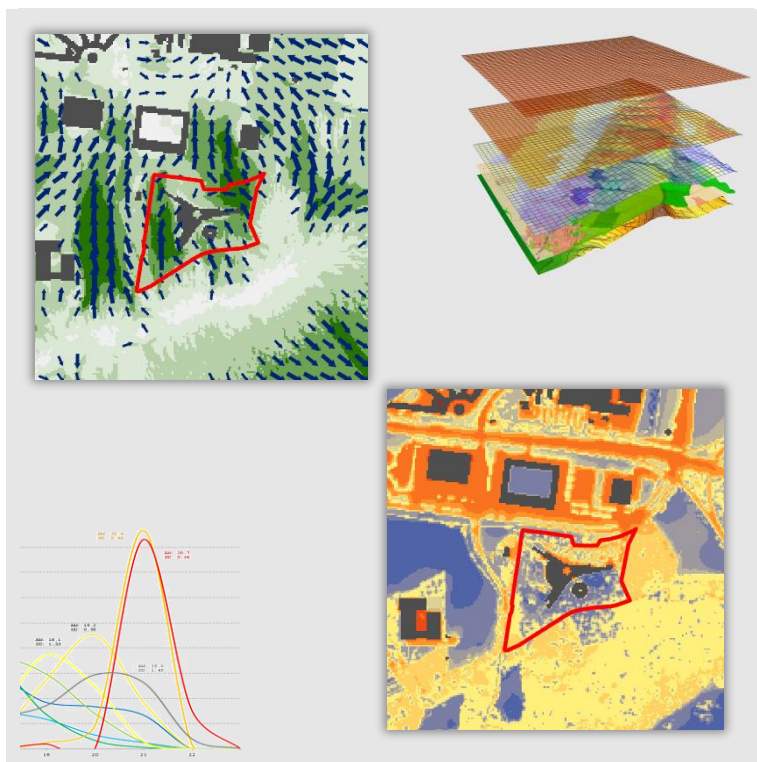


Klimaökologische Expertise zur Planung „Forêt d’Or“ Bd. de Kockelscheuer in Luxemburg



Auftraggeberin:

Félix Giorgetti S.à r.l.

3, rue Jean Piret

L-2350 Luxemburg



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel. (0511) 3887200

FAX (0511) 3887201

www.geo-net.de

Inhaltsverzeichnis

Seite:

Inhaltsverzeichnis	1
1. Aufgabenstellung und Einleitung	3
1.1 Das Projekt „Forêt d’Or“	5
1.2 Planungshinweiskarte Stadtklima	6
2. Methode.....	8
2.1 Datengrundlage und Modellrechnung	8
2.2 Synoptische Rahmenbedingungen	9
3. Ergebnisse	10
3.1 Ergebnisse Kaltlufthaushalt	10
3.1.1 Lufttemperatur	10
3.1.2 Kaltluftströmungsfeld	16
3.1.3 Kaltluftvolumenstrom	22
3.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur	28
4. Fazit	34
5. Literatur	38
6. Glossar	39

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand	8
Abb. 2.2: Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet für den Plan-Zustand	9
Abb. 3.1: Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. (°C) um 4:00 Uhr in der Ist-Situation.	13
Abb. 3.2: Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. (°C) um 4:00 Uhr in der Plan-Situation.	14
Abb. 3.3: Differenz der Lufttemperatur zwischen Plan- und Ist-Situation.	15
Abb. 3.4: Prinzipskizze Flurwind	16
Abb. 3.5: Windfeld in 2 m ü. Gr. in der Ist-Situation.	19
Abb. 3.6: Windfeld in 2 m ü. Gr. in der Plan-Situation.	20
Abb. 3.7: Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen Plan- und Ist-Situation.....	21
Abb. 3.8: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom	22
Abb. 3.9: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) in der Ist-Situation.....	24
Abb. 3.10: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) in der Plan-Situation.....	25
Abb. 3.11: Differenz des Kaltluftvolumenstroms zwischen Plan- und Ist-Situation.	26
Abb. 3.12: Blockweise, prozentuale Veränderung des Kaltluftvolumenstroms.	27
Abb. 3.13: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET, °C) in der Ist-Situation	31
Abb. 3.14: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET, °C) in der Plan-Situation.	32
Abb. 3.15: Differenz der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET, °C) zwischen Plan- und Ist-Situation.	33

