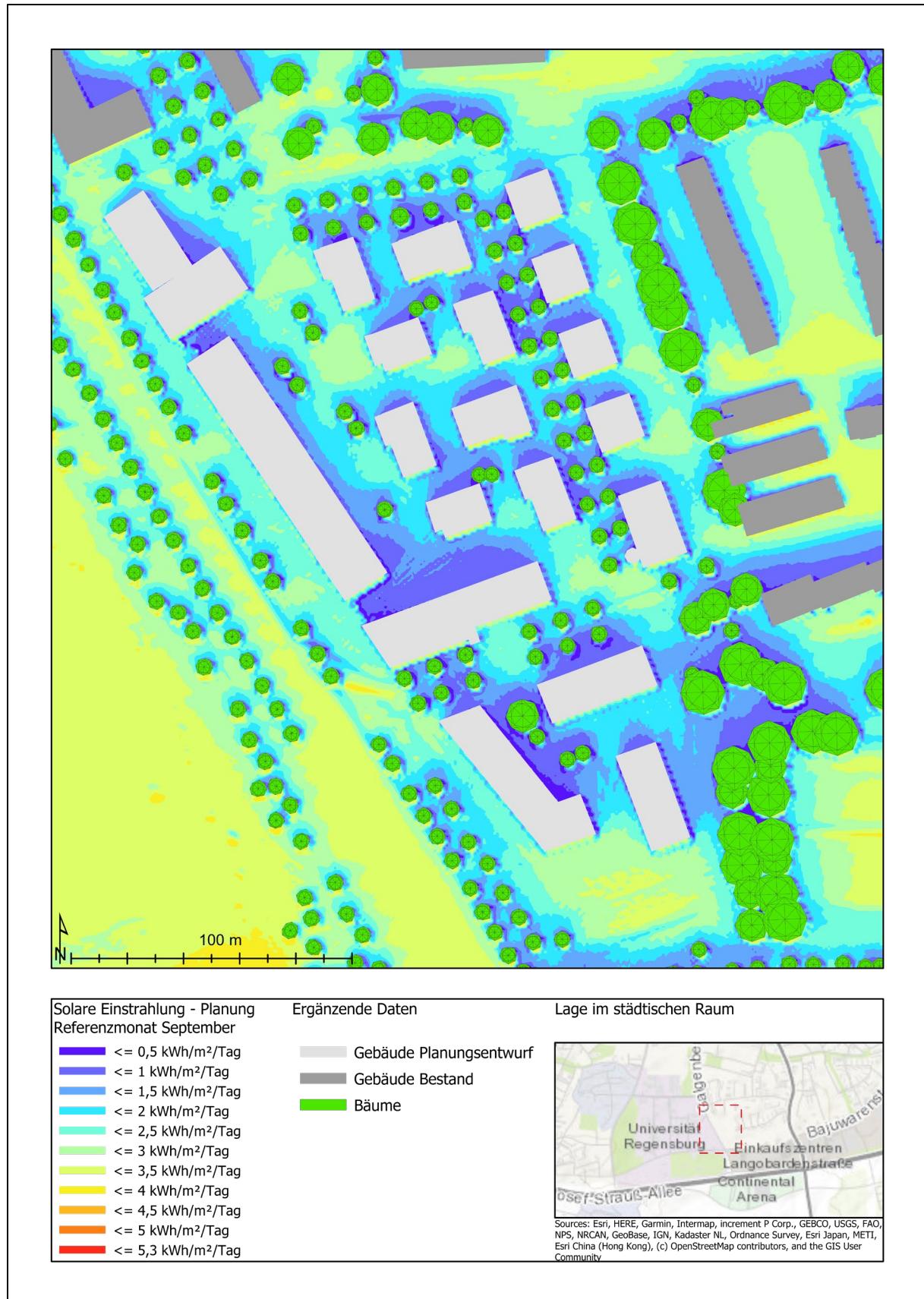


Abbildung 25 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat September



Abbildung 26 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat Dezember

VI.2 Kaltlufthöhe & Kaltlufttransport

Im Kontext der großräumigen Betrachtung der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransports nimmt das Planungsgebiet mit seinen ca. 4 ha einen Bereich mittlerer Größe ein. Wie bereits in der Analyse der Bestandsituation beschrieben (siehe Kapitel V.2), unterstützt die Lage des Planungsraums die lokale Kaltluftentstehung sowie deren Weitertransport.

Durch die Bebauung des Planungsareals werden nun die zuvor klimaaktiven unversiegelten Ackerflächen in Siedlungsflächen transformiert, was in erster Linie zu einer Verminderung der lokal verorteten Kaltluftproduktion führt. Über die Abbildung der Kaltluftsimulation zeigt sich, dass in Bereichen der Baufelder 3, 4 & 5 die Kaltluftschichtdicke gering bleibt, und nur eine geringe Bewegung der Kaltluft stattfindet. Neben der Flächenversiegelung ist dies auf die Regelwirkung der Gebäude im Baufeld 1 zurückzuführen, wodurch eine räumliche Trennung der Kaltluftausbreitung entsteht. Westlich des Baufeld 1 hat dies eine Stauwirkung der Kaltluft zur Folge, die nur langsam abfließen kann.

Die topographische Situation im Bereich des Baufeld 6 gepaart mit der geplanten Bebauung lässt in diesem Bereich eine Kaltluftsenke entstehen, wodurch der Durchfluss / Transport der nächtlichen Kaltluft eingeschränkt wird. In diesem Bereich kann die Kaltluftmächtigkeit auf bis zu 22 m ansteigen.

Die Einflussnahme des gesamten Planungsfalls auf die lokale Kaltluftproduktion sowie die lokale und weitergehende Kaltluftversorgung wird in der Differenzbetrachtung (siehe Kapitel VII.2) verdeutlicht.

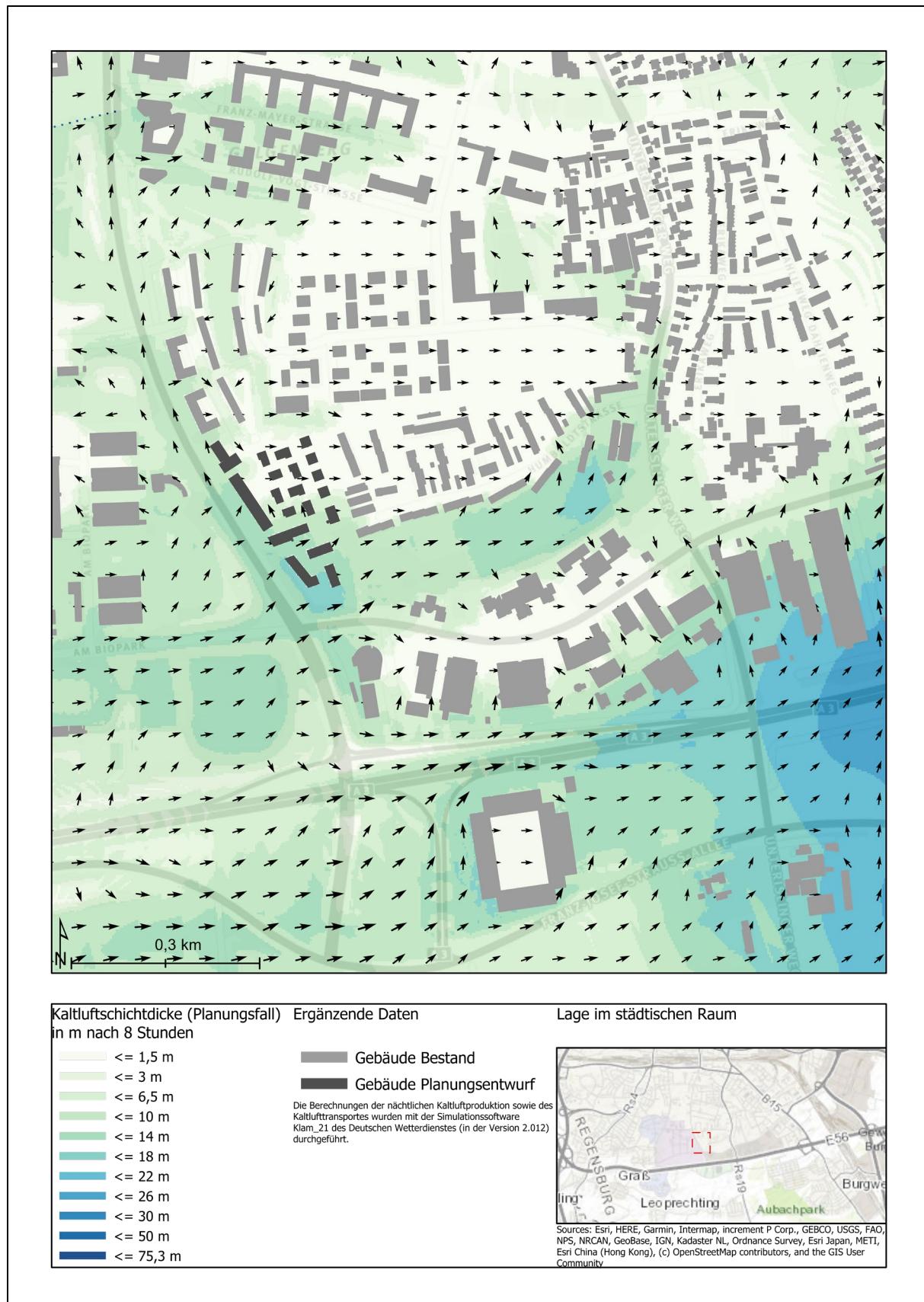


Abbildung 27 Kaltluftschichtdicke in Meter nach 8 Stunden für den Planungsfall

VI.3 Durchlüftung am Tag (3D-Windfeld)

Während die Kaltluftproduktion und der -transport nachts (bei fehlenden Überlagerungsströmungen) stattfindet, ist die regionaltypische Anströmung am Tag wichtig für die Durchlüftung der Siedlungsräume. Über poröse und locker gestaltete Siedlungsräder wird das Potential erhöht, dass auch stärker verdichtete Kernsiedlungsräume am Tag durchlüftet werden.

