

ÖKOPLANA

KLIMAÖKOLOGIE
LUFTHYGIENE
UMWELTPLANUNG

**KLIMAGUTACHTEN ZUM BEBAUUNGSPLAN
„RHEIN-SELZ-PARK, II / RECHENZENTRUM“
IN NIERSTEIN**



Vorhabenträger:

NTT Global Data Centers FRA6 Campus GmbH
Voltastraße 15
65795 Hattersheim

Erstellt von ÖKOPLANA in Kooperation mit



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover

ÖKOPLANA
Seckenheimer Hauptstraße 98
D-68239 Mannheim
Telefon: 0621/474626 · Telefax 475277
E-Mail: info.oekoplana@t-online.de
www.oekoplana.de

Geschäftsinhaber:
Dipl.-Geogr. Achim Burst

Gemeinsam engagiert in der



Mannheim, 14. August 2024

Deutsche Bank Mannheim
IBAN:
DE73 6707 0024 0046 0600 00
BIC: DEUTDE33

Steuernummer: 37137/44979

Inhalt		Seite
1	Aufgabenstellung	1
2	Planungsgebiet und Planungsentwurf	3
3	Untersuchungsmethodik	13
4	Klimaökologische Situation am Planungsstandort und Folgen des Klimawandels	15
5	Numerische Modellrechnungen zum lokalen Klima- geschehen	28
5.1	Kaltluftprozessgeschehen – Ergebnisse für den Ist-Zustand und Plan-Zustand	33
5.2	Belüftungsverhältnisse am Tag – Ergebnisse für den Ist-Zustand und den Plan-Zustand	51
5.3	Thermische / bioklimatische Umgebungsbedingungen - Ergebnisse für den Ist-Zustand und Plan-Zustand (Nacht- und Tagsituation)	55
6	Zusammenfassung und Bewertung	64
7	Planungsempfehlungen	69
	Quellenverzeichnis / weiterführende Literatur	79

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Lage des Planungsgebiets „FRA6 Data Center Campus Nierstein“
- Abb. 2:** Luftbild vom Planungsgebiet „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“
- Abb. 3:** Topografische Lagesituation des Planungsgebiets „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“
- Abb. 4:** Lagesituation des Planungsgebiets „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“ Ausschnitt aus der TK 1:5.000
- Abb. 5:** Fotografische Dokumentation – Derzeitige Nutzungen im Planungsgebiet
- Abb. 6:** Fotografische Dokumentation – Blick auf das Planungsgebiet aus Norden bzw. Nordosten
- Abb. 7:** Regionaler Raumordnungsplan Rheinhessen-Nahe 2014
- Abb. 8:** Planungsentwurf zum geplanten „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“, Stand 02.08.2024
- Abb. 9:** Vorentwurf des Bebauungsplans „Rhein-Selz-Park, II / Rechenzentrum“, Stand: 13.08.2024
- Abb. 10:** Sommerliche Wärmebelastung in Rheinland-Pfalz im Durchschnitt der Jahre 2003 - 2022
- Abb. 11:** Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien
- Abb. 12:** Bandbreite der jährlichen Änderung der Lufttemperatur im Landkreis Mainz-Bingen
- Abb. 13:** Potenzielle Gebiete mit vermehrter Spätfrostgefährdung für Obst- und Weinbaukulturen
- Abb. 14:** Ausschnitt aus der Sturzflutkarte Rheinland-Pfalz. Potenzielle Fließgeschwindigkeiten des oberflächlich abfließenden Wassers bei einem extremen Starkregenereignis (124 – 136 mm in vier Stunden)
- Abb. 15:** Ausschnitt aus dem Windrosenatlas Rheinland-Pfalz
- Abb. 16:** Mittlere Tagesoberflächentemperaturen im Zeitraum 2018 - 2023
- Abb. 17:** Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen
- Abb. 18:** Flächennutzung im Modellgebiet – Ist-Zustand

- Abb. 19** Flächennutzung im Modellgebiet – Plan-Zustand
- Abb. 20:** Prinzipskizze Kaltluftvolumenstromdichte
- Abb. 21:** Ist-Zustand. Kaltluftfließgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 22:** Ist-Zustand. Ausbreitung der bodennahen Kaltluft (2 m ü.G.) in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 23:** Ist-Zustand. Nächtliche Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 24:** Ist-Zustand. Kaltluftvolumenstromdichte im Planungsgebiete und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 25:** Ist-Zustand. Kaltluftmächtigkeit im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Ergebnisse von Kaltluftabflusssimulationen mit dem Modell KLAM_21
- Abb. 26:** Plan-Zustand. Nächtliche Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht
- Abb. 27:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der nächtlichen Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht
- Abb. 28:** Plan-Zustand. Kaltluftfließgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 29:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der nächtlichen Kaltluftfließgeschwindigkeit 2 m ü.G. im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht
- Abb. 30:** Kennzeichnung von Bereichen mit Zunahme der Spätfrostgefahr für Weinreben
- Abb. 31:** Plan-Zustand. Kaltluftvolumenstromdichte und Richtung (2 m ü.G.) in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 32:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte relative Zu- bzw. Abnahme des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms. im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht

- Abb. 33:** Prüfschema „Kaltluftrelevanz“
- Abb. 34:** Ist-Zustand. Windgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G.
- Abb. 35:** Plan-Zustand. Windgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G.
- Abb. 36:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der Windgeschwindigkeit 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G.
- Abb. 37:** Ist-Zustand. Nächtliche Lufttemperaturverteilung (2 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 38:** Plan-Zustand. Nächtliche Lufttemperaturverteilung (2 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 39:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der Lufttemperatur 2 m ü.G. in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr)
- Abb. 40:** Ist-Zustand. PET-Werte (1.1 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr)
- Abb. 41:** Plan-Zustand. PET-Werte (1.1 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr)
- Abb. 42:** Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der bioklimatischen Belastung (PET-Werte) 1.1 m ü.G. an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr)
- Abb. 43:** Deckblatt der Broschüre „Wege zur Planung eines nachhaltigen Gewerbegebiets“
- Abb. 44:** Mögliche Handlungsfelder zur Gestaltung günstiger klimatischer Umgebungsbedingungen
- Abb. 45:** Beispielhafte Querschnittsdarstellung unterschiedlicher Fassadenbegrünungstypen
- Abb. 46:** Hellbezugswerte unterschiedlicher Grautöne und beispielhafter Pflastersteine

Abb. 47: Oberflächenstrahlungstemperaturen unterschiedlicher Oberflächenbeläge

Abb. 48: Beispielhaftes Wasserbecken, Brunnen mit kleinen Fontänen

1 Aufgabenstellung

In der Verbandsgemeinde Rhein-Selz plant das Unternehmen NTT GLOBAL DATA CENTERS FRA6 CAMPUS GMBH auf dem überwiegenden Teil des Areals der ehemaligen „Anderson Barracks Dexheim“ einen großflächigen Campus für Rechenzentren („Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“).

Die Lage des Planungsgebiets, das eine Flächengröße von ca. 59.9 ha aufweist, kann der **Abbildung 1** entnommen werden.

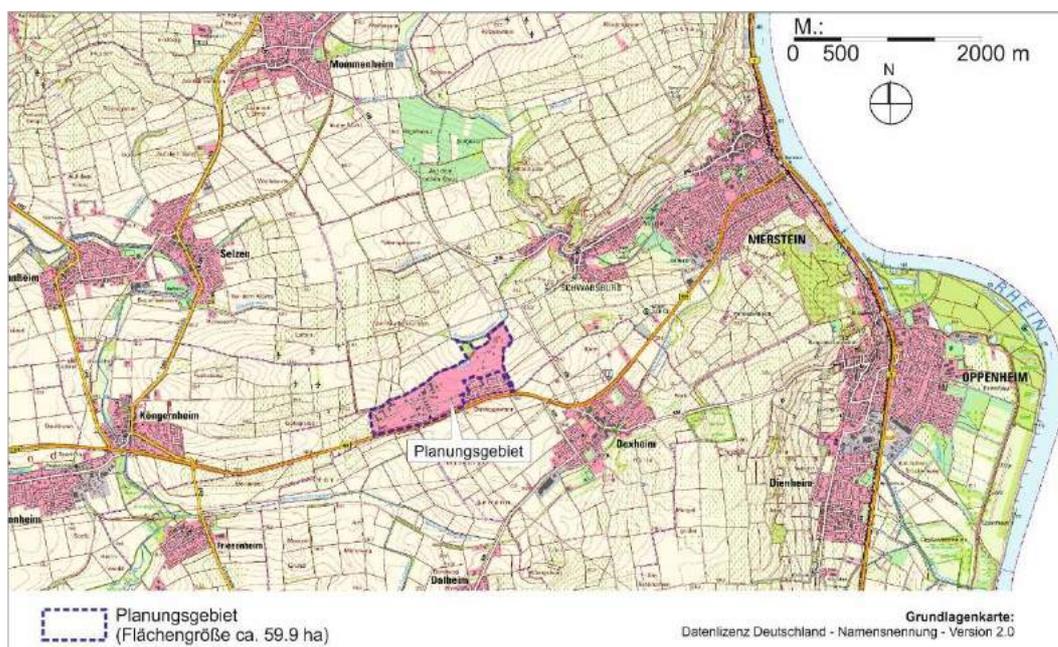


Abbildung 1: Lage des Planungsgebiets „FRA6 Data Center Campus Nierstein“

Laut vorliegendem Masterplanvorentwurf vom 02.08.2024 sollen auf dem ehemaligen Kasernenareal insgesamt zehn Rechenzentrumsgebäude mit zusätzlichen Büroflächen und Infrastruktureinrichtungen realisiert werden. Sie reihen sich entlang einer zentralen Grünzone von Westsüdwesten nach Ostnordosten auf. Die Erschließung des Geländes erfolgt über zwei Anschlüsse an die B 420.

Mit der geplanten Flächennutzungsänderung ist mit einer Veränderung des lokalen Kaltluftprozesschens im angrenzenden Freiraumgefüge zwischen den Ortslagen Dexheim, Nierstein/Schwabsburg im Osten und Friesenheim und Köngersheim im Westen zu rechnen. Des Weiteren werden durch die veränderten Baustrukturen die lokalen Belüftungsverhältnisse am Tag sowie die thermischen / bioklimatischen Umgebungsbedingungen modifiziert.

Im Rahmen des vorliegenden Klimagutachtens werden die ortsspezifischen klima-ökologischen Verhältnisse im Planungsgebiet und in dessen Umgebung analysiert und mögliche Klimamodifikationen durch den vorgelegten Planungsentwurf aufgezeigt.

Bei der Bewertung der lokalen Klimamodifikationen durch den geplanten „FRA6 Data Center Campus Nierstein“ sind die prognostizierten Klimawandelfolgen zu berücksichtigen. So zeigen beispielsweise Modellstudien für Rheinland-Pfalz (RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWANDEL FOLGEN 2020¹), dass u.a. die Häufigkeiten heißer Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) und von Tropennächten ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) in den nächsten Jahrzehnten deutlich zunehmen werden. Damit steigt auch die Anzahl von Hitzewellen².

Über die Formulierung von Planungshinweisen / Leitplanken zur baulichen Entwicklung im angestrebten Rechenzentrums-Campus werden Maßnahmen zur Sicherung günstiger strömungsdynamischer und thermischer / bioklimatischer Verhältnisse aufgezeigt.

¹ **RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWANDEL FOLGEN (2020)**: Themenheft Klimawandel – Entwicklung in der Zukunft. Trippstadt

² Laut Deutschem Wetterdienst liegt eine Hitzewelle vor, wenn an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen Lufttemperaturen von über 28°C gemessen werden – <https://www.dwd.de>

2 Planungsgebiet und Planungsentwurf

Das ca. 59.9 ha große Planungsgebiet „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“ befindet sich im Osten des Landschaftsraums rheinhessisches Tafel- und Hügelland.

Die Entfernung des geplanten Rechenzentrumcampus zur nächstgelegenen Siedlungslage Dexheim beträgt ca. 800 m (siehe **Abbildung 1**). Das Stadtgebiet von Nierstein befindet sich mit seinem Stadtteil Schwabsburg in einer nordöstlichen Entfernung von ca. 780 m. Die Abstände des Planungsgebiets zu den Ortslagen Friesenheim und Köngernheim im Südwesten bzw. Westen belaufen sich jeweils auf ca. 2.000 m.

Wie der **Abbildung 2** zu entnehmen ist, ist das Planungsgebiet in eine Agrar- und Weinbaulandschaft eingebettet, die als intensive Kaltluftproduktionsfläche zu definieren ist.

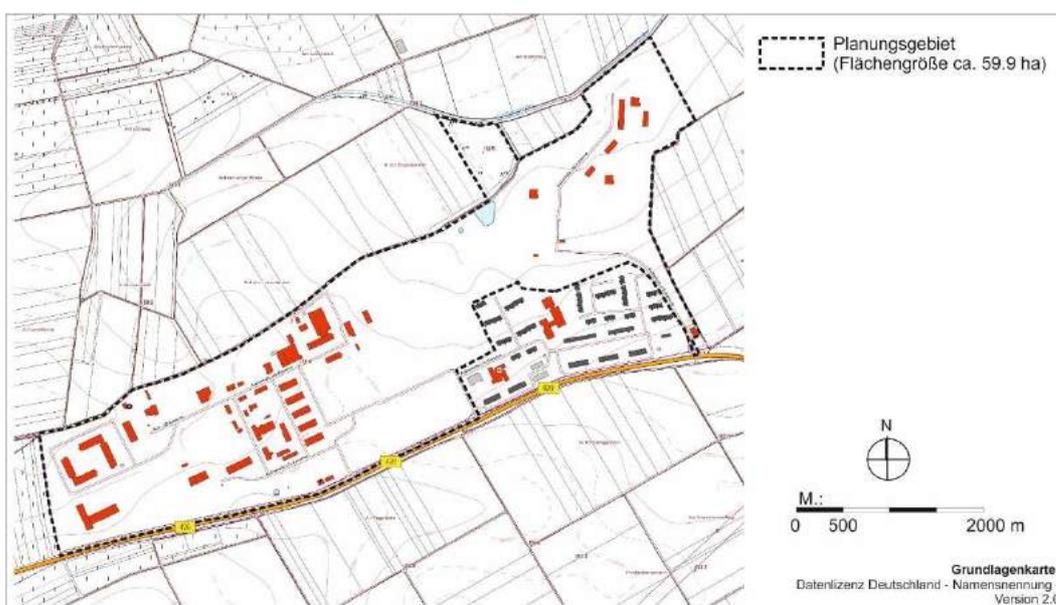
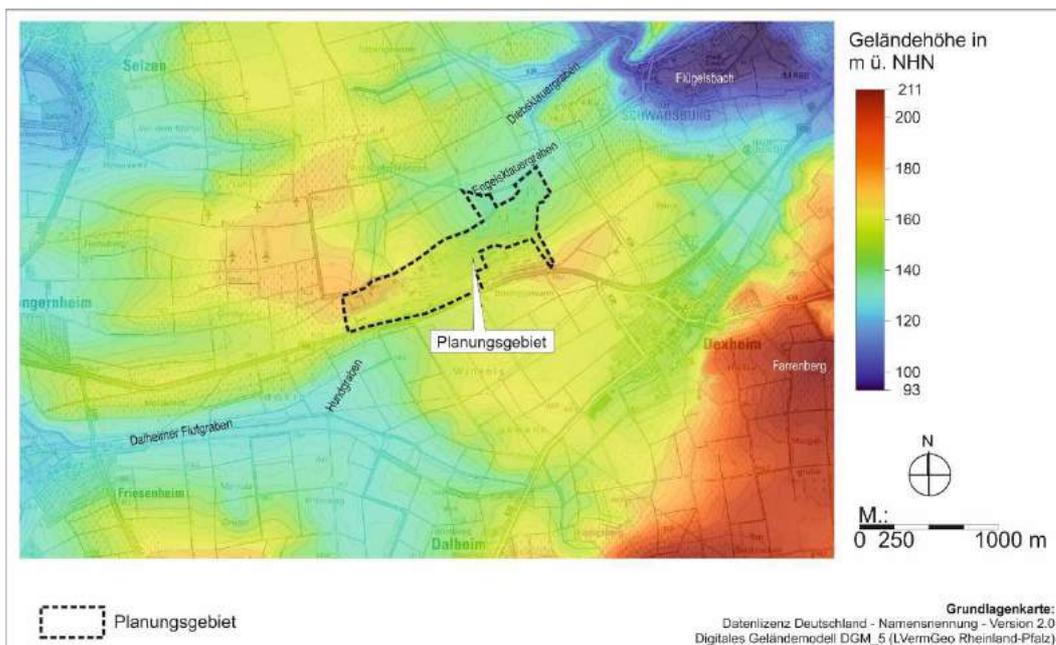


Abbildung 2: Luftbild vom Planungsgebiet „FRA6 Data Center Campus Nierstein“

Die Geländehöhen im Planungsumfeld bewegen sich zwischen ca. 208 m (Farrenberg östlich von Dexheim) und ca. 95 m ü. NHN (Schwabsburg) – **Abbildung 3**. Das Planungsgebiet nördlich der B 420 befindet sich in einer Höhenlage von ca. 173 m ü. NHN im Nordwesten und ca. 135 m ü. NHN im Nordosten. Entlang der B 420 steigt das Gelände von Südwesten nach Nordosten von ca. 158 m ü. NHN auf ca. 170 m ü. NHN an.

Im Südwesten fällt das Gelände in den Hundgraben bzw. Dalheimer Flutgraben ab. Im Nordosten schließt der Engelsklauergraben / Diebsklauergraben an das Planungsgebiet an. Beide Hangeinschnitte fungieren in Strahlungsnächten als lokale Kaltluftammel- bzw. Kaltluftabflussgebiete.

Die topografische Lagesituation des Planungsgebiets wird ergänzend auch durch die **Abbildung 4** ersichtlich.



Im Planungsgebiet bestehen größtenteils noch Baustrukturen der ehemaligen US-Kaserne „Anderson Barracks“ (siehe **Abbildungen 5** und **6**).

Im Westen dominieren 3-geschossige Kasernenbauten (Gebäudehöhen ca. 10 m) und Hallenkomplexe sowie großflächig versiegelte Stellplatzflächen. In zentraler Gebietslage besteht ein großzügiger Freiraum, der ehemals als Sportfläche (Rasenfläche) und als Stellplatzfläche (asphaltiert) genutzt wurde. Hier befindet sich auch der Verkehrsanschluss zur B 420. Im Südosten befinden sich Zeilenhäuser mit lockerer Durchgrünung. Dieses Areal ist nicht Bestandteil des Planungskonzepts. Im Nordosten gab es Bestrebungen eine Offroad-Strecke zu verwirklichen. Einzelne Fahrspuren sind im Gelände vorhanden. Des Weiteren befinden sich dort wenige Nebengebäude mit Höhen von ca. 4.5 – 6.0 m.



Abbildung 5: Fotografische Dokumentation – Derzeitige Nutzungen im Planungsgebiet. Luftbild: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Fotoaufnahmen: ÖKOPLANA



Abbildung 6: Fotografische Dokumentation – Blick auf das Planungsgebiet aus Norden bzw. Nordosten. Luftbild: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Fotoaufnahmen: ÖKOPLANA

Der Regionale Raumordnungsplan Rheinhessen-Nahe 2014 (**Abbildung 7**) weist das Planungsgebiet zum Großteil als Siedlungsfläche Industrie und Gewerbe aus. Im nördlichen Teilgebiet befindet sich ein Areal, das als sonstige Freifläche festgesetzt ist.

Das direkte Umfeld des Planungsgebietes ist als ein Vorranggebiet für die Landwirtschaft gekennzeichnet. Derartige Gebiete tragen zur nächtlichen Kaltluftbildung und zur Intensivierung der Gebietsdurchlüftung bei.

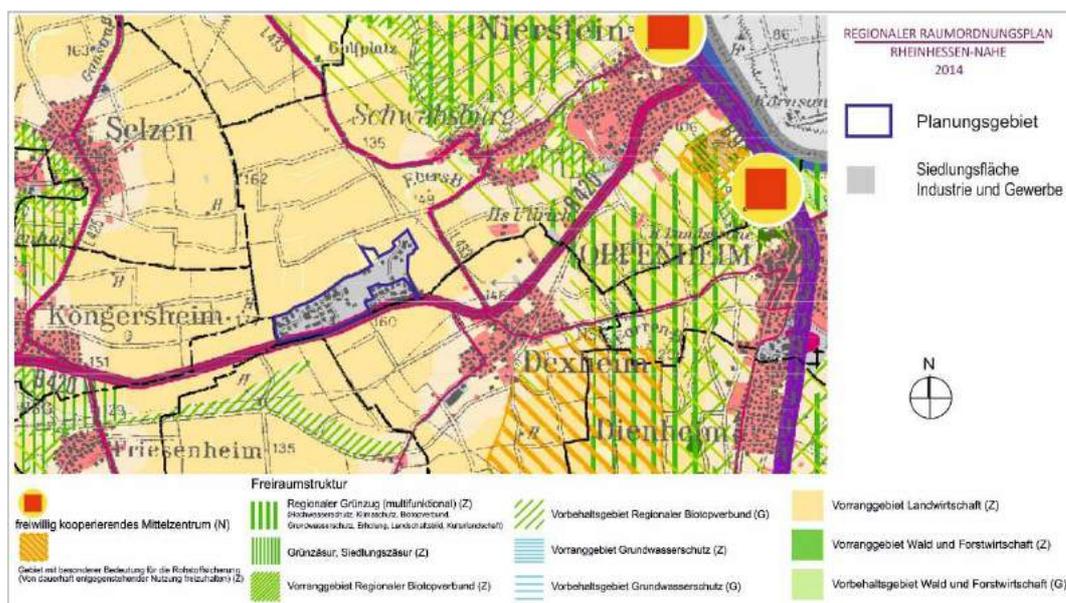


Abbildung 7: Regionaler Raumordnungsplan Rheinhessen-Nahe 2014.
Grafikquelle: PLANUNGSGEMEINSCHAFT RHEINHESSEN-NAHE (<https://www.pg-rheinhessen-nahe.de>)

Der vorgelegte Masterplan zur Flächenentwicklung im geplanten „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“ (**Abbildung 8**) zeigt eine beispielhafte Bebauung der Rechenzentrumsgebäude und das Begrünungskonzept. Diese können im Zuge des Planungsprozesses noch Modifikationen unterliegen.

Das aktuelle Bebauungskonzept zeigt insgesamt 10 Rechenzentrumsgebäude (Gebäude A – J). Sie zeigen Grundflächen von ca. 138 m x 57 m und werden durch bauliche Nebenanlagen (u.a. Bürogebäude) ergänzt. Eine Ausnahme bildet das Rechenzentrumsgebäude H, das eine Grundfläche von ca. 69 m x 57 m aufweist. Die max. Gebäudehöhen betragen ca. 29 m zzgl. 3 m für Technikaufbauten.

Die Erschließung der Rechenzentren erfolgt jeweils über Ringstraßen. Zusätzlich weist jedes Rechenzentrum ergänzende Infrastruktureinrichtungen auf (z.B. Andienungsflächen etc.). Die Rechenzentren sind aus Sicherheitsgründen eingezäunt.

Die Haupteinschließung des Gesamtgeländes, das teilweise mit Abstand zur Gebietsgrenze ebenfalls vollständig umzäunt ist, erfolgt im Bereich der heutigen Zufahrt an der B 420. Dort ist im Osten eine Sub-Station mit einer Grundfläche von ca. 12.600 m² geplant.

Im Osten ist ein ca. 3.1 ha großes Teilgebiet als möglicher „Innovation Campus“ vorgesehen. Hierzu gibt es noch keine Planung.

Im Norden reicht der Geltungsbereich des Planungsgebiets über das Kasernenareal hinaus. Auf einer ca. 2 ha großen Fläche sind dort Maßnahmen zur Regenwasserrückhaltung und zur Ökologie (Biotopverbund) angedacht.



Abbildung 8: Planungsentwurf zum geplanten „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“. Stand 02.08.2024. Grafik bereitgestellt von MCA ARCHITECTS.

Zur grünordnerischen Einbindung des „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“ in das Planungsumfeld sind neben dem „Central Park“, einer zentralen, trichterförmigen Freiraum- / Grünachse (Breite ca. 20 m bis ca. 80 m, Länge 560 m) an den Gebietsrändern begrünte Retentionsflächen und mehrere Habitatflächen geplant.

Die derzeit dort vorhandene Vegetation wird weitestgehend erhalten.

Der Vorentwurf für den Bebauungsplan „Rhein-Selz-Park, II / Rechenzentrum“ (siehe **Abbildung 9**) weist das Planungsgebiet als Sondergebiet (SO) aus. Für die Rechenzentren sind, entsprechend des Masterplans, zehn Baufelder gekennzeichnet. In diesen Bereichen sind max. Gebäudehöhen von 29 m zzgl. 3 m für Lärm- / Sichtschutzwänden und Technikaufbauten festgesetzt. Für Nebengebäude sind max. Gebäudehöhen von 16 m geplant.

Die genauen Bezugspunkte und Höhen für die Oberkanten der Baufelder können **Tabelle 1** entnommen werden.

	BF-A	BF-B	BF-C	BF-D	BF-E
BP	160,0 m	160,0 m	168,0 m	161,5 m	158,5 m
OK-Z	29,0 m				
OK-N	16,0 m				

	BF-F	BF-G	BG-H	BF-I	BF-J	Substation
BP	152,0 m	156,0 m	154,5 m	147,0 m	142,0 m	—
OK-Z	29,0 m	—				
OK-N	16,0 m					

Tabelle 1: Bezugspunkte und Höhen der Oberkante für die Baufelder. Tabelle bereitgestellt von Stadt.Quartier.

Die festgesetzten Höhen der Oberkanten dürfen durch Abluftkamine überschritten werden.

Auf den Rechenzentren befinden wärmeemittierende Rückkühler. Sie stoßen in der Regel Warmluft mit einer Temperatur von 25 – 30°C mit einer Geschwindigkeit von ca. 8 – 10 m/s aus. An heißen Tagen muss mit höheren Luftaustrittstemperaturen (bis über 50°C) gerechnet werden.

Im Sondergebiet wird für die Substation sowie die Baufelder BF-A bis BF-J die Grundfläche (GR) jeweils als Höchstmaß, wie in **Tabelle 2** dokumentiert, festgesetzt.

	BF-A	BF-B	BF-C	BF-D	BF-E
GR max.	27.200 m ²	25.600 m ²	26.200 m ²	28.700 m ²	27.700 m ²

	BF-F	BF-G	BG-H	BF-I	BF-J	Substation
GR max.	28.300 m ²	27.100 m ²	14.700 m ²	29.000 m ²	28.000 m ²	11.600 m ²

Tabelle 2: Höchstmaße der Grundflächen für die Baufelder. Tabelle bereitgestellt von Stadt.Quartier

Zur Eingrünung des Geländes und zur Sicherung einer ausreichenden Versickerungsfähigkeit der Böden legt der Bebauungsplan-Vorentwurf Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Grünstrukturen und des Bodens fest.

So ist je fünf Kfz-Stellplätze zwischen den Stellplätzen oder unmittelbar an diese angrenzend ein großkroniger Laubbaum gemäß einer beigefügten Pflanzliste anzupflanzen. Erschließungswege, Wege und Plätze, die nicht regelmäßig mit Kraftfahrzeugen befahren werden sowie ebenerdige Stellplätze sind in wasserdurchlässiger Bauweise und versickerungsfähigem Unterbau herzustellen. Ausgenommen davon sind befestigte Aufstellflächen für die Feuerwehr.

Außerdem sind als Maßnahme zur Reduktion bioklimatischer Belastungen die Farbgebung der Gebäudefassaden und Oberflächenbefestigungen vorgegeben. Demnach sind Materialien und Farbtöne mit geringer Wärmespeicherung zu verwenden, bei welchen der L-Wert des RAL Design Systems mindestens 50 oder heller ist.