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI-RL 3787)	28
---	----

1. Aufgabenstellung und Einleitung

Das Wohlbefinden und die Gesundheit der Menschen sind nicht zuletzt abhängig von den meteorologischen Verhältnissen in ihrem Lebensumfeld. Dabei wirkt sich die Gestaltung dieses Lebensumfeldes, also vornehmlich die des Siedlungsraumes, direkt auf die in ihm auftretenden Wärme- und Luftbelastungen aus. Klimatische und lufthygienische Aspekte sind somit durch den Menschen beeinflussbar und daher feste Bestandteile der räumlichen Planung. Das Schutzgut „Klima und Luft“ ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen ableiten, die der Erhaltung günstiger bioklimatischer Verhältnisse dienen bzw. auf eine Verbesserung des Stadtklimas in ungünstig bewerteten Teilräumen abzielen. Um diesen Leitgedanken langfristig verfolgen zu können, ist es zudem erforderlich, die Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen.

Belange des Umweltschutzes im Rahmen der Bauplanung sind in der *Législation relative à l'aménagement communal et au développement urbain* festgehalten (in Art. 2: „Les communes ont pour mission de garantir le respect de l'intérêt général en assurant à la population de la commune des conditions de vie optimales par [...] (e) le respect du patrimoine culturel et un niveau élevé de protection de l'environnement naturel et du paysage [...]“). Die Beeinflussung des Klimas durch die Umsetzung von Bauprojekten wird im Rahmen der *Évaluation des incidences sur l'environnement* (EIE) ausgewertet und ist rechtlich im *Loi du 15 mai 2018 relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement et portant modification* unter Art. 3 (1) Punkt 3 verankert.

Im Auftrag der Félix Giorgetti S.à r.l. wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zur klimaökologischen Situation im Bereich des Vorhabens „Forêt d'Or“ durchgeführt. Für die planerische Berücksichtigung der Schutzgüter Klima und Luft ist es bedeutsam, sich auf eine differenzierte Bewertung der kleinräumig variablen klimatischen Bedingungen einschließlich ihrer komplexen Wechselwirkungen stützen zu können. Die zu klärenden Fragen, die im Mittelpunkt der Untersuchung stehen, beziehen sich auf das nähere Umfeld des Bebauungsplans:

- Welche Belüftungssituation liegt in der Umgebung der Vorhabenfläche vor?
- Wie ist die bioklimatische Situation zu beurteilen?
- Welche Veränderungen ergeben sich durch die vorgesehene Neuplanung?
- Welche Empfehlungen können für eine zukünftige Bebauung auf der Fläche gegeben werden?

Diese Studie soll klimaökologische Rahmendaten in einer hohen räumlichen Auflösung liefern, um eine sachgerechte Beurteilung der Schutzgüter Klima/Luft innerhalb des Planungsprozesses zu gewährleisten. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf den Kaltlufthaushalt und die mögliche Beeinflussung bei einer Überplanung gelegt. Ausgangspunkt für die Ermittlung dieser Zusammenhänge ist eine austauscharme, sommerliche Hochdruckwetterlage, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einhergeht. Während bei einer windstarken „Normallage“ der

Siedlungsraum gut durchlüftet wird und eine Überwärmung kaum gegeben ist, stellt die windschwache Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel im Sommer eine „Worst Case“-Betrachtung dar (**Abb. 1.1**).