Am Standort des Planungsraums ist eine lokal- und regionaltypische Anströmung aus Südsüdost am Tag dominant (siehe Kapitel I.3). Entsprechend wurde das 3-dimensionale Windfeld für diese Anströmungsrichtung berechnet.

Durch die Einbringung der geplanten Gebäude in den Planungsraum verändert sich die lokale Durchlüftungssituation. Das Gesamtbild wirkt heterogener. Dabei entstehen neben Bereichen mit verringriger Windgeschwindigkeit auch Bereiche in denen, meist durch Kanalisierungseffekte der Gebäude, die mittlere Windgeschwindigkeit erhöht ist. Diese Kanalisierungseffekte lassen sich in Ansätzen auch über mehrere Gebäudezwischenräume hinweg feststellen. Es bleibt dabei aber festzuhalten, je größer die Oberflächenrauigkeit ist, desto stärker sind die auftretenden Reibungsverluste und damit auch die Windgeschwindigkeiten vermindert.

Im Höhenschnitt 2 m über Grund (Abbildung 28) zeigt sich, dass die Baufelder 5 & 6 Bereiche guter Durchlüftung aufweisen. Dies ist unter anderem auf die Offenheit der Erschließungsstraße und der dortigen T-Kreuzungssituation nördlich des Baufelds 6 zurückzuführen, wodurch der Wind über den Straßenraum in den bebauten Raum gelangen kann. Im nördlicheren Bereich (Baufeld 4 und Teilbereichen von Baufeld 3) nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit jedoch weiter ab, was bei einer austauscharmen sommerlichen Wetterlage zu einer stagnierenden Durchlüftung führen kann. Hierdurch können sich (in Kombination mit hoher solarer Einstrahlung) lokale klimatische Ungunstbereiche ausbilden. Eine ähnliche Situation findet sich auch im südlichen Bereich östlich des Baufeld 1. Hier besteht jedoch der Unterschied darin, dass eine große parkähnliche Grünfläche geplant ist, die zum Erhalt und der Förderung des thermischen Komforts beitragen kann.

Auf einer Schnitthöhe von 10 m über Grund (siehe Abbildung 29) werden keine Gebäude im Planungsraum überströmt. Jedoch zeigt sich eine deutlich verminderte Einflussnahme der natürlichen topographischen Gegebenheiten. Das Windfeld wird primär durch die Gebäude in ihrer Höhe, Ausrichtung und Lage geprägt. Für den Planungsraum bedeutet dies für das Baufeld 3 eine immer noch hohe Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen den Gebäuden. Gleichzeitig nimmt die Durchlüftung im Bereich von Baufeld 5 weiter zu, so dass nun auch die Kernbereiche des Baufeld 4 eine bessere Durchlüftung aufweisen.

Die Einflussnahme des gesamten Planungsfalls auf die lokale Durchlüftung sowie auf die potenzielle weiträumigere Beeinflussung auf das Windfeld wird in der Differenzbetrachtung (siehe Kapitel VII.3) verdeutlicht.

