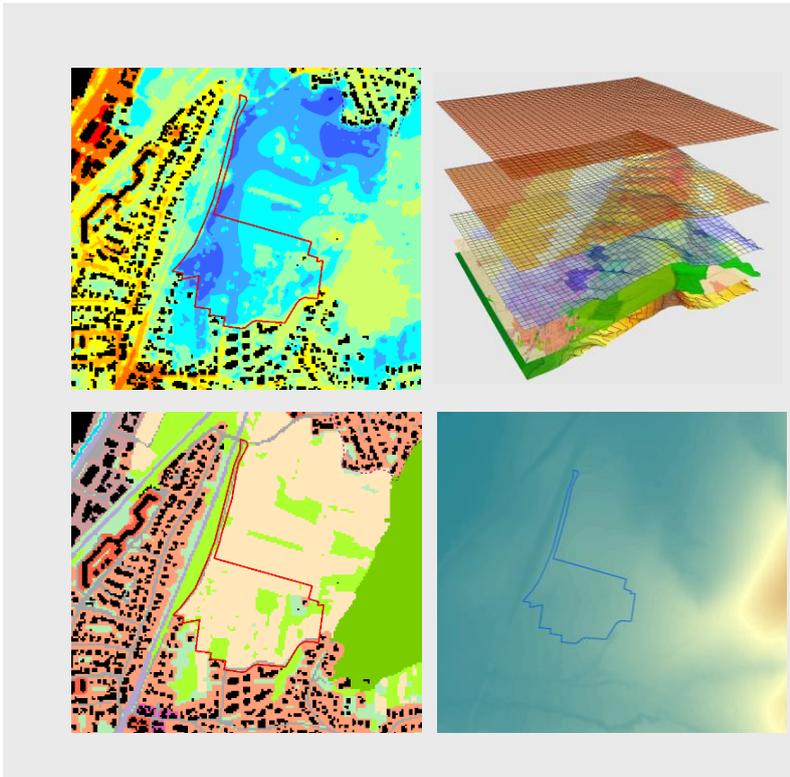


Klimaökologisches Fachgutachten mit den Schwerpunkten sommerliche Hitzebelastung, Kaltlufthaushalt und Klimawandelfolgen für den Bebauungsplan „Höhe“ in Freiburg-Zähringen



Auftraggeber:

**Entwicklungs- und Erschließungsgemeinschaft
Baugebiet Höhe GbR**

c/o badenovaKONZEPT GmbH & Co.KG

Zähringer Str. 338a

79108 Freiburg im Breisgau



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel. (0511) 3887200

FAX (0511) 3887201

www.geo-net.de

In Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. Günter Groß
Anerkannt beratender Meteorologe (DMG)
Öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen und
Kleinklima der IHK Hannover und Hildesheim

Hannover, Februar 2023

1. Einleitung

Der Bebauungsplan Nr. 2-100 „Höhe“ sieht die Realisierung eines neuen Wohnquartiers im Stadtteil Freiburg-Zähringen vor. Bei dem Gebiet handelt es sich derzeit im Wesentlichen um eine unbebaute Grünfläche sowie im nördlichen Bereich um eine landwirtschaftlich genutzte Fläche. Lediglich im Nordosten des Plangebietes befindet sich ein bebautes Grundstück mit einem einzelnen Wohnhaus (siehe Abb.1). Eine klimaökologische Ersteinschätzung auf Basis des gesamtstädtischen Klimaanpassungskonzeptes Freiburg (GEO-NET 2019) zeigt, dass sich das Plangebiet im nördlichsten der insgesamt sechs ausgewiesenen Kaltluftliefernden Talabwindssysteme befindet und in diesem als Kaltluftentstehungsfläche fungiert (siehe Abb. 2). Der Fläche ist somit eine hohe bioklimatische Bedeutung zuzuordnen.

Im vorliegenden Fachgutachten werden die aktuelle klimaökologische Situation im Plangebiet detailliert betrachtet und die Auswirkungen des geplanten Vorhabens auf die klimaökologischen Funktionen mithilfe von Modellrechnungen hinsichtlich der gegenwärtigen sowie zukünftigen Situation untersucht und beurteilt. Weiterhin werden konkrete Planungshinweise gegeben, die eine klimaangepasste Gestaltung unterstützen.



Abb. 1: Ausschnitt des nördlichen Stadtgebietes von Freiburg (Stadtteil Zähringen) mit dem Plangebiet (rot).

Das alleinstehende Wohnhaus am östlichen Ende des Höhewegs bildet derzeit den einzigen Gebäudebestand im Plangebiet. Begrenzt wird die Fläche im Süden durch die Wohnsiedlungsbebauung des Stadtteils Zähringen, im Westen durch eine Bahnlinie mit dahinterliegender Wohnsiedlungsbebauung und im Osten durch die bewaldete Vorbergzone des Schwarzwaldes. In nördlicher Richtung schließen sich zudem weitere Grünflächen sowie landwirtschaftlich genutzte Flächen an. Das Gelände befindet sich in einer Hanglage und fällt entlang seiner Ost-West-Ausdehnung deutlich nach Westen hin ab.

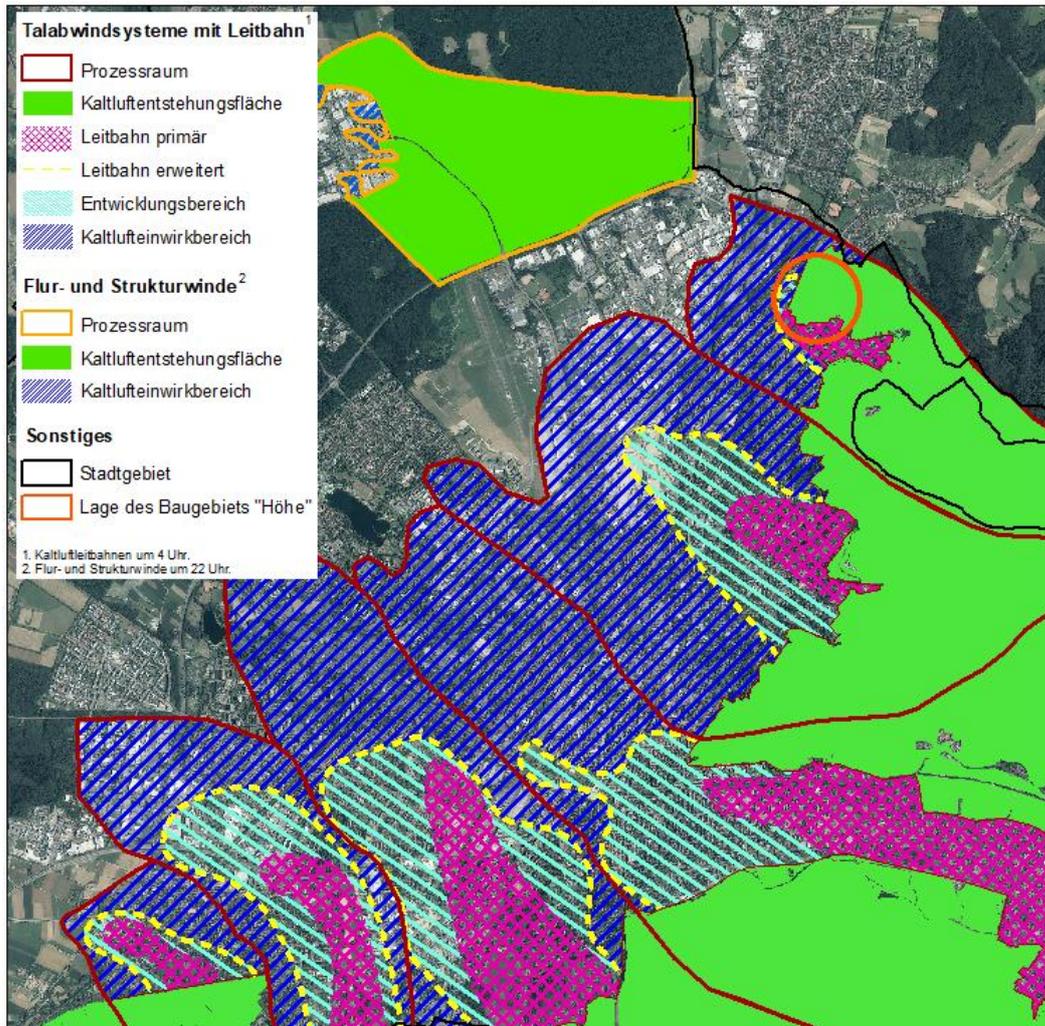


Abb. 2: Ausschnitt aus der Kaltluftfluthaushaltkarte des Klimaanpassungskonzepts (GEO-NET 2019).

In der vorliegenden Analyse werden insgesamt drei Modellläufe durchgeführt:

- ◆ Status quo = derzeitiger Zustand
- ◆ Plan-Zustand = Umsetzung der Bebauungsplans
- ◆ Plan-Zustand Zukunfts-Szenario = zusätzliche Auswirkungen des Klimawandels

Für die modelltechnische Umsetzung des Plan-Zustandes dient der Bebauungsplanentwurf mit Stand vom Dezember 2022 als Grundlage (siehe Abbildung 3a). Dieser sieht für das Plangebiet eine 3 bis 5-geschos-sige Wohnbebauung, eine Kita sowie Ausgleichsflächen vor. Der Planung nach beschränkt sich die Neubebauung auf ein etwa 4,5 ha großes Areal im südöstlichen Teil des insgesamt ca. 8 ha großen Plangebietes.



Die Ausgleichsflächen im Norden und Westen sowie die auszubauende Erschließungsstraße im Nordwesten bilden zusammen den restlichen Flächenanteil. Für die Ausgleichsflächen ist nach Planentwurf im Norden eine Streuobstwiesennutzung sowie Gehölzpflanzung und im Westen eine Wiese mit lockerem Baumbestand inklusive einer Retentionsfläche für Niederschlagswasser vorgesehen. Hinsichtlich der nördlichen Streuobstwiese sowie der Gehölzpflanzung wurde der Plan „Übersicht CEF-Maßnahmen“ (FAKTORGRÜN 2021) verwendet (siehe Anhang A 2). Bei der westlichen Grünfläche wurden in Anbetracht der vorhandenen Bestandsvegetation lediglich entsprechend des Bebauungsplanentwurfs Bäume ergänzt bzw. hinzugefügt. Innerhalb des Bereichs der Neubebauung wurden gemäß der Planunterlage die Bestandsbäume entfernt und lediglich die dargestellten Bäume im Straßenraum hinzugefügt.