3 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen des vorliegenden Klimagutachtens erfolgt zur Beurteilung der lokal-klimatischen Situation und zur Erarbeitung klimatisch relevanter Planungsempfehlungen zunächst eine Bestandsaufnahme der ortsspezifischen klimaökologischen Funktionsabläufe. Hierbei wird u.a. auf Klimadaten des LANDESAMTES FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ zurückgegriffen. Des Weiteren werden Daten zu den lokalen Klimawandelfolgen ausgewertet.

In einem weiteren Schritt werden mit Hilfe des seit vielen Jahren im Gutachtensektor eingesetzten und vielfach geprüften Klimamodells FITNAH 3D (GROSS, G. 1992, 2017³) für den Ist- und Plan-Zustand numerische Modellsimulationen durchgeführt. Als Plan-Zustand wird dabei eine „maximale“ Bebauung angenommen. D.h., dass bei den Modellrechnungen die einzelnen Baufelder mit ihren max. Gebäudehöhen als vollständig bebaut in die Simulationen eingehen.

Schwerpunkte der Modellrechnungen sind das lokale Kaltluftprozessgeschehen, das örtlich von besonderer siedlungs-/geländeklimatischer Bedeutung ist und die thermischen / bioklimatischen Umgebungsbedingungen. Zudem erfolgt eine Bilanzierung der kleinräumigen Belüftungsverhältnisse.

Das Grundgerüst des Modells FITNAH 3D besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird. Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Flächennutzungsstrukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH 3D besondere Parametrisierungen vorgesehen.

³ **GROSS, G. (1992):** Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.

GROSS, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, Journal of Heat Island Institute International Vol. 12-2

Ein Wald oder Baumbestand findet beispielsweise über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren.

Unter Berücksichtigung bebauungsspezifischer Größen wie Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der bebauungsbedingten Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden.

FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3783, Bl.7 (VDI 2017) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass eine Prognose zur Auswirkung von geplanten Flächennutzungsänderungen nur durch den Einsatz numerischer Modelle möglich ist. Messungen helfen bei dieser Problemstellung nicht weiter, da nur existierende atmosphärische Zustände instrumentell erfassbar sind. Modellrechnungen gestatten es dagegen, schon im Planungsstadium vorgesehener Nutzungsänderungen mögliche unerwünschte oder gar negative Klimaveränderungen zu erkennen.

Abschließend wird ein Katalog mit klimaökologisch positiv wirksamen Planungshinweisen bereitgestellt, der die Gestaltung eines klimawandelgerechten Gewerbegebiets unterstützen kann.

4 Klimaökologische Situation am Planungsstandort und Folgen des Klimawandels

Die Verbandsgemeinde Rhein-Selz befindet sich mit seiner Lage in den östlichen Randhöhen des Rheinhessischen Tafel- und Hügellands in der warmgemäßigten, feuchten Westwindzone. Das Klima wird überwiegend von milden, feuchten und damit wolkenreichen Luftmassen geprägt, die mit den am häufigsten vorkommenden Südwest- bis Westwinden herangeführt werden.

Die Jahressumme des Niederschlags beläuft sich im Landkreis Mainz-Bingen mit der Stadt Nierstein und der Ortslage Dexheim im 30-jährigen Mittel (1971 - 2000) auf ca. 572 mm (GERICS⁴ 2021), wobei der Monat Juni die größte Niederschlagshöhe (ca. 64 mm) aufweist. In diesem Monat kommt es durch hohe Einstrahlungsintensität und der daraus folgenden Konvektion mit Wolkenbildung verstärkt zu Schauern und Gewittern. Die geringsten Niederschläge treten mit einer monatlichen Niederschlagsmenge von durchschnittlich ca. 34 mm im Februar auf.

An der agrarmeteorologischen Klimamessstation Selzen (123 m ü. NHN), ca. 3.7 km nordwestlich des Planungsgebiets „FRA6 Data Center Campus Nierstein“, wurde zwischen den Jahren 2014 und 2023 im Jahresdurchschnitt eine Niederschlagshöhe von 529 mm gemessen (<https://www.dlr.rlp.de>).

Die Jahresmitteltemperatur beträgt im Landkreis Mainz-Bingen im mehrjährigen Mittel ca. 9.9°C (1971 – 2000). Die Julitemperaturen erreichen Durchschnittswerte um 18.9°C, die minimalen Durchschnittswerte werden mit 1.4°C im Januar gemessen. An der agrarmeteorologischen Klimamessstation Selzen wird zwischen den Jahren 2014 und 2023 eine Jahresdurchschnittstemperatur von 11.1°C erfasst. Die sommerlichen Temperaturmaxima liegen dabei zwischen 34.0 und 39.3°C, was auf die allgemein hohe sommerliche Wärmebelastung im Planungsgebiet hinweist (siehe auch **Abbildung 10**).

⁴ **GERICS** = Climate Service Center Germany mit Sitz in Hamburg
https://gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/index.php.de

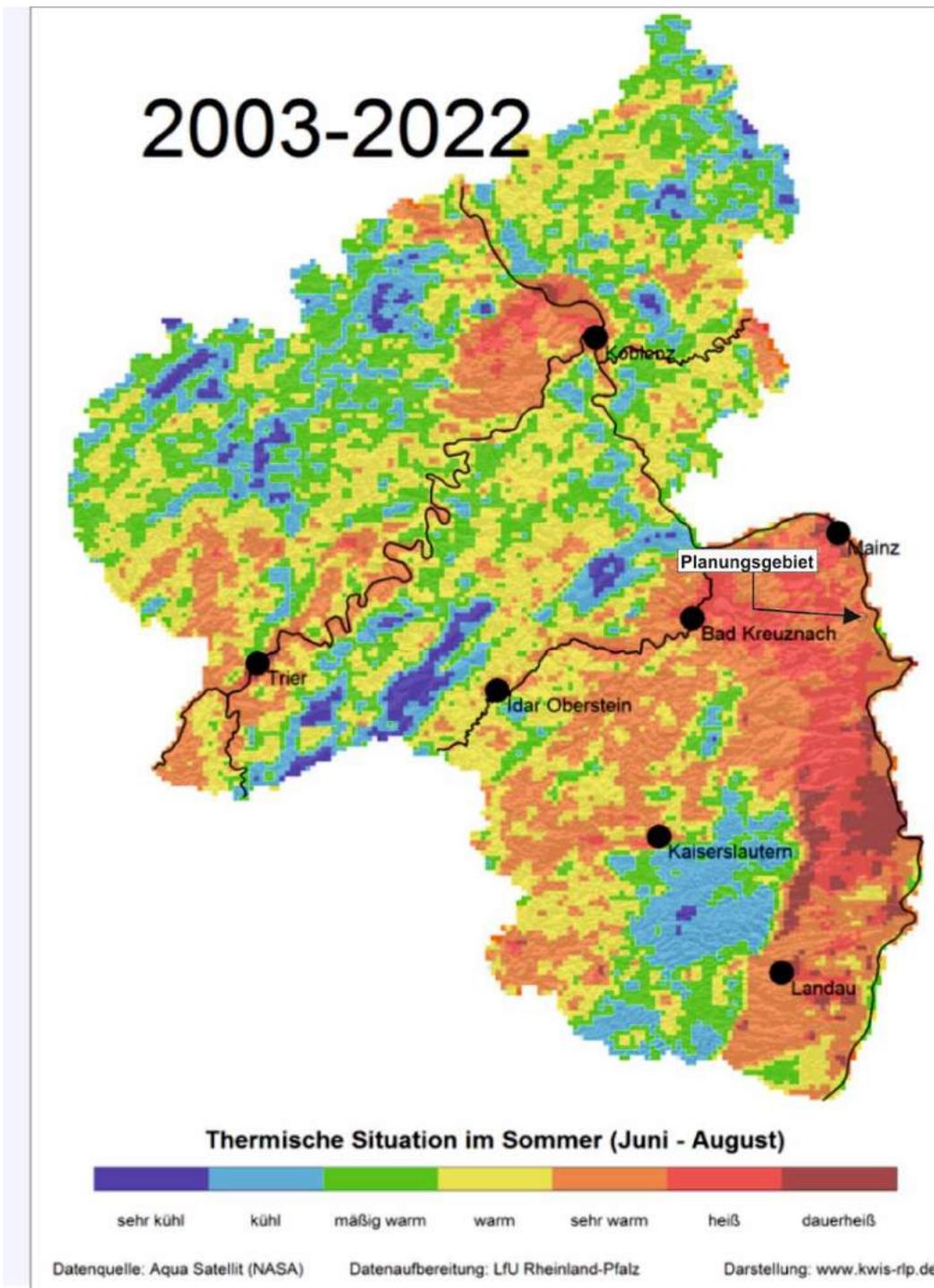


Abbildung 10: Sommerliche Wärmebelastung in Rheinland-Pfalz im Durchschnitt der Jahre 2003 - 2022

Laut Statistik von GERICS sind im Landkreis Mainz-Bingen im 30-jährigen Mittel (1971 – 2000)

- 13.4 Eistage/Jahr ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$)
- 63.6 Frosttage/Jahr ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$)
- 8.3 heiße Tage/Jahr ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)
- 41.5 Sommertage/Jahr ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$)
- 0.3 Tropennächte/Jahr ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$)

pro Jahr zu registrieren.

An der agrarmeteorologischen Klimamessstation Selzen werden im Durchschnitt der Jahre 2014 – 2023 4 Eistage, 67 Frosttage, 19 heiße Tage und 67 Sommertage registriert. Die hohe Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen belegt ebenfalls die allgemein hohe thermische Belastung im Planungsgebiet und in dessen Umfeld.

Im Zuge des globalen Klimawandels wird die sommerliche Wärmebelastung deutlich zunehmen. Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO_2 -Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO_2 -Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO_2 -Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*).

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m^2 , der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (MOSS ET AL. 2010⁵; **Abbildung 11**):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. $3 \text{ W}/\text{m}^2$. Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 \text{ W}/\text{m}^2$ ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2°C -Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.

⁵ MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARD K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VAN VUUREN D. P., CARTER T. R., EMORI S., KAI-NUMA M., KRAM T., MEEHL G. A., MITCHELL J. F. B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S. J., STOUFFER R. J., THOMSON A. M., WEYANT J. P., WILBANKS T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.

- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. In den letzten Dekaden befanden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (BODEN ET AL. 2017⁶). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Für die Einschätzung zukünftiger Klimarisiken wird das RCP 8.5 als geeignetes Szenario angesehen. Aus diesem Grund und im Sinne des Vorsorgegedankens werden im vorliegenden Pre-Check die Daten des RCP-Szenarios 8.5 verwendet.

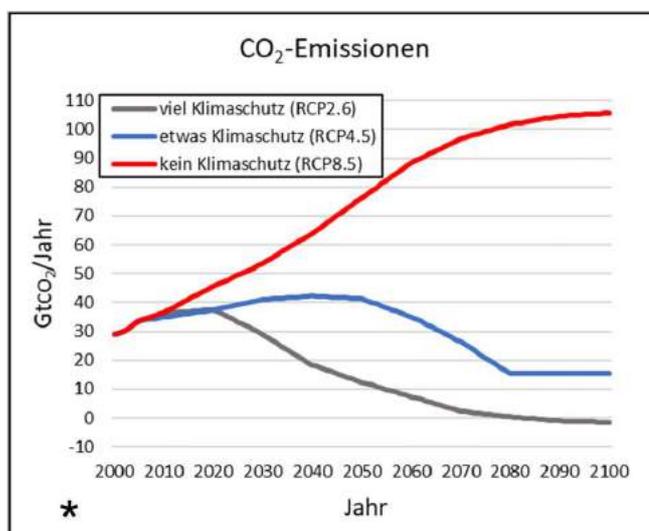


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (nach CUBASCH ET AL. 2013⁷, Grafik: GERICS 2021)

⁶ BODEN T.A., MARLAND G., ANDRES R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

⁷ CUBASCH U ETAL. (2013): Introduction. In: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nach Berechnungen von GERICS (2021) wird im Landkreis Mainz-Bingen die mittlere Jahresmitteltemperatur bei Berücksichtigung des Antriebsszenarios RCP 8.5 im Zeitraum 2036 – 2065 (= nahe Zukunft) gegenüber der Zeitspanne 1971 – 2000 um ca. 1.2 - 3.0 K ansteigen (**Abbildung 12**).

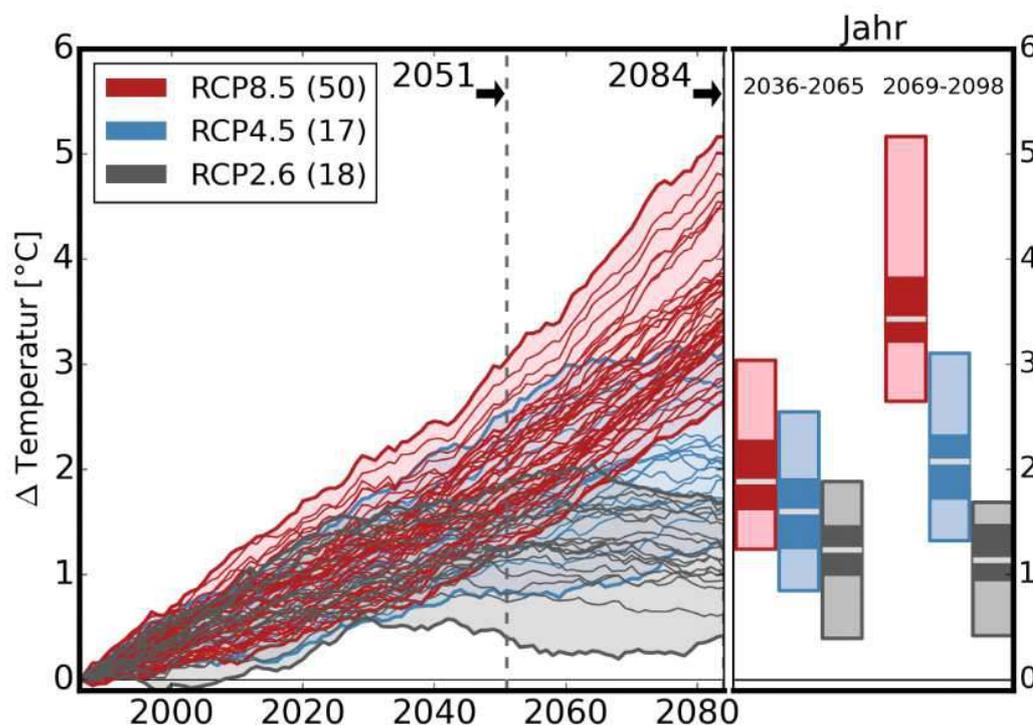


Abbildung 12: Bandbreite der jährlichen Änderung der Lufttemperatur im Landkreis Mainz-Bingen. Grafik aus: GERICS (2021)

Die Anzahl der bioklimatisch besonders relevanten heißen Tage und Sommertage wird sich um bis zu max. 29.9 Tage/Jahr bzw. um bis zu max. 44.9 Tage/Jahr erhöhen. Da zugleich die Anzahl der Tropennächte um bis zu 22.1 Tage/Jahr zunimmt, steigt ebenfalls die Wahrscheinlichkeit lang anhaltender Hitzewellen. Die erhöhte Wärmebelastung führt insbesondere bei alten und kranken Menschen sowie Kleinkindern zu gesundheitsgefährdendem Hitzestress. Die zunehmende Hitzebelastung mindert auch die Produktivität am Arbeitsplatz.

Durch die o.a. thermisch wirksamen Klimawandelfolgen wird die Sicherstellung günstiger thermischer Umgebungsverhältnisse auch in Gewerbegebieten zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen.

Im Planungsumfeld wird Weinbau betrieben. Daher sind auch die planungsbedingten Folgen auf die Spätfrostgefährdung zu betrachten.

Wie der **Abbildung 13** zu entnehmen ist, wird der Weinbau aktuell größtenteils außerhalb von Hangeinschnitten / Tiefenlinien betrieben, die eine vermehrte Spätfrosthäufigkeit aufweisen. Kommt es planungsbedingt zu Reduktionen der Kaltluftfließgeschwindigkeiten, können sich die spätfrostgefährdeten Bereiche u.U. räumlich ausdehnen.



Abbildung 13: Potenzielle Gebiete mit vermehrter Spätfrostgefährdung für Obst- und Weinbaukulturen. Datenquelle: <https://geobox-i.de/GBV-RLP-Wein/>.
Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 / AgroScience Rheinland-Pfalz

Klimawandelbedingt sinkt laut GERICS (2021) zwar die Anzahl der Spätfrosttage zwischen April und Mai im Landkreis Mainz-Bingen im Zeitraum 2036 – 2065 gegenüber dem Zeitraum 1971 -2000 um ca. 2.0 Tage/Jahr, da sich der Blühbeginn bei den Reben jedoch verfrüht, ist mit keiner Abnahme der Schadhäufigkeit durch Spätfrost zu rechnen. In den zum Planungsgebiet nahegelegenen Rebanlagen sollte demnach, wie bereist o.a., in Senken, Mulden oder am Hangfuß des Weinbergs (Kaltluftsammlbereiche) eine zunehmende nächtliche Windruhe vermieden werden, da Spätfrost in der Regel insbesondere in nächtlichen Windstagnationsbereichen auftreten.

Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (≥ 20 mm/Tag) wird nach GERICS (2021) im Landkreis Mainz-Bingen von 2.1 Tage/Jahr (1971 – 2000) auf bis zu ca. 4.0 Tage/Jahr (2036 – 2065) zunehmen.

Wie der nachfolgende Ausschnitt aus der Sturzflutkarte Rheinland-Pfalz des LANDESAMTS FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION RHEINLAND-PFALZ zeigt (**Abbildung 14**), bildet das Planungsgebiet bei Starkregenereignissen einen Teil des Einzugsgebietes für Sturzfluten, die im Südwesten in Richtung Hundgraben bzw. Dalheimer Flutgraben (Fließrichtung Friesenheim) und im Norden bzw. Nordosten in Richtung Engelsklauergraben / Diebsklauergraben (Fließrichtung Schwabsburg) gerichtet sind.

Bei Neubaumaßnahmen sind daher ausreichende Retentionsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

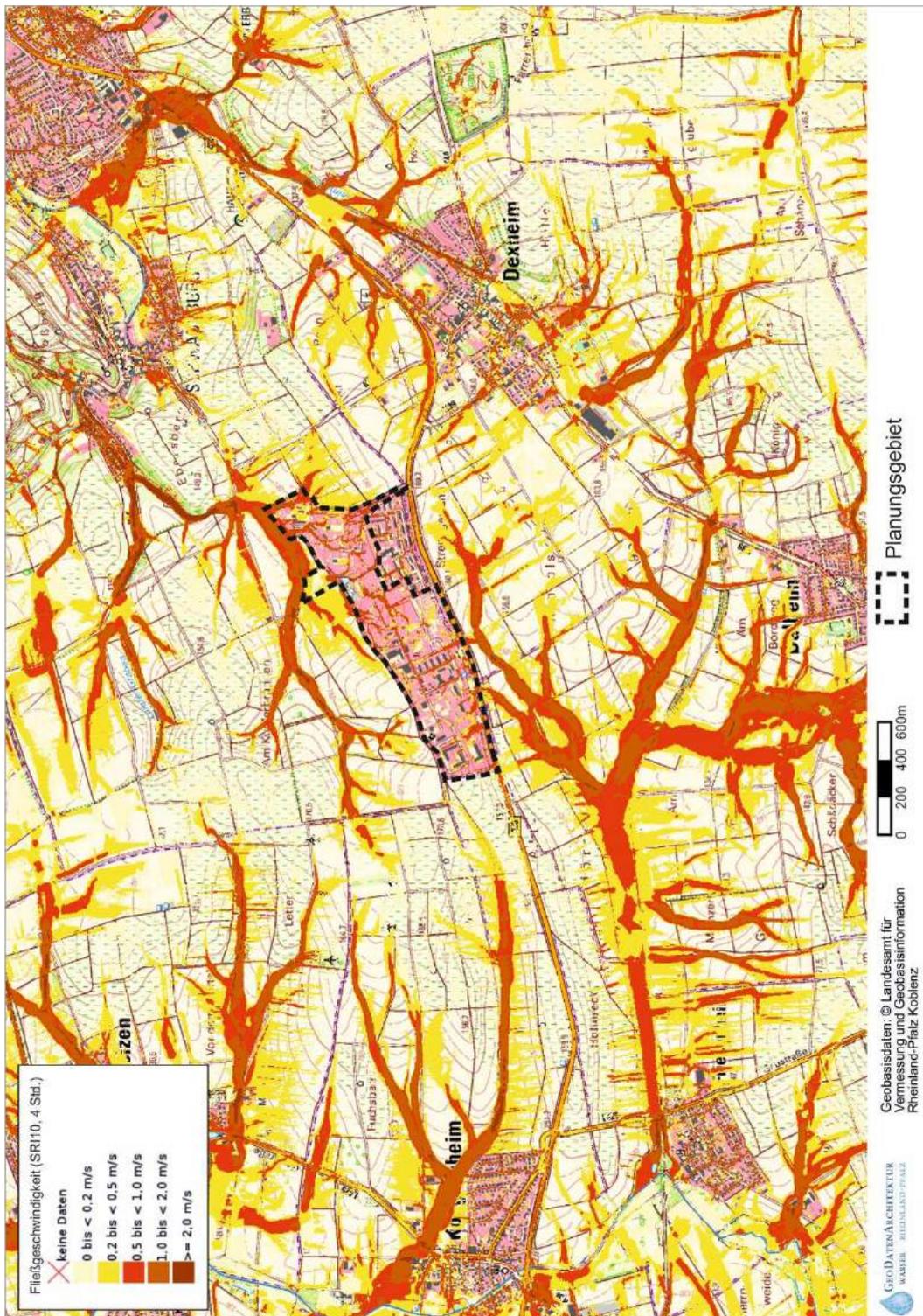


Abbildung 14: Ausschnitt aus der Sturzflutkarte Rheinland-Pfalz. Potenzielle Fließgeschwindigkeit des oberflächlich abfließenden Wassers bei einem extremen Starkregenereignis (124 – 136 mm in vier Stunden). Grafikquelle: <https://www.wasserportal.rlp-umwelt.de>

Analysiert man die mehrjährigen Winddaten (2011 – 2020) des Windrosenatlases Rheinland-Pfalz (**Abbildung 15, Tabelle 3**), so zeigt sich, dass die vorherrschenden Windrichtungen im Planungsgebiet und in dessen Umfeld im Allgemeinen Südsüdwest bis Westsüdwest und Nordnordost bis Ostnordost sind, wobei es durch die Flächennutzung und das Relief lokal zu leichten Differenzierungen kommen kann.

Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt im mehrjährigen Mittel (1981 – 2000)⁸ im Bereich des Planungsgebiets ca. 3.4 - 3.7 m/s, wodurch eine intensive Durchlüftung möglich ist. Innerhalb der Bebauung kann die mittlere Windgeschwindigkeit auf Werte von unter 2.0 m/s sinken, so dass dort von insgesamt geringer Durchlüftungsintensität auszugehen ist.

Die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten von über 4.0 m/s werden im Bereich des Planungsgebiets großwetterlagenbedingt bei Winden aus westsüdwestlichen Richtungen registriert (ca. 8% der Jahresstunden 2011 - 2020). Bei Winden aus nordöstlichen Richtungen (Nebenmaximum) stellen sich zumeist mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 2.0 und 4.0 m/s ein.

Windrichtung	Planungsgebiet Häufigkeit in%	Nierstein Häufigkeit in%	Oppenheim Häufigkeit in%
30	11.5	13.1	13.5
60	12.7	10.3	8.7
90	4.9	4.2	3.8
120	3.8	3.5	3.1
150	5.8	5.4	5.2
180	9.1	10.7	12.4
210	10.9	11.5	11.9
240	15.5	14.3	13.2
270	9.3	8.9	8.3
300	6.2	6.0	6.1
330	4.8	5.3	6.0
360	5.4	6.8	7.8

Tabelle 3: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen (Zeitraum: 2011 – 2020) an den Standorten Planungsgebiet, Nierstein und Oppenheim. Daten bereitgestellt von: LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ

⁸ Aus: **Deutscher Wetterdienst (2004):** Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (10 m ü.G.) in der Bundesrepublik Deutschland. Offenbach a. M.

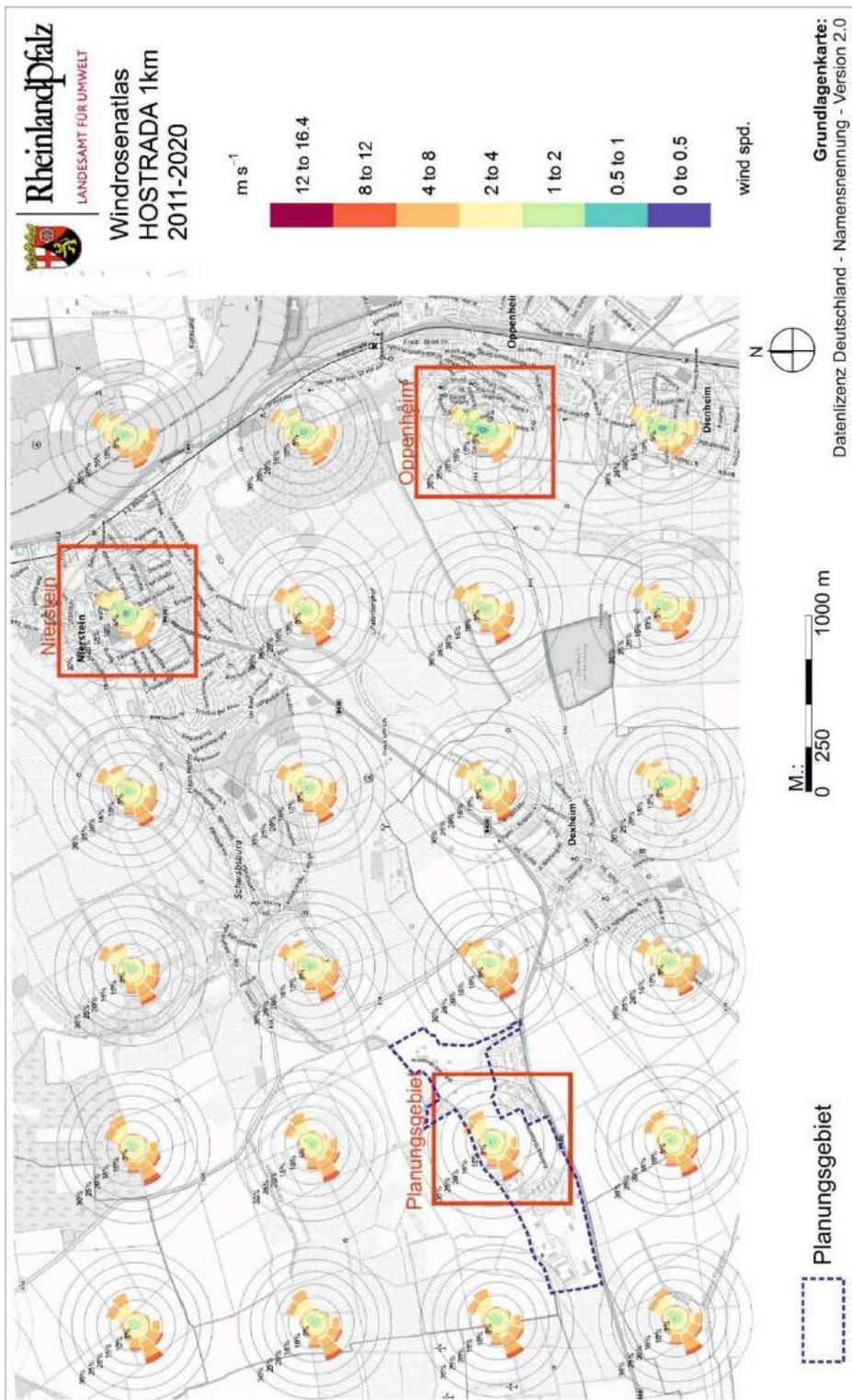


Abbildung 15: Ausschnitt aus dem Windrosenatlas Rheinland-Pfalz. Grafik bereitgestellt von: LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ

In windschwachen Strahlungsnächten, die siedlungsklimatisch von besonderer Bedeutung sind, häufen sich im Planungsgebiet und in dessen Umfeld orografisch bedingte Kaltluftbewegungen entlang von Tal- und Hangeinschnitten sowie seichte Hangabwinde.