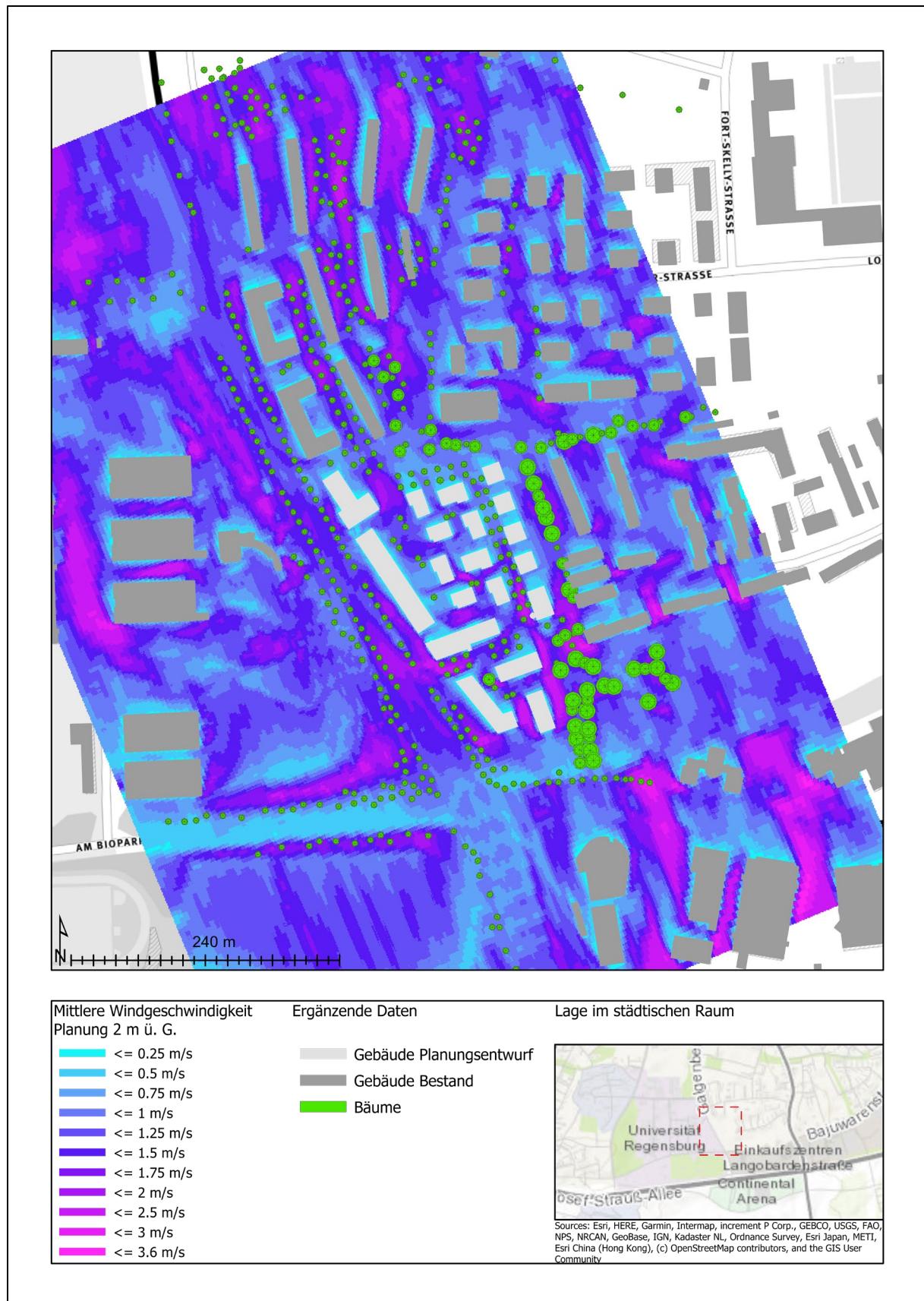


Abbildung 28 Mittlere Windgeschwindigkeit im Planungsfall auf 2 m über Grund

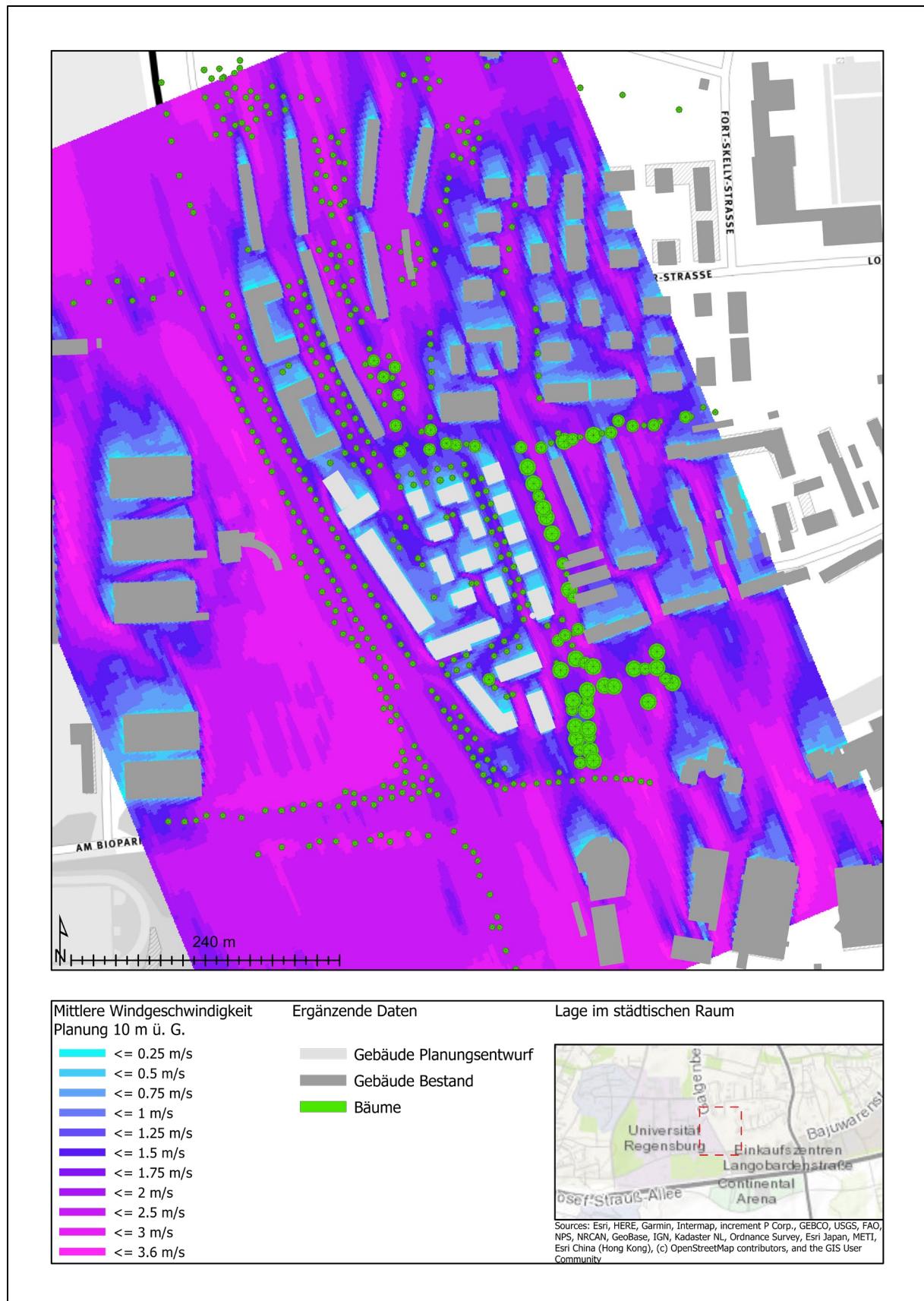


Abbildung 29 Mittlere Windgeschwindigkeit im Planungsfall auf 10 m über Grund

VII. Bewertung der Veränderung (Differenzen) der klimatischen Situation im Untersuchungsraum (zwischen Bestands- und Planungsfall)

VII.1 Solare Einstrahlung – Differenz Planung zu Bestand

Zur Betrachtung der Differenzsituation zwischen Bestands- und Planungsfall wurde der Sommermonat Juni gewählt, da hier die stärksten Unterschiede zu erwarten sind, und so die sich verändernde Situation lesbar abbildet.

Da im Bestandfalls im Planungsraum keine Bebauung vorhanden ist, beschreibt die in Abbildung 30 dargestellte Differenzberechnung die Abnahme des solaren Eintrags auf die Fläche, was gleichzeitig die entstehende Verschattung wiederspiegelt. Deutlich wird, dass es nur vereinzelte Bereiche gibt, bei denen sich keine Veränderungen und damit auch keine zusätzliche Verschattung im Planungsraum auftritt. Diese Bereiche befinden sich primär zwischen den Baufeldern 4 und 5 sowie zwischen den Baufeldern 2 und 5. Diese Gebiete werden meist von größeren Flächen ergänzt, bei denen die Differenz bei $< 0,5 \text{ kWh pro m}^2 \text{ und Tag}$ liegt. Erwartungsgemäß findet auf den Flächen nordöstlich bis nordwestlich der Gebäude die stärkste Abnahme der solaren Einstrahlung statt.

Die vorliegenden Karten zur solaren Einstrahlung im Planungsfall (Abbildung 23 bis Abbildung 26) sowie die vorliegende Differenzbetrachtung zur aktuellen Bestandssituation können als wichtige Informationen genutzt werden um das zukünftige Außenraumkonzept in Hinblick auf Nutzung und Aufenthalt zu optimieren.

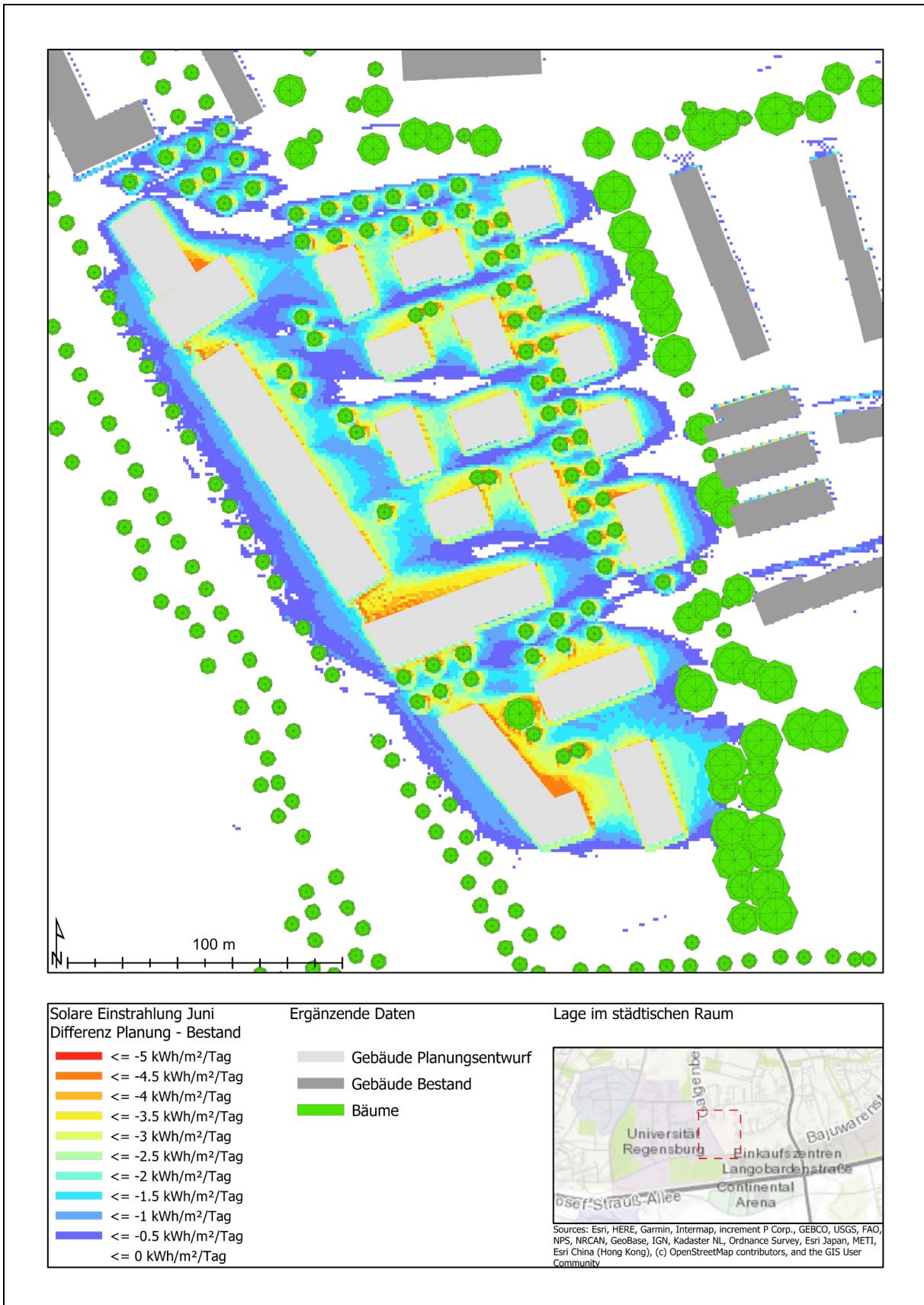


Abbildung 30 Differenz der solaren Einstrahlung im Referenzmonat Juni (zwischen Planung und Bestand)