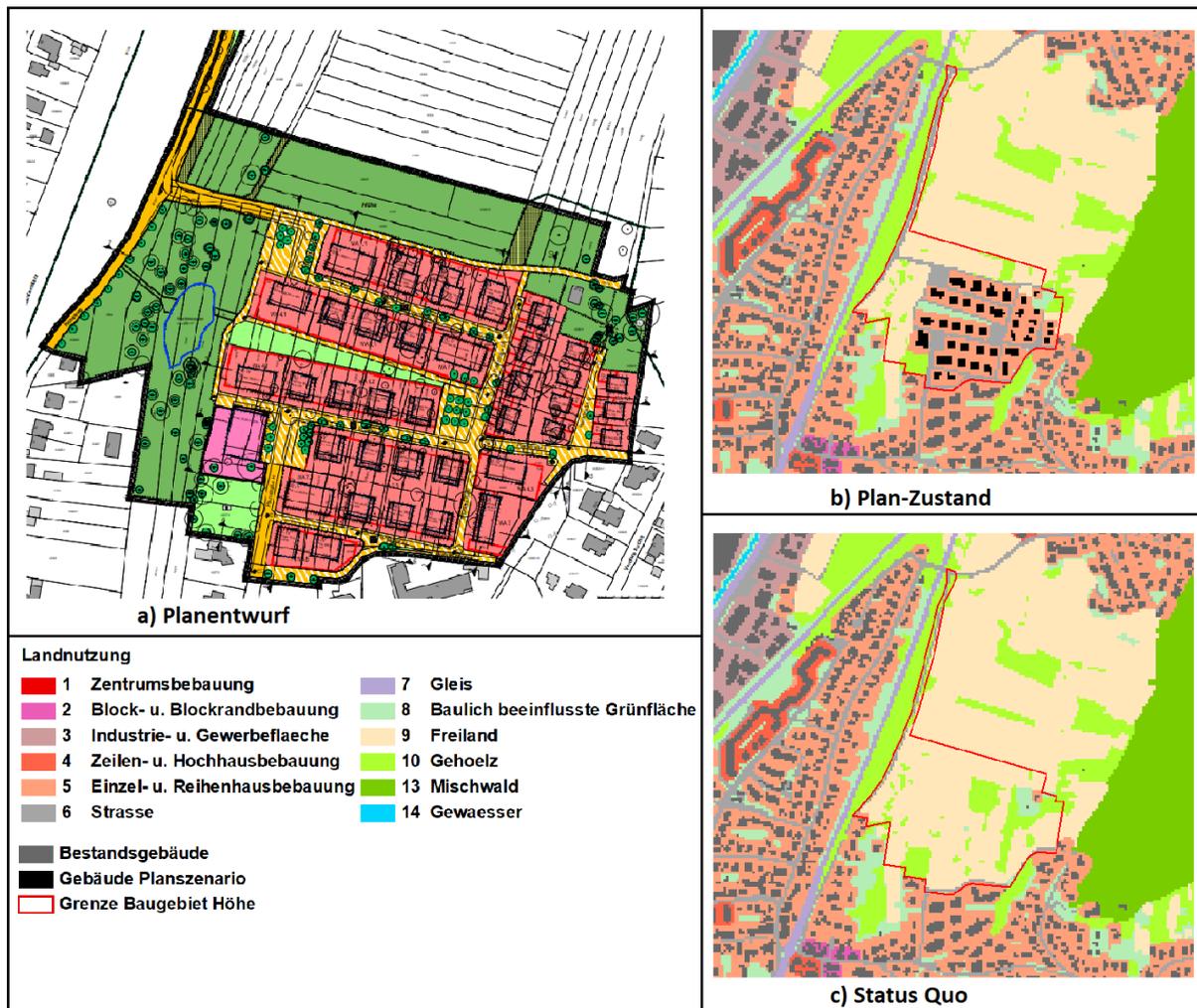


Abb. 3: Abbildung a) zeigt den Bebauungsplanentwurf Nr. 2-100 „Höhe“ (Stand: Dezember 2022). Abbildungen b) und c) zeigen den Plan-Zustand bzw. den Status Quo im Plangebiet sowie die nähere Umgebung.



2. Methodik

Bei numerischen Modellen wie FITNAH 3D müssen zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Nutzungsstruktur und Geländehöhe sind wichtige Eingangsdaten für die Windfeldmodellierung, da über die Oberflächengestalt, die Höhe der jeweiligen Nutzungsstrukturen sowie deren Versiegelungsgrad das Strömungs- und Temperaturfeld entscheidend beeinflusst wird.

Die Modellrechnung wurde zunächst für den Status quo sowie das Plan-Szenario, um auf dieser Basis die klimaökologischen Auswirkungen des Planvorhabens auswerten und beurteilen zu können. Das gesamte Untersuchungsgebiet hat bei einer Abmessung von 1,6 km x 2,45 km eine Fläche von etwa 3,9 km². Mit der hohen räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m ist es möglich, die Gebäude- sowie Baumstrukturen realitätsnah zu erfassen und ihren Einfluss auf den Luftaustausch abzubilden.

Der Analyse liegt eine sommerliche Strahlungswetterlage zugrunde (wolkenloser Himmel, keine übergeordnete Windströmung), da die klimaökologischen Funktionen unter dieser Wetterlage fundiert untersucht werden können.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Freiburger Stadtklima wurden in einer zusätzlichen Modellrechnung analysiert, die sowohl ein Klimaänderungssignal als auch die geänderte Landnutzung infolge der geplanten Bebauung umfasste. Dabei wurde entsprechend dem europäischen Stand der Technik auf Ergebnisse regionaler Klimamodellen der EURO-CORDEX-Initiative zurückgegriffen. Gemäß bundesweiter Leitlinien wurde ein Ensemble aus Klimamodellen verwendet, das verschiedene Klimaszenarien zur Entwicklung der zukünftigen Treibhausgasemissionen berücksichtigt (RCP-Szenarien). Das Klimaänderungssignal in der vorliegenden Modellrechnung beruht auf dem Szenario RCP 4.5, welches von einem moderaten Verlauf des Klimawandels ausgeht und beschreibt die mittlere Zunahme der sommerlichen Lufttemperatur (+ 1,8 K) in Freiburg in der mittleren Zukunft (2041-2070) im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000.



3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Klimasimulation repräsentieren die Nachtsituation um 4 Uhr morgens sowie die Tagsituation um 14 Uhr. Bei den modellierten Parametern handelt es sich um die bodennahe Lufttemperatur in 2 m Höhe, das bodennahe Kaltluftströmungsfeld in 2 m Höhe und den Kaltluftvolumenstrom (jeweils Nachtsituation) sowie die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m über Grund als Maß für die Wärmebelastung am Tage.

Die Modellergebnisse werden je Parameter für den Status quo und das Plan-Szenario (+Zukunft) betrachtet.

3.1 Lufttemperatur in der Nacht

Allgemeines: Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages sein Maximum. Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit mehr als 8 Kelvin (K) Temperaturabweichung zwischen den abgekühlten Grün- und Freiflächen sowie den wärmeren Siedlungsflächen einstellen kann. Besonders auffällig dabei ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume. Die in Städten gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnisse lassen sich auf einige wesentliche Faktoren zurückführen. Hierzu gehören:

- die erhöhte Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Boden- und Oberflächeneigenschaften
- die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrößerte strahlungsabsorbierende Oberfläche
- die herabgesetzte Verdunstung durch die direkte Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation oder die Vorflut
- die über die vermehrte Emission von Gasen und Aerosolen zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt)
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischer Rauigkeit und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland
- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion.

Damit ist das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich vor allem abhängig von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung. Doch auch die Luftvolumina über grüngeprägten Flächen weisen untereinander keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate von natürlichen Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (u.a. ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie von eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen (Bewuchs, Laubstreu usw.) bestimmt.



Das Relief (Exposition, Geländeneigung) und die Lage im Mosaik der Nutzungen und ihrer dynamischen Luftaustauschprozesse üben einen weiteren Einfluss aus. Eine Sonderstellung nehmen Wald-, Gehölz- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im Wald beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete haben eine klimatische Ausgleichsfunktion und filtern zudem Luftschadstoffe. Während tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts in 2 m Höhe, im Vergleich zu nicht mit Gehölz bestandenen Grünflächen, eher milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher auch am Tage kühlere Luft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, überwärmte Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten von Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Denn ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Entlastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas in den Nachtstunden weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas. So steht in der Nacht weniger der Aufenthalt im Freien, sondern die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum im Vordergrund. Nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 besteht ein Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumlufte, so dass die Temperatur der Außenluft die entscheidende Größe für die Beurteilung der Nachtsituation darstellt (VDI 2008). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten.

Modellergebnisse:

Abbildung 4 zeigt das Temperaturfeld um 4 Uhr nachts in einer Höhe von 2 m über Grund. Im gegenwärtigen Zustand zeigt das Plangebiet eine tendenzielle Temperaturzunahme von West (13-15 °C) nach Ost (15-17 °C). Dies lässt sich am höheren Baum- bzw. Gehölzbestand im Osten des Plangebiets festmachen. Die höchsten Temperaturen mit bis zu 18 °C sind im Nordosten im Bereich der Bestandsbebauung vorzufinden, was auf den dortigen höheren Versiegelungsgrad zurückzuführen ist. Die umliegende Wohnbebauung weist im Norden und Süden einen Temperaturbereich von durchschnittlich 16 bis 18 °C auf. Im Bereich der vergleichsweise dichten Wohnbebauung im Westen liegt der Temperaturbereich mit durchschnittlich 18 bis 19 °C etwas höher. Temperaturen von über 20 °C sind im Wesentlichen im Industrie- bzw. Gewerbegebiet im Nordwesten, im Straßenraum sowie im dicht bebauten Siedlungsbereich im Südwesten anzutreffen.

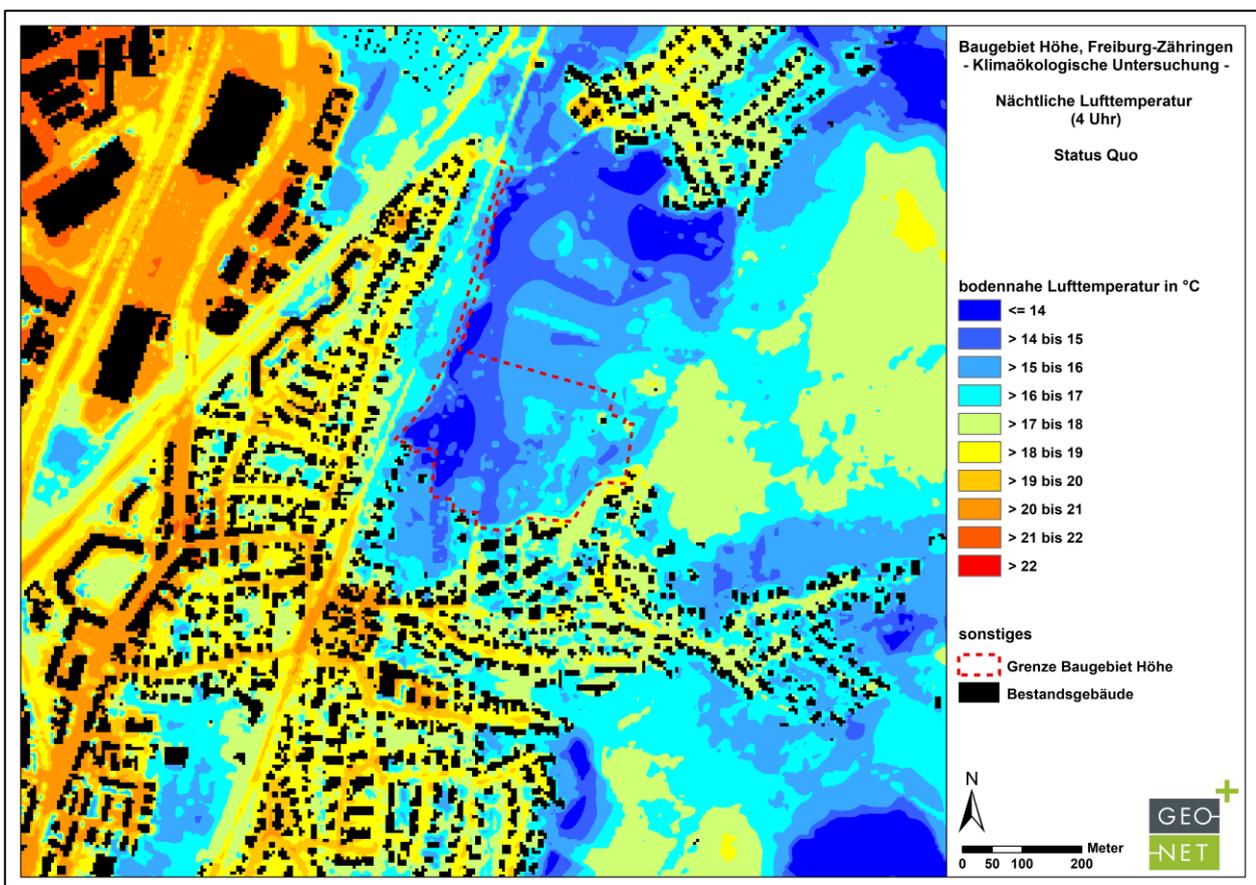


Abb. 4: Lufttemperatur im Status quo in 2 m über Grund um 04 Uhr.