Die Intensität der lokalen Kaltluftbildung ist dabei von der örtlichen Flächennutzung abhängig. Das Kaltluftprozessgeschehen am Übergang Freiland – Bebauung kann allgemein wie folgt beschrieben werden.

In wolkenlosen, windschwachen Nächten kühlt sich der Erdboden und die darüber liegende bodennahe Luft aufgrund der ungehinderten langwelligen Ausstrahlung und der abgeschwächten vertikalen Durchmischung der bodennahen Luftschichten verstärkt ab. Es kommt, abhängig von der Flächennutzung, zu sog. Kaltluftbildung unterschiedlicher Intensität (siehe **Tabelle 4**).

Nutzung	Kaltluftproduktionsrate in m ³ /m ² ·h
Grünland, Ackerland	~ 15 - 20
Wald	~ 12 - 15
Gartenbau, Mischflächen	~ 10 – 15
Kleingärten	~ 6
Friedhofflächen	~ 6
Sport-/Freizeitflächen	~ 3 - 6
Wasseroberflächen	0

Tabelle 4: Kaltluftproduktionsraten unterschiedlicher Flächennutzungstypen
(BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG 2013, ÖKOPLANA 2010)

In reliefiertem Gelände nimmt die Kaltluftmächtigkeit im Allgemeinen hangabwärts zu, da von höheren Geländelagen (= Planungsgebiet) kommend immer mehr Kaltluft in den Abfluss mit einbezogen wird. Die Intensität des Kaltluftabflusses ist von der Hangneigung sowie von der Oberflächenrauigkeit des Bewuchses und der Bebauung abhängig. Die Reibungskraft der Oberflächen bremst die Strömungsdynamik. Bei Hangneigungen von unter 2° sind in der Regel Impulse von übergeordneten Windströmungen (z.B. Regionalströmungen) erforderlich, um innerhalb der bodennahen Kaltluftschicht Fließbewegungen auszulösen. Auch Flurwindeffekte zwischen kühlen und deutlich überwärmten Gebieten (Landwirtschaftsflächen ↔ Bebauung) vermögen die bodennahe Kaltluft in Bewegung zu setzen.

Kaltluftbewegungen zeigen in der ersten Nachthälfte die größten Fließgeschwindigkeiten, da zu diesem Zeitpunkt die vertikale Mächtigkeit der stabil geschichteten Luftmassen noch geringer ist und somit regionale und überregionale Winde höherer Geschwindigkeit noch vermehrt bodennah durchgreifen können.

Kaltluftstaus bilden sich im Luv von natürlichen und anthropogenen Hindernissen (Wald- und Siedlungsrand, einzelne Baukörper, Straßendämme etc.). Die kalte Luft staut sich bis zur Hindernishöhe oder etwas darunter auf, bis bei weiterem Nachfließen von Kaltluft das Hindernis schließlich überströmt wird (KING, 1973). Kleinere Hindernisse werden von der abfließenden Kaltluft ohne nennenswerte Staubbildung um- oder überströmt. Kaltluftseen entstehen durch Ansammlung kalter Luft in Mulden und Senken.

Detaillierte Ergebnisse zu den lokalspezifischen Kaltluftbewegungen können dem Kap. 5 entnommen werden.

Die thermische / bioklimatische Situation an warmen / heißen Sommertagen wird wesentlich durch die örtlichen Oberflächentemperaturen bestimmt.

Wie Ergebnisse satellitengebundener Infrarotaufnahmen für die Sommermonate 2018 – 2023 (**Abbildung 16**) dokumentieren, zeigen die Wiesen/Landwirtschaftsflächen im Planungsgebiet mit 33 - 36°C am Tag größtenteils ein mittleres Oberflächentemperaturniveau. Im Planungsgebiet werden im Bereich versiegelter Flächen vermehrt Temperaturen von 36 – 42°C ermittelt. In Bereichen mit Gehölzbeständen (z.B. Engelsklauergraben) sind mittlere Oberflächentemperaturen von ca. 30 – 33°C zu bestimmen. Die thermische Gunstwirkung schattenwerfender Gehölzflächen und unversiegelter Freiflächen wird damit offensichtlich.

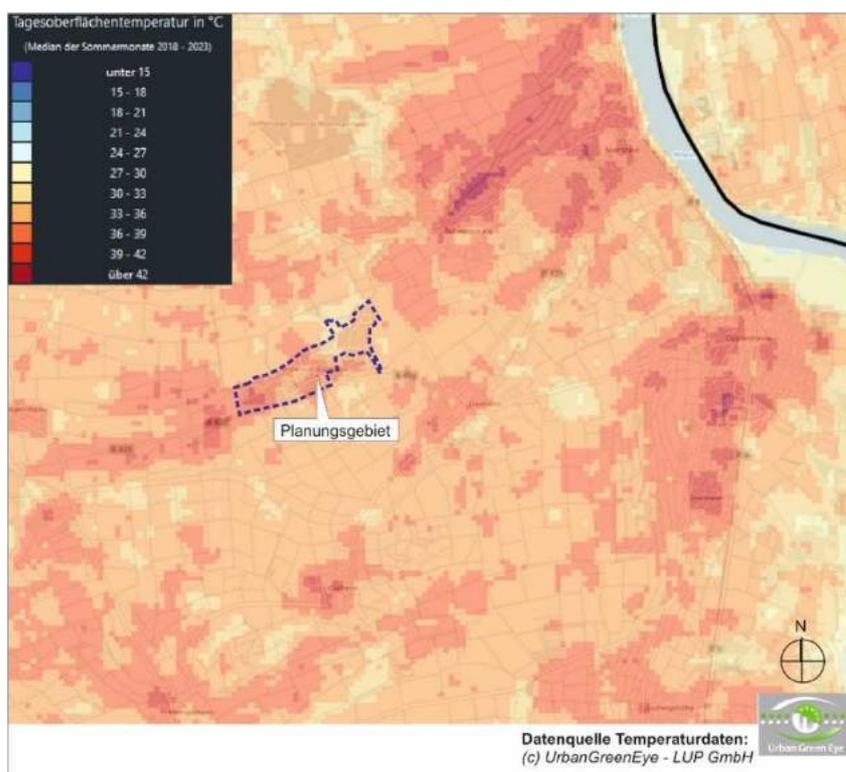


Abbildung 16: Mittlere Tagesoberflächentemperaturen im Zeitraum 2018 – 2023

An heißen Sommertagen sind tagsüber zwischen dem Planungsgebiet (Ist-Zustand) und dem angrenzenden Freiraumgefüge keine größeren Lufttemperaturunterschiede zu erwarten. Diese werden am Tag durch den meist intensiven horizontalen und vertikalen Luftaustausch unterbunden.

Bereits vor Sonnenuntergang setzt die Abkühlung ein und ist allgemein in der ersten Nachthälfte am stärksten. Die thermische Situation wird dabei vermehrt durch die Topographie (z.B. Tallage, Hanglage, Muldenlage), die Flächennutzung und durch die innerhalb der Bebauung graduell unterschiedlich wirksamen Ventilationsseffekte lokal, regional und überregional angelegter Luftströmungen beeinflusst. In den Nachtstunden kühlen die Oberflächen auf Grund fortdauernder Ausstrahlung und fehlender Einstrahlung zunehmend ab und demzufolge die darüber liegenden Luftschichten. Intensive Abkühlung erfolgt im Bereich vegetationsbedeckter Flächen, während sich innerhalb dichter Bebauung Wärmeinseln ausbilden. Dabei ist anzumerken, dass die stärkste Abkühlung meist zu allen Jahreszeiten in den gleichen Lagen auftritt.

Das Planungsgebiet ist in das Freiraumgefüge (vorwiegend Landwirtschafts- und Weinbauflächen) zwischen Nierstein/Schwabsburg, Dexheim, Friesenheim und Königernheim eingebettet. Dadurch stellt sich das Planungsgebiet, trotz stellenweise großflächig versiegelter Flächen, thermisch vergleichsweise günstig dar.

5 Numerische Modellrechnungen zum lokalen Klimageschehen

Im Rahmen des vorliegenden Klimagutachtens werden für den Ist- und Plan-Zustand das lokale Kaltluftprozessgeschehen, die thermischen / bioklimatischen Umgebungsbedingungen sowie die Belüftungssituationen detailliert analysiert. Hieraus lassen sich für das Planungsgebiet Planungshinweise zu einer klimaökologisch verträglichen Bebauung ableiten.

Sämtlichen Modellrechnungen mit dem Modell FITNAH 3D liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Siedlungsgebieten die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Modelliert wird ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten besonders gut ausprägen.

In **Abbildung 17** sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Wald-/Gehölzflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

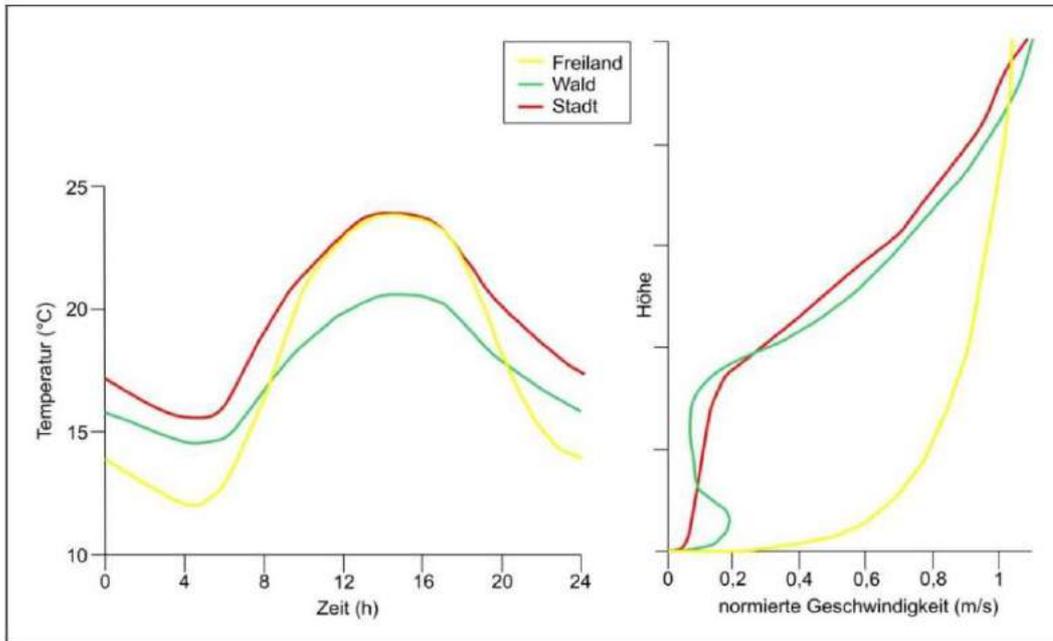


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992⁹)

Das Modell berechnet die zeitliche Entwicklung der Kaltluftströmung bei gegebener zeitlich konstanter Kaltluftproduktionsrate. Diese, ebenso wie die Reibungskoeffizienten, werden über die Art der Landnutzung gesteuert (**Abbildung 18**).

Es werden neun Landnutzungsklassen berücksichtigt:

- Gebäude,
- Versiegelung / Straßen,
- Frei-/Grünflächen,
- Rebflächen,
- Gewässer,
- naturferner Boden,
- Baum über Versiegelung,
- Baum über Grünfläche,
- Baum über naturfernem Boden.

⁹ **GROSS, G. (1992):** Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.

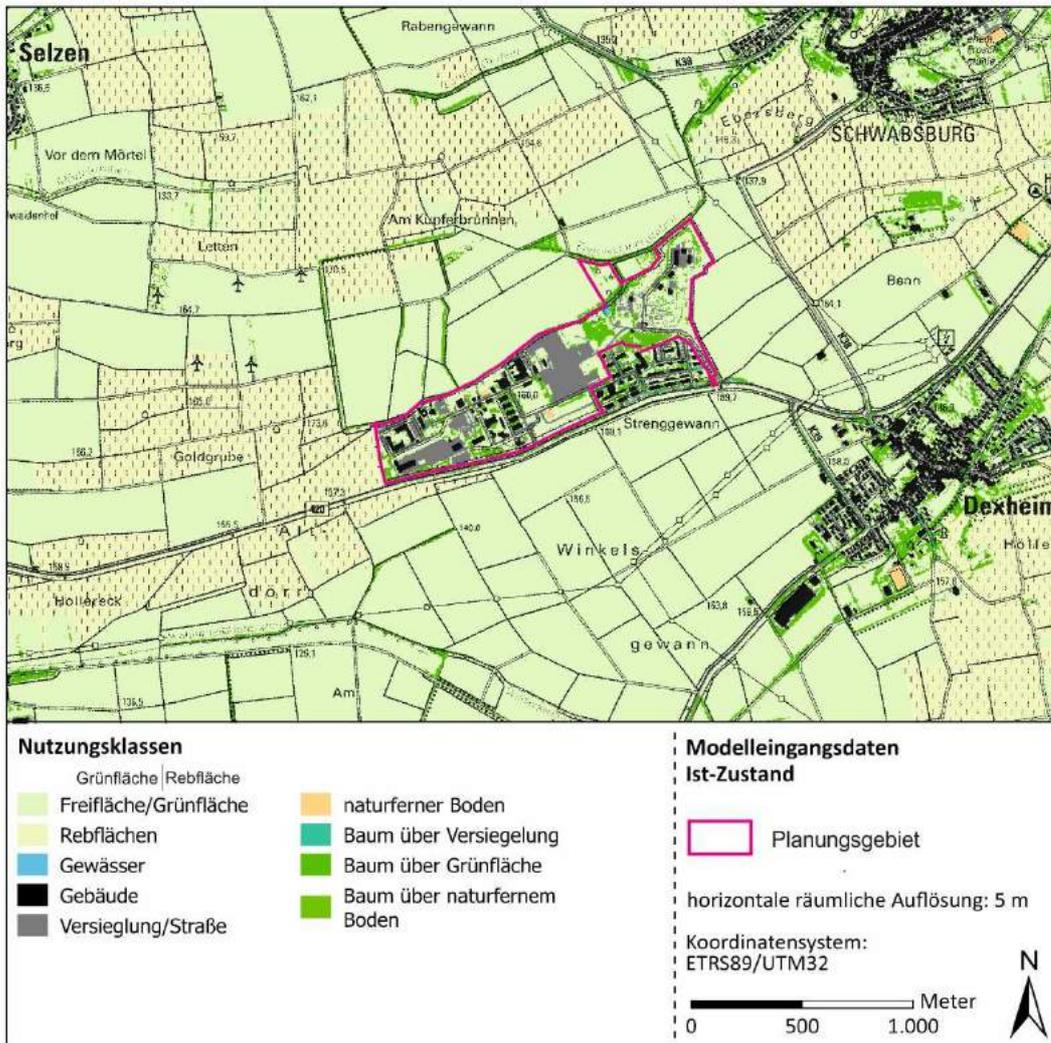


Abbildung 18: Flächennutzung im Modellgebiet, Ist-Zustand. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die Flächennutzungsklassen für den Plan-Zustand sind in **Abbildung 19** dokumentiert.

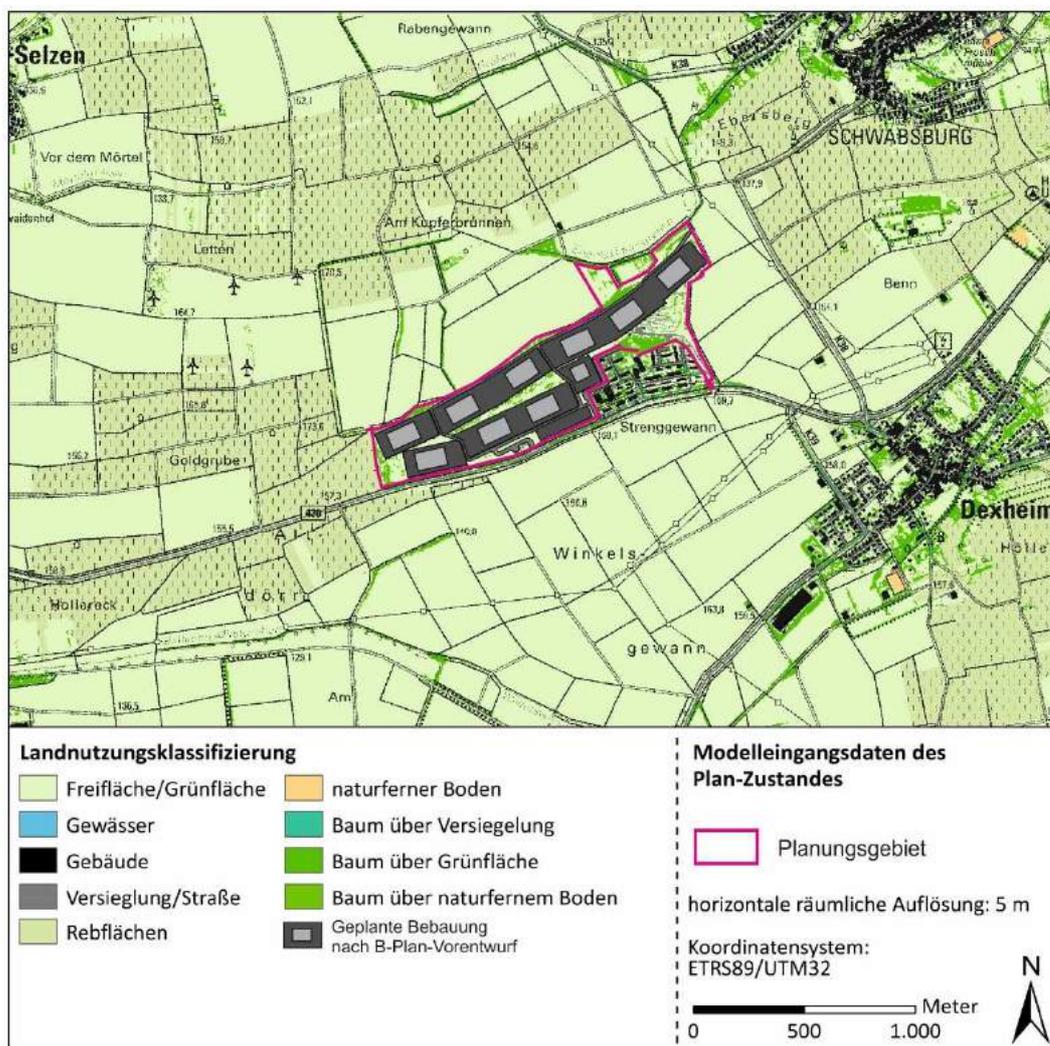


Abbildung 19: Flächennutzung im Modellgebiet, Plan-Zustand. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die potenzielle Ausgleichsleistung der Kaltluftströmung lässt sich recht umfassend aus zwei miteinander gekoppelten Parametern des Kaltluftprozessgeschehens ableiten:

1. Aus dem **Kaltluftvolumenstrom**, der das in einer bestimmten Zeiteinheit transportierte Gesamtvolumen an Kaltluft durch eine definierte vertikale Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung angibt.
Dabei wird das Luftvolumen über die variable absolute Höhe der Kaltluftschicht aufsummiert (integriert), während die horizontale Breite der Fläche stets einem Meter entspricht („Kaltluftvolumenstromdichte“, siehe **Abbildung 20**).
Geschwindigkeit und Richtung können innerhalb der Luftsäule veränderlich sein.

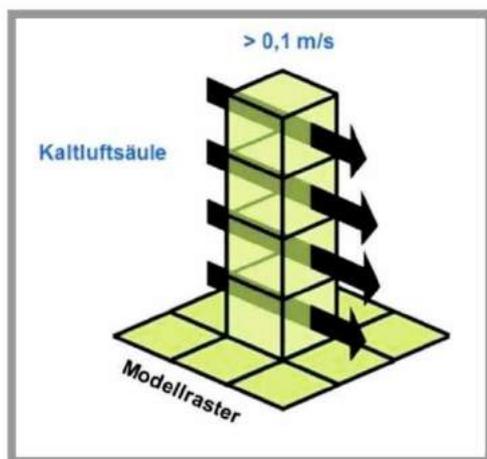


Abbildung 20: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstromdichte (nach: GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH / ÖKOPLANA 2020¹⁰)

2. Aus der **bodennahen Strömungsgeschwindigkeit**, die aufzeigt, inwieweit die Kaltluft tatsächlich in den Aufenthaltsbereich des Menschen durchgreifen kann und nicht etwa zu wesentlichen Anteilen in höheren Schichten des Überdachniveaus stattfindet. Die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit ist nicht nur von der Mächtigkeit der Kaltluftschicht und damit von der tatsächlich transportierten Masse an Kaltluft abhängig, sondern auch von der Windoffenheit der bodennahen Nutzungsstrukturen.

Ergänzend werden mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21¹¹ Modellrechnungen zur Kaltluflhöhe und zur punktuellen Kaltluftausbreitung (Tracer) durchgeführt. Das Modell KLAM_21 entspricht ebenfalls den Anforderungen an mesoskalige Kaltluftmodelle nach VDI.

Das betrachtete Rechengebiet umfasst eine Gebietsgröße von 5.8 x 3.8 km (inkl. erforderliche Randbereiche des Modellgebiets), womit die planungsnahen Kaltluftentstehungs- und Kaltluftzielgebiete erfasst werden. Dargestellt wird ein 4.7 x 3.2 km großer Ausschnitt.

Die Ergebnisse der Kaltluftberechnungen werden für den Zeitpunkt kurz vor Sonnenaufgang (04:00 Uhr) dargestellt.

¹⁰ **GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH, ÖKOPLANA (2020):** Stadtklimaanalyse Mannheim 2020. Hannover, Mannheim.

¹¹ **DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2008:** Das Kaltluftabfluss-Modell KLAM_21. Theoretische Grundlagen und Handhabung des PC-Programms. Offenbach a. M.

5.1 Kaltluftprozessgeschehen – Ergebnisse für den Ist-Zustand und Plan-Zustand

Die **Abbildung 21** zeigt für den **Ist-Zustand** die Ergebnisse der Kaltluftströmungssimulationen zum bodennahen Windfeld (2 m ü.G.) gegen 04:00 Uhr (kurz vor Sonnenaufgang).

In dieser Kaltluftbildungsphase bestimmen im Planungsgebiet erwartungsgemäß schwache Kaltluftbewegungen das bodennahe Luftaustauschgeschehen (0.1 – 1.0 m/s). Wie die Windvektoren verdeutlichen, entwickeln sich im westlichen Planungsteilgebiet relieffolgend schwache nordnordwestliche Kaltluftbewegungen, die über die B 420 in den Hundgraben abfließen. Herrscht großräumige Windstille vor, strömt die Kaltluft in geringer Intensität über den Dalheimer Flutgraben in Richtung der Ortslage Friesenheim. Bei der vorliegenden Situation mit schwachen westsüdwestlichen Gradientwinden bleibt dieser Kaltluftabfluss in Richtung Westen aus. Im Dalheimer Flutgraben herrschen vielmehr extrem schwache Windbewegungen in Richtung Osten vor, wo sich am Übergang in den Weiterswiesengraben ein Kaltluftsee (mittlere Windgeschwindigkeit unter 0.1 m/s) ausbildet.

Im zentralen und östlichen Planungsteilgebiet entwickeln sich, ebenfalls reliefbedingt, südwestliche Kaltluftabflüsse in Richtung Engelsklauergraben. Während in bebauten Gebieten des Planungsareals mittlere Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0.10 – 0.25 m/s vorherrschen, sind in weitgehend unbebauten Lagen (Gebietszentrum) mittlere Geschwindigkeiten bis 0.50 m/s zu ermitteln.

Über den Engelsklauergraben gelangt die Kaltluft aus dem Planungsgebiet bis zur Ortslage Schwabsburg. Dies wird durch die Ergebnisse einer Tacergasausbreitungsrechnung verdeutlicht (**Abbildung 22**).

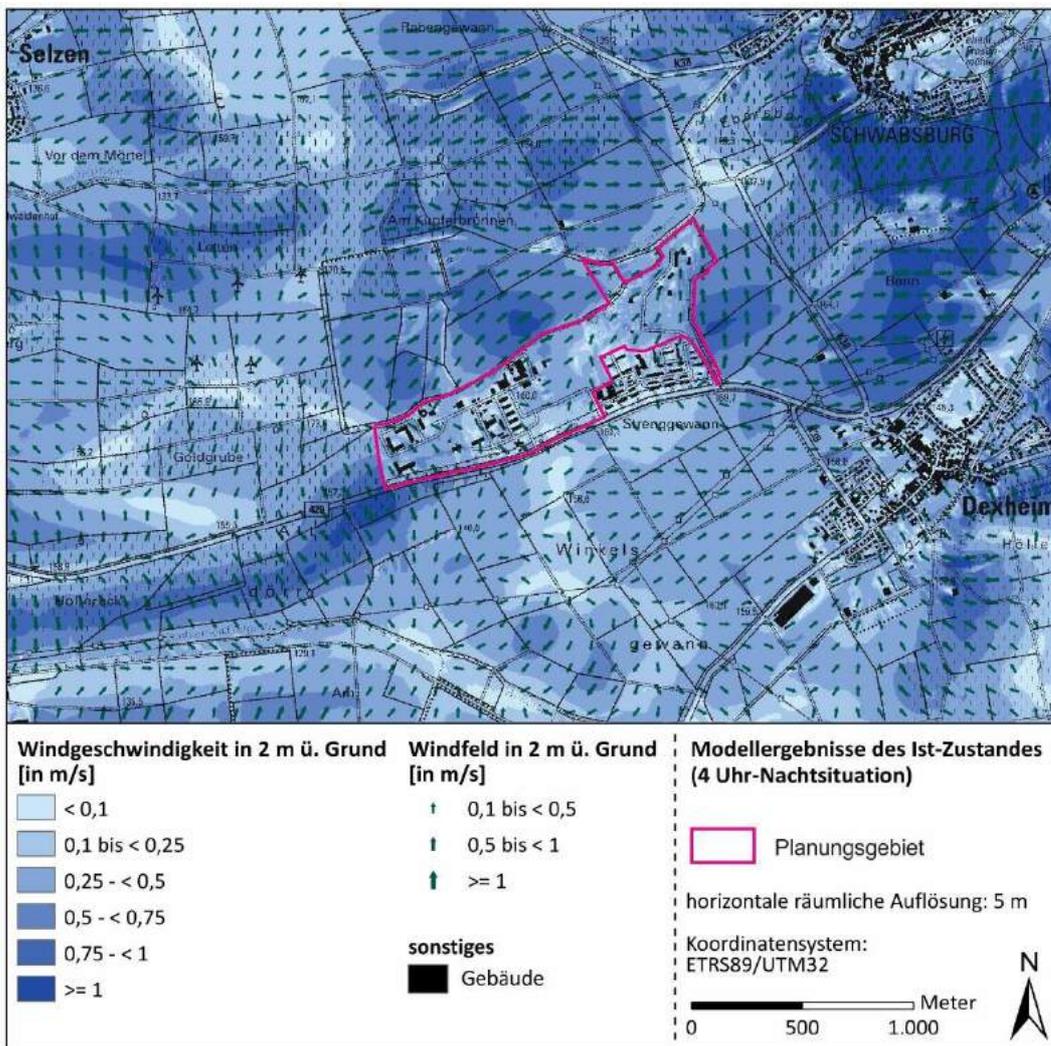


Abbildung 21: Ist-Zustand. Kaltluftfließgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. in einer wind-schwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

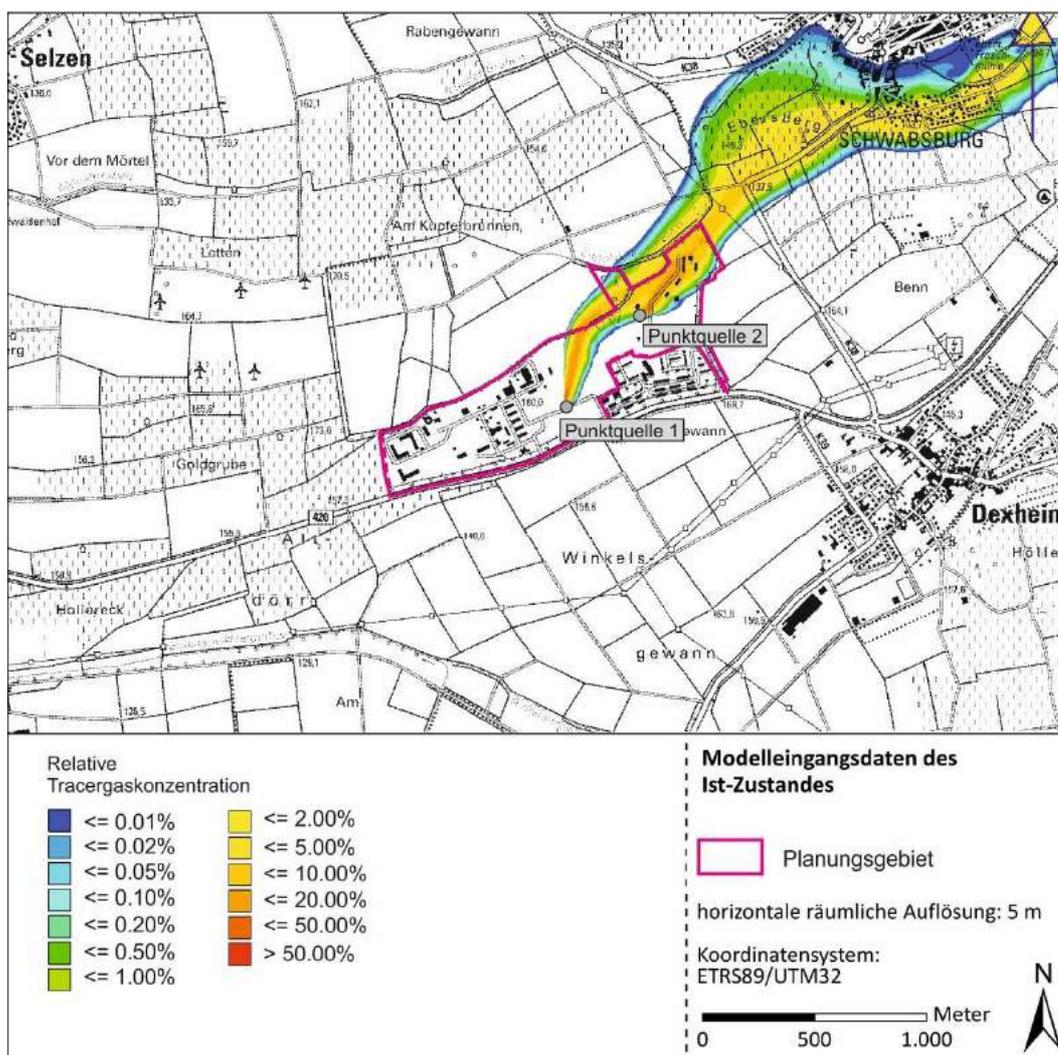


Abbildung 22: Ist-Zustand. Ausbreitung der bodennahen Kaltluft (2 m ü.G.) in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Modellsimulationen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Der Kaltluftvolumenstrom, der die Gesamtintensität der Kaltluftbewegungen beschreibt, wird neben der Kaltluftfließgeschwindigkeit auch von den örtlichen Kaltluftproduktionsraten der Flächennutzungen bestimmt. Diese sind in **Abbildung 23** dargestellt. Die Kaltluftproduktionsraten zeigen im Planungsgebiet und in dessen Umfeld Werte von 5 – über 40 m³/(m²· h).