VII.2 Kaltluftsimulation – Differenz Planung zu Bestand

Die für die Untersuchung vorgegebene Planungsfläche erstreckt sich von Nord nach Süd am südlichen Stadtrand von Regensburg. Dabei bilden die Gebäude am westlichen Rand, parallel entlang der Galgenbergstraße, einen baulichen Riegel. Dieser bauliche Riegel führt dazu, dass die nächtlich entstehende Kaltluft sich nur noch vermindert in nordöstlicher Richtung ausbreiten kann und dies zum Kaltluftstau auf der Straße und den westlich gelegenen Flächen führt. Dadurch kommt es im Planungsgebiet selbst, wie auch im angrenzenden Siedlungsraum, in nordöstlicher Richtung zu einer Reduzierung der maximalen Kaltluftschichtdicke. Gleichzeitig führt die Bebauung der Planungsfläche zu einer Verminderung der lokalen Kaltluftproduktion gegenüber den aktuell im Planungsraum vorhandenen Ackerflächen. In der Differenzbetrachtung der Kaltluftversorgung wird der Wirkbereich deutlich. Neben der bereits erwähnten Riegelwirkung führt die Bebauung im südwestlichen Bereich auf Grund verminderter Fließgeschwindigkeiten zu einem dortigen Stau der Kaltluft, wodurch der Abfluss und damit auch die maximal erreichbare Kaltluftschichtdicke im östlichen Verlauf großflächig um ca. 3 m reduziert wird. Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Klam_21 Simulationsprogramms auf Grundlage von offiziellen Landnutzungsklassifizierungen, Topographie und Bebauung durchgeführt. Hierbei wurden im vorliegenden Fall in Regensburg die Landnutzungsklassen vereinfacht (entsprechend der Standartvorgaben im Simulationsprogramm) aufgelöst, wodurch in den Ergebnissen zur Kaltluftproduktion / -höhe Unschärfen auftreten können. Diese Unschärfen hängen von der tatsächlichen Durchgrünung der in der Landnutzung definierten Siedlungsräume ab. Da im vorliegenden lokalen und weiteren Untersuchungsraum ein insgesamt hoher Grünanteil auf den Siedlungsflächen vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass die berechnete Einschränkung der Kaltluftausbreitung sowie der Kaltlufthöhen im umgesetzten Planungsfall geringer ausfallen werden. Dies trifft insbesondere für die berechneten Defiziträume entlang der Kleingärtensiedlung (zwischen Humboldtstraße und Johann-Hösl-Straße), dem östlichen Bereich der Humboldtstraße sowie dem östlichen Bereich an der Grundschule am Napoleonstein zu. Dennoch stellt die vorliegende Differenzbetrachtung eine wichtige Planungsinformation dar, mit deren Hilfe sensible Bereiche geschützt oder in ihrer Grünausstattung gefördert werden können.

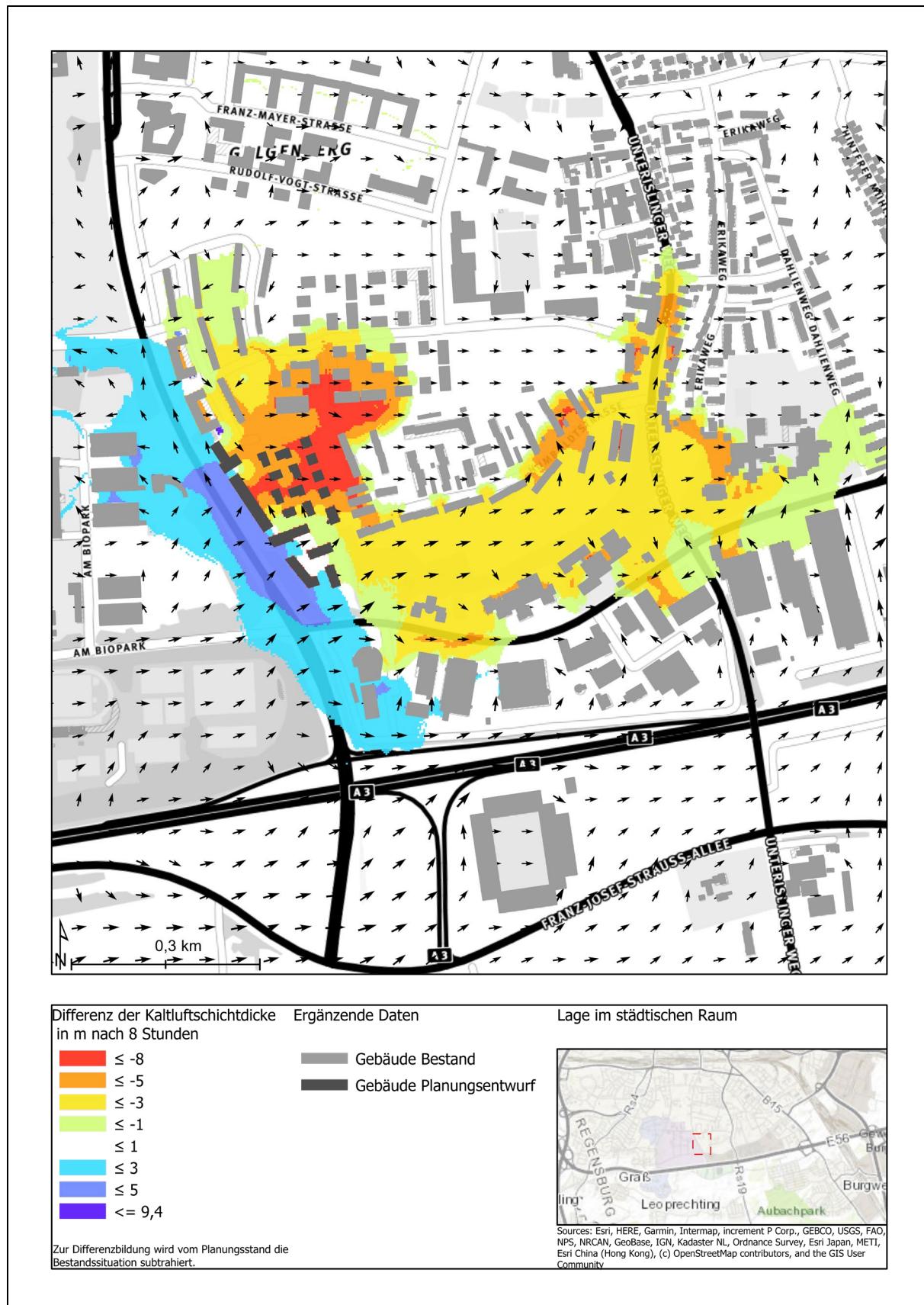


Abbildung 31 Differenz der Kaltluftschichtdicke nach 8 Stunden (zwischen Planung und Bestand)

VII.3 Durchlüftung am Tag – Differenz Planung zu Bestand

Die Betrachtung der Differenzberechnung zwischen dem aktuellen Bestands- und dem zukünftigen Planungsfall ist nur für die Bereiche außerhalb des Planungsraums relevant, da es sich beim Planungsraum selbst um eine aktuell unbebaute landwirtschaftliche Fläche handelt. Damit ist die Differenzberechnung für den Bereich des Planungsraums nur bedingt planungsrelevant. Vielmehr sollten für die lokale Betrachtung hier ergänzend die der Differenzberechnung zugrundeliegenden Ergebnisse der 3-dimensionalen Windfeldberechnung (siehe Kapitel VI.3) genutzt werden.

Für die Feststellung einer potentiellen Beeinflussung des weiteren Siedlungsraums können wiederum die in den Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten Differenzberechnungen (sowie die Gesamtbetrachtung des berechneten 3-dimensionalen Windfeldes) herangezogen werden. Hier wird deutlich, dass die Bebauung im Planungsfall nur lokale Auswirkungen auf die Durchlüftungssituation hat. An einzelnen Bereichen im Süden (Baufeld 6) kann es am Rande des Planungsraums zu einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit kommen. Gleichzeitig kann in einzelnen kleineren Bereichen eine teils minimale Abnahme ebenso wie eine minimale Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit festgestellt werden.

Die vorliegenden Karten zur Durchlüftung am Tag im Planungsfall (Abbildung 28 und Abbildung 29) sowie die vorliegende Differenzbetrachtung zur aktuellen Bestandssituation können als wichtige Informationen genutzt werden um das zukünftige Außenraumkonzept in Hinblick auf Nutzung und Aufenthalt zu optimieren.

Eine Beeinträchtigung der städtischen Durchlüftung am Tag durch die Bebauung der Fläche bei einer typischen Anströmung aus Südsüdost (siehe Kapitel I.3.1) kann nicht festgestellt werden.