Abbildung 5 zeigt die Zunahme der nächtlichen Lufttemperatur von der aktuellen zur geplanten Situation. Es wird deutlich, dass durch die geplante Bebauung eine deutliche Zunahme der Temperaturwerte zu erwarten ist. Insbesondere auf den Verkehrsflächen wird eine relativ deutliche Temperaturerhöhung von stellenweise über 5 K im Vergleich zur derzeitigen Situation erreicht. Im Wohngebiet erhöht sich die Lufttemperatur im Mittel um 3 bis 4 K und kleinräumig um bis zu 5 K. Innerhalb des geplanten Grünzuges sowie am Rand des Plangebietes erhöht sich die Temperatur vergleichsweise wenig um bis zu 2,4 K. Auswirkungen auf den Bestand im Umland erscheinen nur im Nahbereich des Plangebietes und erweisen sich mit maximal 1 K eher geringfügig. Die umliegende Wohnbebauung wird mit weniger als 0,5 K westlich



sowie südwestlich des Plangebiets nur sehr kleinräumig beeinflusst. Im Vergleich zur umliegenden Siedlungsraum entspricht die zu erwartende Lufttemperatur von 18 bis 19 °C in etwa der westlich angrenzenden Wohnbebauung (siehe Abb. 6).

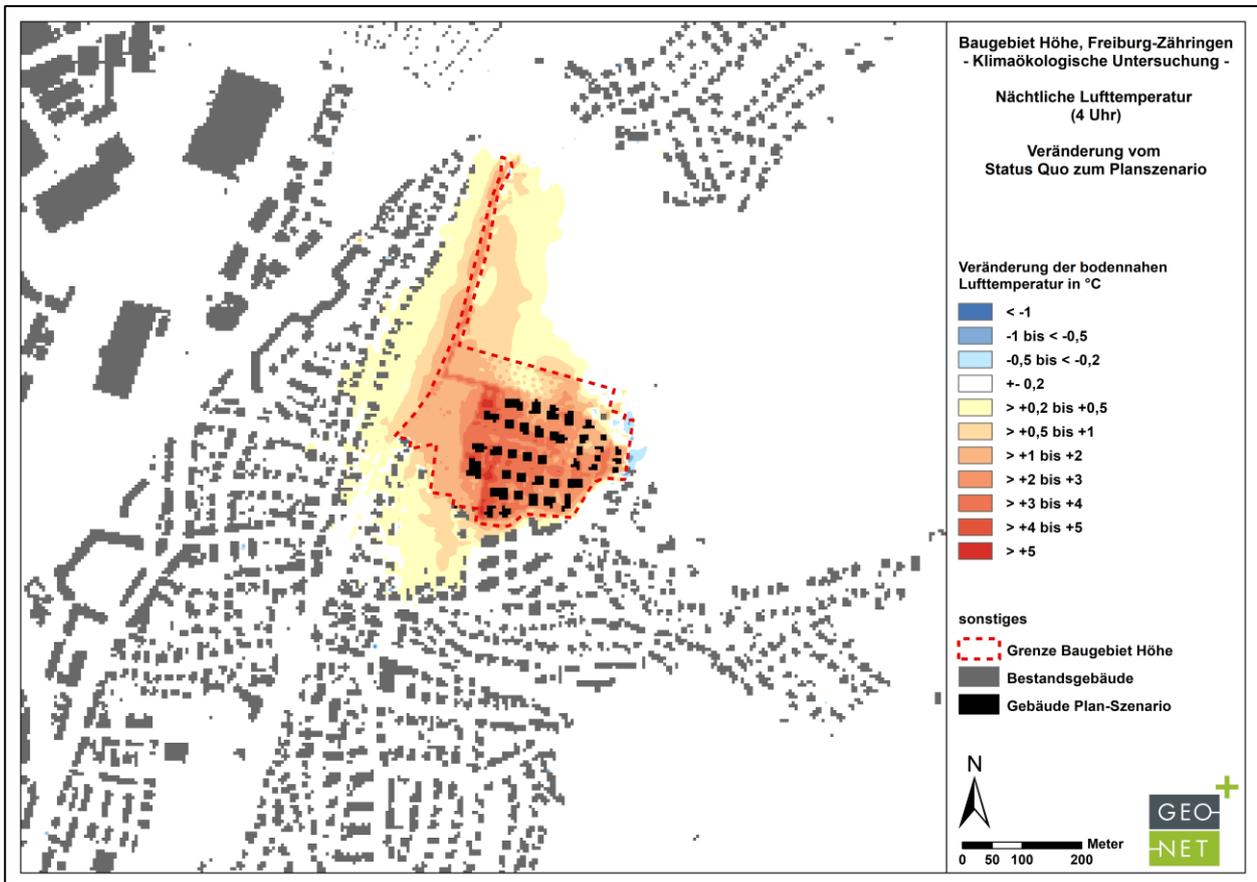


Abb. 5: Zunahme der Lufttemperatur im Plan-Szenario im Vergleich zum Status quo.

Entsprechend des angenommenen Klimawandel-Szenarios steigt die Nachttemperatur im gesamten Untersuchungsgebiet deutlich an (durchschnittlich + 1,72 K). So werden im Bereich der stark versiegelten Flächen im Nord- und Südwesten sowie im teilweise im Straßenraum nun vermehrt Lufttemperaturen von über 22°C erreicht. Auch die klimatische Belastung innerhalb des Baugebiets Höhe nimmt durch den Klimawandel spürbar zu (durchschnittlich + 1,69 K).

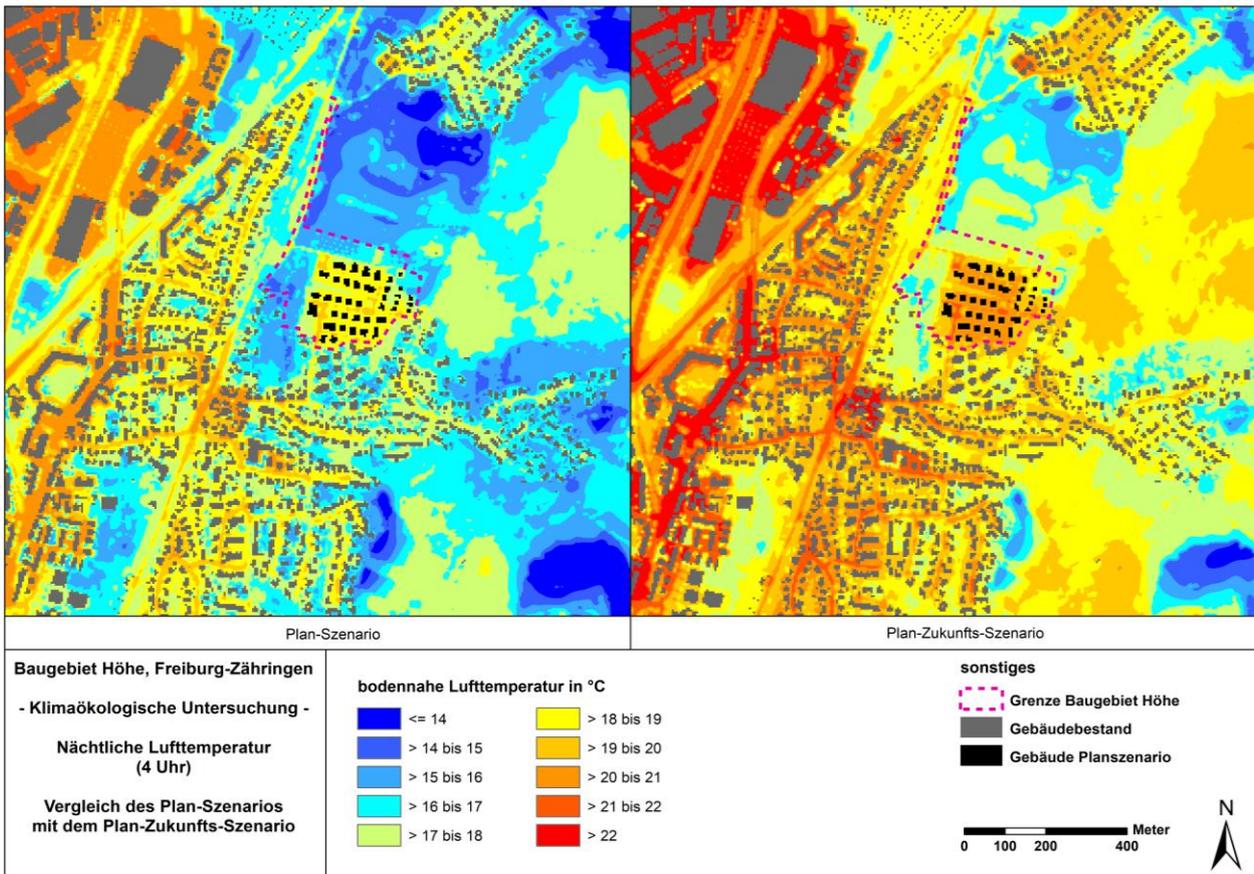


Abb. 6: Vergleichende Darstellung der Lufttemperatur des Plan-Szenarios (links) und des Plan-Zukunfts-Szenarios (rechts).

3.2 Kaltluftprozessgeschehen in der Nacht

Allgemeines

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieser Prozesse sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen bzw. dem Umland einstellen (**Abbildung 7**). An den geeigneten Flächen setzt sich außerdem abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So können z.B. an Hängen nächtliche Kaltluftabflüsse entstehen (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft bestimmt und durch eine vorhandene Neigung des Geländes $> 1^\circ$ verstärkt. Neben den durch die Geländeform bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck, aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (u.a. KIESE et al. 1992).

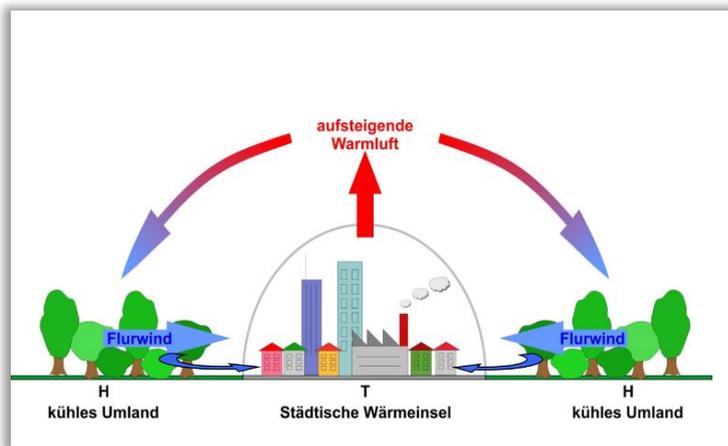


Abbildung 7: Prinzipskizze Flurwind.

Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsrate geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden. Diese kleinskaligen Windsysteme werden, je nach lokalen Bedingungen, im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den großen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen.

Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie dichte Baumbestände und Bauten abgebremst wird. Die Flur-/Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind (d.h. die großräumige Windströmung in der Höhe) überdeckt werden können.