Die Kaltluftproduktionsraten nehmen bei vergleichbarer Flächennutzung mit größerer Hangneigung zu (KING, E. 1973¹²).

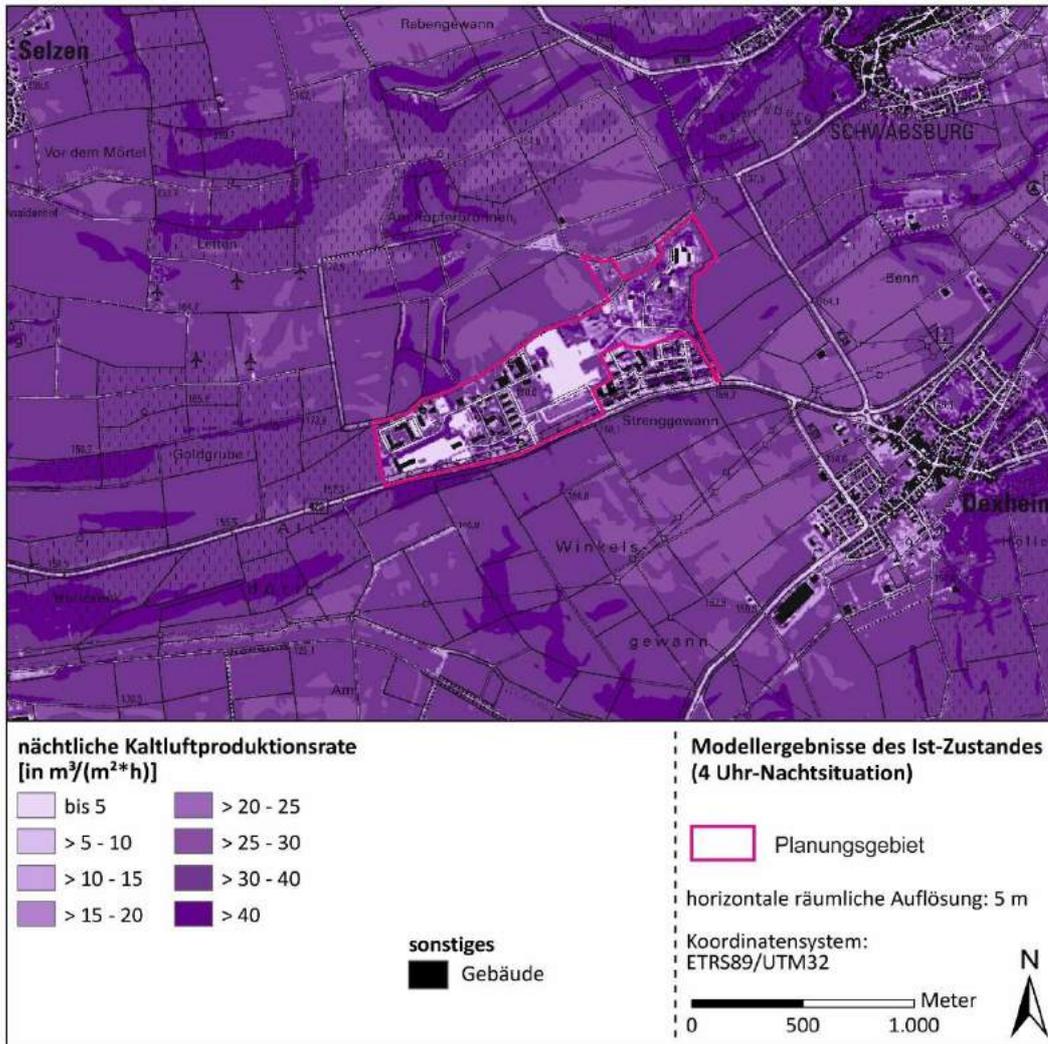


Abbildung 23: Ist-Zustand. Nächtliche Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

¹² KING, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefahr durch Straßenbauten. Berichte des DWD 130., Offenbach.

Abbildung 24 bildet für den Ist-Zustand die räumliche Verteilung der Kaltluftvolumenstromdichte ab.

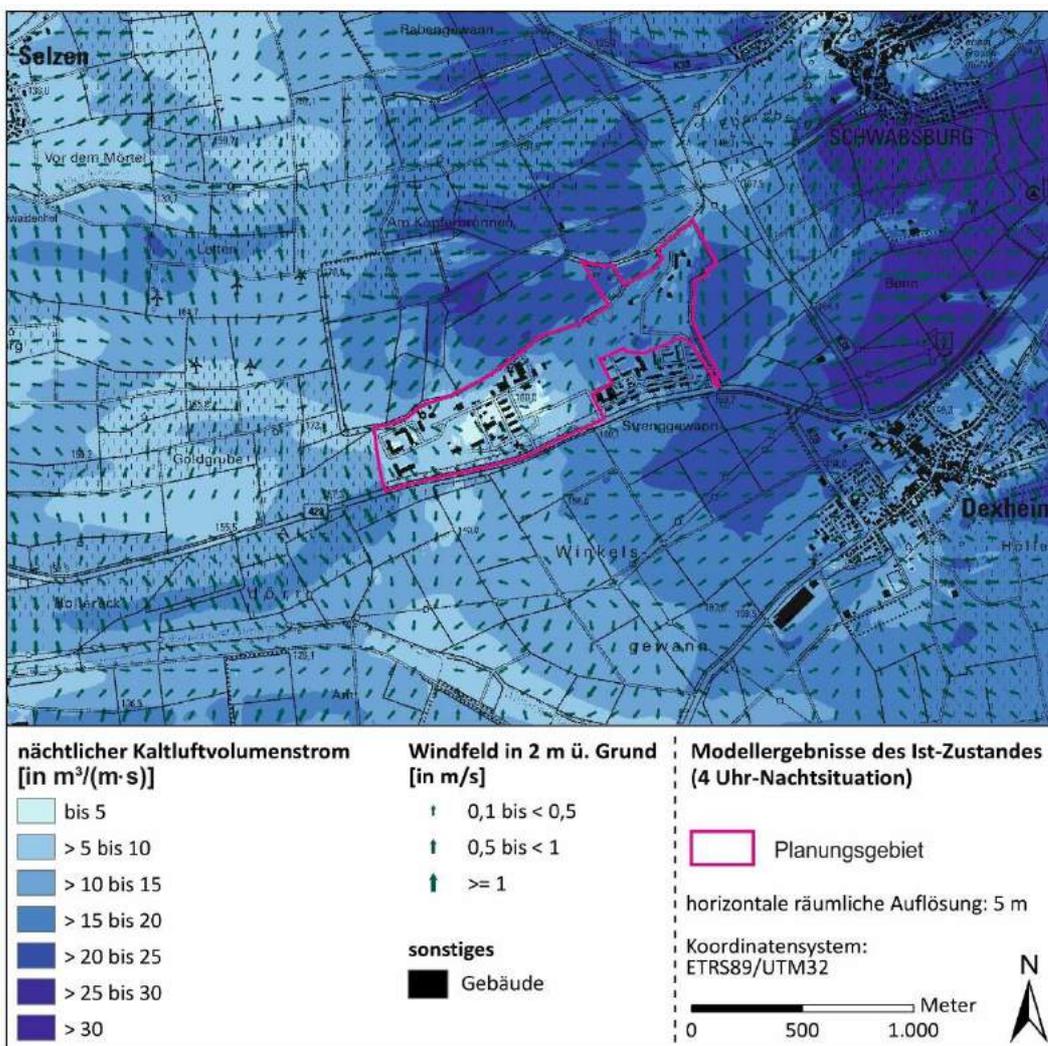


Abbildung 24: Ist-Zustand. Kaltluftvolumenstromdichte und Richtung (2 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die Kaltluftvolumenstromdichte wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt je nach Standort eine große Variabilität. An Hängen mit vergleichsweise starkem Gefälle werden Werte von bis über 30 m³/(m·s) erreicht – so zum Beispiel südlich von Schwabsburg. Auch in den Hanglagen nördlich des Planungsgebiets (Gewann In den Engelskläuern) sind Kaltluftvolumenstromdichten von 15 bis 30 m³/(m·s) zu bestimmen. Diese Werte werden in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (Entwurf 2024) „Lokale Kaltluft“ mit einem guten bis sehr guten Kaltluftdurchlüftungspotenzial in Verbindung gebracht (siehe **Tabelle 5**).

- mindestens $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$: extrem gutes Kaltluftdurchlüftungspotenzial
- mindestens $25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$: sehr gutes Kaltluftdurchlüftungspotenzial
- mindestens $15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$: gutes Kaltluftdurchlüftungspotenzial
- mindestens $7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$: mäßiges Kaltluftdurchlüftungspotenzial
- unter $7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$: geringes Kaltluftdurchlüftungspotenzial

Tabelle 5: Bewertung der Kaltluftvolumenstromdichte bezogen auf die Belüftungsfunktion von Siedlungsbereichen. Aus: VDI Richtlinie 3787, Blatt 5 (Entwurf 2024) „Lokale Kaltluft“, S. 16.

Im Planungsgebiet zeigen sich in zentraler und westlicher Gebietslage Kaltluftvolumenstromdichten von ca. $5 - 10 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$. Diese sind laut **Tabelle 5** nur mit einem geringen bis mäßigen Kaltluftdurchlüftungspotenzial verbunden. Das zentrale und westliche Planungsteilgebiet ist damit für die kaltluftbedingte Belüftung der benachbarten Siedlungslagen (Schwabsburg / Friesenheim / Dexheim) nur von untergeordneter Bedeutung.

Im östlichen bzw. nordöstlichen Planungsteilgebiet sind Kaltluftvolumenstromdichten von ca. $10 - 20 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ zu erwarten. Diese Werte weisen auf ein bislang gutes Kaltluftdurchlüftungspotenzial hin (siehe **Tabelle 5**). Während im westlichen Planungsteilgebiet durch die kuppenartige Lage nur lokale Kaltluftmächtigkeiten von ca. $15 - 30 \text{ m}$ zu erwarten sind, können im nordöstlichen Teilgebiet vertikale Mächtigkeiten bis knapp über 40 m auftreten (**Abbildung 25**).

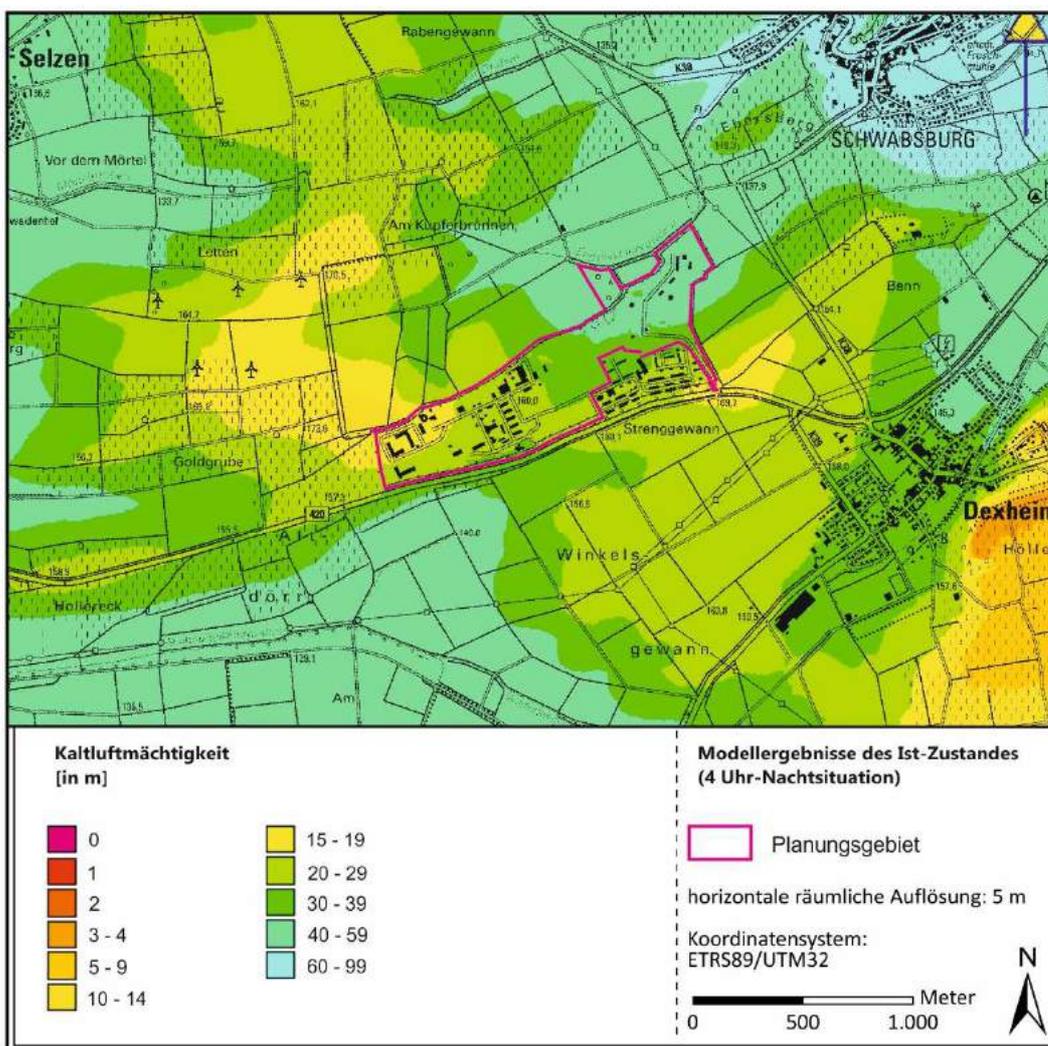


Abbildung 25: Ist-Zustand. Kaltluftmächtigkeit im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Ergebnisse von Kaltluftabflusssimulationen mit dem Modell KLAM_21. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Im **Plan-Zustand** ändert sich durch die geplanten neuen Baustrukturen das lokale Kaltluftprozessgeschehen. Aufgrund der angestrebten baulichen Verdichtung gehen innerhalb des Planungsgebiets Kaltluftproduktionsflächen verloren, wodurch die nächtlichen Kaltluftproduktionsraten sinken (siehe **Abbildungen 26** und **27**). Nur in Bereichen mit neuen Grünstrukturen (z.B. „Centralpark“) ist mit einem Anstieg zu rechnen. Außerhalb des Planungsgebiets nehmen über Vegetationsflächen überall dort die Kaltluftproduktionsraten zu, wo planungsbedingte Windabschwächungen zu bilanzieren sind. In Bereichen mit planungsbedingten Windbeschleunigungen nimmt die Kaltluftproduktionsrate durch die höheren Luftwechselraten leicht ab. Diese Modifikationen beschränken sich auf den Nahbereich des Planungsgebiets. In den benachbarte Ortslagen von Schwabsburg und Dexheim sind bei den Kaltluftproduktionsraten keine Veränderungen zu bestimmen.

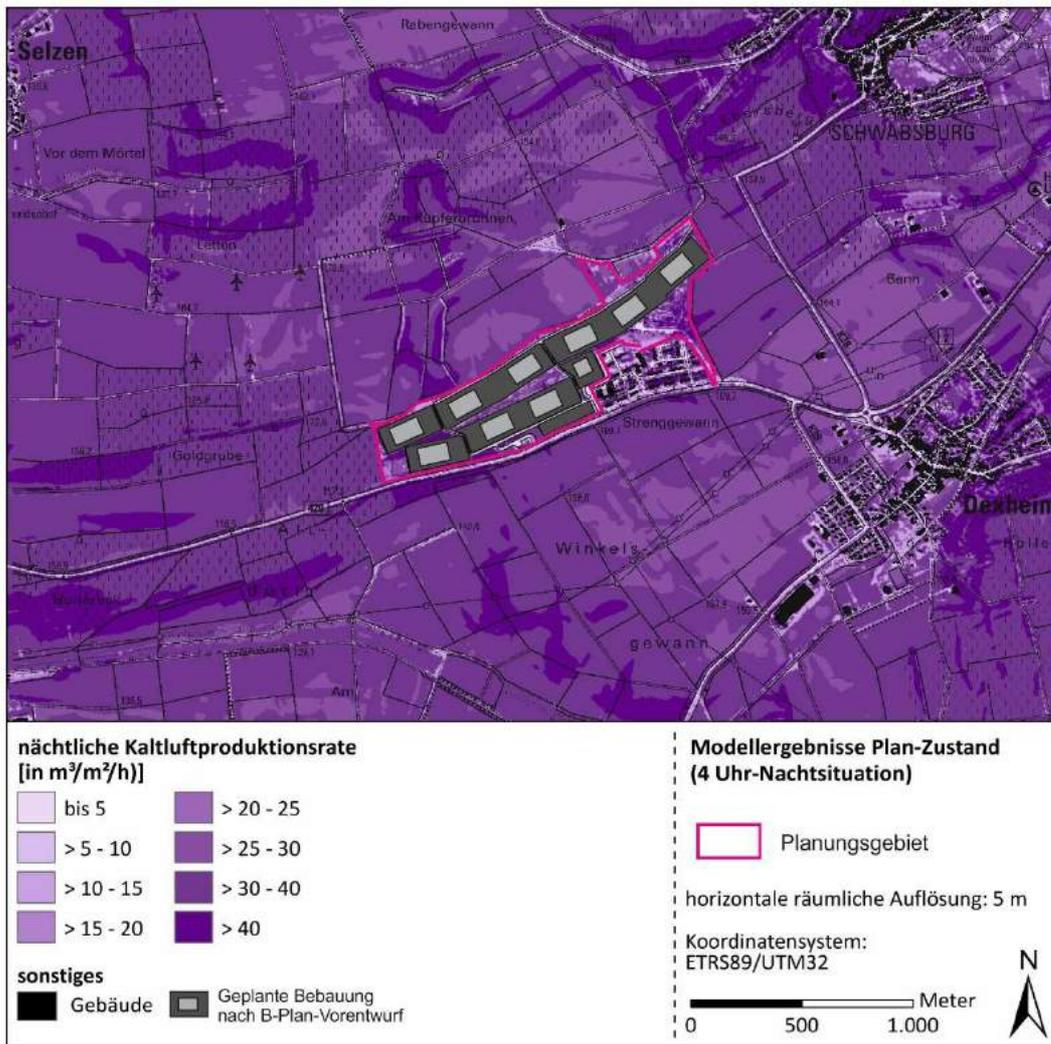


Abbildung 26: Plan-Zustand. Nächtliche Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

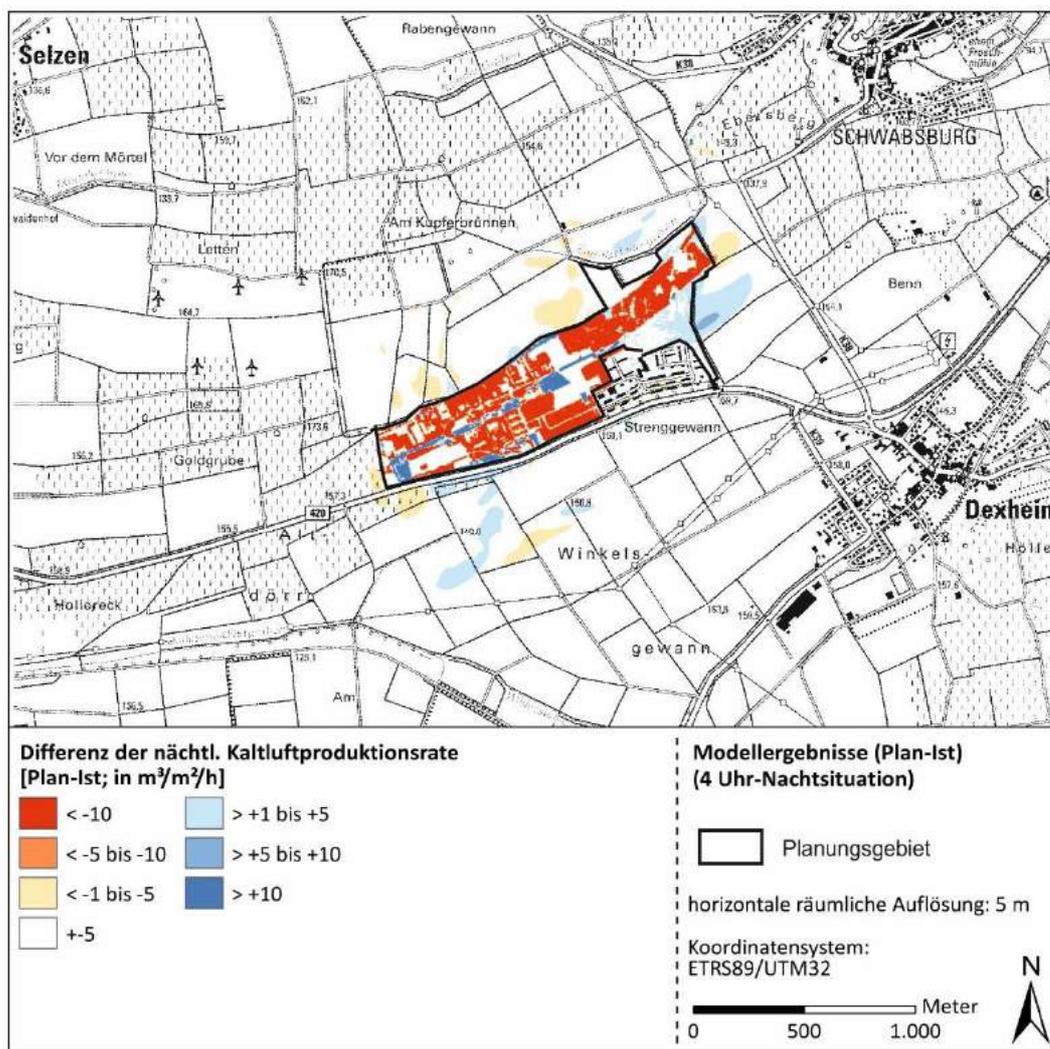


Abbildung 27 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der nächtlichen Kaltluftproduktionsraten im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer wind-schwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die an den potenziell möglichen Rechenzentren im Planungsgebiet zu erwartenden Veränderungen beim Windfeld (**Abbildungen 28** und **29**) können wie folgt beschrieben werden. Die bis zu 32 m hohen Rechenzentren (inkl. Technikaufbauten) sowie die bis zu 16 m hohen Nebengebäude wirken im vorliegenden Fall für die von Nordnordwesten (westliches Planungsteilgebiet) bzw. Südwesten (zentrales und östliches Planungsteilgebiet), Nordwesten / Westsüdwesten zuströmende Kaltluft als zusätzliche Barriere. Die Strömung wird daher in den unmittelbaren Lee-Lagen der geplanten Bebauung reduziert. Gleiches gilt für die Luv-Lagen. Die räumliche Erstreckung dieser Bereiche bleibt auf das unbebaute Freiraumgefüge im Umfeld des Planungsgebiets beschränkt.

Die benachbarten Ortslagen von Schwabsburg, Dexheim, Friesenheim und Kögernheim sind von keinen planungsbedingten Strömungsmodifikationen betroffen. Der im Luv-Bereich verzögerte Anteil der Strömung wird mit etwas höherer Windgeschwindigkeit an den Seiten vorbeigeführt (Umströmungseffekt). Zudem kommt es durch die geplante Neubebauung mit den Warmluftemissionen der Rechenzentren zu einer vermehrten Labilisierung der bodennahen Kaltluftschichten, weshalb an den Randbereichen des Planungsgebiets stellenweise leichte Windbeschleunigungen (ca. 0.1 – 0.3 m/s) zu bilanzieren sind. Der vertikale Warmluftaustritt über Dachniveau der Rechenzentren vermischt die über die Dachflächen strömende Kaltluft mit der prozessbedingten Warmluft der Rechenzentren, wodurch nicht nur die Vertikalgeschwindigkeit über Dachniveau (= über 29 m ü. G.) ansteigt, sondern auch die Horizontalgeschwindigkeiten. Eine kleinklimatisch relevante Schwächung des kaltluftbedingten Kaltluftprozessgeschehens ist somit durch die angestrebte Bebauung am Planungsstandort nicht zu erwarten.