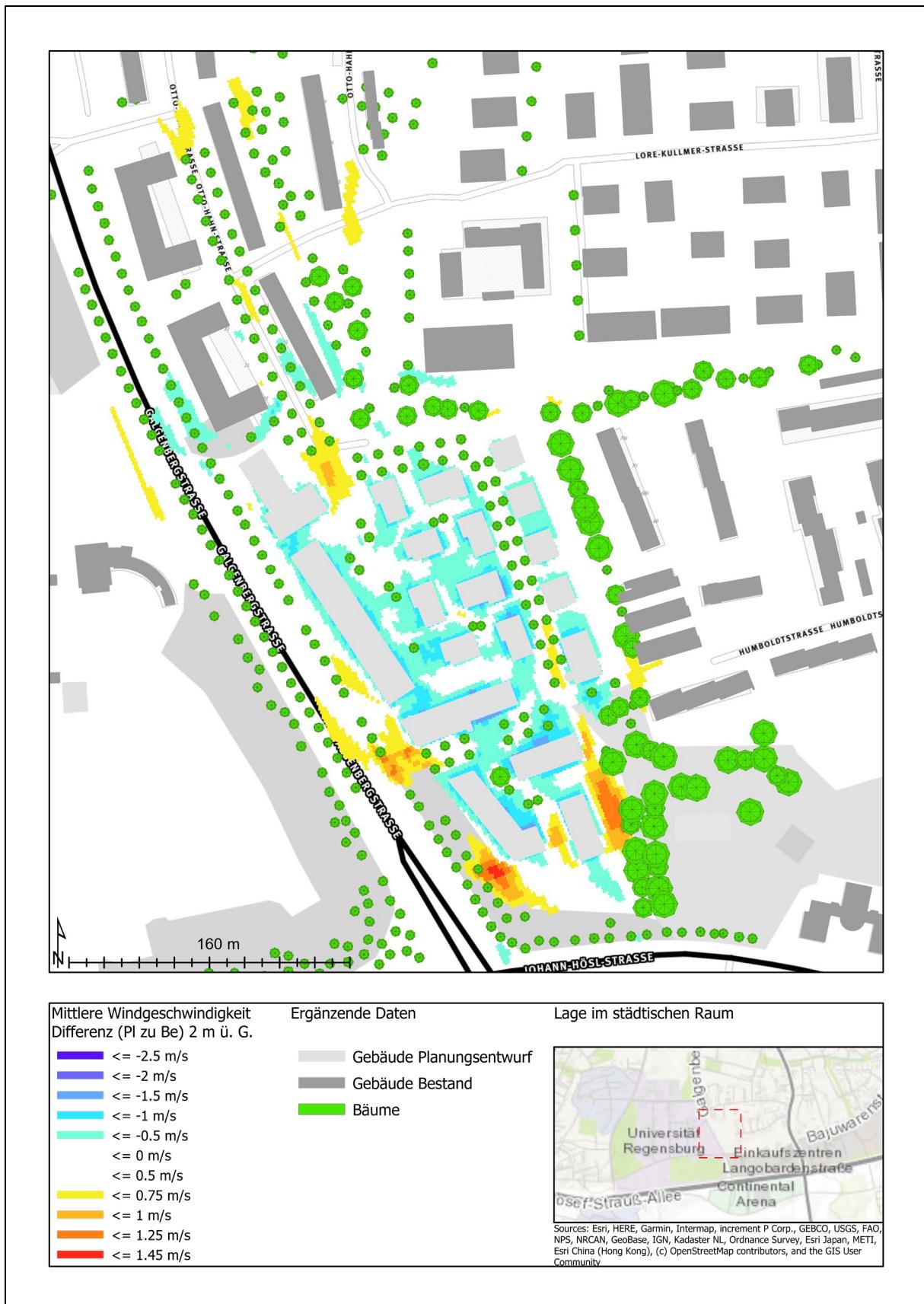


Abbildung 32 Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit auf 2 m über Grund (zwischen Planung und Bestand)

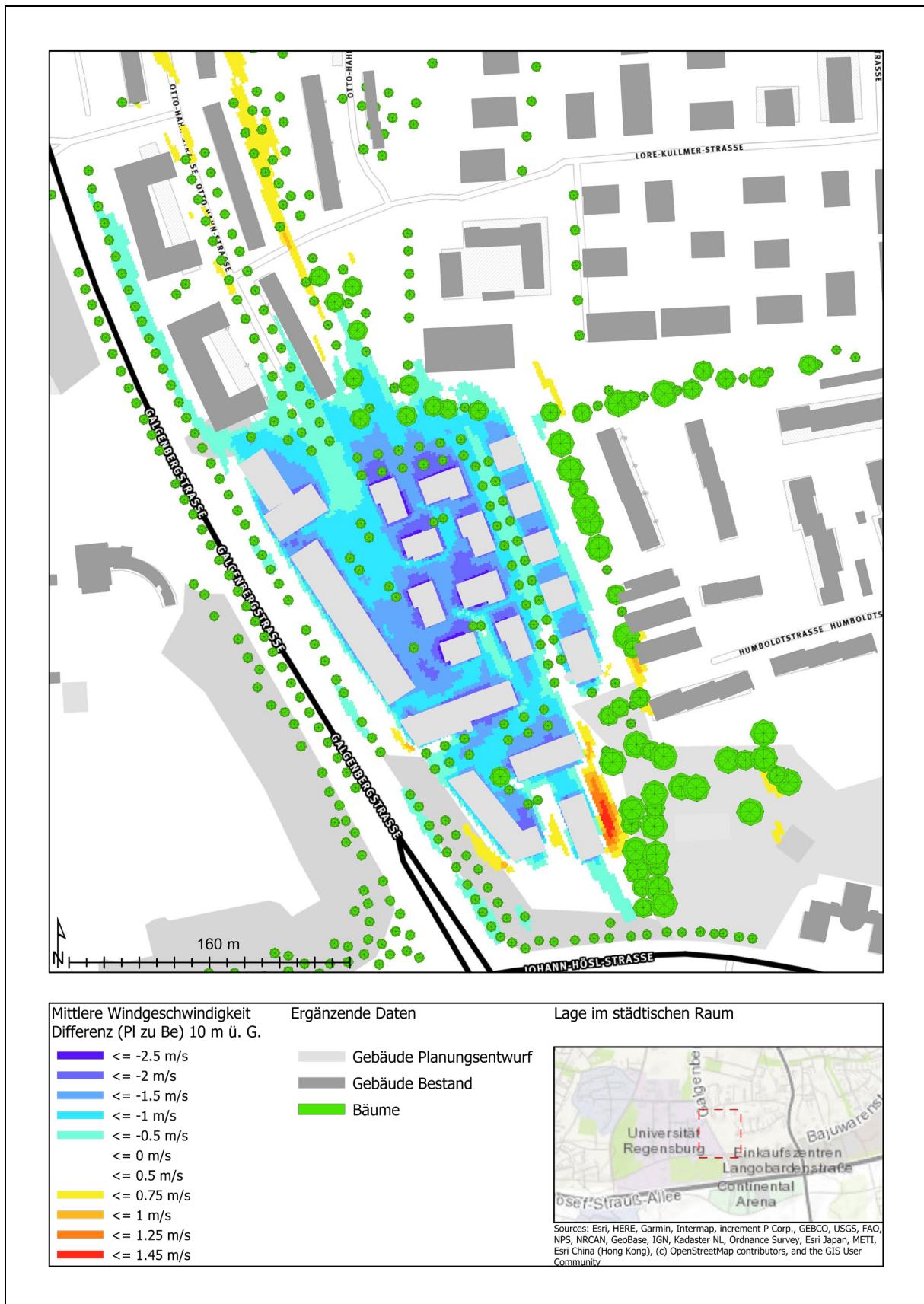


Abbildung 33 Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit auf 10 m über Grund (zwischen Planung und Bestand)

VIII. Gesamtbeurteilung und Maßnahmenvorschläge

Die Gesamtbeurteilung des Planungsfalls setzt sich aus der gemeinsamen Betrachtung der stadt- und mikroklimatisch relevanten Faktoren der solaren Einstrahlung, der Durchlüftung am Tag sowie der nächtlichen Kaltluftproduktion und des Kaltlufttransportes zusammen. Entsprechend der Ausgangssituation findet eine Transformation einer offenen Ackerfläche zu einer bebauten Siedlungsfläche mit Grünanlagen statt. Die Untersuchung der solaren Einstrahlung ist primär für die Flächen und die Gebäude im Planungsgebiet von Relevanz. Eine erhöhte Wärmespeicherung durch die Bebauung auf der Fläche ist gegeben, jedoch ohne ein damit verbundenes Risiko einer zusätzlichen Überwärmung der Siedlungsfläche (Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel), da diese in ihrer Struktur (inkl. Durchlüftung und Kaltluft) sowie Grünausstattung über ausreichend Ausgleichspotential verfügt. Über die Identifizierung von verschatteten und solar exponierten Arealen ergibt sich die Möglichkeit die Konzepte zur zukünftigen Nutzung der Außenflächen entsprechend der Analyseergebnisse planerisch anzupassen um so, auch in Kombination mit den Berechnungsergebnissen zum Durchlüftungspotential am Tag, die Aufenthaltsqualität im Außenraum zu maximieren.

Während die solare Einstrahlung nur von lokaler Bedeutung ist, zeichnet sich im Bereich der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransportes ein erweiterter Wirkungsbereich ab, der durch den Planungsfall beeinflusst wird. Über die Differenzbetrachtung (siehe Abbildung 31) lassen sich eindeutig Flächen lokalisieren, bei denen es zu einer Verringerung oder zu einer Erhöhung der Kaltluftschichtdicke kommt. Trotz der flächigen Ausdehnung kann nicht von einer großräumigen Betroffenheit mit Bedeutung für das Stadtgebiet insgesamt gesprochen werden. Dennoch werden geeignete Maßnahmen (siehe Kapitel 0) empfohlen, um ein hohes Maß an klimatischer Kompensation sicherzustellen. Dazu gehört auch ein hoher extensiver Gründachanteil (entsprechend der Vorgaben aus Kapitel VIII.1 & VIII.2) Es bleibt festzuhalten, dass das Simulationsprogramm nicht jede vorhandene Einzelstruktur im Modell abbilden kann (siehe Kapitel VII.2). Für den Untersuchungsraum bedeutet dies, dass die Reduzierung der Kaltluft nur bedingt stattfindet, da der großräumigere Siedlungsraum vor Ort insgesamt überdurchschnittlich stark durchgrün ist.