Nächtliches Windfeld

Die Abbildung 8 stellt das zum nächtlichen Analysezeitpunkt 4 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 20 m aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von 0,1 m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

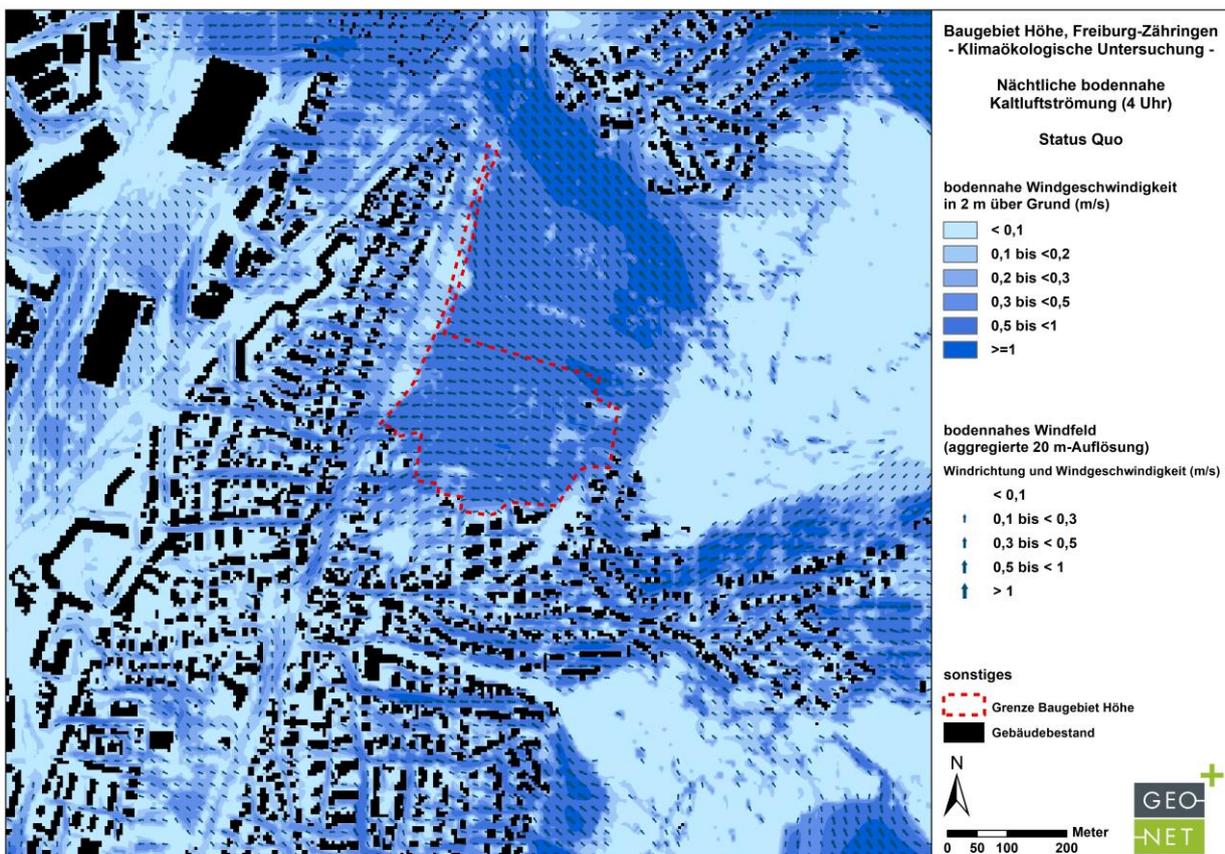


Abb. 8: Strömungsfeld und Strömungsgeschwindigkeit im Status quo in 2 m über Grund um 04 Uhr.

Die Geschwindigkeit der Kaltluftströmungen im Untersuchungsraum liegt verbreitet zwischen $< 0,1$ m/s bis über $1,0$ m/s, wobei deren Dynamik räumlich variiert. Die Kaltluft strömt dabei aus östlicher bis südöstlicher Richtung mit durchschnittlich etwa $0,5$ m/s an das Plangebiet heran. Im Ist-Zustand zeigt sich innerhalb des Gebietes ein weitestgehend einheitliches Strömungsbild. Mit Geschwindigkeiten von $0,3$ bis $0,5$ m/s fließt die Kaltluft entsprechend des Hanggefälles von Ost nach West. Lediglich der vorhandene Vegetationsbestand sowie die kleinräumige Wohnbebauung bewirkt ein Abbremsen der Kaltluftströmung.

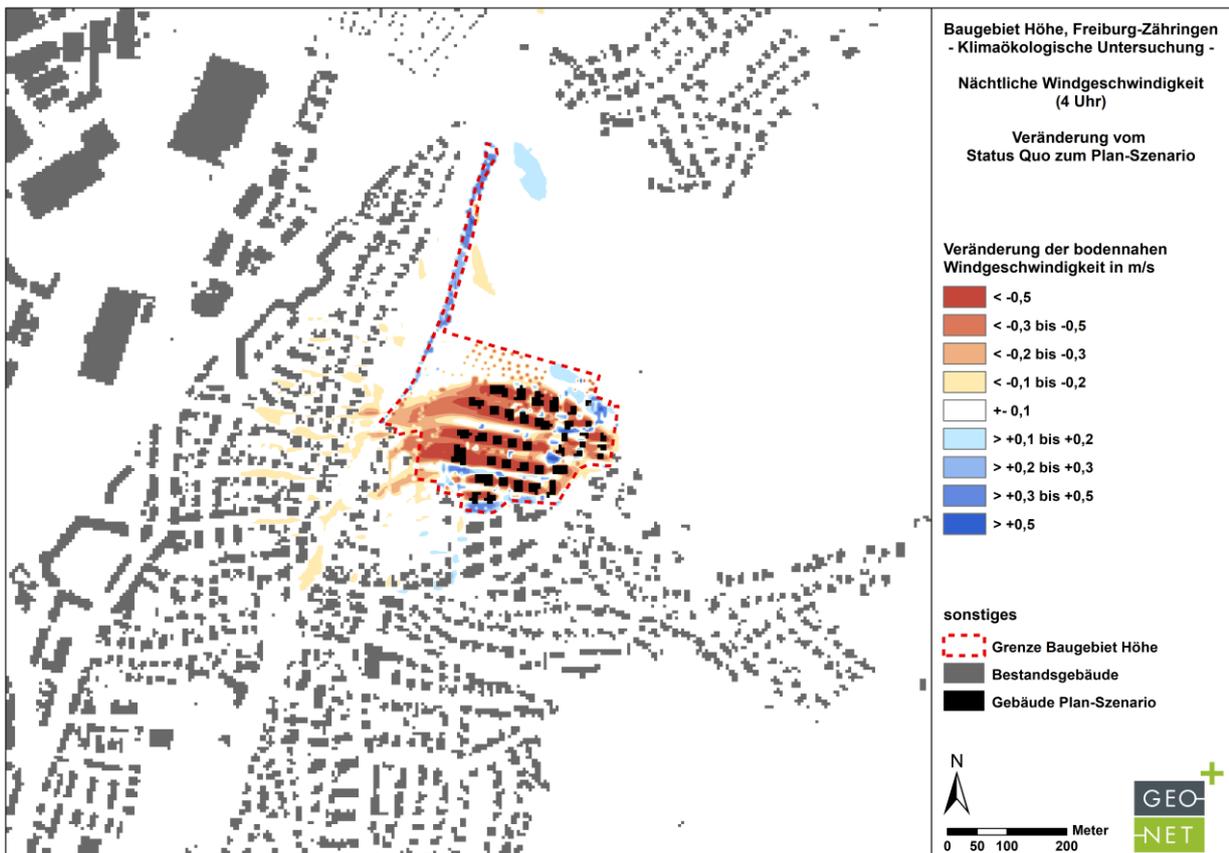


Abb. 9: Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im Plan-Szenario im Vergleich zum Status quo.

Die Betrachtung der Differenz der Strömungsgeschwindigkeit zwischen Status quo und Plan-Szenario (Abb. 9) macht deutlich, dass die geplante Bebauung abbremsend auf die einströmende Kaltluft wirkt. Dabei ist eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit von stellenweise über 0,5 m/s im Plangebiet zu verzeichnen. Die vorhandenen unbebauten Korridore zwischen der geplanten Bebauung weisen erwartungsgemäß eine deutlich geringere Bremswirkung gegenüber der Kaltluft auf. Durch eine Kanalisation der anströmenden Kaltluft ist stellenweise sogar eine kleinräumige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit entlang der Korridore zu erwarten. Außerhalb des Plangebiets sind lediglich westlich geringfügige Auswirkungen zu erwarten, welche aber nur im geringen Maße in den umliegenden Siedlungsbereich vordringen.

Hinsichtlich der grundlegenden nächtlichen Strömungssituation sind durch das angenommene Klimawandelszenario zu keinen nennenswerten Änderungen zu erwarten (Abb. 10). Lediglich lokal sind kleinräumige Unterschiede im dargestellten Windfeld auszumachen. Die insgesamt minimale Erhöhung von durchschnittlich 0,02 m/s im Modellgebiet bzw. 0,03 m/s innerhalb des Baugebiets Höhe bekräftigt diesen Eindruck.

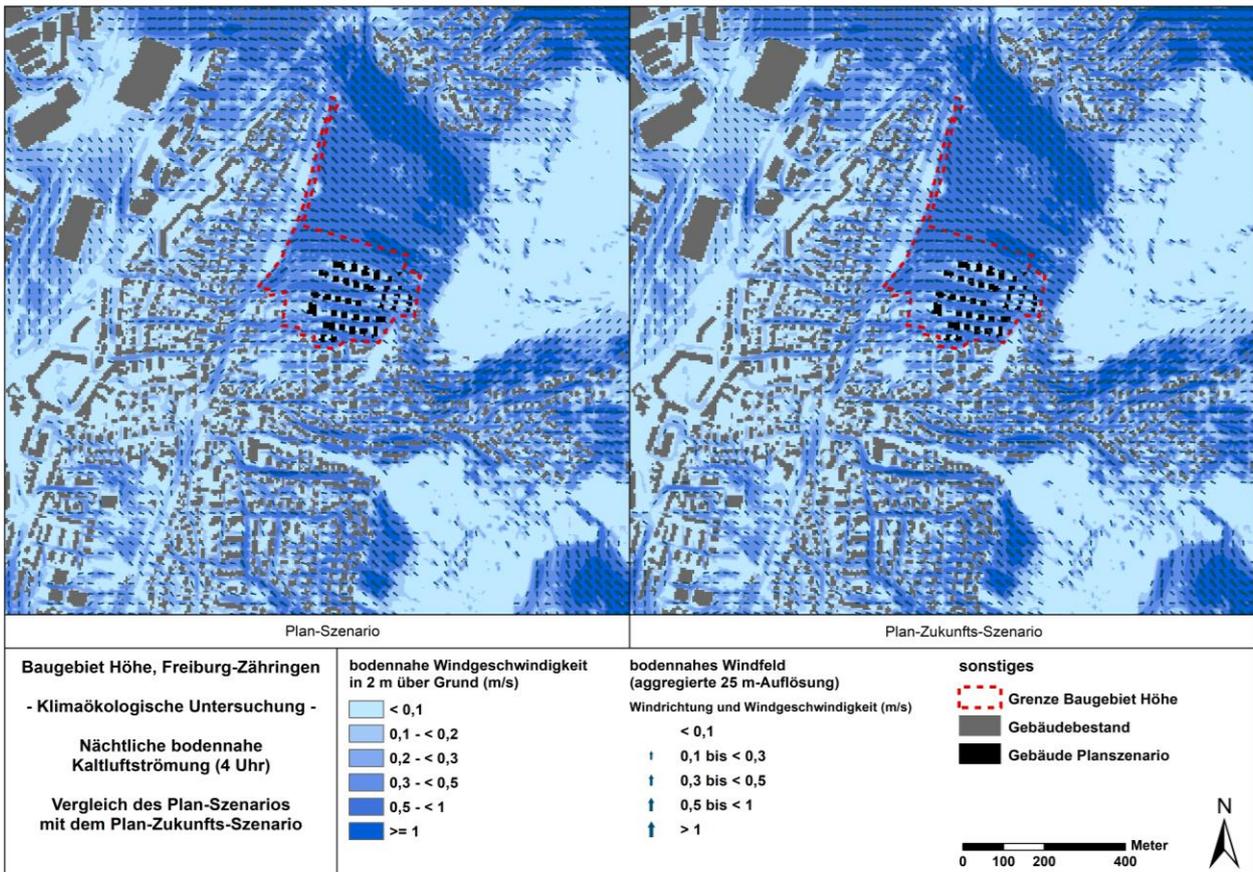


Abb. 10: Gegenüberstellung der nächtlichen bodennahen Kaltluftströmung vom Plan-Szenario und Plan-Zukunfts-Szenario (RCP4.5, 2041-2070).

Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom

Allgemeines: Wie bereits im Vorkapitel zur bodennahen Kaltluftströmung eingehender erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird

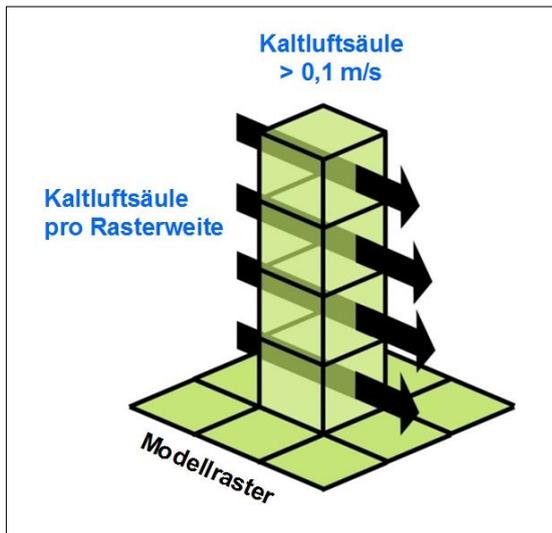


Abbildung 11: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

zur Bewertung der Kaltluftsituation ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für dargestellte Ergebnisse bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 5 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-dichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich veranschaulichen, indem man sich ein 5 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte (**Abbildung 11**). Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

Modellergebnisse: Zum Zeitpunkt des Ist-Zustandes fungiert das Plangebiet als Kaltluftproduktionsfläche und ist Teil des nördlichsten der sechs im Klimaanpassungskonzept (GEO-NET 2019) ausgewiesenen Talabwindssysteme. Kaltluftzuflüsse erhält das Gebiet im Wesentlichen aus der südöstlich verlaufenden Kaltluftleitbahn (Abb. 12). Das Waldgebiet östlich des Plangebiets bewirkt, dass ein großer Teil der hangaufwärts produzierten Kaltluft nördlich und südlich am Plangebiet vorbeifließt, sodass ein wesentlicher Anteil der Kaltluft im Bereich des Plangebiets selbst produziert wird. Insgesamt zeigt sich im Plangebiet ein homogenes Bild hinsichtlich des Kaltluftvolumenstroms. Dieser beträgt durchschnittlich etwa $15 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ und verringert sich in den westlich und südwestlichen Siedlungsflächen nur relativ geringfügig.

Anders als bei Belastungen durch Luftschadstoffe oder Verkehrslärm, für die in Verordnungen konkrete Grenz- oder Richtwerte genannt werden, gibt es für die Beeinflussung des Kaltlufthaushaltes keine allgemeingültigen Bewertungsmaßstäbe. Lediglich in der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 (VDI 2003) wird ein quantitatives „Maß der Beeinflussung“ vorgeschlagen, das eine Reduktion der Abflussvolumina um mehr als

10 % im Umfeld von bioklimatisch belasteten Siedlungsgebieten als „hohe vorhabenbedingte Auswirkung“ ausweist. Eine Verringerung um 5 bis 10 % wird als „mäßige Auswirkung“ eingestuft, unterhalb von 5 % wird die Auswirkung einer Volumenstromverringerung als „geringfügig“ angesehen.

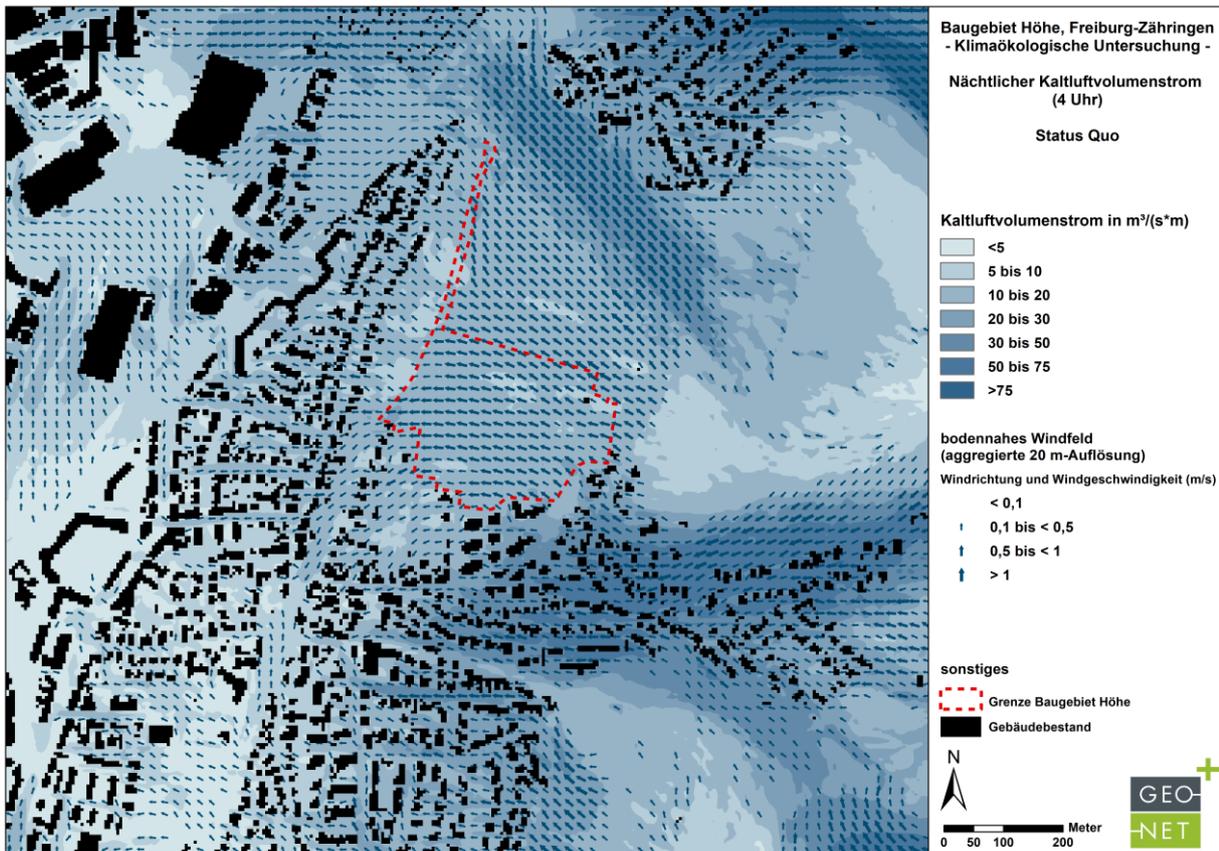


Abb. 12: Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Status quo um 04 Uhr.

Durch das geplante Vorhaben ist in der Änderung des Kaltluftvolumenstroms (Abb. 13) eine Reduzierung von teilweise deutlich über 30 % innerhalb des Plangebietes zu rechnen. Die erhebliche Reduzierung des Kaltluftvolumenstroms setzt sich ausgehend von den geplanten Gebäudekörpern in Richtung Westen bis in die angrenzende Wohnbebauung fort und bewirkt dort bis in maximal 300 m Entfernung zum Plangebiet eine Reduzierung von 10 bis 27 %. Erhöhungen des Kaltluftvolumenstroms sind durch Kanalisationswirkung im Wesentlichen innerhalb des Plangebiets im Bereich der in Ost-West-Richtung verlaufenden Korridore zu erwarten.

Die relativ starken prozentualen Auswirkungen auf die westlich angrenzende Wohnbebauung sind auch auf das dortige vergleichsweise moderate Wertenniveau zurückzuführen. So führen bereits geringe absolute Abnahmen des Kaltluftvolumenstroms zu einer gemäß der oben genannten VDI-Richtlinie „hohen Auswirkung“. Zudem bezieht sich die VDI-Richtlinie primär auf thermisch belastete Siedlungsräume, was auf die betroffenen Siedlungsräume aufgrund des überwiegend hohen Grünflächenanteils nur bedingt zutrifft.

Die modellierten klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Kaltluftsituation zeigen wie im Fall des nächtlichen Windfeldes nur geringfügige Abweichungen. Im Mittel ist innerhalb des Plangebiets eine Abnahme von ca. 2,4 % bzw. $0,3 m^3/(s \cdot m)$ zu erwarten.

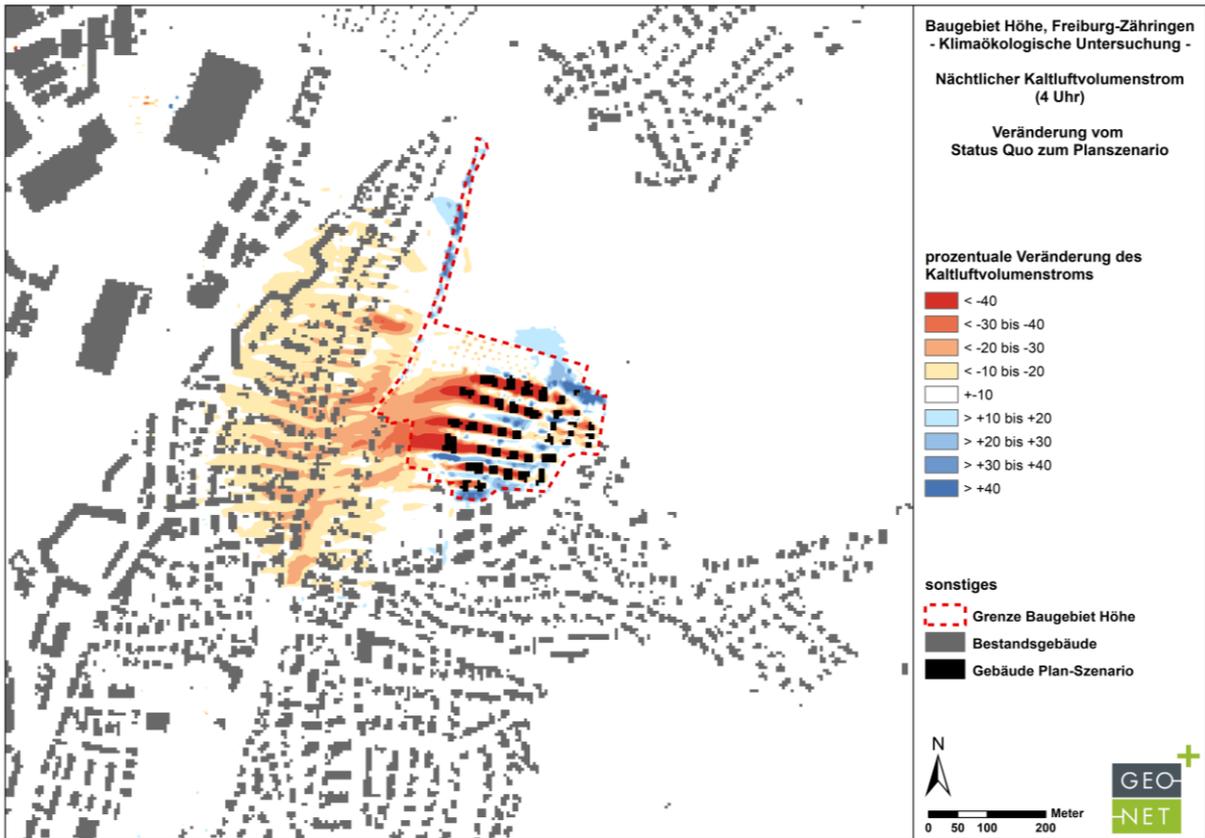


Abb. 13: Veränderung des Kaltluftvolumenstroms im Plan-Szenario im Vergleich zum Status quo.