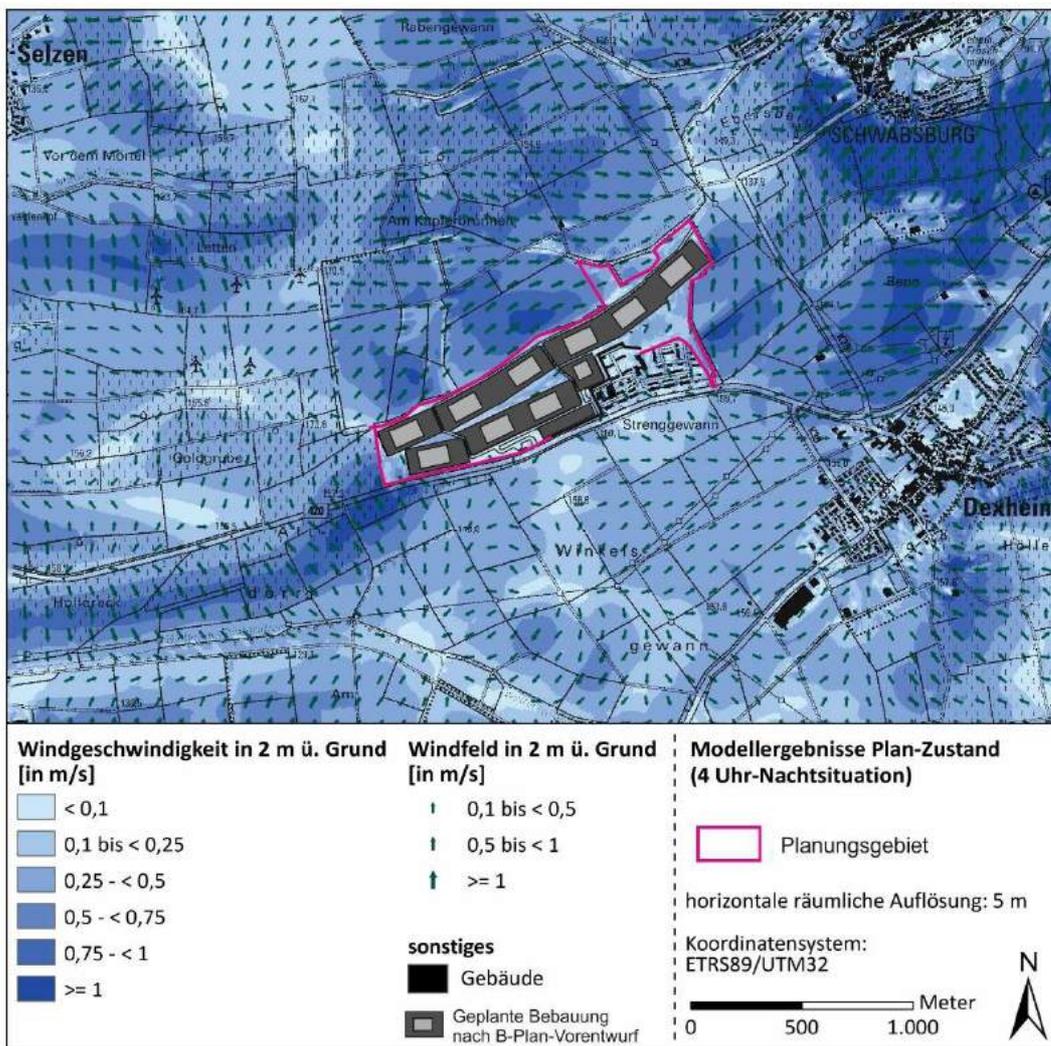


Abbildung 28: Plan-Zustand. Kaltluftfließgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. in einer wind-schwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

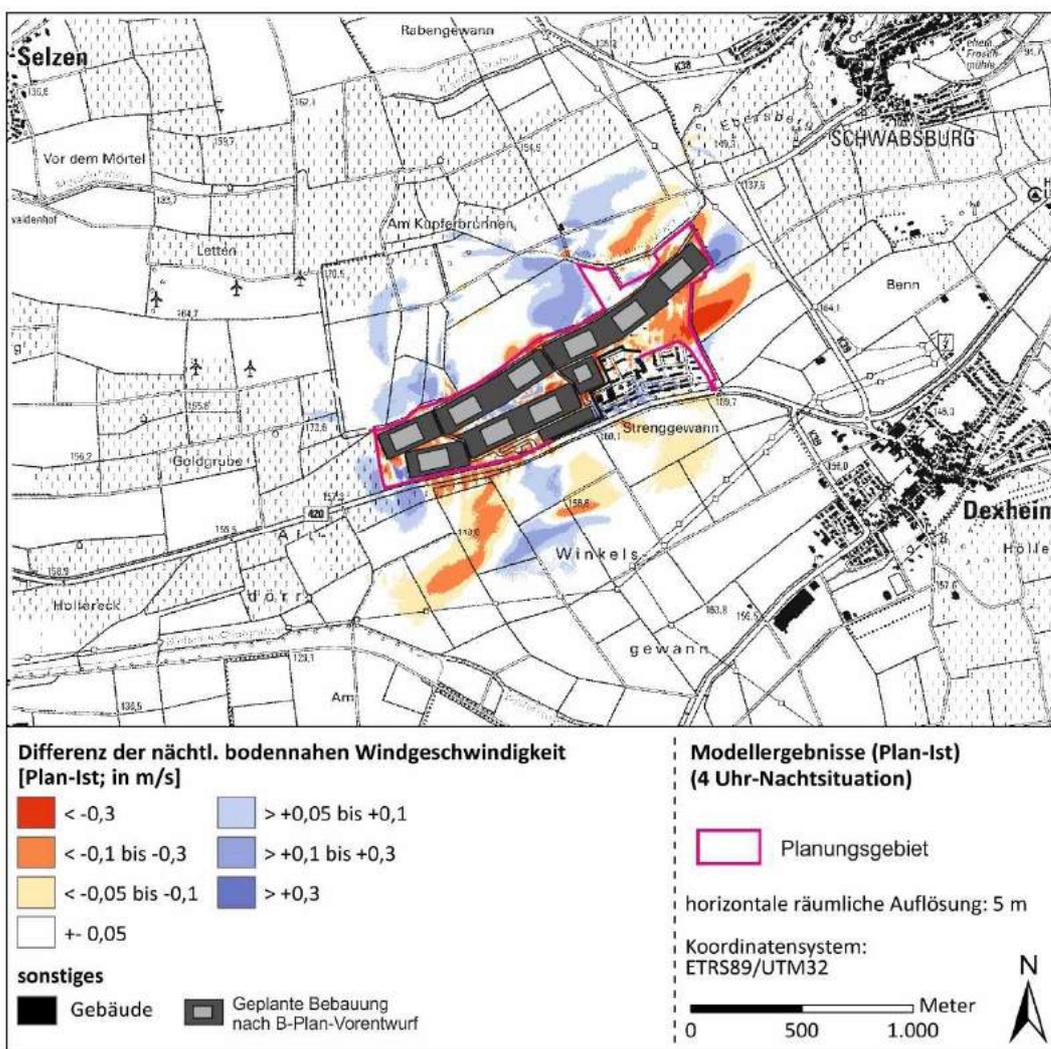


Abbildung 29 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der nächtlichen Kaltluftfließgeschwindigkeit 2 m ü.G. im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Wie in Kap. 4 bereits angeführt, ist bei der Planung auch darauf zu achten, dass die Spätfrostgefahr für Weinreben nicht großflächig zunimmt. Anhand der Berechnungen zur Kaltluftfließgeschwindigkeit lässt sich ableiten, dass in heute bereits spätfrostgefährdeten Lagen keine großflächige Zunahme der Gefahrenlage erfolgt. Allein in den mit Dunkelblau markierten Bereichen (**Abbildung 30**) steigt die Spätfrostgefährdung gegenüber dem Ist-Zustand weiter an. In den anderen Lagen verbleiben ausreichende Kaltluftbewegungsintensitäten, um Kaltluftstagnation und damit bodennahe Frostbildung in den Nachtstunden zu unterbinden.

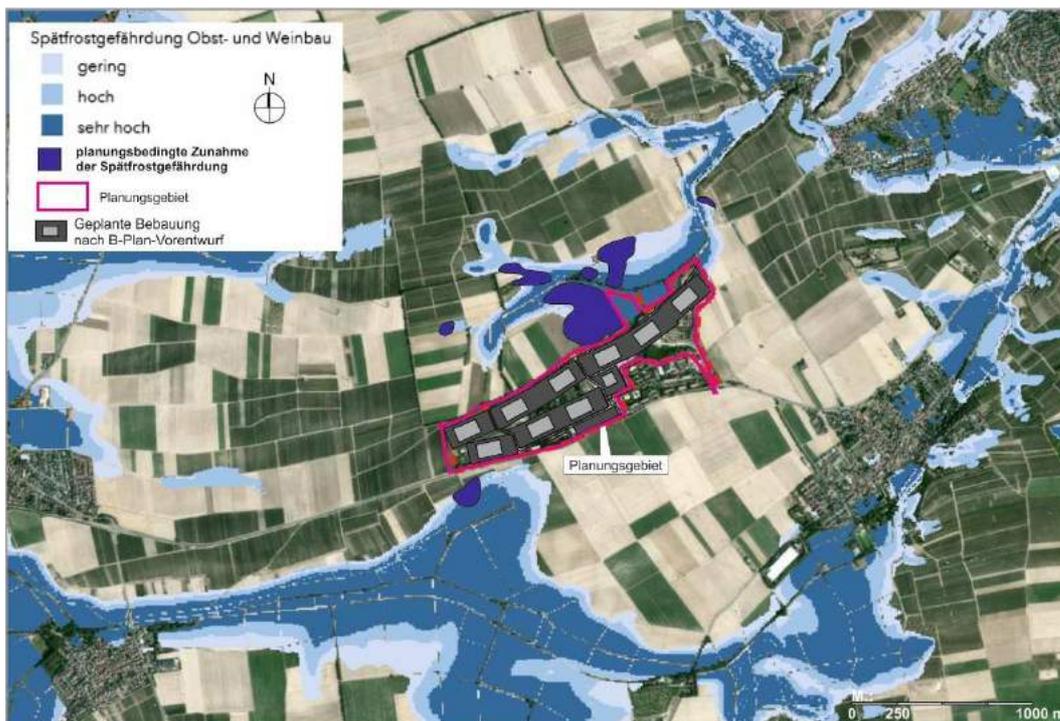


Abbildung 30: Kennzeichnung von Bereichen mit Zunahme der Spätfrostgefahr für Weinreben.
Datenquelle: <https://geobox-i.de/GBV-RLP-Wein/>. Ergänzt durch ÖKOPLANA.
Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 / AgroScience Rheinland-Pfalz

Die **Abbildungen 30** und **31** zeigen die planungsbedingten Veränderungen des lokalen Kaltluftvolumenstroms.

Laut VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) ist bei stadt-/siedlungsklimatisch bedeutsamen Kaltluftströmungen eine Verringerung der Kaltluftvolumina oder der Kaltluftfließgeschwindigkeit von mehr als 10% gegenüber dem Ist-Zustand als Eingriff mit lokalklimatisch nachteiligen Folgen (Zunahme der thermischen Belastung) im Kaltluftzielgebiet zu bewerten (siehe **Tabelle 6**). Diese sind mit Hilfe klimatischer Modellstudien vertiefend zu bestimmen

Prozentuale Änderung gegenüber dem Ist-Zustand	≤ 5 %	≤ 10 %	> 10 %
Auswirkung	gering	mäßig	hoch
Veränderung der Häufigkeit des Auftretens (in Jahresstunden)			
Prozentuale Änderung gegenüber dem Ist-Zustand	≤ 5 %	≤ 10 %	> 10 %
Auswirkung	gering	mäßig	hoch

Tabelle 6: Klimaökologische Bewertung von planungsbedingten Modifikationen des Kaltluftvolumenstroms oder der Kaltluftfließgeschwindigkeit (aus: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 2003, S. 53)

Prozentuale Änderungen gegenüber dem Ist-Zustand zwischen 5 und 10% sind als „mäßige Auswirkung“ zu bewerten. Bei Werten unter 5% sind im Allgemeinen nur „geringe klimatische Auswirkungen“ im wärmebelasteten Kaltluftzielgebiet (hier: Dexheim, Schwabsburg) zu erwarten.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen belegen, dass in den angrenzenden Siedlungslagen von Dexheim und Schwabsburg keine relevanten Abnahmen bzgl. des Kaltluftvolumenstroms zu erwarten sind. Die Abstände des Planungsgebiets zu den o.a. Ortslagen sind ausreichend, um die thermischen Negativeffekte der geplanten Bebauung aufzufangen. Eine auffallende Abnahme des lokalen Kaltluftvolumenstroms ist nicht zu bilanzieren. Dies wird durch die **Abbildung 31** verdeutlicht.

Die leichte Zunahme des Kaltluftvolumenstroms im Westen des Planungsgebiets ist auf die planungsbedingten Windbeschleunigungen zurückzuführen.

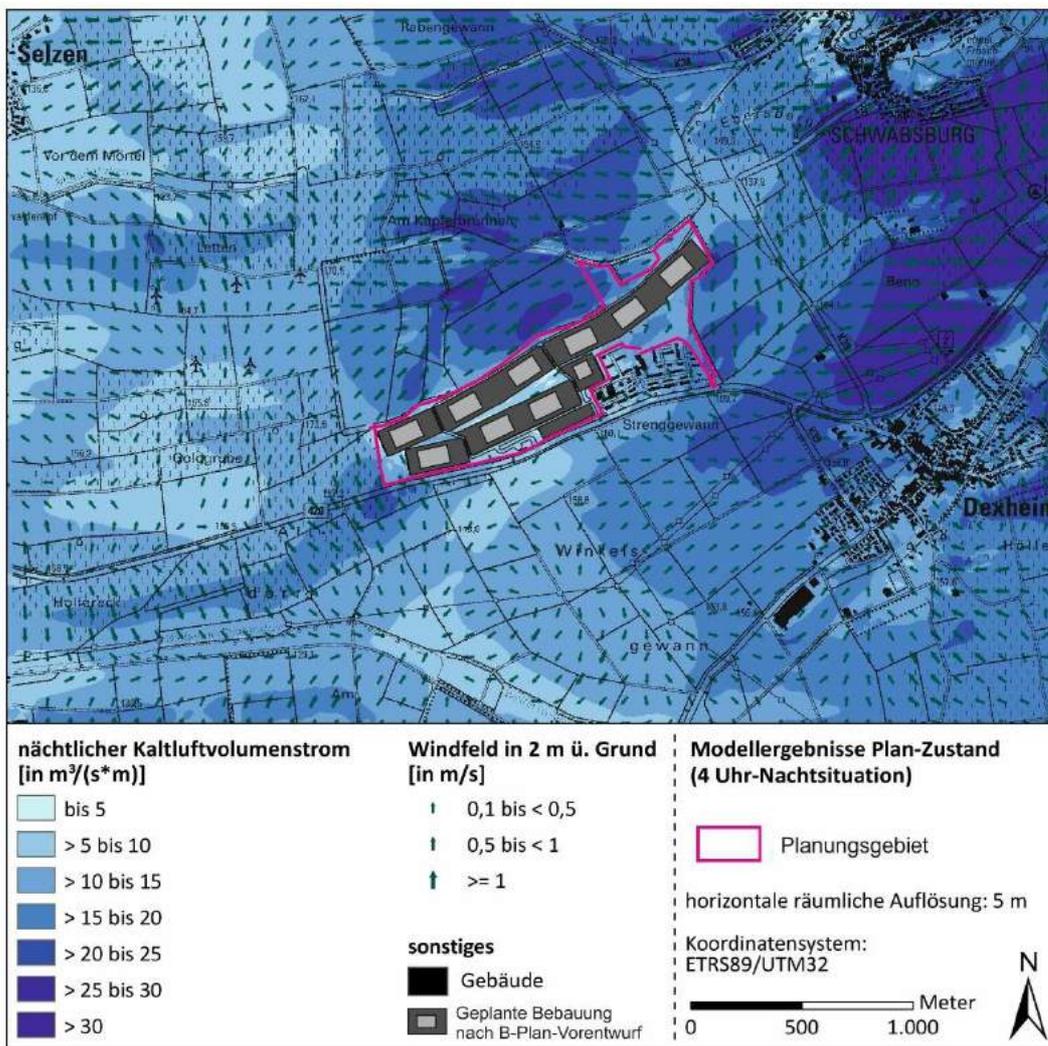


Abbildung 30: Plan-Zustand. Kaltluftvolumenstromdichte und Richtung (2 m ü.G.) in einer wind-schwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

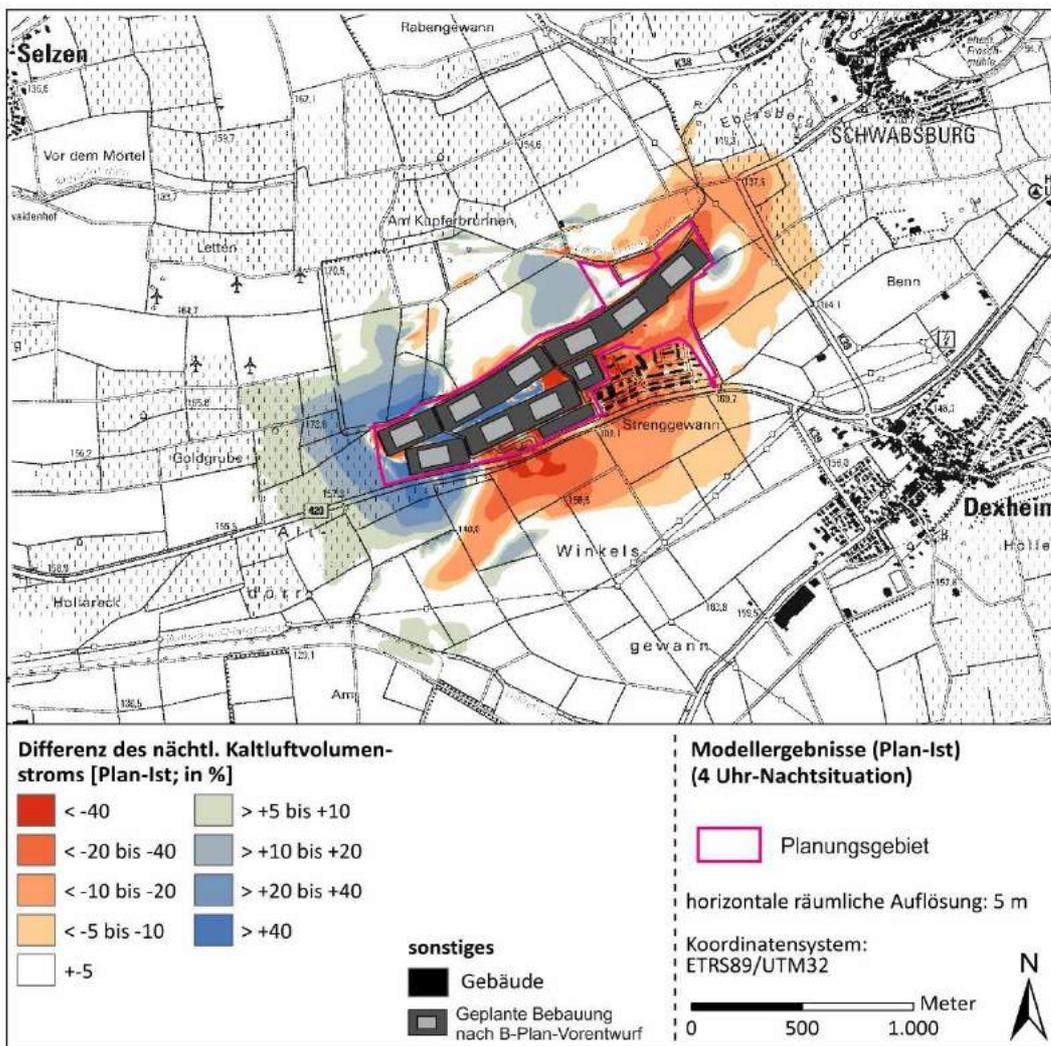


Abbildung 31 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte relative Zu- bzw. Abnahme des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms. im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) wird derzeit überarbeitet. Seit März 2024 liegt ein erster Entwurf vor. Er unterliegt aktuell noch der Prüfung.

Der Entwurf legt als Bewertungsgrößen für planungsbedingte Eingriffe in das Kaltluftprozessgeschehen weiterhin den Kaltluftvolumenstrom bzw. die Kaltluftvolumenstromdichte oder die Kaltluftfließgeschwindigkeit fest.

Zuvor ist anhand eines Prüfschemas die Kaltluftrelevanz des Planungsgebiets auf Siedlungsgebiete zu beurteilen (siehe **Abbildung 32**). Das Ablaufschema für das Planungsgebiet und die angrenzenden Siedlungslagen von Dexheim und Schwabsburg ist mit Rot umrandet.

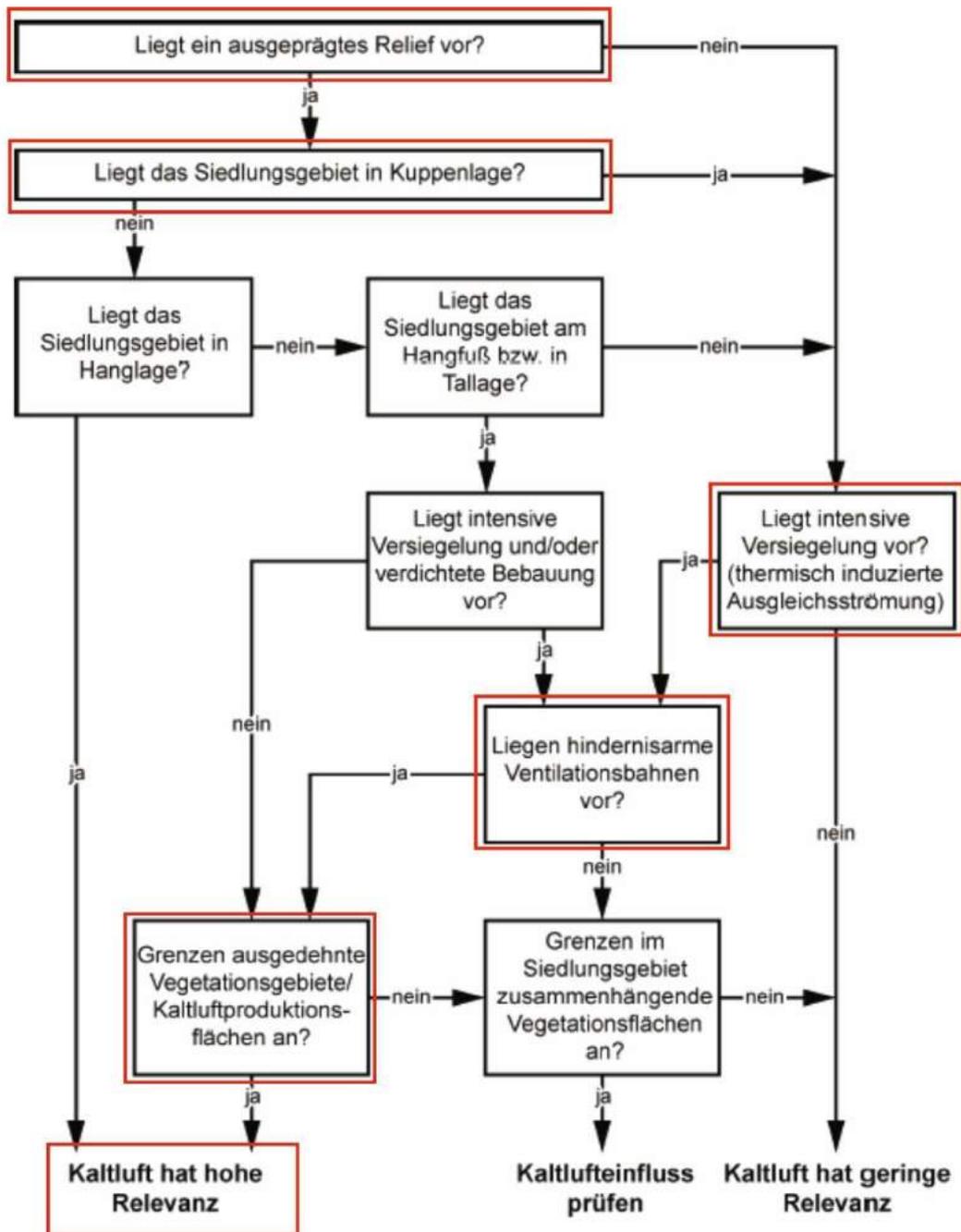


Abbildung 32: Prüfschema „Kaltluftrelevanz“. Aus VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (Entwurf, März 2024)

Beschreibung des Ablaufschemas im vorliegenden Planungsfall:

Durch die kuppenartige Lage des Planungsgebiets und die talartige Lagen der Ortslagen Dexheim und Schwabsburg liegt im Planungsgebiet ein ausgeprägtes Relief vor. Das Planungsgebiet befindet sich zudem in Tallage. Das Planungsgebiet und die Ortslagen zeigen stellenweise intensive Versiegelungen. Der Engelsklauergraben nordöstlich des Planungsgebiets sowie die Hagnzone in Richtung Dexheimer Bach im Osten bzw. Südosten des Planungsgebiets sind als hindernisarme Ventilationsbahnen bzw. Hangflächen einzustufen. An die Ortslagen bzw. an das Planungsgebiet schließen zudem ausgedehnte Kaltluftproduktionsflächen an. Die lokale Kaltluft hat somit hohe Relevanz. Dementsprechend ist auch nach VDI-Richtlinienentwurf das Kaltluftprozessgeschehen zu prüfen.

Beläuft sich im Ist-Zustand die Kaltluftvolumenstromdichte in Schwabsburg und Dexheim auf unter $25 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$, so ist nach VDI-Richtlinienentwurf 3787, Blatt 5 (2024) allenfalls eine relative Einschränkung des Kaltluftvolumenstroms um max. 5% tolerabel.

Wie **Abbildung 31** zeigt, wird auch dieser Wert in Dexheim und Schwabsburg nicht überschritten. Somit ist auch nach dem VDI-Richtlinienentwurf eine unzulässige Einschränkung der kaltluftspezifischen Belüftung nicht festzustellen.

5.2 Belüftungssituation am Tag – Ergebnisse für den Ist-Zustand und Plan-Zustand

Wie der Kap. 4 beschrieben, herrschen im Planungsgebiet im Allgemeinen süd-südwestliche bis westsüdwestliche Windrichtungen vor (Häufigkeit ca. 26% der Jahresstunden im Mittel der Jahre 2011 – 2020). Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt im mehrjährigen Mittel (1981 – 2000) im Bereich des Planungsgebiets ca. 3.4 - 3.7 m/s.

Zur Begutachtung des Einflusses des Planungsvorhabens auf die örtliche Belüftungssituation wird bei den nachfolgenden Modellrechnungen eine westsüdwestliche Windanströmung aus Westsüdwesten mit 3 m/s (10 m ü.G.) zu Grunde gelegt.

Wie die Ergebnisse für den **Ist-Zustand (Abbildung 33)** belegen, zeigt sich das Planungsgebiet und dessen Umfeld intensiv belüftet. Windgeschwindigkeiten unter 1.0 m/s, die auf einen deutlich abgeschwächten bodenanahen Luftaustausch schließen lassen, bleiben auf die unmittelbaren Gebäudelee- und Gebäudeluvlagen sowie auf den Nahbereich dichter Gehölzbestände begrenzt.

Mit Realisierung einer max. Bebauung nach Bebauungsplan-Vorentwurf (**Plan-Zustand, Abbildungen 34 und 35**) ist in Lee-Lage bis in eine Entfernung von ca. 1.500 m mit einer leicht abgeschwächten Belüftungsintensität (0.1 – 0.5 m/s) zu rechnen.

Deutlichere Windabschwächungen (über 1.0 m/s) bleiben auf eine Entfernung von ca. 300 m bis 900 m begrenzt. Die Ortslagen von Schwabsburg und Dexheim sind von keinen Windgeschwindigkeitsmodifikationen betroffen.

Dreht der Wind am Tag vermehrt zu westlichen und südwestlichen Richtungen sind in Dexheim bzw. Schwabsburg Windgeschwindigkeitsreduktion von ca. 0.1 m/s bis 0.5 m/s zu erwarten. Da hiervon keine großflächig windschwachen Ortslagen betroffen sind, kann eine derart geringe Windgeschwindigkeitsreduktion aus gutachterlicher Sicht akzeptiert werden. Ein vermehrt Tendenz zu Luftstagnation ist nicht zu befürchten.

Das Planungsvorhaben führt somit am Tag in den benachbarten Siedlungslagen zu keinen bemerkenswerten Windfeldveränderungen.

Innerhalb des Planungsgebiets fungiert die zentrale Freiraum-/Grünachse als funktionsfähige Belüftungsbahn.