Im dritten Untersuchungsaspekt wurde die Durchlüftung am Tag bei einer gebietsdominanten Anströmung aus Südsüdost analysiert. Die Ergebnisse zeigen, wie bereits zuvor bei der Analyse der solaren Einstrahlung, die primär lokale Bedeutung der Durchlüftung im Planungsraum. Planerisch wird empfohlen, sofern es sich um Straßen mit zu erwartenden hohem Verkehrsaufkommen handelt, bei der Auswahl der zu verwendenden Gehölze auf den Habitus und Ausprägung der Krone im adulten Zustand zu achten, damit ein Kronenzusammenschluss (insbesondere bei orthogonal zur Anströmung angeordneter Bäumen) vermieden wird, da sonst das Risiko einer vertikalen Trennung der Luftschichten besteht und sich Luftschadstoffe im bodennahen Bereich akkumulieren können. Eine weiträumige negative Beeinflussung des umgebenden Siedlungsraums kann im Fall der Durchlüftung am Tag ausgeschlossen werden.

Unter klimatischen Gesichtspunkten stellt der Planungsfall eine anthropogene Beeinflussung des Planungsraums dar. Jedoch ist entsprechend der durchgeführten Analysen und Untersuchungen nicht von einem Vorhaben mit schwerwiegender klimatischer Beeinflussung zu sprechen. Unter Berücksichtigung der nachfolgenden Maßnahmenvorschläge können unter anderem die negativen Einflüsse auf die Kaltluftversorgung im Siedlungsraum planerisch

kompensiert werden, so dass die klimatischen Belange für den Planungsraum sowie für das Stadtgebiet ausreichend Berücksichtigung finden.

VIII.1 Liste potentieller Pflanzen für Dachbegrünung

Selektionskriterien: Hohe Wuchshöhe, erforderliche Substratdicke, Erscheinungsmerkmale (z.B. horstbildend, dicht wachsend, visuelle Blattdichte)

Bei den nachfolgenden Auflistungen handelt es sich um keine Pflanzplanung. Das heißt es fand keine Berücksichtigung von beispielsweise regionalem Vorkommen, Vergesellschaftung, Konkurrenzfähigkeit, Substratanforderungen, Blühphasen und Pflege statt. Bei extensiven Begrünungsarten ist generell eine Bestandsumbildung der Artenzusammensetzung beispielsweise durch fehlende/falsche Pflege (Sukzession, Nährstoffmangel, Wassermangel) und Witterungseinflüsse zu erwarten.

Mit Verweis auf die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): 2018 - Dachbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für Planung, Bau, Instandhaltung von Dachbegrünungen erfordert eine Pflanzplanung eine separate vorhabenbezogene Fachplanung zur Abstimmung von Arten, baulichen und vegetationstechnischen Voraussetzungen und der Pflege.

Hochwachsende Arten auf 10 cm Substratschicht

Geeignete Begrünungsart gemäß geforderter Aufbaudicke: Sedum-Moos-Kraut- bzw. max. Sedum-Kraut-Gras-Begrünung auf Extensivdach (vgl. Tab.3; FLL Dachbegrünungsrichtlinie 2018);

Bezüglich Blattmasse und Wuchshöhe wird eine Sedum-Kraut-Gras- Begrünung präferiert. Ggf. ist eine Prüfung, in Abhängigkeit der baustatischen Situation, auf die Möglichkeit einer einfachen Intensivbegrünung durchzuführen, da diese eine klimatisch höhere Leistungsfähigkeit und einen höheren Artenerhalt aufweist.

Zusätzlich wird die Einbringung flach wachsender, „Lücken“ schließender sowie trockenheitsangepasster Vegetationsformen wie Kräuter z.B. Thymian empfohlen. Die Auswahl der Arten basiert auf Ihrem Minimalanspruch bzgl. der Substratdicke. Daher kann eine spätere Bestandsumbildung (nach mehreren Jahren) nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 7 Hochwachsende Arten auf mind. 10 cm Substratschicht

Name	Max. ca. Wuchshöhe in cm	Blüte
Achillea millefolium	50	Weiβ
Anthemis tinctori	60	Gelb
Centaurea scabiosa	90	Violett
Corydalis lutea	40	Gelb
Euphorbia cyparissias	30	Gelb
Inula ensifolia	40	Gelb
Iris tectorum	45	Violett
Leucanthemum vulgare	60	Weiβ

<i>Sanguisorba minor</i>	40	Rot
<i>Thymus vulgaris</i>	40	Rosa
Gräser		
<i>Festuca cinerea</i>	60	
<i>Carex flacca</i>	60	
<i>Melica ciliata</i>	60	
<i>Stipa tenuissima</i>	70	
<i>Festuca valesiaca</i>	30	

Hochwachsende Arten auf 15 cm Substratschicht

Geeignete Begrünungsart gemäß der geforderter Aufbaudicke: Sedum-Kraut-Gras-Begrünung (Extensivbegrünung) oder max. Wildstauden-Gehölzbegrünung (einfache Intensivbegrünung) (Tab.3; FLL Dachbegrünungsrichtlinie 2018). Auch hier sollte ggf. eine Prüfung, in Abhängigkeit der baustatischen Situation, auf die Möglichkeit einer einfachen Intensivbegrünung durchgeführt werden, da diese eine klimatisch höhere Leistungsfähigkeit und einen höheren Artenerhalt aufweist.

Tabelle 8 Hochwachsende Arten auf mind. 15 cm Substratschicht (zzgl. Arten ab 10 cm)

Name	Max. ca. Wuchshöhe in cm	Blüte
<i>Campanula rotundifolia</i>	30	Blau
<i>Orgenaum vulgare</i>	40	rosa
<i>Verbascum nigrum</i>	100	gelb
Gräser		
<i>Festuca rubra commutata</i>	60	
<i>Briza media</i>	40	
<i>Bromus erectus</i>	60	
<i>Festuca amethystina</i>	60	

Tabelle 9 Gehölzarten für eine einfache Intensivbegrünung

Name	Max. ca. Wuchshöhe in cm	Blüte
<i>Caryopteris clandonensis</i>	100	blau
<i>Rosa nitida</i>	70	Rosa
<i>Salix hastata 'Wehrhahnii'</i>	60	Gelb
<i>Syringa meyeri „Palibin</i>	90	Violett
<i>Mahonia aquifolium 'sorte'</i>	120	gelb
<i>Syringa meyeri 'Palibin'</i>	150	violett

VIII.2 Räumlich verortete Maßnahmenvorschläge (die Zahlen beschreiben die Zuordnung in Abbildung 34)

Vorbemerkung: Da sich der Wirkbereich des Vorhabens über den Planungsraum hinaus erstreckt, wurden auch Maßnahmen außerhalb des eigentlichen Planungsraums formuliert.

Hierbei handelt es sich um flächenaufwertende / kompensatorische Maßnahmen, die aus klimatischer Sicht zu empfehlen sind.

- ① *Extensive Dachbegrünung (ohne externe Bewässerung) auf den Dachflächen, die keinen funktionellen Nutzen für die Bewohner (z.B. Dachterrassen) haben, mit einer Substratdicke zwischen 10 cm und 15 cm (in Abhängigkeit der baustatischen Eignung) zur Reduktion der baulichen Überwärmung durch Absorption solarer Einstrahlung am Tag. Der Anteil der hochwachsenden Pflanzen / Gräsern sollte sich im Bereich von 50 % bis 75 % liegen. Im Optimum > 75 %, um eine möglich hohe Verschattung der Dachflächen durch die Vegetationshöhe zu erreichen.*
- ② *Sicherstellung eines hohen Grünflächenanteils zur Förderung der schnellen nächtlichen Auskühlung der Flächen.*
- ③ *Bei der Auswahl von Gehölzen ist der Habitus (insbesondere Kronenform) im adulten Zustand zu Berücksichtigung, um einen Kronenzusammenschluss und das Risiko eines verminderter vertikalen Austausches von Luftmassen und der damit möglichen Akkumulierung von Luftschadstoffen im bodennahmen Raum zu vermeiden. Dieser Planungshinweis ist nur zu berücksichtigen, sollte am Tag mit einem hohen Durchgangsverkehr und entsprechend hohen Schadstoffemissionen zu rechnen sein.*
- ④ *Je nach konkreter Ausgangslage vor Ort sollte über kompensatorische Maßnahmen der Grünflächenanteil erhöht bzw. sichergestellt werden, sowie mögliche Strömungshindernisse entfernt werden.*
- ⑤ *(übergeordnete Empfehlung für die Stadtentwicklung) Dauerhafte Sicherung und Weiterentwicklung dieser Flächen als wichtige klimaaktive Areale der Kaltluftversorgung.*