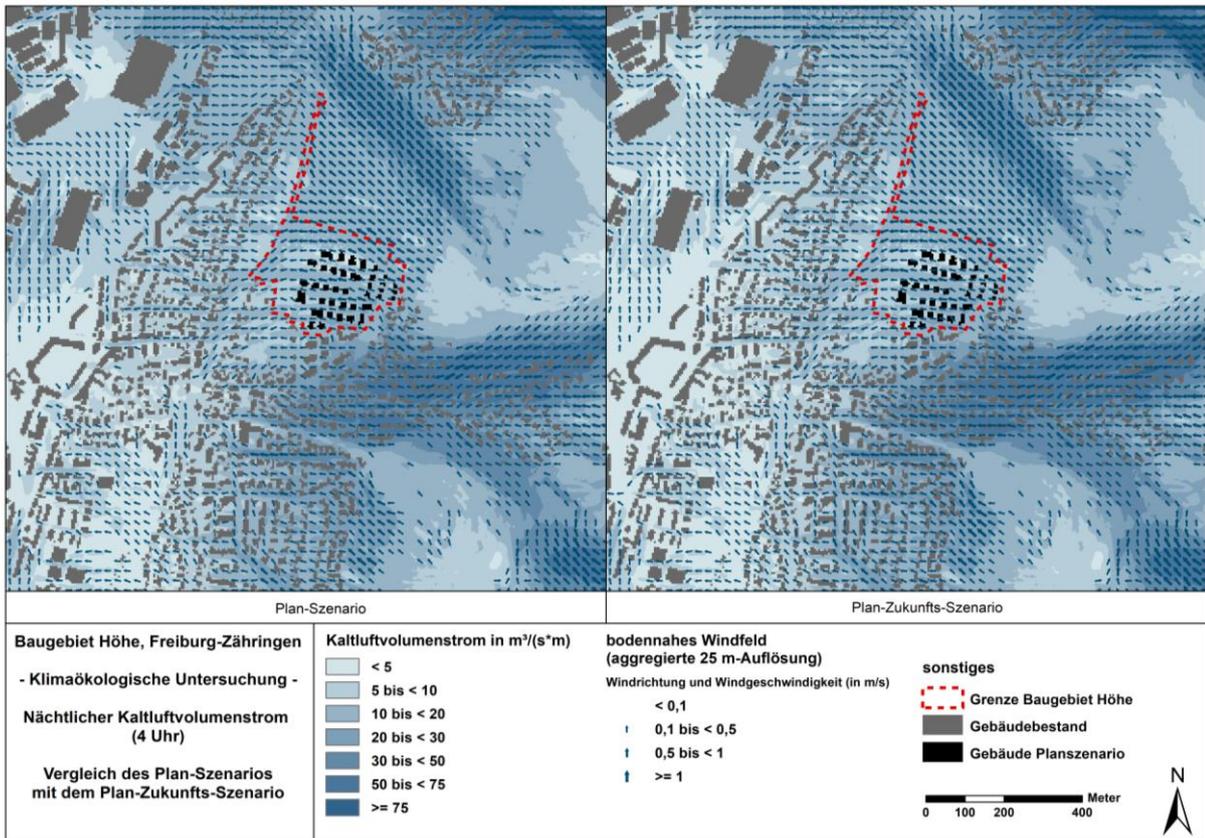


Abb. 14: Vergleichende Darstellung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms vom Plan-Szenario und Plan-Zukunfts-Szenario (RCP4.5, 2041-2070).

3.3 Wärmebelastung am Tage

Zur Bewertung der Wärmebelastung werden Indizes verwendet, die Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. In Modellen wird der Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung berechnet und die Wärmebelastung eines Menschen abgeschätzt. Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbio-klimatische Index PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) um 14 Uhr herangezogen (Matzarakis und Mayer 1996). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden quantifiziert (siehe Anhang A 1, VDI 2004).

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der PET um 14 Uhr in 1,1 m über Grund für die derzeitige Situation. Innerhalb des Plangebietes gestaltet sich das Temperaturfeld je nach Baumbestand eher heterogen. So tritt eine starke bis stellenweise extreme Wärmebelastung mit Temperaturen von 35 bis über 41 °C im Bereich der nicht verschatteten Flächen auf, wohingegen verschattete Bereiche mit Baum- bzw. Gehölzbestand nur eine schwache bis mäßige Wärmebelastung aufweisen.

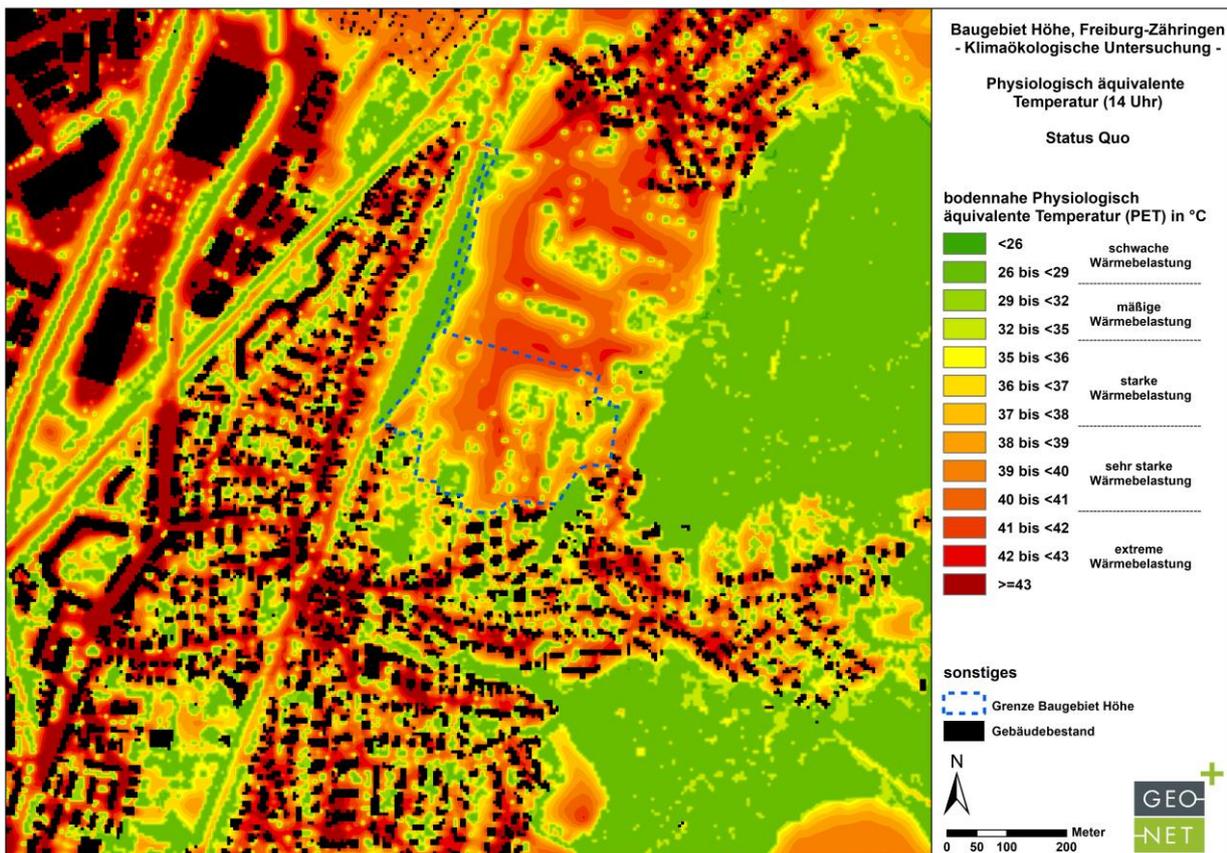


Abb. 15: Ausprägung der PET im Status quo in 2 m über Grund um 14 Uhr.

Durch das Planvorhaben ergibt sich im Plangebiet Großteils eine signifikante Erhöhung der PET gegenüber dem Status quo (siehe Abbildung 16). Durch das Entfernen der Bestandsbäume innerhalb des Bereichs der geplanten Wohnbebauung und die Erhöhung des allgemeinen Versiegelungsgrades, insbesondere im Bereich des Straßenraums, kommt es zu Erhöhungen der PET von stellenweise 10 bis 15 K. Auch in den Zwischenräumen der Wohnbebauung steigt die PET häufig zwischen 1 und 5 K an. Eine nennenswerte



Verringerung der PET ist lediglich im Bereich der geplanten Streuobstwiesen bzw. Gehölzpflanzungen sowie der geplanten Straßenbäume vorzufinden. Dort nimmt die PET durch die Verschattung der Bäume um etwa 1 bis 10 K ab. Außerhalb des Plangebietes treten erwartungsgemäß lediglich im direkten Nahbereich Veränderungen der PET auf.

Durch die angenommenen Auswirkungen des Klimawandels ist hinsichtlich der PET eine weiter zunehmende klimatische Belastungssituation zu erwarten. So zeigen die Ergebnisse der Modellrechnung (Abb. 17) eine deutliche Zunahme sowie Intensivierung der stark bis extrem wärmebelasteten Flächen. Im Mittel steigt die PET um 1,58 K (Plangebiet) bzw. 1,62 K (gesamtes Modellgebiet) an.

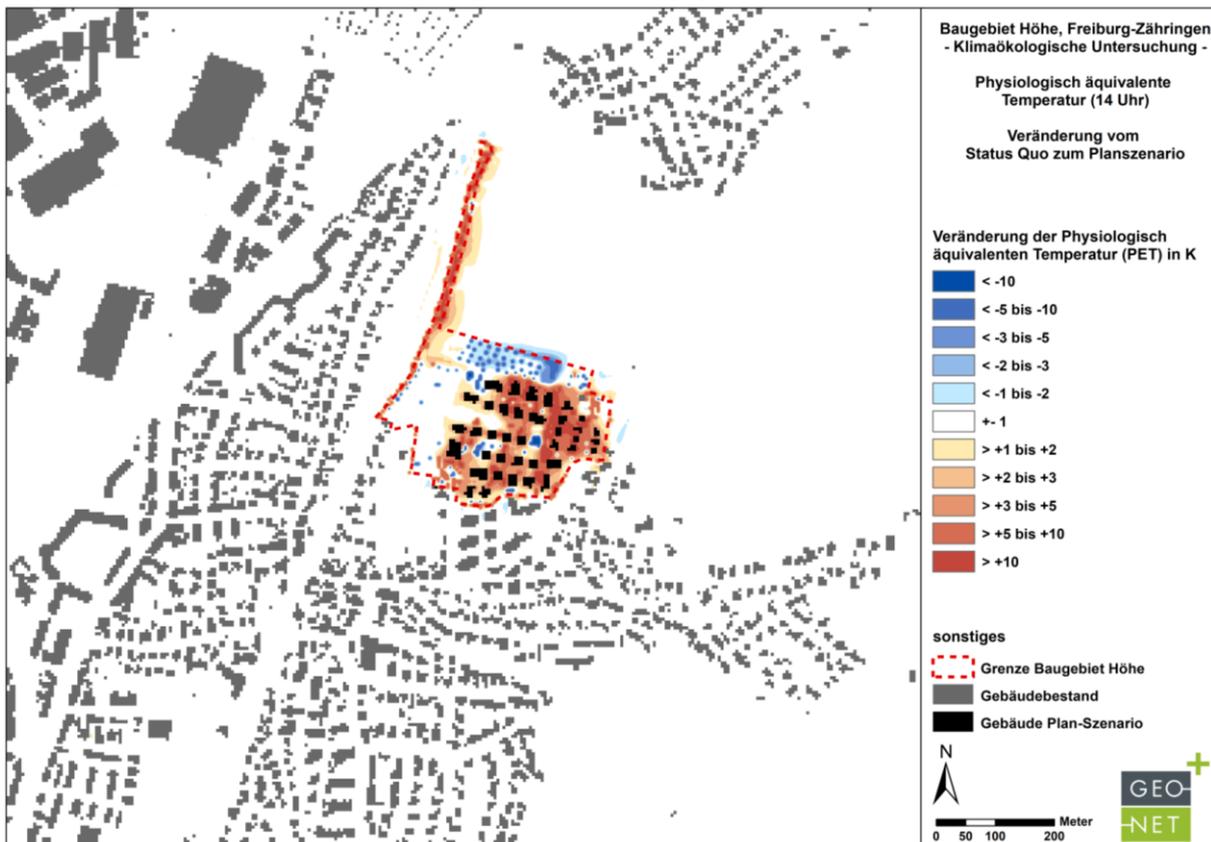


Abb. 16: Veränderung der PET im Plan-Szenario im Vergleich zum Status quo.