Die Rechenzentren stoßen über Abluftkamine und Ventilatoren Warmluft aus. Infolge der allgemein höheren Temperatur der ausströmenden Luft und deren vertikalen Impuls (Annahme: 6 - 9 m/s) steigt die Luft über den Rechenzentrumsgebäuden auf und kühlt sich dabei theoretisch trockenadiabatisch ($1^\circ/100\text{ m}$) durch die Luftdruckabnahme ab. Durch die Auftriebsströmung an Rückkühlern kann das Windfeld bis in eine Höhe von ca. 65 – 75 m ü.G. beeinflusst werden (ÖKOPLANA 2023). Aufgrund der Vermischung mit dem großräumig vorherrschenden Westsüdwestwind wird die Warmluftfahne aber auch horizontal verfrachtet und damit vermehrt verdünnt, wodurch die Fahnenluft rasch den physikalischen Zustand (Wärmeinhalt, Feuchtegehalt und Geschwindigkeit) der Umgebungsluft annimmt. Eine Herunterführung der Warmluft in bodennächste Luftschichten findet infolge der Konvektion am Tag nicht statt.

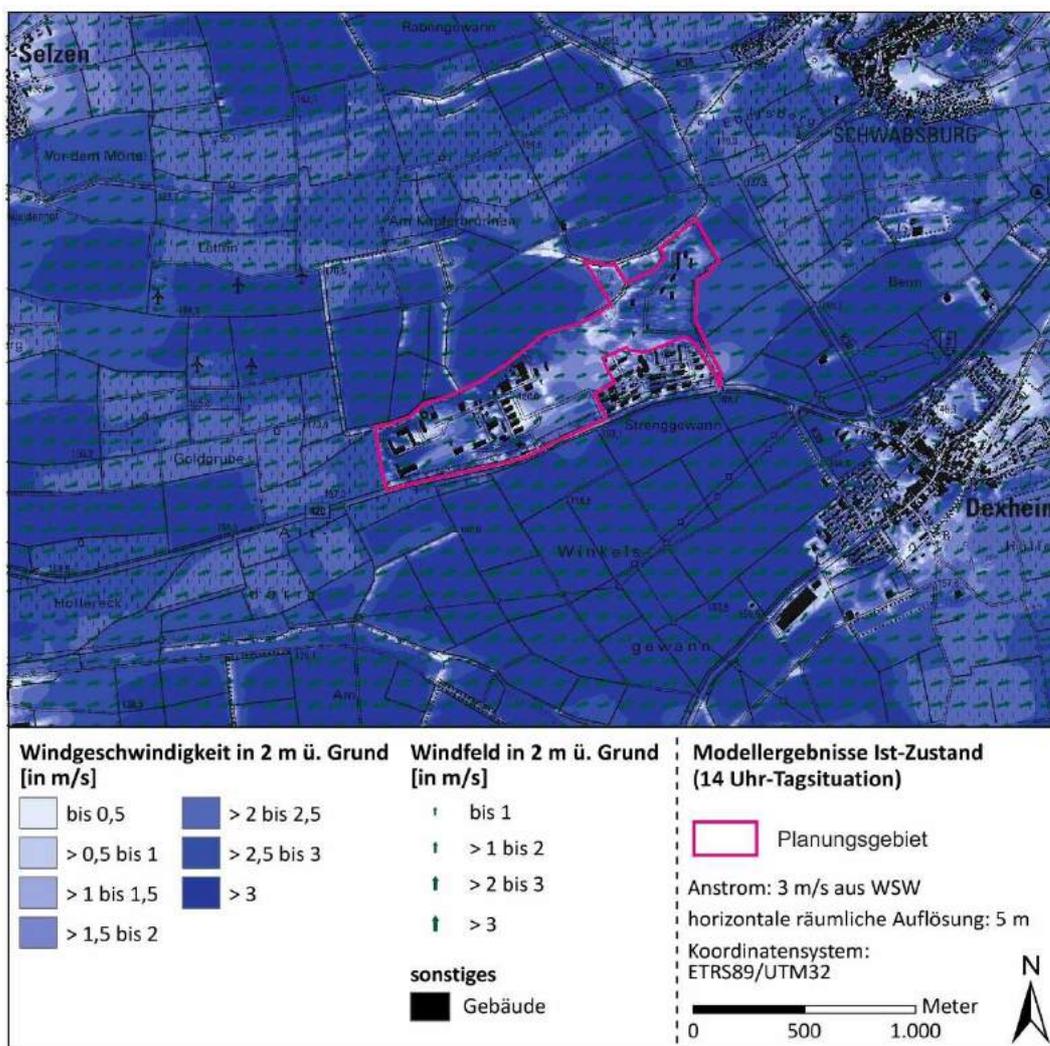


Abbildung 33: Ist-Zustand. Windgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

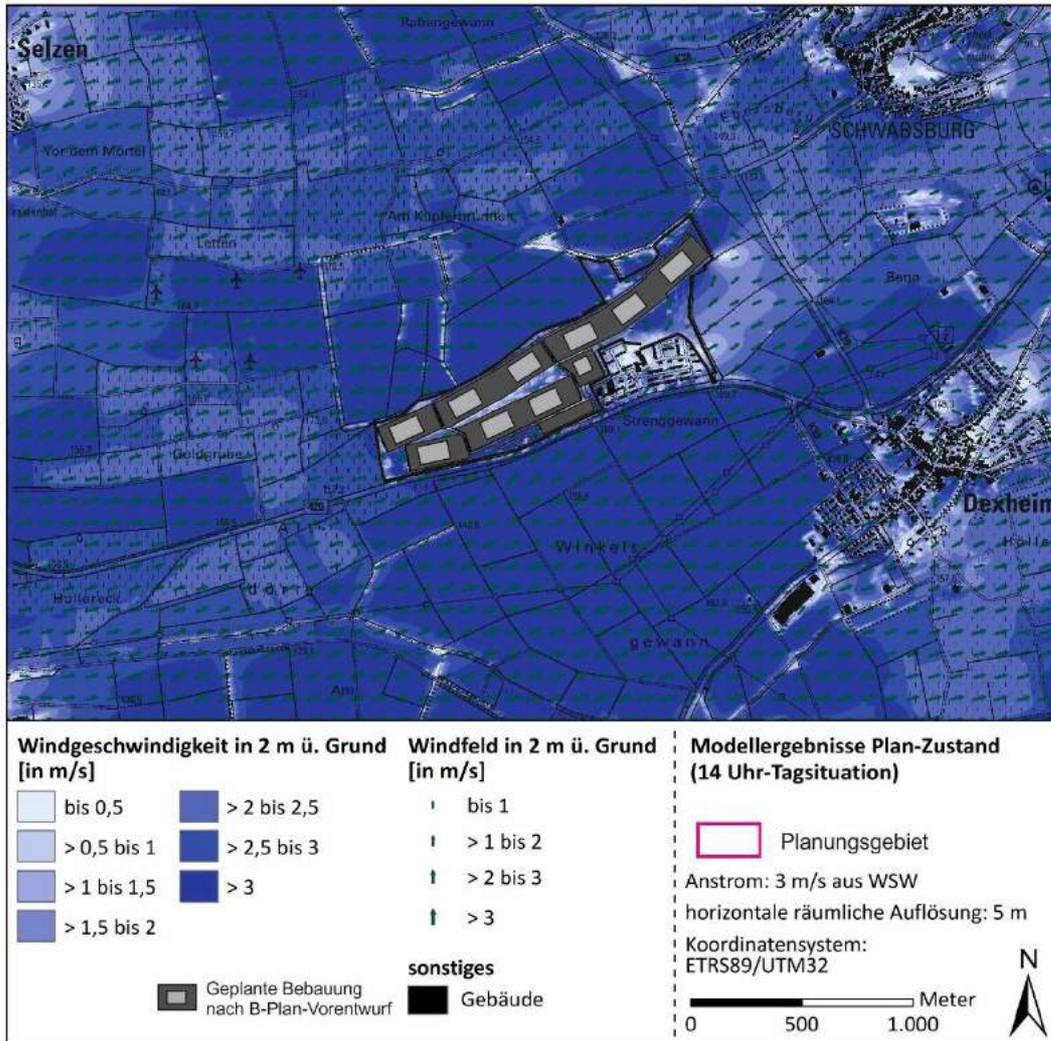


Abbildung 34: Plan-Zustand. Windgeschwindigkeit und Richtung 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

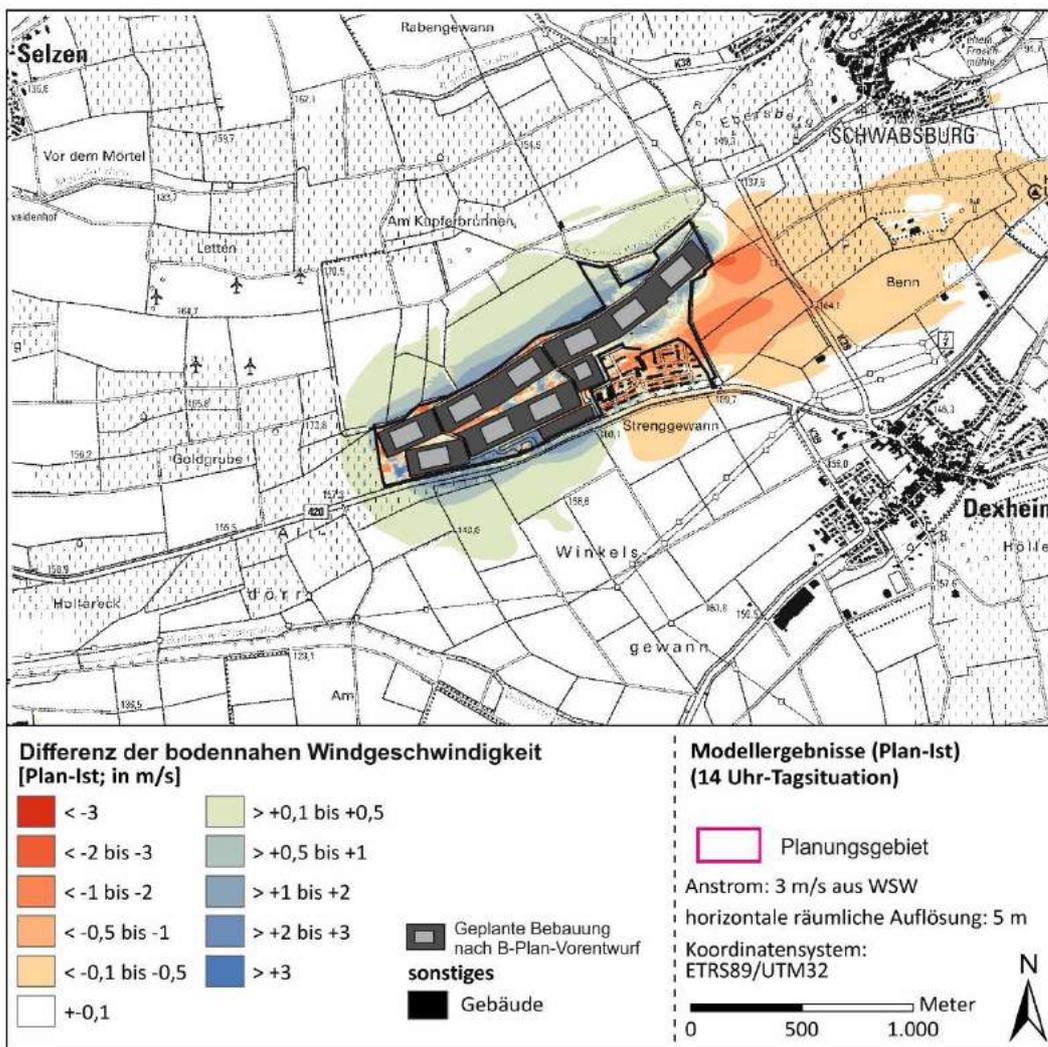


Abbildung 35 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der Windgeschwindigkeit 2 m ü.G. am Tag bei vorherrschendem Westsüdwestwind mit 3.0 m/s in einer Höhe von 10 m ü.G. Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

5.3 Thermische / bioklimatische Umgebungsbedingungen - Ergebnisse für den Ist-Zustand und Plan-Zustand (Nacht- und Tagsituation)

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur (04:00 Uhr) ermöglicht es, überwärmte Siedlungsbereiche (sogenannte Wärmeinseln) zu identifizieren, und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die nachfolgend aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Unterschiede innerhalb der Siedlungsgebiete bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

In Abhängigkeit von der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Höhenlage des Standorts, kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis (**Abbildung 36**) in der **Ist-Situation** von ca. 14 - 15 °C in unbebauten Hangeinschnitten (= Kaltluftsammelgebiete) bis über 19 °C über großflächig versiegelten Bereichen des Planungsgebiets. Die Ortslagen von Schwabsburg und Dexheim zeigen sich durch den Einfluss lokaler Kaltluftbewegungen thermisch begünstigt. Lufttemperaturen von über 19 °C bleiben auf dicht bebaute Innerortslagen begrenzt.

Das Planungsgebiet profitiert bzgl. der nächtlichen thermischen Belastung von den gebietsinternen Grün- und Gehölzflächen. Es zeigt sich eine vielfältiges kleinräumiges Mosaik aus kühlen und überwärmten Arealen.

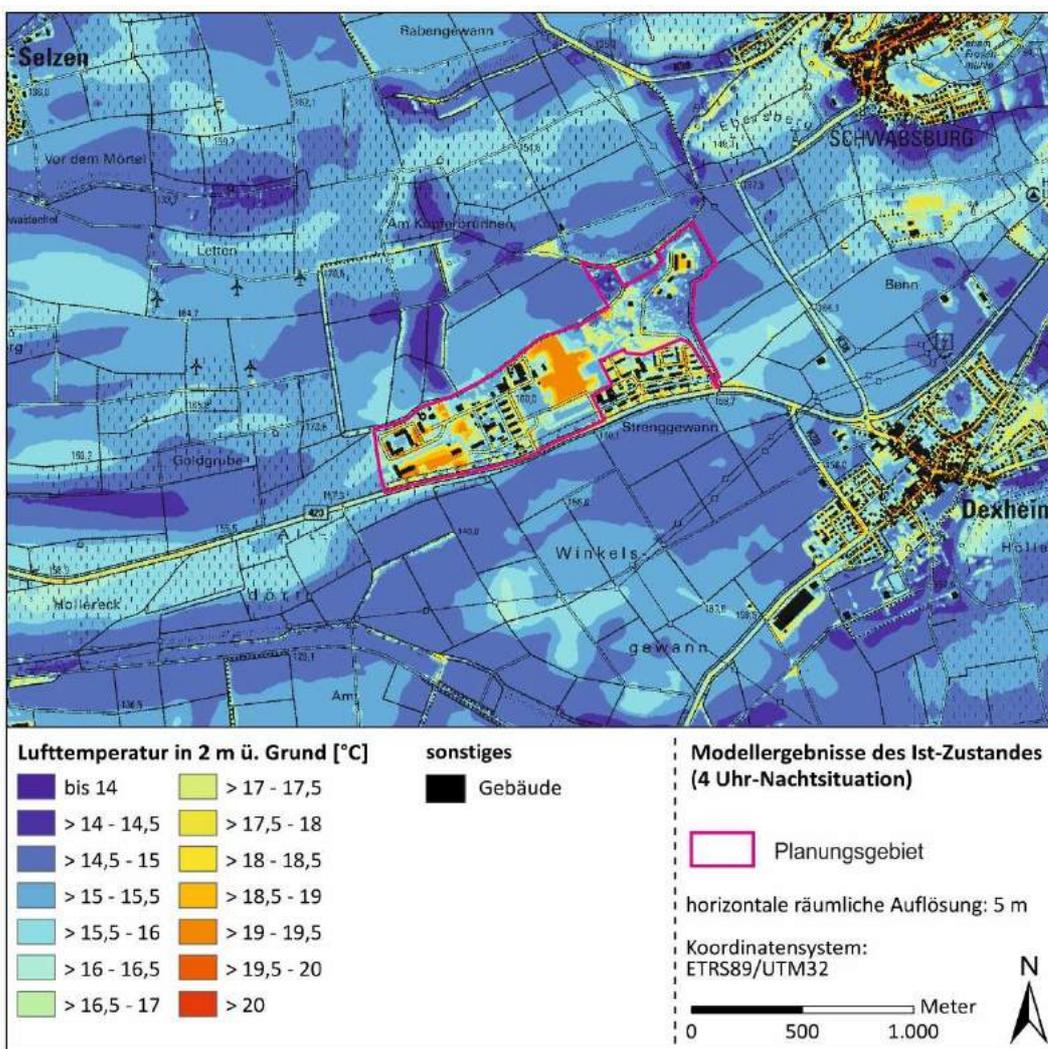


Abbildung 36: Ist-Zustand. Nächtliche Lufttemperaturverteilung (2 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Mit Realisierung der geplanten Bebauung (Betrachtung eines Worst-Case Falles, **Abbildungen 37** und **38**) kommt es in Strahlungsnächten allein im direkten Planungsumfeld zu Änderungen der Lufttemperaturverteilung. In den unmittelbaren Luv- und Lee-Lagen des Planungsgebiets nimmt die Lufttemperatur durch die leicht reduzierte Windgeschwindigkeit um ca. 0.1 – 0.5 K ab. In Bereichen mit vermehrter Labilisierung der bodennahen Kaltluftschicht steigt die Lufttemperatur hingegen um ca. 0.1 – 0.5 K an. Die Kaltluftbildung über dem Freiraumgefüge im Planungsumfeld ist ausreichend, um die Ausbildung einer prägnanten Wärmeinsel im Planungsgebiet zu unterbinden. Ergänzend forcieren die angedachten grünordnerischen Maßnahmen („Centralpark“, Sicherung und Ergänzung von Gehölzstrukturen am Gebietsrand) die nächtliche Abkühlung im Planungsgebiet.

Die benachbarten Ortslagen von Dexheim und Schwabsburg sind von keinen nächtlichen Lufttemperaturänderungen betroffen.

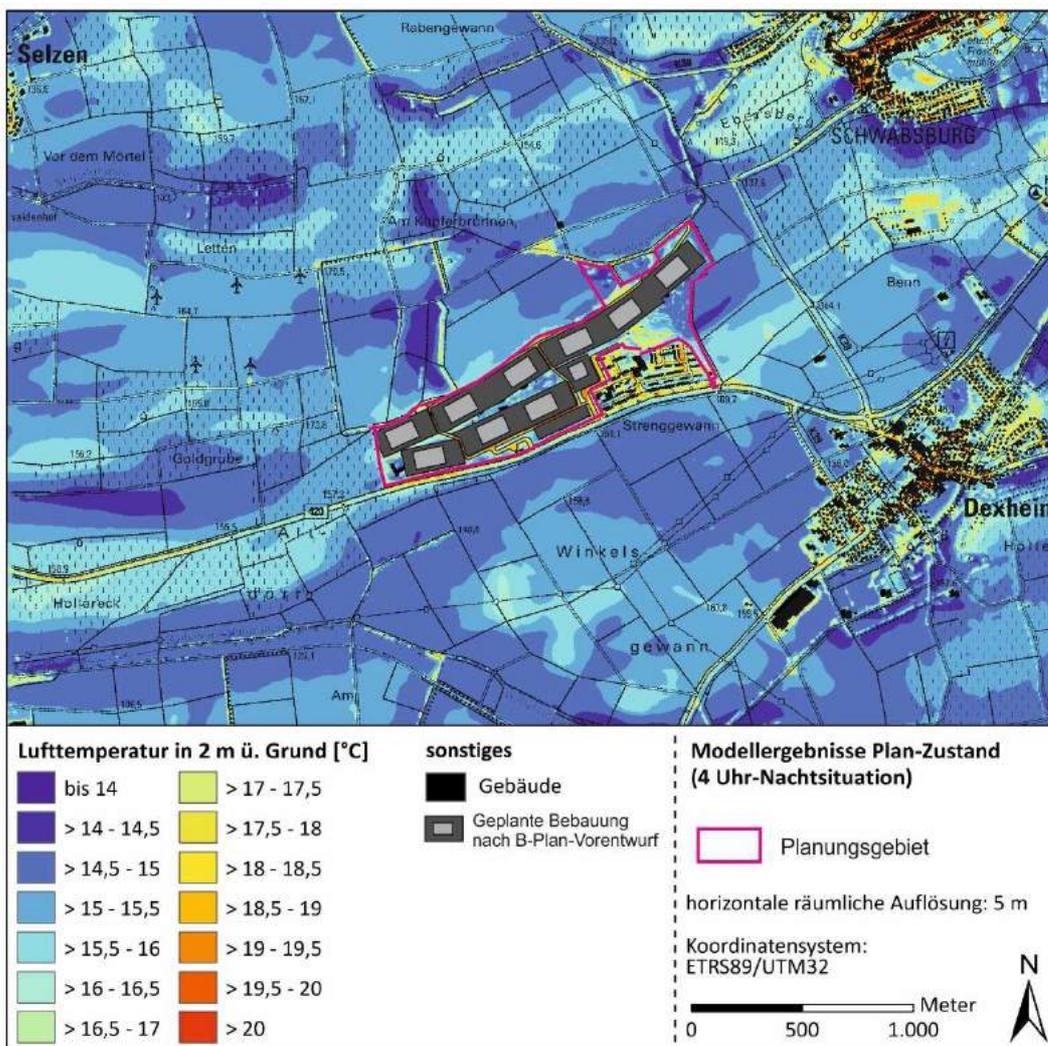


Abbildung 37: Plan-Zustand. Nächtliche Lufttemperaturverteilung (2 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

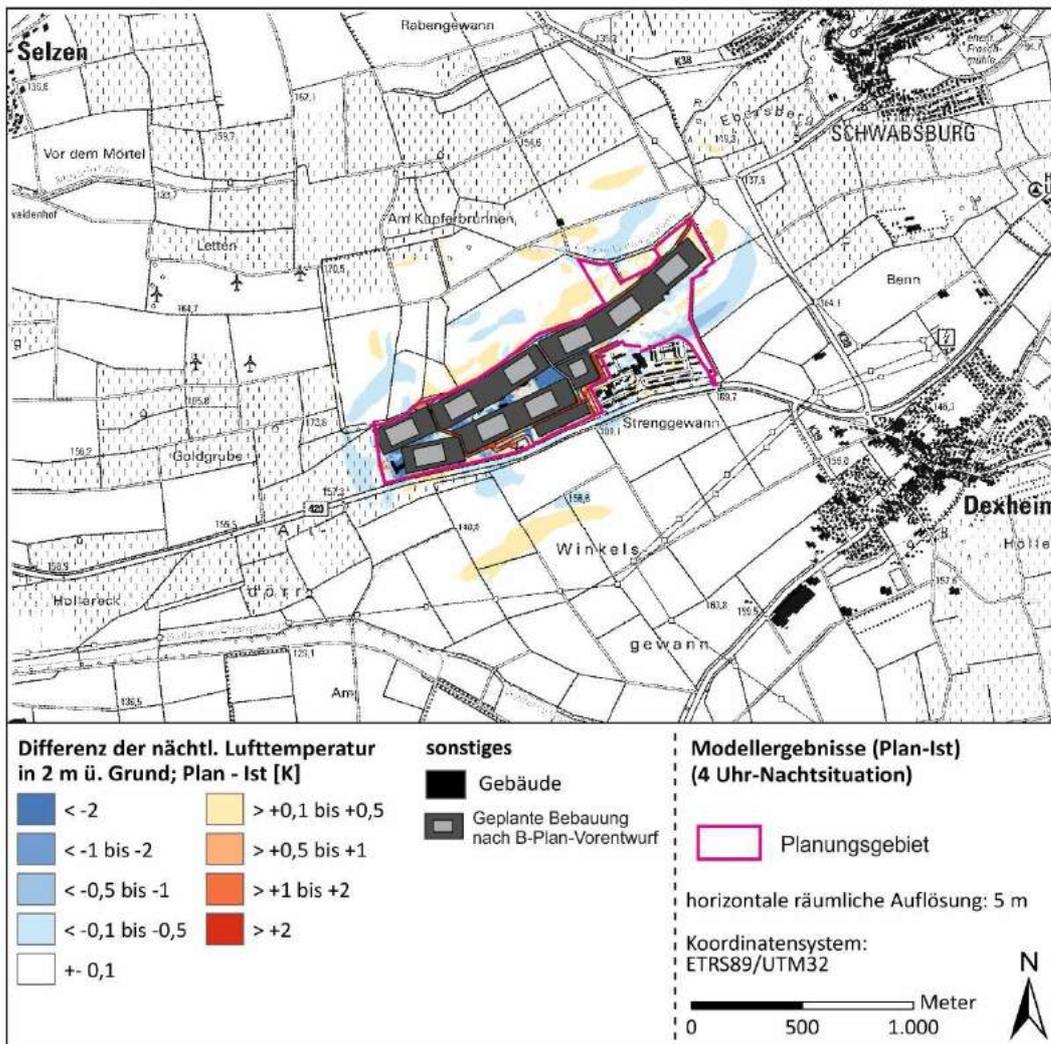


Abbildung 38 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der Lufttemperatur 2 m ü.G. in einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht (04:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die benachbarten Ortslagen von Dexheim und Schwabsburg sind von keinen Lufttemperaturänderungen betroffen.

Zur Bestimmung der Wärmebelastung am Tag wird nachfolgend für das Bioklimamaß PET (Physiologische Äquivalenttemperatur / engl. Physiological Equivalent Temperature) der 14:00 Uhr-Termin gewählt, da zu diesem Zeitpunkt in Kombination Sonneneinstrahlung / Lufttemperatur die höchste bioklimatische Belastung zu erwarten ist. Dabei wird den Berechnungen ein Sommertag ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) zu Grunde gelegt, um im Resultat eine möglichst große Spannbreite unterschiedlicher Belastungsstufen herausarbeiten zu können. Damit kann u.a. die Aufenthaltsqualität im Bereich des geplanten Data Center Campus bewertet werden.

Der PET-Wert ist ein biometeorologisches Bewertungsmaß [siehe VDI-RICHTLINIE 3787, BL. 2 (2022): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas], das den aktuellen meteorologischen Atmosphärenzustand in thermischer Hinsicht für den Menschen bewertbar macht.

Die PET ist auf Basis einer standardisierten Person, die sich im Freien aufhält und nachfolgende Kriterien erfüllt, diejenige Temperatur, bei der im typischen Innenraum die Energiebilanz eines Menschen bei gleichen Werten der Haut- und Kerntemperatur ausgeglichen ist. Es findet eine Adaption der real wahrgenommenen Bedingungen der Außenwelt in den Innenraum statt und ermöglicht es dem Menschen, den thermischen Zustand außerhalb mit seinen Erfahrungen im Innenraum in Relation zu setzen.

Die Standardperson (Klima-Michel) für den die PET- Berechnung aufgestellt ist, weist folgende Merkmale auf:

- Geschlecht: männlich
- Alter: 35 Jahre
- Gewicht: 75 kg
- Größe: 1,75 m
- Körperoberfläche: 1,9 m²
- metabolische Rate: 80 W (leichte Tätigkeit, sitzend)
- Kleidungsfaktor: 0,9 clo

Die PET zeigt eine starke Abhängigkeit von der mittleren Strahlungstemperatur, die entscheidend von der direkten Sonneneinstrahlung geprägt wird. Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

Die Bewertung der Wärmebelastung nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 kann der **Tabelle 7** entnommen werden.

PET (°C)	Thermisches Empfinden	Belastungskategorie
>41	<i>sehr heiß</i>	<i>extrem starke Wärmebelastung / Hitzestress</i>
35 bis ≤ 41	<i>heiß</i>	<i>starke Wärmebelastung / Hitzestress</i>
29 bis ≤ 35	<i>warm</i>	<i>moderate Wärmebelastung</i>
23 bis ≤ 29	<i>leicht warm</i>	<i>leichte Wärmebelastung</i>
18 bis ≤ 23	<i>komfortabel (neutral)</i>	<i>kein thermischer Stress</i>

Tabelle 7: Kategorisierung von PET in Bereiche unterschiedlichen thermischen Empfindens.
VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (2022)

Abbildung 39 (Ist-Zustand): Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich gehölzüberstellte Flächen mit den geringsten PET-Werten von meist unter 29 °C ab (keine bis leichte Wärmebelastung). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Schattenbereiche von Gehölzen / Bäumen in der Regel als „kühle“ Rückzugsorte dienen können. Auch Gewässer wirken am Tag kühlend, insbesondere in Kombination mit schattenwerfender Ufervegetation. Im Bereich der Weinbauflächen führt der Schattenwurf der Blätter im Bereich der Rebzeilen ebenfalls zu einer leichten Minderung der Wärmebelastung.