Abbildung 34 Maßnahmenverortung

IX. Anlagen

IX.1 Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional	LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Abt.	Abteilung		
AG	Auftraggeber	Lapro	Landschaftsrahmenprogramm
AN	Auftragnehmer	LEP	Landesentwicklungsprogramm
B	Bundesstraße	LP	Landschaftsplan
BAB	Bundesautobahn	LRP	Landschaftsrahmenplan
BauGB	Baugesetzbuch	m	Meter
BauNVO	Baunutzungsverordnung	m^2	Quadratmeter
B-Plan	Bebauungsplan	m^3	Kubikmeter
bzw.	beziehungsweise	m ü. NHN	Meter über Normalhöhennull
cm	Zentimeter	NN	Normal-Null
CO ₂ -äq	Kohlenstoffdioxidäquivalent	NE	Nordost
d.h.	das heißt	PET	Physiological Equivalent Temperature
Esri	Environmental Systems Research Institute	ppm	parts per million
FLL	Forschungsgesellschaft, Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V.	PHK	Planungshinweiskarte
FNP	Flächennutzungsplan	PS	Planungsschwerpunkt
GALK	Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V.	RCP	Representative Concentration Pathways
GOP	Grünordnungsplan	RGBI	Rot Grün Blau Nahinfrarot
ha	Hektar	RP	Regionalplan
i.d.R.	in der Regel	SE	Südost
Inc.	Incorporated	SRES	Special Report on Emissions Scenarios
inkl.	inklusiv	UC	Urban Canopy
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	UCL	Urban Canopy Layer
i.R.	im Rahmen	UTC	Coordinated Universal Time
K	Kelvin	v.a.	vor allem
KFK	Klimafunktionskarte	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
km	Kilometer	W	Watt
km ²	Quadratkilometer		
L	Landstraße		

IX.2 Glossar

Absorption	wellenlängenabhängige Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, bei welcher Strahlungsenergie in Wärmeenergie überführt wird. Die Absorption von Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche ist Ursache für die unterste Heizschicht der Atmosphäre als Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungsvorgänge.
Aerosole	Aerosole sind (meteorologisch gesehen) Bestandteile von Beimengungen der Atmosphäre. Sie beteiligen sich wesentlich am luftchemischen Wirkungskomplex und spielen bei Strahlungsprozessen (Absorption, Streuung, Extinktion) eine wichtige Rolle.
Albedo	Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0,3 z.B. reflektiert 30 % der einfallenden Strahlung und absorbiert 70 %. Je heller die Oberfläche, desto größer ist ihre Albedo.
Allochthone Witterung	"fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung, die durch mehr oder weniger unperiodische Änderungen der Wetterelemente (kein ausgeprägter Tagesgang) gekennzeichnet ist.
Autochthone Witterung	"eigenbürtige", durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist.
Bergwind	weht abends, nachts und in der Frühe. Nachts kühlte sich die Luft im Gebirge stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt die Berghänge hinunter und weht zum Teil sehr kräftig durch die Täler hindurch.
Bioklima	Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus. Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden.
Calme***	nahezu windstille Gebiete (auch Kalme)
Emission*	die Abstrahlung oder Aussendung elektromagnetischer Wellen oder Teilchen als Strahlung, ebenso wie der Ausstoß fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in die Außenluft sowie in Wasser oder andere Umweltbereiche
Flurwind*	eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung
Globalstrahlung	die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und (diffuser) Himmelsstrahlung
Hangwind*	Wind, der unter dem Einfluss der Tageserwärmung an Berghängen entsteht und tagsüber bergaufwärts (Hangaufwind), nachts bergabwärts (Hangabwind) weht. Hangwinde sind in der Regel bei einer ruhigen Strahlungswetterlage besonders gut ausgebildet.
Heißer Tag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$ beträgt (früher auch Tropentag).

Hitzewelle	eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Eine Hitzewelle ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann.
Immission*	Einwirkung von unmittelbar oder mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursachte Emissionen auf die Umwelt. Zu den Immissionen gehören vorwiegend Luftverunreinigungen, Geräusche, Gerüche, Erschütterungen, Licht, Strahlen und Wärme.
Klimafaktoren	(auch klimatologische Wirkungsfaktoren) sind Faktoren, welche die Klimaelemente (Temperatur, Luftfeuchte usw.) und damit das Klima eines Ortes beeinflussen.
Kaltluftabfluss	der nächtliche Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt - trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltluftfluss	die in windschwachen, klaren Nächten hangabwärts strömende kalte Luft. Sie sammelt sich am Erdboden und ist dann schwerer als die wärmere Luft der Umgebung. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hängt von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes, das heißt, von der Größe des Gebietes, in dem Kaltluft produziert wird ab.
Kaltluftstau	die abriegelnde Wirkung eines Hindernisses auf einen Kaltluftfluss. Die Kaltluft kann sich sowohl vor orografischen Hindernissen (z.B. Hügelrücken) als auch vor künstlichen Hindernissen (z.B. Bauwerke, Dämme) stauen.
Klimamodell*	mathematisches Gleichungssystem welches das Klima bzw. dessen Änderungen simuliert. Als Variablen dienen physikalische und chemische Beziehungen.
Klimaprojektion	Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde unter Nutzung von Klimamodellen. Sind in der Lage alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre des Planeten, zu beschreiben. Mit ihnen können die beobachteten Änderungen des Klimas in der Erdgeschichte analysiert und nachvollzogen werden.
Kontinentalklima	Klima, welches charakteristisch für das Innere größerer Festlandsmassen ist. Im Allgemeinen ist das Kontinentalklima durch große jährliche und tägliche Schwankungsbereiche der Temperatur, eine geringe relative Feuchte sowie mäßigen oder geringen, unregelmäßig fallenden Niederschlag geprägt.
Lokalklima	Klima an einem konkreten Ort. Es ist eingebettet in das Regionalklima und wird zusätzlich durch Relief und Flächennutzung in der näheren Umgebung des Ortes bestimmt.
Makroklima	Klima, welches von großskaligen Prozessen geprägt ist
Maritimes Klima	Klima von Gebieten, die an die See bzw. das Meer angrenzen oder davon umgeben sind (auch ozeanisches Klima). Geringe Tages- und/oder Jahresgänge der Temperatur und hohe relative Luftfeuchte sind charakteristisch für das maritime Klima.
Mesoklima	Bereich, der zwischen dem Mikroklima und dem Makroklima liegt. Während das Makroklima hauptsächlich von großskaligen und das Mikroklima vor allem von kleinskaligen, lokalen Prozessen beeinflusst ist, ist es im Mesoklima eine Mischung von beiden. Damit umfassen die Skalen der mesoskaligen Phänomene etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000

	km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche. Geländeform, Hangneigung und Beschaffung der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter.
Mikroklima	mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftsichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist.
Rauigkeit***	(auch Rauheit) bezeichnet die Unebenheit von Oberflächen
Regionalklima	eng verwandt mit der Begrifflichkeit Mesoklima. Dabei sind Phänomene mit sehr ähnlichen Raum- und Zeitskalen gemeint, die durch sowohl groß- als auch kleinskalige Prozesse beeinflusst werden, aber auch von regionalen Gegebenheiten wie der Geländeform und der Landnutzung abhängen. Beim Regionalklima, im Gegensatz zum Mesoklima, wird deutlicher der Bezug zu natur- oder kulturräumlichen Klimabesonderheiten hergestellt.
Resilienz**	Die Leistungsfähigkeit eines Systems Störungen zu absorbieren, und sich in Phasen der Veränderung so neu zu organisieren, dass wesentliche Strukturen und Funktionen erhalten bleiben.
Retention**	Rückhaltevermögen von unterschiedlichen Oberflächen für flüssiges Wasser.
Sommertag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ beträgt
Städtische Wärmeinsel*^L	ein typisches Merkmal des Stadtklimas welches durch die Wechselwirkung mehrerer unterschiedlicher Effekte hervorgerufen wird. Durch die starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts werden die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer.
Strahlungsbilanz*	Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung einer Fläche. Insbesondere terrestrische und solare Strahlung sind dabei von Bedeutung.
Strahlungswetterlage*	eine Form des Hochdruckwetters mit geringer Bewölkung und höchstens mäßigen Winden
Synoptik	ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschaub die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht (Analyse oder Wetterlage).
Talwind	bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als über der Ebene. Dadurch steigt die Luft nach oben und der Luftdruck sinkt über dem Gebirge. Zum Ausgleich beginnt die Luft unterhalb der Gipfel von außen - also durch die Täler - ins Gebirge einzuströmen.
Tropennacht	eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ beträgt
Übergangsklima*	beschreibt den fließenden Übergang zwischen dem maritimen Klima und dem kontinentalen Klima. Das Übergangsklima kommt überwiegend in Europa vor. Daher ist der

	Westen dieses Klimas ozeanisch geprägt, während der Osten eher kontinental beeinflusst wird
Überwärmungsakkumulationseffekt*^L	während längeren Hitzeperioden kann die nächtliche Abkühlung die erhöhte tägliche Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht mehr kompensieren, d.h. auch die Minima der nächtlichen Temperaturen steigen an
Urban Canopy Layer	Atmosphärenenschicht zwischen Erdoberfläche und mittlerer Hausdachhöhe in der Stadt
Vulnerabilität**	der IPCC definiert Vulnerabilität als das Maß, zu dem eine Person, Region oder ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Dabei wird die Vulnerabilität bzw. Verwundbarkeit als eine Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungsfähigkeit verstanden.
Windstärke	anhand der Auswirkungen des Windes auf die Wasseroberfläche oder auf Objekte an Land geschätzter Stärkewert. In der international vereinbarten 13-teiligen Beaufort-Skala (0 = Windstille bis 12 = Orkan) sind jedem Stärkewert Windgeschwindigkeitsbereiche zugeordnet.
zyklonal	Drehsinn der Luftströmung um ein Gebiet tiefen Luftdrucks (Nordhalbkugel: gegen den Uhrzeigersinn, Südhalkugel: im Uhrzeigersinn) Außerdem die Bezeichnung für eine Wetterlage mit überwiegendem Tiefdruckeinfluss, welche zumeist durch wolken- und niederschlagsreiches Wettergeschehen gekennzeichnet ist.