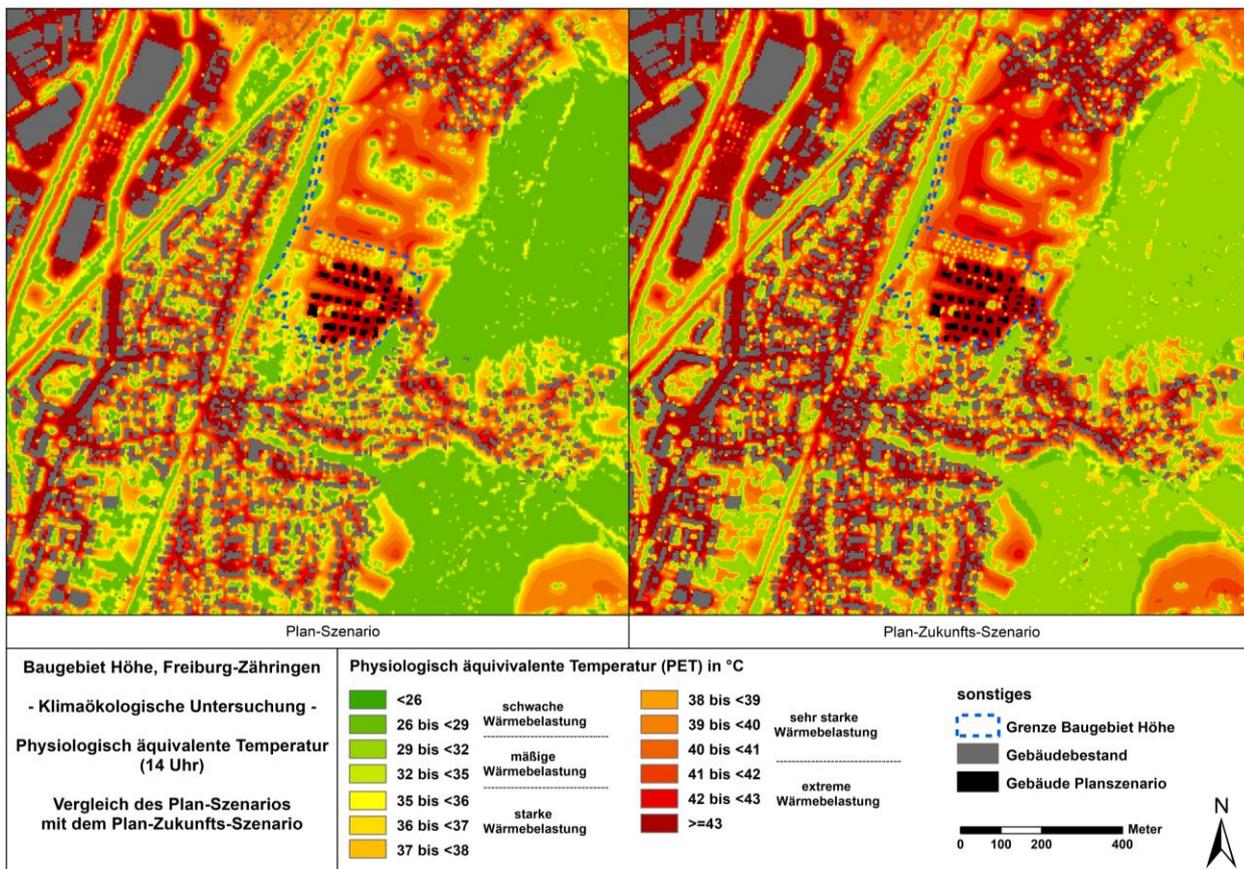


Abb. 17: Gegenüberstellung der PET zwischen Plan-Szenario und Plan-Zukunfts-Szenario (RCP4.5, 2041-2070).

4. Auswirkungen des Klimawandels im Freiburger Stadtgebiet

In der vorliegenden Untersuchung wurden zusätzlich die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima im Untersuchungsgebiet entsprechend dem aktuellen Stand der Technik modelliert (vgl. Kap. 2). Die zugrunde gelegten EURO-CORDEX-Daten erlauben zudem Aussagen zur klimawandelbedingten Entwicklung weiterer Kenngrößen in Freiburg. Vergleichbare Kenngrößen wurden bereits im Zuge der Freiburger Klimaanalyse von 2018 bzw. dem Klimaanpassungskonzept von 2019 tiefgehend untersucht.

Die Ergebnisse dieser vorangegangenen Untersuchung werden von den aktuellen Daten bestätigt bzw. können darüber hinaus noch differenzierte Aussagen getroffen werden. Neben weiter steigenden Mitteltemperaturen (vgl. Abb. 18) ist im städtischen Raum gerade die Zunahme von Hitzeperioden von Relevanz, die sich in einem deutlichen höheren Auftreten von Tropennächten (derzeit 2, in der mittleren Zukunft 5 - 24 pro Jahr) und „Heißen Tagen“ (derzeit 12, in der mittleren Zukunft 17 - 43 pro Jahr) äußert (Tab. 1). Damit erhöht sich die Belastung für die Stadtbevölkerung und die Gefahr gesundheitlicher Schäden, insbesondere bei empfindlichen Bevölkerungsgruppen (Kleinkinder, hochaltrige Menschen).

Während die Jahresniederschläge tendenziell zunehmen, ändert sich das Niederschlagsmuster hin zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. In Kombination mit den steigenden Temperaturen spiegelt sich dies auch in der klimatischen Wasserbilanz wider und sorgt für eine stärkere Gefährdung von Flora



und Fauna durch sommerliche Trockenheit (Abb. 19). Im urbanen Raum bedeutet dies eine stärkere Beanspruchung (und meist ebenso Inanspruchnahme) des Stadtgrüns, das oftmals ohnehin schwierigere Standortbedingungen vorfindet. Entsprechend ist eine steigende Pflege des Stadtgrüns erforderlich, um dessen klimaökologische Funktionen zu erhalten.

Eine weitere Funktion (intakter) Grünflächen ist deren Wasseraufnahmefähigkeit und somit Schutz vor Starkregen, der in Städten zu besonders heftigen Schäden führen kann. Zukünftig ist von einer höheren Niederschlagsintensität auszugehen, auch die Zunahme von Starkregenereignissen deutet sich an, sodass bei den geplanten Bauvorhaben Maßnahmen zur Starkregenvorsorge empfohlen werden.

Tab. 1: Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Kenngrößen in Freiburg – die Spannbreite spiegelt das Änderungssignal des 15. bis 85. Perzentils für 39 Modellläufe und die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5, 8.5 ab (basierend auf EURO-CORDEX-Daten, Referenzperiode basierend auf DWD-Daten).

| | Referenzperiode (1971-2000) | Nahe Zukunft (2021-2050) | Mittlere Zukunft (2041-2070) | Ferne Zukunft (2071-2100) |
|--|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Jahresmitteltemperatur [°C] | 11,2 | 12,1 – 13,2 | 12,1 – 14,2 | 12,1 – 16,4 |
| Heiße Tage [n/Jahr] ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) | 12 | 17 - 30 | 17 - 43 | 17 - 63 |
| Tropennächte [n/Jahr] ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) | 2 | 5 – 15 | 5 – 24 | 5 – 53 |
| Frosttage [n/Jahr] ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) | 50 | 29 – 40 | 19 – 38 | 7 – 38 |
| Jahresniederschlag [mm/Jahr] | 959 | 891 – 1094 | 883 – 1050 | 858 – 1075 |
| starker Niederschlag [n/Jahr] ($N > 10\text{mm/d}$) | 23 | 21 – 27 | 19 – 27 | 20 – 27 |
| Starkniederschlag [n/Jahr] ($N > 30\text{mm/d}$) | 0 | 0 – 1 | 0 – 2 | 0 – 3 |

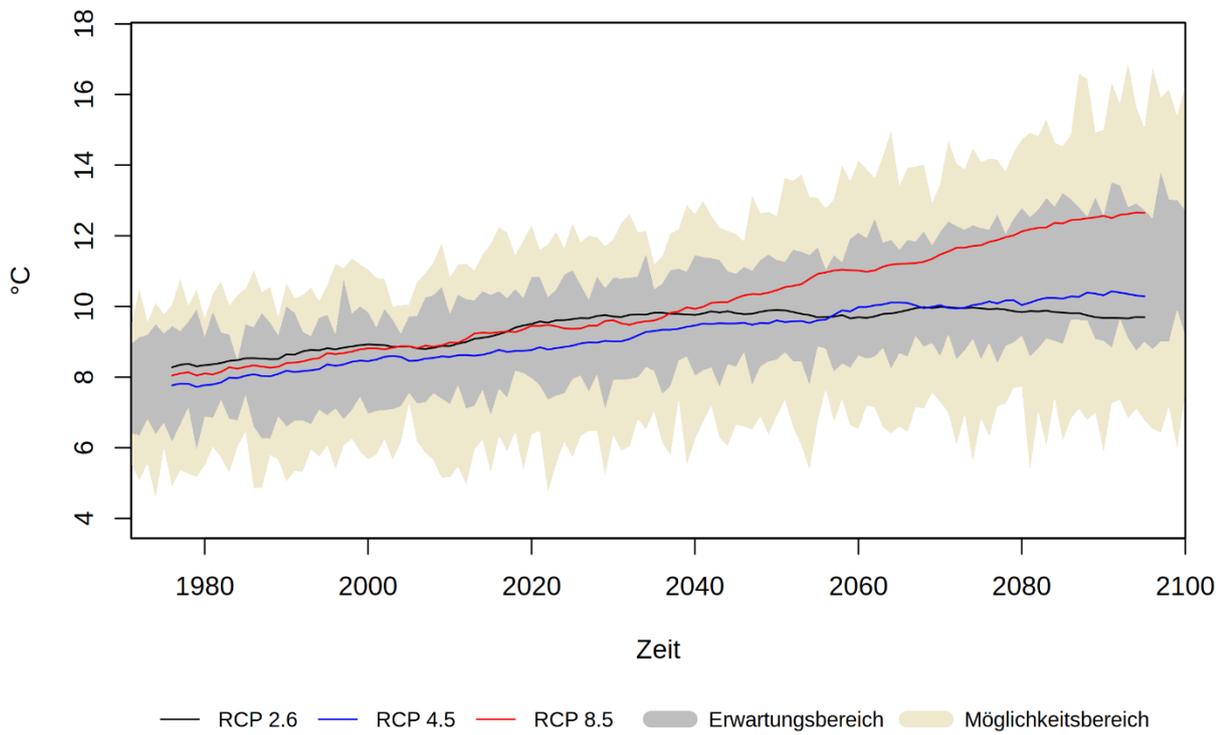


Abb. 18: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur in Freiburg entsprechend der RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5.