Die Landwirtschaftsflächen zeigen sich durch den Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung stark bis extrem belastet. Hier ergeben sich bzgl. der bioklimatischen Bewertung keine größeren Unterschiede zu versiegelten Flächen. Im Planungsgebiet fungieren gehölzüberstellte Fläche durch ihren Schattenwurf ebenfalls als bioklimatische Gunstflächen.

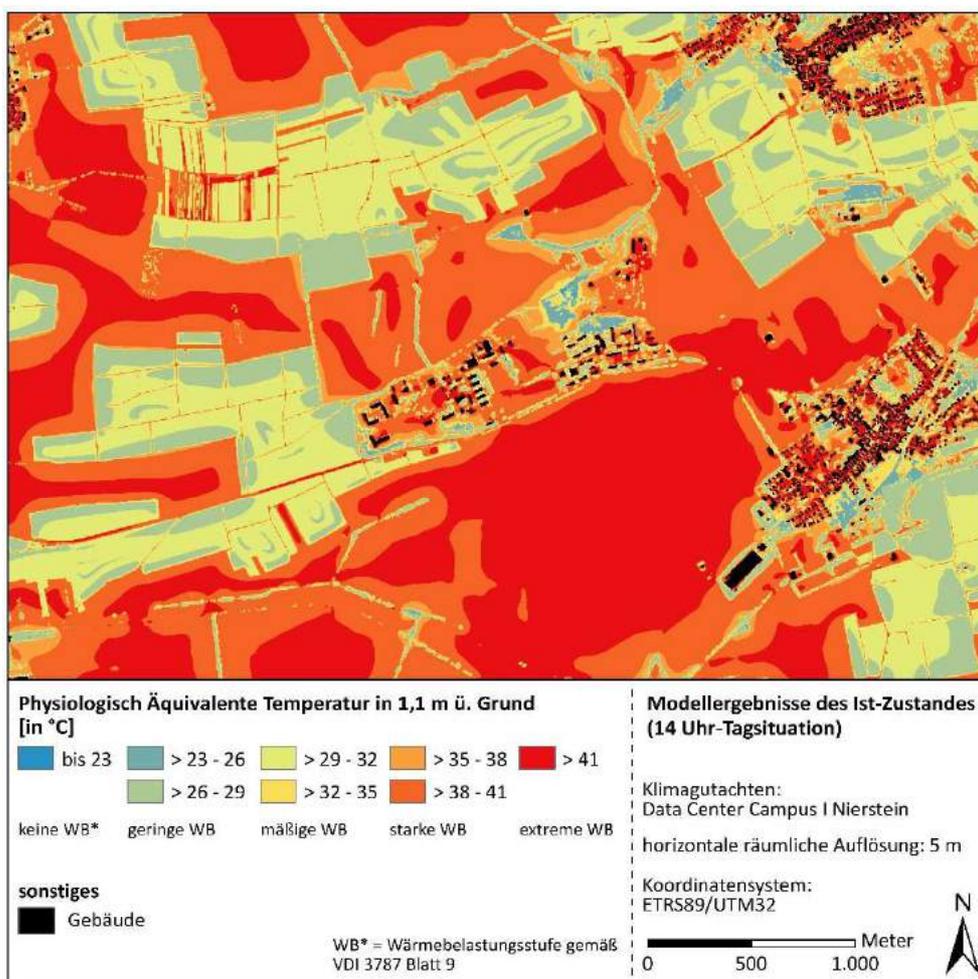


Abbildung 39: Ist-Zustand. PET-Werte (1.1 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für den **Plan-Zustand (Abbildungen 40 und 41)** lassen erkennen, dass sich die planungsbedingten Veränderungen bei der bioklimatischen Belastung auf das Planungsgebiet und dessen unmittelbaren Nahbereich beschränken. Durch den zusätzlichen Schattenwurf der geplanten Bebauung sowie durch die Windbeschleunigungen am Nord- und Südrand des Planungsgebiets (siehe **Abbildung 35**) nimmt die bioklimatische Belastung am Tag im unmittelbaren Nahbereich der geplanten Bebauung gegenüber dem Ist-Zustand ab. Allein im Osten und Nordosten stellen sich im Freiland kleinflächige bioklimatische Zusatzbelastungen ein. Sensible Wohnbebauung ist von den bioklimatischen Zusatzbelastungen nicht betroffen.

Innerhalb des Planungsgebiets können gehölzüberstellte Freiflächen als kühle Rückzugsorte für die Beschäftigten definiert werden.

Bezüglich der bioklimatischen Umgebungsbedingungen ist das Planungsvorhaben als verträglich einzustufen.

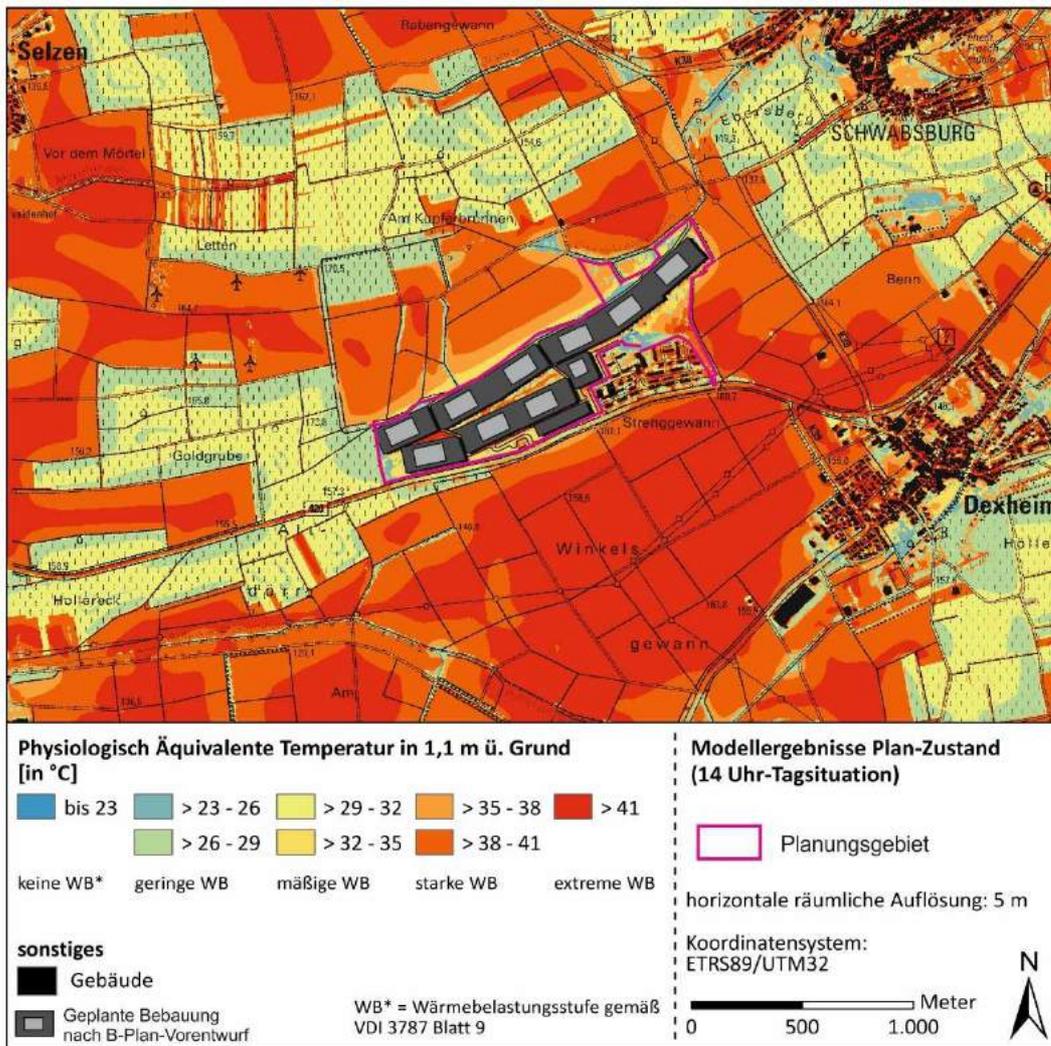


Abbildung 40: Plan-Zustand. PET-Werte (1.1 m ü.G.) im Planungsgebiet und in dessen Umfeld an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

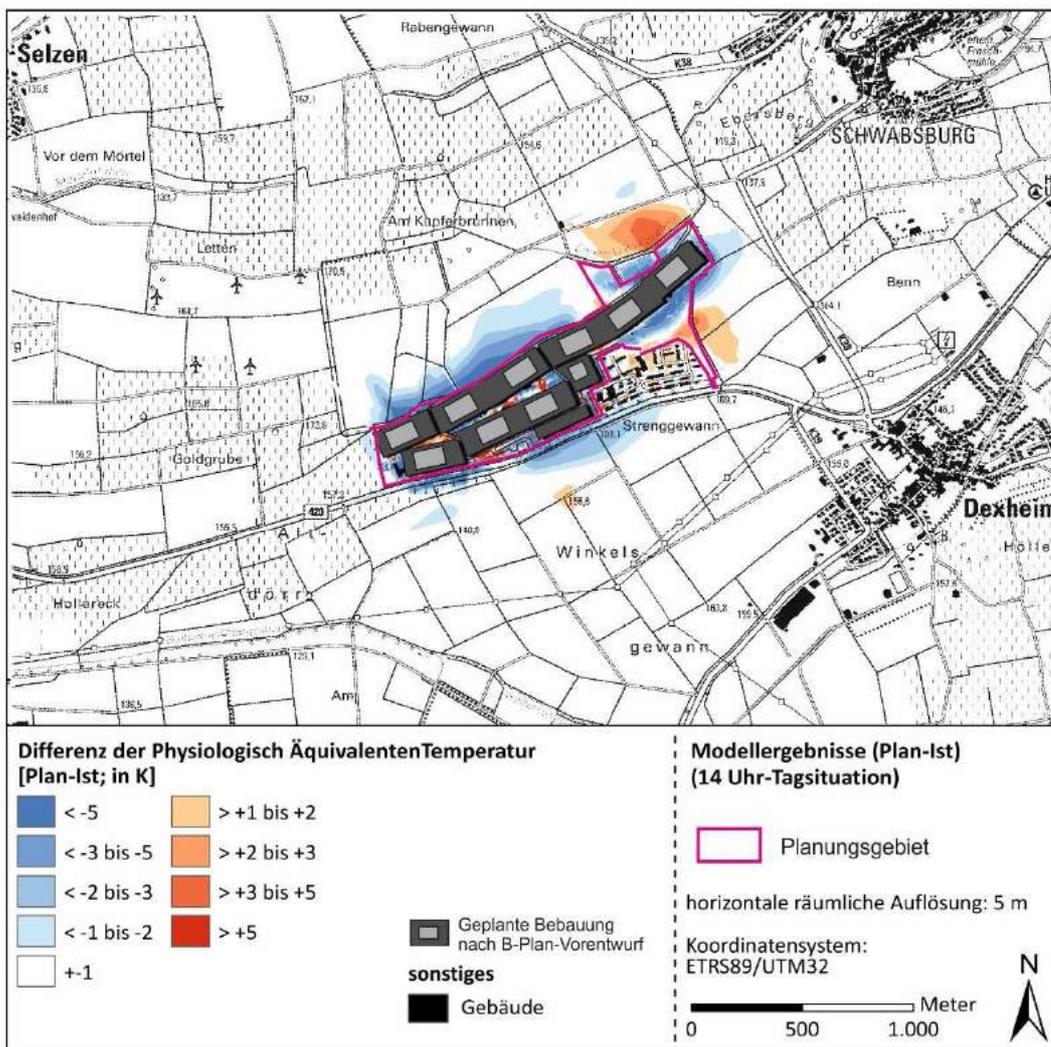


Abbildung 41 Vorher-Nachher-Vergleich. Planungsbedingte Zu- bzw. Abnahme der bioklimatischen Belastung (PET-Werte) 1.1 m ü.G. an einem windschwachen sommerlichen Strahlungstag (14:00 Uhr). Grundkarte: Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0

6 Zusammenfassung und Bewertung

In der Verbandsgemeinde Rhein-Selz plant das Unternehmen NTT GLOBAL DATA CENTERS FRA6 CAMPUS GMBH auf dem überwiegenden Teil des Areals der ehemaligen „Anderson Barracks Dexheim“ einen großflächigen Campus für Rechenzentren („Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“).

Das ca. 59.9 ha große Planungsgebiet „Data Center Campus Nierstein FRA6 NTT“ befindet sich im Osten des Landschaftsraums rheinhessisches Tafel- und Hügelland und ist in eine Agra- und Weinbaulandschaft eingebettet.

Die Entfernung des geplanten Rechenzentrumcampus zur nächstgelegenen Siedlungslage Dexheim beträgt ca. 800 m. Das Stadtgebiet von Nierstein befindet sich mit seinem Stadtteil Schwabsburg in einer nordöstlichen Entfernung von ca. 780 m. Die Abstände des Planungsgebiets zu den Ortslagen Friesenheim und Königernheim im Südwesten bzw. Westen belaufen sich jeweils auf ca. 2.000 m.

Die Geländehöhen im Planungsumfeld bewegen sich zwischen ca. 208 m (Farrenberg östlich von Dexheim) und ca. 95 m ü. NHN (Schwabsburg).

Das Planungsgebiet nördlich der B 420 befindet sich in einer Höhenlage von ca. 173 m ü. NHN im Nordwesten und ca. 135 m ü. NHN im Nordosten. Entlang der B 420 steigt das Gelände von Südwesten nach Nordosten von ca. 158 m ü. NHN auf ca. 170 m ü. NHN an.

Im Südwesten fällt das Gelände in den Hundgraben bzw. Dalheimer Flutgraben ab. Im Nordosten schließt der Engelsklauergraben / Diebsklauergraben an das Planungsgebiet an. Beide Hangeinschnitte fungieren in Strahlungsnächten als lokale Kaltluftammel- bzw. Kaltluftabflussgebiete.

Im Planungsgebiet bestehen größtenteils noch Baustrukturen der ehemaligen US-Kaserne „Anderson Barracks“.

Der Regionale Raumordnungsplan Rheinhessen-Nahe 2014 (**Abbildung 7**) weist das Planungsgebiet zum Großteil als Siedlungsfläche Industrie und Gewerbe aus. Im nördlichen Teilgebiet befindet sich ein Areal, das als sonstige Freifläche festgesetzt ist. Das direkte Umfeld des Planungsgebietes ist als ein Vorranggebiet für die Landwirtschaft gekennzeichnet. Derartige Gebiete tragen zur nächtlichen Kaltluftbildung und zur Intensivierung der Gebietsdurchlüftung bei.

Der vom Planungsbüro Stadt.Quartier vorgelegte Vorentwurf für den Bebauungsplan „Rhein-Selz-Park, II / Rechenzentrum“ weist das Planungsgebiet als Sondergebiet (SO) aus.

Für die Rechenzentren sind, entsprechend des Masterplans, 10 Baufelder gekennzeichnet. In diesen Bereichen sind max. Gebäudehöhen von 29 m zzgl. 3 m für Lärm- / Sichtschutzwänden und Technikaufbauten festgesetzt. Für Nebengebäude sind max. Gebäudehöhen von 16 m geplant.

Die festgesetzten Höhen der Oberkanten dürfen durch Abluftkamine überschritten werden.

Auf den Rechenzentren befinden wärmeemittierende Rückkühler. Sie stoßen in der Regel Warmluft mit einer Temperatur von 25 – 30°C mit einer Geschwindigkeit von ca. 8 – 10 m/s aus. An heißen Tagen muss mit höheren Luftaustrittstemperaturen (bis über 50°C) gerechnet werden.

Im Sondergebiet wird für die Substation sowie die Baufelder BF-A bis BF-J die Grundfläche (GR) jeweils als Höchstmaß (siehe **Tabelle 2**) festgesetzt.

Zur Eingrünung des Geländes und zur Sicherung einer ausreichenden Versickerungsfähigkeit der Böden legt der Bebauungsplan-Vorentwurf Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Grünstrukturen und des Bodens fest.

So ist je fünf Kfz-Stellplätze zwischen den Stellplätzen oder unmittelbar an diese angrenzend ein großkroniger Laubbaum gemäß einer beigefügten Pflanzliste anzupflanzen. Erschließungswege, Wege und Plätze, die nicht regelmäßig mit Kraftfahrzeugen befahren werden sowie ebenerdige Stellplätze sind in wasserdurchlässiger Bauweise und versickerungsfähigem Unterbau herzustellen. Ausgenommen davon sind befestigte Aufstellflächen für die Feuerwehr.

Außerdem sind als Maßnahme zur Reduktion bioklimatischer Belastungen die Farbgebung der Gebäudefassaden und Oberflächenbefestigungen vorgegeben. Demnach sind Materialien und Farbtöne mit geringer Wärmespeicherung zu verwenden, bei welchen der L-Wert des RAL Design Systems mindestens 50 oder heller ist.

Im Rahmen des anstehenden Planungsprozesses sind die ortsspezifischen strömungsdynamischen und thermischen / bioklimatischen Verhältnisse vertiefend zu analysieren und die aus den vorgesehenen Planungen resultierenden Modifikationen zu beurteilen.

Zur klimaökologischen Bewertung des vorgelegten Planungsentwurfs erfolgt zunächst eine Beschreibung der lokalen Klimasituation und möglicher Klimawandelfolgen.

In weiteren Analyseschritten werden die planungsbedingten Veränderungen im Kaltluftprozessgeschehen, bei den thermischen / bioklimatischen Umgebungsbedingungen und bei den ortsspezifischen Belüftungsverhältnissen bilanziert.

Wie die mehrjährigen Winddaten (2011 – 2020) des Windrosenatlases Rheinland-Pfalz zeigen, herrschen im Planungsgebiet im Allgemeinen südsüdwestliche bis westsüdwestliche und nordnordöstliche bis ostnordöstliche Winde vor.

Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt im Bereich des Planungsgebiets ca. 3.4 - 3.7 m/s, wodurch eine intensive Durchlüftung möglich ist. Innerhalb der Bebauung kann die mittlere Windgeschwindigkeit auf Werte von unter 2.0 m/s sinken, so dass dort von insgesamt geringer Durchlüftungsintensität auszugehen ist.

In den Nachtstunden setzen bei wolkenarmen Himmel über den Hang- und Tallagen des Planungsumfeldes lokale Kaltluftbewegungen ein (ca. 22% der Nächte/Jahr), die wesentlich zur Belüftung der benachbarten Ortslagen (z.B. Dexheim, Schwabsburg, Friesenheim) beitragen.

Die thermische Situation an warmen / heißen Sommertagen wird im Wesentlichen durch die örtlichen Oberflächentemperaturen bestimmt.

Wie Ergebnisse satellitengebundener Infrarotaufnahmen für die Sommermonate 2018 – 2023 dokumentieren, zeigen die Wiesen/Landwirtschaftsflächen im Planungsgebiet mit 33 - 36°C am Tag größtenteils ein mittleres Oberflächentemperaturniveau. Im Planungsgebiet werden im Bereich versiegelter Flächen vermehrt Temperaturen von 36 – 42°C ermittelt. In Bereichen mit Gehölzbeständen (z.B. Engelsklauergraben) sind mittlere Oberflächentemperaturen von ca. 30 – 33°C zu bestimmen. Die thermische Gunstwirkung schattenwerfender Gehölzflächen und unversiegelter Freiflächen wird damit offensichtlich.

Die Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen zum Kaltluftprozessgeschehen dokumentieren, dass im Ist-Zustand im Planungsgebiet in zentraler und westlicher Gebietslage Kaltluftvolumenstromdichten von ca. 5 – 10 m³/(m·s) vorliegen. Diese nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2024 – Entwurf) nur mit einem geringen bis mäßigen Kaltluftdurchlüftungspotenzial verbunden. Das zentrale und westliche Planungsteilgebiet ist damit für die kaltluftbedingte Belüftung der benachbarten Siedlungslagen (Schwabsburg / Friesenheim / Dexheim) nur von untergeordneter Bedeutung. Im östlichen bzw. nordöstlichen Planungsteilgebiet sind Kaltluftvolumenstromdichten von ca. 10 – 20 m³/(m·s) zu bilanzieren. Diese Werte weisen auf ein bislang gutes Kaltluftdurchlüftungspotenzial hin. Während im westlichen Planungsteilgebiet durch die kuppenartige Lage nur lokale Kaltluftmächtigkeiten von ca. 15 - 30 m zu erwarten sind, können im nordöstlichen Teilgebiet vertikale Mächtigkeiten bis knapp über 40 m auftreten.

Im Plan-Zustand ändert sich durch die geplanten neuen Baustrukturen das lokale Kaltluftprozessgeschehen. Aufgrund der angestrebten baulichen Verdichtung gehen innerhalb des Planungsgebiets Kaltluftproduktionsflächen verloren, wodurch die nächtlichen Kaltluftproduktionsraten sinken. Zudem wirken die bis zu 32 m hohen Rechenzentren (inkl. Technikaufbauten) sowie die bis zu 16 m hohen Nebengebäude als zusätzliche Strömungsbarrieren. Die Strömung wird daher in den unmittelbaren Lee-Lagen der geplanten Bebauung reduziert. Gleiches gilt für die Luv-Lagen. Die räumliche Erstreckung dieser Bereiche bleibt aber auf das unbebaute Freiraumgefüge im Umfeld des Planungsgebiets beschränkt.

Die Modellergebnisse zum Kaltluftvolumenstrom belegen, dass in den Ortslagen Dexheim und Schwabsburg keine auffallenden planungsbedingten Abnahmen zu bilanzieren sind. Sie betragen deutlich weniger als 5%.

Laut VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) ist bei stadt-/siedlungsklimatisch bedeutsamen Kaltluftströmungen eine Verringerung der Kaltluftvolumina oder der Kaltluftfließgeschwindigkeit von mehr als 10% gegenüber dem Ist-Zustand als Eingriff mit lokalklimatisch nachteiligen Folgen (Zunahme der thermischen Belastung) im Kaltluftzielgebiet zu bewerten.

Das Planungsvorhaben ist somit nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) als klimaverträglich zu bewerten.

Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) wird derzeit überarbeitet. Seit März 2024 liegt ein erster Entwurf vor. Demnach ist in Gebieten mit Kaltluftvolumenstromdichten von unter 25 m³/m·s (z.B. dicht bebaute Ortslagen von Dexheim und Schwabsburg) eine planungsbezogene relative Einschränkung des Kaltluftvolumenstroms um max. 5% tolerabel. Auch dieser Wert wird in den zum Planungsgebiet benachbarten Ortslagen nicht erreicht.

Somit ist auch nach dem VDI-Richtlinienentwurf eine unzulässige Einschränkung der kaltluftspezifischen Belüftung nicht festzustellen.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zu den örtliche Belüftungsintensitäten am Tag lassen in den benachbarten Siedlungslagen ebenfalls keine bemerkenswerten Veränderungen erwarten.

Mit der Analyse des nächtlichen Lufttemperaturfeldes wird gezeigt, dass im Planungsgebiet im Ist-Zustand bereits mehrere größere Flächen bestehen, die sich in den Nachtstunden als kleinräumige Wärmeinseln darstellen. Allein im nordöstlichen Planungsteilgebiet bestehen größere Flächen, die zur örtlichen Kaltluftbildung beitragen.

Das von Landwirtschafts- und Weinbauflächen geprägte Umfeld bildet einen großflächigen thermischen Ausgleichsraum. Die Gunstflächen puffern den Wärmeeintrag vom Planungsgebiet in das Umfeld deutlich ab, so dass bislang vom Planungsgebiet für die nächstgelegenen Siedlungslagen von Schwabsburg und Dexheim keine thermische Negativwirkung ausgeht.

Mit Realisierung der geplanten Bebauung (Betrachtung eines Worst-Case Falles) kommt es in Strahlungsnächten allein im direkten Planungsumfeld zu Änderungen der Lufttemperaturverteilung. In den unmittelbaren Luv- und Lee-Lagen des Planungsgebiets nimmt die Lufttemperatur durch die leicht reduzierte Windgeschwindigkeit um ca. 0.1 – 0.5 K ab. In Bereichen mit vermehrter Labilisierung der bodennahen Kaltluftschicht steigt die Lufttemperatur hingegen um ca. 0.1 – 0.5 K an. Die Kaltluftbildung über dem Freiraumgefüge im Planungsumfeld ist ausreichend, um die Ausbildung einer prägnanten Wärmeinsel im Planungsgebiet zu unterbinden. Ergänzend forcieren die angedachten grünordnerischen Maßnahmen („Centralpark“, Sicherung und Ergänzung von Gehölzstrukturen am Gebietsrand) die nächtliche Abkühlung im Planungsgebiet.

Die benachbarten Ortslagen von Dexheim und Schwabsburg sind von keinen nächtlichen Lufttemperaturänderungen betroffen.

Auch die Ergebnisse zur bioklimatischen Belastung lassen durch die Planung in den nächstgelegenen Ortslagen Dexheim und Schwabsburg keine Zusatzbelastung erwarten. Die planungsbedingten Veränderungen bei der bioklimatischen Belastung beschränken sich auf das Planungsgebiet und dessen unmittelbaren Nahbereich. Innerhalb des Planungsgebiets bilden gehölzüberstellte Freiflächen durch die Schattenbildung bioklimatische Gunsträume.

Das Vorhaben führt somit im Planungsumfeld zu keiner auffallenden thermischen / bioklimatischen Zusatzbelastung.

7 Planungsempfehlungen

Angesichts der Prognosen zu den Klimawandelfolgen, die u.a. eine deutliche Zunahme von heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) und Tropennächten ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) erwarten lassen, muss es Ziel der Planung sein, die strömungsdynamische und thermische / bioklimatische Ungunst der geplanten Bebauung mit ergänzenden Ausgleichsmaßnahmen möglichst eng zu begrenzen.

Dies wird auch von Seiten des Landes Rheinland-Pfalz gefordert (**Abbildung 42**).



Abbildung 42: Deckblatt der Broschüre „Wege zur Planung eines nachhaltigen Gewerbegebiets. ENERGIEAGENTUR RHEINLAND-PFALZ GMBH. Gefördert durch: MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE UND MOBILITÄT RHEINLAND-PFALZ.

Nachfolgend werden daher klimawirksame Planungsempfehlungen skizziert, die Eingang in die Planung finden können.