Sofern nicht anders gekennzeichnet gilt als primäre Quelle das Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienst (DWD) (www.dwd.de/lexikon oder www.wetterlexikon.eu).

* Wetter-Lexikon von [wetter.net](http://www.wetter.net) - Q.met GmbH ([https://www.wetter.net/wetterlexikon](http://www.wetter.net/wetterlexikon))

** Lexikon der Nachhaltigkeit der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken ([https://www.nachhaltigkeit.info](http://www.nachhaltigkeit.info))

*** Duden - Bibliographisches Institut GmbH ([https://www.duden.de](http://www.duden.de))

*^L Environmental Sciences Europe – Kuttler 2011 (<http://www.enveurope.com>)

IX.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiedliche Planungsebenen mit entsprechender klimatischer Einordnung (Burghardt und Campe 2015)	1
Abbildung 2 Schematische Übersicht geografische Lage Stadt Würzburg (Quelle: Amt für Stadtentwicklung, Abt. Statistik)	3
Abbildung 3 Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur in Regensburg in °C	6
Abbildung 4 Monatliche Niederschlagshöhen in mm in Regensburg	7
Abbildung 5 Monatliche Sonnenscheindauer in Stunden in Regensburg	8
Abbildung 6 Entwurf Planungsstand 15.10.2019 (ASTOC, 2019)	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung unterschiedlicher temperaturrelevanter Faktoren und Effekte im urbanen Raum, die zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel beitragen (DWD 2017)	11
Abbildung 8: Vertikales Windprofil über der Innenstadt, dem Stadtrand und dem Freiland (Robel et al., 1978)	14
Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Zirkulation von Hang- sowie Berg- und Talwinden in Abhängigkeit zur Tageszeit (Liljequist und Cehak 1979)	15
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland Windsystems. Die wärmere "Stadtluft" steigt wegen ihrer geringeren Dichte auf während sich die kühlere "Landluft" absinkt. Durch diesen Luftdruckgegensatz resultiert ein Wind vom Land in die Stadt	15
Abbildung 11: Topografisch bedingtes Kaltluft-Abflussregime (Zenger 1998)	16
Abbildung 12: Beispiel für eine Hangbebauung mit talparalleler Riegelwirkung (VM BW 2012)	17
Abbildung 13: Beispiel für die Blockadewirkung eines Straßendamms (oben) und die Durchlässigkeit einer Brücke (unten) in Bezug auf einen Kaltluftstrom (VM BW 2012)	17
Abbildung 14: Solare Einstrahlung – schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Strahlungstypen (direkte, diffuse und reflektierte Strahlung)	18
Abbildung 15: Beispiel eines Vergleichs der Bestrahlungsstärke (W/m ²) bei diffuser und direkte Einstrahlung im Sommer (21.06.)	18
Abbildung 16 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat März	25
Abbildung 17 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat Juni	26
Abbildung 18 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat September	27
Abbildung 19 Solare Einstrahlung - Bestand - Referenzmonat Dezember	28
Abbildung 20 Kaltluftschichtdicke in Meter nach 8 Stunden für die Bestandssituation	30
Abbildung 21 Mittlere Windgeschwindigkeit im Bestand auf 2 m über Grund	32
Abbildung 22 Mittlere Windgeschwindigkeit im Bestand auf 10 m über Grund	33
Abbildung 23 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat März	35
Abbildung 24 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat Juni	36
Abbildung 25 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat September	37
Abbildung 26 Solare Einstrahlung im Planungsfall für den Referenzmonat Dezember	38
Abbildung 27 Kaltluftschichtdicke in Meter nach 8 Stunden für den Planungsfall	40
Abbildung 28 Mittlere Windgeschwindigkeit im Planungsfall auf 2 m über Grund	42
Abbildung 29 Mittlere Windgeschwindigkeit im Planungsfall auf 10 m über Grund	43
Abbildung 30 Differenz der solaren Einstrahlung im Referenzmonat Juni (zwischen Planung und Bestand)	45

Abbildung 31 Differenz der Kaltluftschichtdicke nach 8 Stunden (zwischen Planung und Bestand).....	47
Abbildung 32 Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit auf 2 m über Grund (zwischen Planung und Bestand).....	49
Abbildung 33 Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit auf 10 m über Grund (zwischen Planung und Bestand).....	50
Abbildung 34 Maßnahmenverortung	55

IX.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Lufttemperatur in Regensburg, 01.01.1947 - 02.09.2019.....	5
Tabelle 2 Niederschlagshöhen in Regensburg, 01.01.1947 - 02.09.2019.....	6
Tabelle 3 Sonnenscheindauer in Regensburg, 01.12.1947 - 02.09.2019.....	7
Tabelle 4: Beispiele für typische Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkung (rechte Spalte) im städtischen Raum	10
Tabelle 5: Zusammenstellung verschiedener Kaltluftentstehungsraten aus unterschiedlichen Studien in Abhängigkeit zur Art des Untergrunds	17
Tabelle 6: Simulationsparameter der durchgeführten Berechnungen.....	21
Tabelle 7 Hochwachsende Arten auf mind. 10 cm Substratschicht.....	52
Tabelle 8 Hochwachsende Arten auf mind. 15 cm Substratschicht (zzgl. Arten ab 10 cm).....	53
Tabelle 9 Gehölzarten für eine einfache Intensivbegrünung.....	53

IX.5 Literaturverzeichnis

BRÜNDL W., MAYER H., BAUMGARTNER A. 1986, Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten, Abschlussbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“

BURGHARDT, R. 2015, Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors, Kassel University Press

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2018, Download digitale Daten 02.09.2019, Online-Quelle URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm>

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), Informationsblatt: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21, - Stand 03/2016

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), Städtische Wärmeinsel, Online-Quelle URL: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html Abruf: 09/2017

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), Wetter und Klima vor Ort, Online-Quelle URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/bayern/regensburg/_node.html

DIMOUDI A. UND NIKOLOPOULOU M. 2003, Vegetation in the urban environment: Microclimatic Analysis and Benefits. Energy and Buildings, 35(1), 69-76

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V. (FLL): 2018 - Dachbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für Planung, Bau, Instandhaltung von Dachbegrünungen

GEONET 2002, GIS-basierte Aufbereitung der Modellergebnisse zur Kaltluftsimulation für die Nutzung im Rahmen der Landes- und Regionalplanung in Thüringen; Abschlussbericht

GEONET 2011, MORO Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel Leitfaden „Klimaökologie“, Baden-Baden

GROSS G. 1987, Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate: A numerical study; In: Boundary-Layer Meteorology; 28 (4); S. 315-337

HUPFER P. UND KUTTLER W. (Hrsg.) 1998, Witterung und Klima, Vieweg + Teubner Verlag

HUSSAIN M. UND LEE B.E. 1980, A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.6, Iss.3-4, p 207-225

KING E. 1973, Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten; Berichte des Deutschen Wetterdienstes 130; 17

Köppen, W., 1918: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). Petermanns Geogr. Mitt., 64, 193-203, 243-248.

KUTTLER W. 2011, Climate change in urban areas – part 1, Effects Environmental Sciences Europe 23

LANUV 2018, Fachbericht 86 – Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

LILJEQUIST G.H. UND CEHAK K. 1979, Allgemeine Meteorologie, Friedr. Vieweg & Sohn Verlags-gesellschaft mbH, Braunschweig

MATZARAKIS A., RÖCKEL R., RICHTER C-J., HÖFL. H-C., STEINICKE W., STREIFENEDER M., MAYER H., 2008, Planungs-relevante Bewertung des Stadtklimas am Beispiel von Freiburg im Breisgau, Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft 68, 334-340

MAYER H. 1992, Stadtklima und Lufthygiene, Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 4 „Stadtökologie“, 21-30

OKE, T.R. 1988, Street design and urban canopy layer climate, Energy and Buildings 1, 103-113

OKE, T.R. (Hrsg.) 2017, Urban Climates, Cambridge University Press

ROBEL F., HOFFMANN U., RIEKERT A., 1978, Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot Thermographie, Beiträge zur Stadtentwicklung Nr. 15, Landeshauptstadt Stuttgart

STADT REGENSBURG ABTEILUNG STATISTIK 2018, Online-Quelle URL: http://www.statistik.regensburg.de/allgemeine_daten/karten/stadtbezirke_005.html

STADT REGENSBURG ABTEILUNG STATISTIK 2019, Online-Quelle URL: http://www.statistik.regensburg.de/menue/informationen_u_zahlen.php

UNGER, J. UND GÁL, T. 2009, Detection of ventilation paths using high resolution roughness parameter mapping in large urban areas. Building and Environment 44, 198-206

VDI 2015, Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1

VDI 2003, Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5

VM BW (Hrsg.) 2012, Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg

ZENGER, A. 1998, Analyse und Bewertung von Kaltluftabflüssen. Nocturnal Drainage Flow Model NDFM