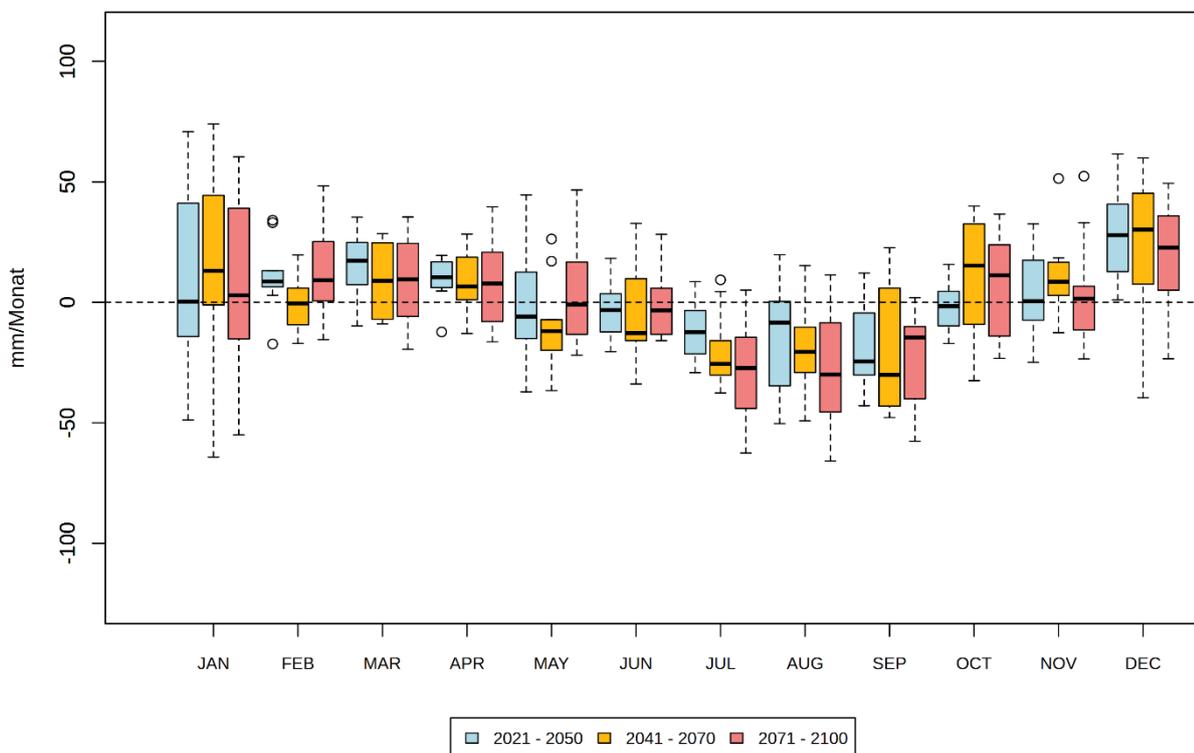


Abb. 19: Langjährige Änderung der mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Freiburg (RCP 4.5).



5. Schlussfolgerung und planerische Hinweise

Der Vergleich in der vorliegenden Analyse zwischen dem Status quo und dem Plan-Szenario zeigt, dass durch das Planvorhaben eine Beeinträchtigung der klimaökologischen Funktionen innerhalb des Plangebietes und zum Teil auch darüber hinaus zu erwarten ist. Die untersuchten Klimaparameter werden dabei teilweise signifikant beeinflusst.

Da die Fläche im Status quo eine weitestgehend unversiegelte und nur locker mit Büschen und Bäumen bestandene Freifläche ist, kommt es durch die geplante Bebauung zu einer Erhöhung der Nachttemperaturen. Dies ist vor allem auf die zusätzliche Baumasse und die größere Versiegelung zurück zu führen. Zudem steht die Planfläche nun nicht mehr bzw. nicht im Ausmaß wie zuvor für die Kaltluftproduktion zu Verfügung, wodurch es auch in den angrenzenden Bestandsflächen zu einer Steigerung der nächtlichen Temperaturen kommt. Die Auswirkungen sind hier allerdings gering und liegen größtenteils unter 0,5 K. Aufgrund der Lage des Gebiets direkt angrenzend an große Kaltluftliefergebiete und die geplante lockere Bebauung ist der Anstieg der Temperaturen als moderat zu betrachten.

Durch die Hinderniswirkung der geplanten Gebäude kommt es ebenfalls zu einer Änderung der Windgeschwindigkeiten. Das Plangebiet wird von Kaltluftströmungen aus den angrenzenden Hängen von Ost-süd-ost überströmt und im weiteren Verlauf in eine Ost-West-Strömung abgelenkt. Die ebenfalls größtenteils in Ost-West-Richtung angeordnete geplante Bebauung ermöglicht zum Teil eine gute Durchströmung der Baureihen. Die im Osten geplante Bebauung quer zur Strömungsrichtung wird aufgrund der niedrigeren Gebäudehöhe während der Nachtstunden noch relativ gut überströmt. Im Lee der höheren Gebäude kommt es allerdings zu einer deutlichen Verringerung der Windgeschwindigkeiten, die sich auch auf das westliche Plangebiet auswirkt. Die Bestandsbebauung ist von den Änderungen der Windgeschwindigkeiten allerdings nur im geringen Maße betroffen.

Bei der Betrachtung des Kaltluftvolumenstroms zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier kommt es im Lee der größeren Gebäude zu einer Abschwächung. Die Auswirkungen der geplanten Bebauung gehen allerdings über das Plangebiet hinaus und betreffen auch die westlich angrenzende Bestandsbebauung. In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass die Abschwächung des Kaltluftvolumenstroms bis in ca. 300 m Entfernung zum Plangebiet über 10 % hinausgeht. Dies ist laut VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5, „Lokale Kaltluft“ als eine erhebliche Änderung einzustufen.

Die Betrachtung der Tagsituation erfolgte über die PET zum Zeitpunkt 14 Uhr. Hier wird eine Erhöhung vor allem im zukünftig bebauten Bereich deutlich. Dies ist auf die deutliche Zunahme des Versiegelungsgrads und den Wegfall der Bestandsbäume zurück zu führen. Insbesondere die Verschattung (durch Vegetation) ist ein wichtiger Faktor für ein positives Bioklima am Tage. Es ist davon auszugehen, dass sich bei einer guten Grünausstattung des öffentlichen und privaten Raums in Zukunft die klimatische Situation tagsüber auch für den Planfall noch verbessert.

Die Bewertung der klimatischen Auswirkungen der geplanten Bebauung auf das Plangebiet selbst und auf die angrenzende Bestandsbebauung erfolgt nach VDI-Richtlinie 3787 über den Einbezug aller planungsrelevanten Parameter und ihrer Einordnung in das klimatische Umfeld des spezifischen Untersuchungsraums. Die zu überplanende Fläche liegt am Rande des Freiburger Stadtgebiets im Bereiche eines großen Kaltluftentstehungsgebiets. Sie weist im Status Quo eine sehr gute bioklimatische Situation auf, ebenso



wie ein Großteil der angrenzenden Bestandsbebauung. Die geplante Wohnbebauung führt zu einer moderaten Verschlechterung der bioklimatischen Situation. Obwohl die Verringerung des Kaltluftvolumenstroms als erheblich einzustufen ist, zeigt die Betrachtung der weiteren Parameter, dass im Zusammenspiel aller betrachteten Faktoren sowohl im Plangebiet selbst als auch in den betroffenen angrenzenden Stadtteilen eine gute bioklimatische Situation erhalten bleibt. Dies kann sich durch die Auswirkungen des Klimawandels allerdings in Zukunft ändern. So zeigen die Modellergebnisse hinsichtlich der nächtlichen Lufttemperaturen sowie der Wärmebelastung am Tage eine zunehmende erwartete Belastungssituation, weshalb bei der Planung des Bauvorhabens in diesem Zusammenhang vorbeugende Maßnahmen in Betracht gezogen werden sollten. Um insbesondere die Strömungssituation in der Nacht, aber auch die klimatische Situation am Tage zu optimieren, werden im Folgenden planerische Gestaltungshinweise gegeben.

Gewährleistung der Durchströmbarkeit des Gebiets durch strömungsparallele Bebauung

- Erhaltung des zentralen Grünstreifens in Ost-West-Ausrichtung.
- Erhalt eines möglichst breiten Straßenquerschnitts. Hierzu wäre eine parallele und nicht versetzte Anordnung der Gebäude von Vorteil. Eine versetzte Anordnung ist beispielsweise bei der geplanten Kita gegeben, wodurch der Durchströmungskorridor teilweise deutlich verengt wird. Eine 90°-Drehung des Gebäudekörpers würde in diesem Zusammenhang eine deutliche Verbesserung bewirken.

Auch der Gebäudekörper im Abschnitt WA 3 stellt aufgrund seiner Ausrichtung ein relevantes Strömungshindernis dar. Eine Verschiebung der Baugrenzen auf die südliche Hälfte des Bauabschnitts würde die Durchströmbarkeit der Gebäudeabstandsflächen in den Bauabschnitten WA 5.3/7.3 fördern.

Geringer Versiegelungsgrad und gute Grünausstattung des öffentlichen Raums

- Parkplatzflächen teilversiegeln und beschatten sowie weiteres Straßengrün einplanen.
Insbesondere der Baumanteil im Bereich der Planstraßen D, E, F, G, und H sollte nach Möglichkeit erhöht werden.
- Erhalt der Klimafunktion der vorhandenen/geplanten Vegetation insbesondere während Hitze- und Trockenheitsphasen z.B. durch standortgebundene Regenrückhaltungs- bzw. Entwässerungssysteme.
- Möglichst hoher Bodenaufbau oberhalb der geplanten Tiefgaragen. Dies fördert die Wasserverfügbarkeit und ermöglicht das Anpflanzen entsprechend tiefer wurzelnder Vegetation.

Öffentlich zugängliche Grünflächen mit einer hohen Mikroklimavielfalt

- Verschattete Aufenthaltsbereiche mit Sitzgelegenheiten schaffen
Hierfür bietet sich insbesondere der zentrale Grünstreifen an. So könnte dieser z.B. durch Einzelbäume und/oder kleine Baumgruppen hinsichtlich seiner Aufenthaltsqualität während heißer



Sommertage deutlich aufgewertet werden. Um eine Durchströmbarkeit zu gewährleisten, sollte sich der Baumanteil auf maximal 30 % der Grünfläche begrenzen.

- Verschattung möglichst durch Bäume, ggf. zusätzlich temporäre Elemente (z.B. Pergola)
- Insbesondere sensible Nutzungen wie die geplante Kita sollten mit ausreichend schattenspendenden Elementen ausgestattet werden.

Gebäude

- Fassadenbegrünung der Süd-/Südwestfassaden (positive Effekte auf das Außen- und Innenraumklima, mögliche Synergieeffekte: Lärmschutz, Luftreinhaltung, Biodiversität).
- Dachbegrünung auf allen Flachdächern (positive Effekte auf das Außenraumklima in Dachniveau, mögliche Synergieeffekte: Regenwasserrückhalt, Gebäudeenergie, Biodiversität).
- Anpassung des Raumnutzungskonzeptes (keine Südausrichtung von Schlafzimmern)
- Bautechnische Vorrichtungen zum Hitzeschutz (z.B. Markisen, Jalousien)

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Hannover, den 08.02.2023



6. Quellen

GEO-NET 2019: Klimaanpassungskonzept Freiburg. Ein Entwicklungskonzept für das Handlungsfeld Hitze, 2019, GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover.

KIESE, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. *Landschaft + Stadt* 20, H.2, S. 67-71.

MATZARAKIS, A. UND H. MAYER 1996: Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter* No. 18: 7-10.

UBA 2016: Heizen, Raumtemperatur, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur (07.11.2019).

VDI 2008: VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

VDI 2003: Richtlinie VDI 3787 Blatt 5 Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

VDI 2004: Richtlinie VDI 3787 Blatt 9 Umweltmeteorologie – Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.



7. Anhang

Anhang A 1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET in den Tagesstunden (Auszug nach VDI 2004).

| PET | Thermisches Empfinden | Physiologische Belastungsstufe |
|-------|-----------------------|--------------------------------|
| 20 °C | Behaglich | Keine Wärmebelastung |
| 23 °C | Leicht warm | Schwache Wärmebelastung |
| 29 °C | Warm | Mäßige Wärmebelastung |
| 35 °C | Heiß | Starke Wärmebelastung |
| 41 °C | Sehr heiß | Extreme Wärmebelastung |



Anhang A 2: Übersichtsplan der CEF-Maßnahmen für Freiburg-Zähringen (FAKTORGRÜN 2021).