Insgesamt bieten sich aus klimaökologischer Sicht fünf Handlungsfelder an (siehe auch **Abbildung 43**):

- Grüne Infrastruktur
- Bauwerksbegrünung
- Blaue Infrastruktur
- Oberflächen- und Straßenraumgestaltung
- Ventilation und Bebauung

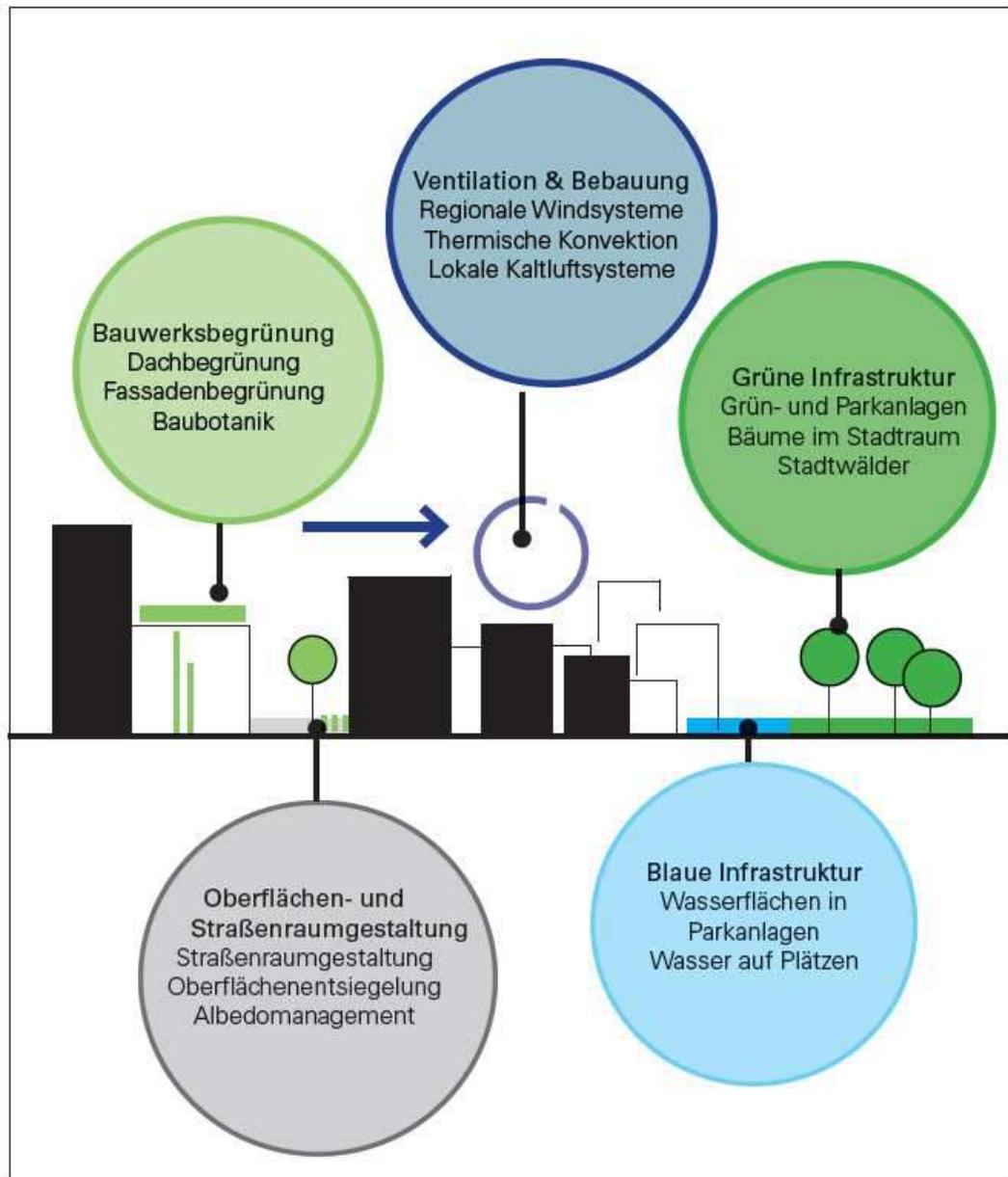


Abbildung 43: Mögliche Handlungsfelder zur Gestaltung günstiger klimatischer Umgebungsbedingungen (aus: Baumüller, N. 2018¹³)

¹³ **BAUMÜLLER, N. (2018):** Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung. Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Städtebau-Institut der Univ. Stuttgart.

Strömungsdynamik / Ventilation und geplante Bebauungsstrukturen:

Bebauungsinterne Ventilationsachsen dienen im Allgemeinen dazu, an heißen Sommertagen örtliche Wärmestaus zu unterbinden und ggf. Luftschadstoffakkumulationen zu vermeiden. Die Breite derartiger Zugbahnen sollte ein Mindestmaß von ca. 25 m aufweisen. Damit bleibt noch Raum für grünordnerische Maßnahmen in Form von Bäumen ohne die Durchlüftungsfunktion zu beeinträchtigen. Die Ventilationsachsen sollten möglichst in Hauptwindrichtung ausgerichtet sein.

Bebauungsinterne Abstandsflächen mit der Funktion „Kaltluftleitbahn“ sollen Kaltluftzuflüssen aus benachbarten klimaökologischen Ausgleichsräumen (z.B. Landwirtschaftsflächen) eine Durchdringung der Bebauung ermöglichen, um den örtlichen Wärmeinseleffekt zu minimieren. Diese sollten eine möglichst geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen. Sie können ggf. auch an Erschließungsstraßen geknüpft sein.

Die im bisherigen Planungskonzept (**Abbildung 8**) dargestellte Bau- und Freiflächenstruktur folgt bereits wesentlichen Zielvorstellungen. Wie **Abbildung 13** dokumentiert, bestimmen im Planungsgebiet am Tag im Allgemeinen west-südwestliche Winde das Luftaustauschgeschehen. Die zentrale Freiraum-/Grünachse im Planungsentwurf nimmt die Richtung auf und zeigt im westlichen und zentralen Planungsteilgebiet eine trichterförmige Ausgestaltung (Breite ca. 20 m bis ca. 80 m, Länge 560 m). Zwar wird die Ventilationsachse am Übergang vom zentralen zum nordöstlichen Plangebiet durch das Bau- und Freiflächenfeld H beendet, ihre Wirksamkeit bezüglich der internen Durchlüftung wird durch die Modellrechnungen aber nachgewiesen.

Zwischen dem südlich und nördlich angrenzenden Freiraumgefüge und der plangebietsinternen Freiraum-/Grünachse bilden im vorgelegten Masterplan Nordnordwest-Südsüdost ausgerichtete Gebäudeabstandsflächen mit Maßen von ca. 33 – über 100 m funktionsfähige Belüftungsachsen, die u.a. das Einsickern von Kaltluft ermöglichen. Mögliche Parkierungsflächen (u.U. überstellt mit PV-Anlagen) bilden dabei nur geringfügige Strömungshindernisse.

Die angedachten Gebäudekubaturen können aus klimaökologischer Sicht ebenfalls befürwortet werden. Durch ihre Südsüdwest-Nordnordost--Längsausrichtung ist die gebäudebedingte Barrierewirkung gegenüber der Hauptwindrichtung Südsüdwest minimiert.

Im nordöstlichen Planungsteilgebiet können die potenziellen Rechenzentren durch ihre gereichte Anordnung umströmt werden. Grundsätzlich sind größere Gebäudehöhen gegenüber großflächig angelegten, niedrigeren Baustrukturen aus klimaökologischer Sicht zu befürworten.

Bauwerksbegrünung / Fassadenbegrünung:

Abhängig von den Fassadenkonzepten der geplanten Bebauung können Fassadenteilbegrünungen einen Beitrag zur Reduktion der örtlichen Überhitzung an heißen Sommertagen leisten. Begrünte Wände heizen sich weniger auf, wodurch sie weniger Wärme an die Umgebung abgeben. Gleichzeitig bewirkt der Verdunstungseffekt der Vegetation eine weitere Abkühlung. Im Vergleich zu einer unbegrünten Wand können nach PFOSER ET AL. (2013¹⁴) in ca. 0.6 m Abstand zur Begrünung Lufttemperaturreduktionen bis ca. 1.3 K gemessen werden.

Für die Luftreinhaltung sind begrünte Fassaden ebenfalls von Vorteil. Die Vegetation filtert Feinstaub und Schadstoffe aus der Luft und verbessert dadurch die Luftqualität. Auch für die Biodiversität sind begrünte Fassaden positiv. Sie bilden Lebensräume und können durch eine gezielte Bepflanzung mit geeigneten Pflanzenarten ebenfalls eine wichtige Nahrungsquelle darstellen.

Für Fassadenbegrünungen bieten sich zusammenhängende geschlossene Fassadenflächen an, die nicht durch Fenster- oder Türöffnungen gegliedert sind. Besonders wirksam sind für den Bewegungsraum des Menschen Fassadenbegrünungen bis zu Höhen von ca. 10 m.

Grundsätzlich kann bei Fassadenbegrünungen zwischen wand- und bodengebundenen Systemen unterschieden werden, wovon vier Beispiele in **Abbildung 44** dargestellt sind. Bei der bodengebundenen Fassadenbegrünung wachsen die Pflanzen aus einer unversiegelten Fläche für den Wurzelraum auf dem Boden entlang der Fassade nach oben. Diese kann frei (1) oder unter Verwendung von Kletterhilfen (2) realisiert werden.

Bei der fassadengebundenen Variante werden Substratträger an der Hauswand montiert. Diese können z. B. Pflanzenkästen (3) oder mit Erdschichten versehene Paneele sein (sog. „living walls“) (4) - SANTI ET AL. (2019¹⁵).

¹⁴ PFOSER, N., JESSER, N., HENRICH, J., HEUSINGER, J., WEBER, S. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen - Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. Abschlussbericht August 2013, Technische Universität Darmstadt (307 S.).

¹⁵ SANTI, G., BERTOLAZZI, A., TURRINI, U. (2019): Vertical Turf For Green Façades: a Vertical Greenery Modular System Integrated To the Building Envelope. In: Journal of Green Building, Vol. 14 (4). DOI: 10.3992/1943-4618.14.4.111 (S. 111-132).

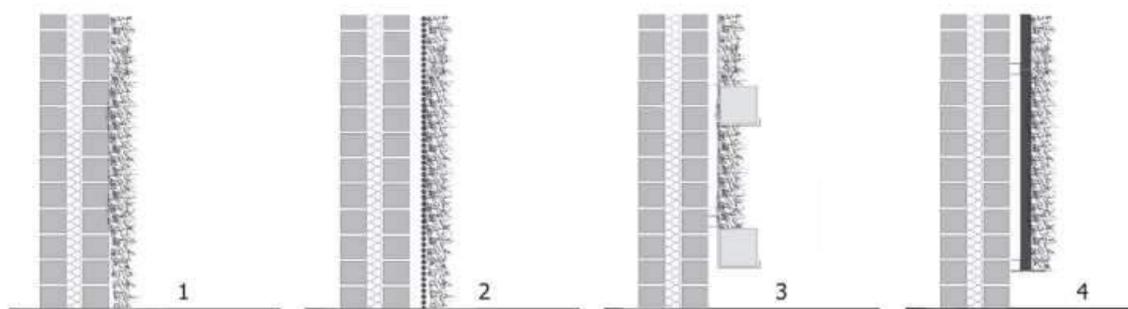


Abbildung 44: Beispielhafte Querschnittsdarstellung unterschiedlicher Fassadenbegrünungstypen (aus: SANTI ET AL. 2019: 115).

Es werden aus fachgutachterlicher Sicht bodengebundene Begrünungen empfohlen, da sich die erforderliche Wasserversorgung gegenüber Pflanzkästen einfacher realisieren lässt.

Bedeutsam sind die Fassadenbegrünungen insbesondere an den Süd- und Westfassaden.

Brandschutzrechtliche Anforderungen sind zu beachten.

Nebenanlagen (z.B. überdachte Radabstellplätze etc.) sollten ebenfalls begrünt werden.

Bauwerksbegrünung / Dachbegrünung:

Dachbegrünungen weisen folgende klimaökologischen Positiveffekte auf:

- Reduzierung der Luftschadstoffbelastung – insbesondere von Feinstaub – durch Erhöhung der schadstoffspezifischen Depositionsgeschwindigkeiten partikel- und gasförmiger Spurenstoffe. Durch die geringere Aufheizung der Luft über begrünten Dächern ist die vertikale Auftriebsströmung und somit die Stauaufwirbelung geringer.
- Dämpfung von Extremwerten der Oberflächentemperaturen durch die Verdunstungsleistung der Pflanzen. An heißen Sommertagen sind begrünte Dächer um ca. 17 – 33 K kühler als unbegrünte Dächer. Die kühlende Wirkung einzelner Dachbegrünungen beschränkt sich allerdings auf die Luftmassen direkt über der Dachoberfläche.
- Erhöhung der Wasserrückhaltefähigkeit nach Starkregen mit der dadurch bedingten Vermeidung von Abflussspitzen in der Kanalisation. Bei Extensivbegrünung beträgt der jährliche Wasserrückhalt im Mittel ca. 60% vom Niederschlag, bei Intensivbegrünung sogar bis 85%.

Beispielhafte Möglichkeiten der Dachbegrünung

Extensive Dachbegrünung, Schichthöhe: 8 – 9 cm, Vegetationsform: Sedum – Kräuter – Gräser, Wasserrückhalt: ca. 50 – 60%

Naturdach - extensive Dachbegrünung, Schichthöhe: 10 – 25 cm, Vegetationsform: Kräuter – Gräser - Sedum, Wasserrückhalt: ca. 60 – 70%

Blue Roof (extensiv Dachbegrünung mit Mäander-Wasserrückhalteelementen), Schichthöhe: 12 cm, Vegetationsform: Sedum – Kräuter – Gräser, Wasserrückhalt: $\geq 70\%$

Energiespardächer (SolarGrünDach), Schichthöhe: ab 8 cm, Vegetationsform: Sedum, Wasserrückhalt: ca. 50 – 60%

Durch die zahlreichen Technikaufbauten auf den Rechenzentrumsgebäuden ist eine großflächige Dachbegrünung nicht möglich. Auf Nebengebäuden sollte sie möglichst großflächig Berücksichtigung finden.

Eine Gestaltung PV-überdachter Parkierungsflächen wäre aus klimaökologischer Sicht zu begrüßen. Sie dienen dem Klimaschutz. Die PV-Anlagen schränken über der potenziellen Freifläche die nächtliche Ausstrahlung und somit die Abkühlung zwar leicht ein, aus Klimaschutzgründen sollten sie aber akzeptiert werden.

Oberflächen- und Straßenraumgestaltung / Berücksichtigung des Albedo-Effektes, Minimierung der Bodenversiegelung:

Damit günstige thermische / bioklimatische Umgebungsbedingungen gesichert werden, sind die befestigten Erschließungsstraßen/-wege auf das nur notwendige Maß zu begrenzen.

Zudem sollten die Wege- und Platzflächen mit möglichst hellen Oberflächenbelägen (Hellbezugswert¹⁶ $\geq 50\%$, (siehe **Abbildung 45**) ausgestaltet werden.

¹⁶ Der Hellbezugswert (engl. Albedo) definiert den Reflexionsgrad eines bestimmten Farbtons. Dabei ist der Reflexionsgrad des Schwarzpunktes = 0 % und der Reflexionsgrad des Weißpunktes = 100 %. Durch den Hellbezugswert wird beschrieben, wie weit der jeweilige Farbton vom Schwarzpunkt entfernt ist.

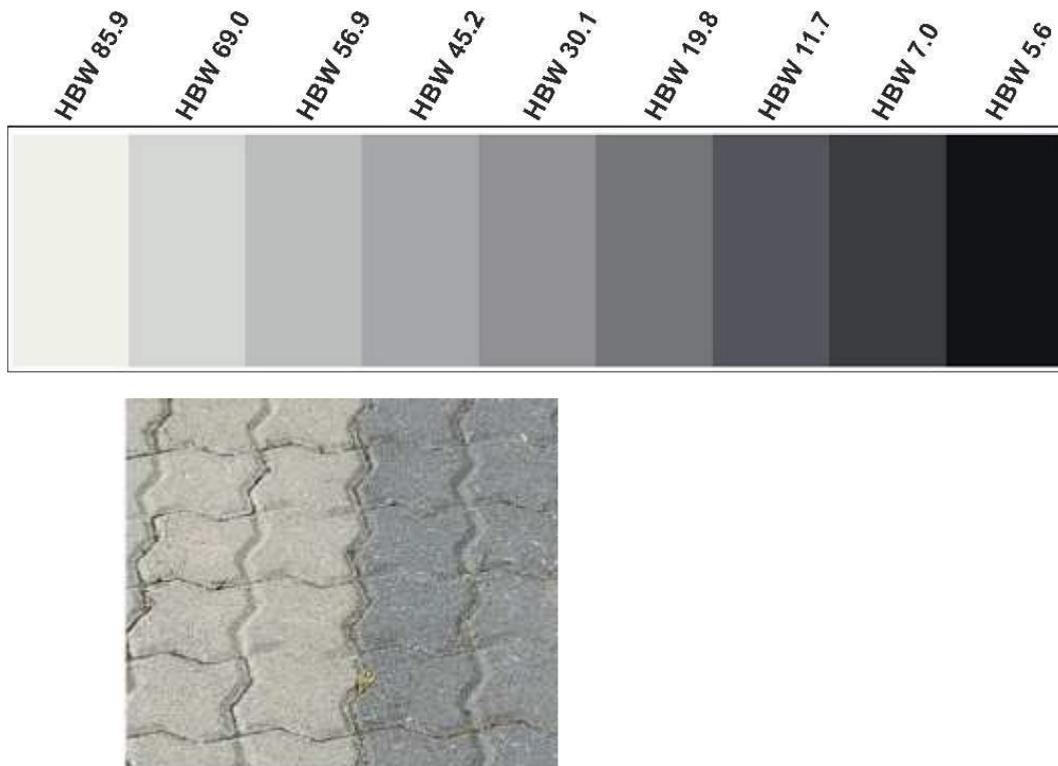


Abbildung 45: Hellbezugswerte unterschiedlicher Grautöne und beispielhafter Pflastersteine (aus: <https://www.brillux.de>; Fotoaufnahme: ÖKOPLANA)

Wie **Abbildung 46** zeigt, weisen hellgraue Pflasterbeläge gegenüber schwarzen Asphaltflächen am Tag deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen auf. In den Nachtstunden wird zudem der Wärmeinseleffekt wirksam reduziert. Bei zu hellen Belägen (HBW >0.80) kann es am Tag zu Blendeffekten und zur Steigerung der bioklimatischen Belastung durch die Reflexstrahlung kommen.

Parkierungsflächen sollten möglichst mit wasserdurchlässigen Oberflächenbelägen hergestellt werden. Die Vorteile der dadurch geringeren Bodenversiegelung sind u.a.:

- Reduktion vom Regenwasserabfluss und Wasserspeicherung im Boden,
- erhöhte Verdunstung vom Boden,
- geringere Oberflächentemperaturen.

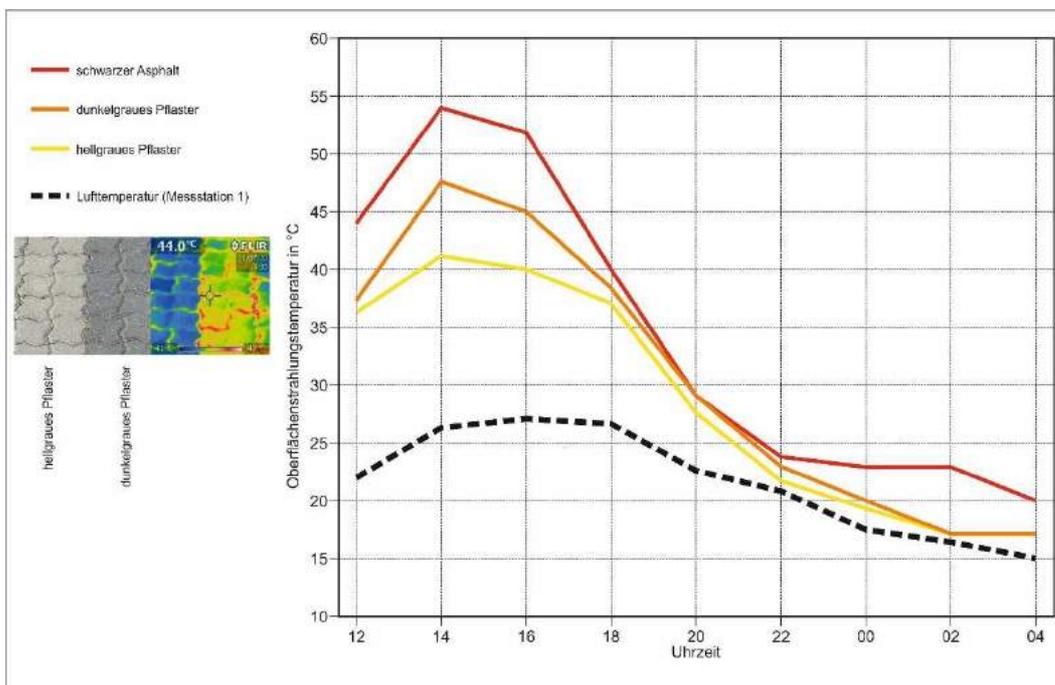


Abbildung 46: Oberflächenstrahlungstemperaturen unterschiedlicher Oberflächenbeläge am 21./22.07.2020 zwischen 12:00 Uhr und 04:00 Uhr. (Messungen, Bilder: ÖKOPLANA)

Oberflächen- und Straßenraumgestaltung bzw. grüne Infrastruktur / Sicherung begrünter Flächen im Planungsgebiet:

Der vorgelegte Masterplan weist noch keine Baumstandorte aus. Aus klimaökologischer Sicht wäre die Sicherung der vorhandenen Gehölze bzw. eine Ergänzung an den Plangebietsrändern zu begrüßen. Sie bilden einen wirksamen Puffer, um die Wärmeaura des Plangebiets räumlich eng zu begrenzen.

Innerhalb des Planungsgebiets sollten an den Südseiten der Erschließungsstraßen Laubbäume gepflanzt werden, um über ihren Schattenwurf die Aufheizung der befestigten Fahrbahnen zu minimieren. Zwischen den Bäumen sollte der Abstand so gewählt werden, dass dazwischen max. die Krone eines ausgewachsenen Baumes Platz findet. Im Bereich von Parkierungsflächen, die nicht mit PV-Anlagen überdacht werden, sollten zur Schattenbildung und zur Erhöhung des örtlichen Grünvolumens ebenfalls Baumpflanzungen realisiert werden. Je fünf Pkw-Stellplätze sollte mindestens ein schattenwerfender Baum gepflanzt werden. Dabei ist auf eine klimaangepasste Artenwahl zu achten.

Auch innerhalb des gebietsinternen „Grünzugs“ sollten inselartig Baumgruppen platziert werden. Die Verschattung verringert die thermische Belastung durch die direkte Sonneneinstrahlung am Tag. Die gefühlte Temperatur (PET) ist in beschatteten Bereichen an heißen Sommertagen um bis zu über 10 K niedriger als in unbeschatteten Bereichen mit gleicher Bodenbedeckung (siehe **Abbildung 23**). Die beschatteten Flächen speichern weniger Wärme, wodurch zudem der nächtliche Wärmeinseleffekt herabgesetzt wird.

Der zusätzlich kühlende Verdunstungseffekt von Bäumen ist stark abhängig von der Wasserverfügbarkeit. Wird ein Baum in Trockenperioden bewässert, kann er mehr Wasser verdunsten und der Kühleffekt ist größer als bei einem unbewässerten Baum, dem der ausgetrocknete Boden kaum Wasser liefert.

Daher kommt es zur Reduktion der Wärmebelastung auch auf die Pflege und eine sorgfältige Vorbereitung der Pflanzgruben an.

So kann zum Beispiel durch den Einsatz von Baumrigolen der Wasserhaushalt eines Baumes optimiert werden. In der Rigole kann Niederschlagswasser temporär zurückgehalten und gespeichert werden, so dass es zu einem späteren Zeitpunkt zur Bewässerung des Baumes eingesetzt werden kann. Vor allem in den ersten Jahren nach der Pflanzung müssen Jungbäume bei anhaltender Trockenheit regelmäßig bewässert werden.

Die Anlage von Retentionsbereichen (Versickerungsmulden), wie im aktuellen Masterplan bereits vorgesehen, wäre ebenfalls vorteilhaft. Sie tragen zur Vermeidung von Überschwemmungen bei Starkniederschlagsereignissen bei. Zudem ist eine Speicherung von Wasser für trockenere Perioden möglich.

Blaue Infrastruktur / Wasserflächen, Fontänen:

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der thermischen Umgebungsbedingungen an heißen Sommertagen bieten Wasserflächen in Form von Wasserspielen oder Brunnenanlagen mit bewegtem Wasser (**Abbildung 47**). Diese bieten sich bspw. im Bereich von gebietsinternen Aufenthaltsflächen (z.B. Pausenflächen für Arbeitende) an. Sie verringern die thermische Belastung an heißen Sommertagen im unmittelbaren Nahbereich durch Verdunstungskälte (vor allem beim Einsatz von Fontänen) und steigern damit die Qualität von Aufenthaltsbereichen. In Kombination mit schattenwerfenden Bäumen sind lokale Lufttemperatursenkungen von ca. 0.2 – 1.5 K möglich.



Abbildung 47: Beispielhaftes Wasserbecken, Brunnen mit kleinen Fontänen (Fotos: ÖKOPLANA, STADT LANDSCHAFT PLUS LANDSCHAFTSARCHITEKTEN GMBH)

Abschließende Bewertung:

Die zur Bewertung des vorgelegten Planungsentwurfs durchgeführten Klimaanalysen lassen im Planungsumfeld keine gravierenden klimaökologischen Negativeffekte erwarten, die einer Realisierung grundsätzlich entgegenstehen. Unvermeidbare strömungsdynamische Veränderungen führen in der nächstgelegenen Bestandbebauung (Dexheim, Schwabsburg, Friesenheim) zu keinen nennenswerten Beeinträchtigungen der nächtlichen Kaltluftbewegungen und der thermischen / bioklimatischen Umgebungsbedingungen.

Die ergänzenden Planungsempfehlungen dienen dazu, in Anlehnung an die landesweite Strategie zur Entwicklung klimaangepasster Gewerbegebiete, die baulich-freiraumplanerische Entwicklung des Planungsgebiets frühzeitig, proaktiv und systematisch auf die negativen Folgen des Klimawandels, wie z.B. Hitze, Trockenheit und Starkniederschläge vorzubereiten und dessen Widerstandskräfte zu stärken (Klimaresilienz).

Burst

.....
gez. Achim. Burst (Dipl.-Geogr.)
ÖKOPLANA

Mannheim, 14. August 2024

Quellenverzeichnis / weiterführende Literatur

BAUMÜLLER, N. (2018): Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung. Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Städtebau-Institut der Univ. Stuttgart.

BODENT A., MARLAND G., ANDRES R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

CUBASCH U ETAL. (2013): Introduction. In: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Deutscher Wetterdienst (2004): Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (10 m ü.G.) in der Bundesrepublik Deutschland. Offenbach a. M.

DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) 2008: Das Kaltluftabfluss-Modell KLAM_21. Theoretische Grundlagen und Handhabung des PC-Programms. Offenbach a. M.

GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH, ÖKOPLANA (2020): Stadtklimaanalyse Mannheim 2020. Hannover, Mannheim.

GROSS, G. 1985: Numerische Simulationen nächtlicher Kaltluftabflüsse und Tiefsttemperaturen in einem Moselseitental, Meteorol. Rdsch., 38, 161-171.

GROSS, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.

GROSS, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, Journal of Heat Island Institute International Vol. 12-2

KING, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefahr durch Straßenbauten. Berichte des DWD 130., Offenbach.

MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARD K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VAN VUUREN D. P., CARTER T. R., EMORI S., KAI-NUMA M., KRAM T., MEEHL G. A., MITCHELL J. F. B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S. J., STOUFFER R. J., THOMSON A. M., WEYANT J. P., WILBANKS T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756

ÖKOPLANA 2005: Landschaftsprogramm Rheinland-Pfalz – Teilbeitrag Klima. Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz vertreten durch die SGD-Süd. Mannheim.

ÖKOPLANA 2023: Klimagutachten zum Bebauungsplan N116 – „Erweiterung Gewerbegebiet Nord“ in Hattersheim am Main. Mannheim..

PFOSER, N., JESSER, N., HENRICH, J., HEUSINGER, J., WEBER, S. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen - Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. Abschlussbericht August 2013, Technische Universität Darmstadt (307 S.).

RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWANDEL FOLGEN (2020): Themenheft Klimawandel – Entwicklung in der Zukunft. Trippstadt.

SANTI, G., BERTOLAZZI, A., TURRINI, U. (2019): Vertical Turf For Green Façades: a Vertical Greenery Modular System Integrated To the Building Envelope. In: *Journal of Green Building*, Vol. 14 (4). DOI: 10.3992/1943-4618.14.4.111 (S. 111-132).

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2003/2024 - ENTWURF): VDI 3787, Bl. 5. Lokale Kaltluft. Düsseldorf.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2020): VDI 3787, Bl. 8. Umweltmeteorologie - Stadtentwicklung im Klimawandel. Düsseldorf.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2022): VDI 3787, Bl. 2. Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. Düsseldorf.