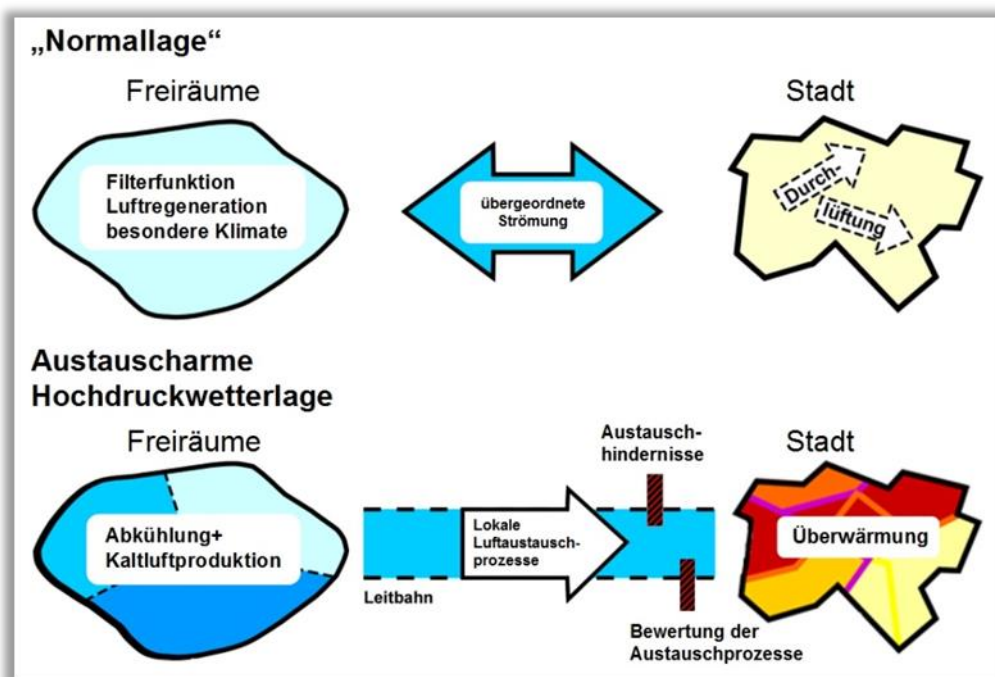


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse bei einer austauscharmen Hochdruckwetterlage.

Diese Wetterlage wird wegen der belastenden Wirkung auf die Gesundheit des Menschen unter besonderer Beachtung von Älteren, Kranken und Kindern zur Beurteilung der bioklimatischen Situation gemäß VDI-RL 3785 Blatt 1 herangezogen. Die Nachtsituation ist dahingehend von Relevanz, da nur dann unter den windschwachen Bedingungen eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Mengen an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischlufte für den Siedlungsbereich liefern und dort die Wärmebelastung während sommerlicher Hitzeperioden abmildern können. Dargestellt wird eine windschwache, austauscharme sommerliche Wettersituation. Da im Rahmen der Klimaanalyse Luxemburg (GEO-NET und LIST 2021) für den überplanten Bereich ein vor allem reliefsinduzierter Kaltluftstrom festgestellt werden konnte, welcher einen thermischen Ausgleich in den Nachtstunden in angrenzende bebaute Bereiche erbringt, ergibt sich die Relevanz für eine vertiefende Untersuchung.

Die Relevanz der Berücksichtigung der klimatischen Situation und des Bioklimas bei der Umsetzung von Planvorhaben leitet sich auch aus dem Klimawandel ab, der zukünftig zu häufigeren und länger andauernden Hitzeperioden führen wird. Mit dem Wissen der klimatischen Situation vor Ort kann eine möglichst optimale Anpassung an die zu erwartende Änderung des Klimas erfolgen.

1.1 Das Projekt „Forêt d’Or“

Die Félix Giorgetti S.à r.l. plant auf einem Grundstück am Bd. de Kockelscheuer in der Stadt Luxemburg unmittelbar südlich des Stade de Luxembourg einen Hotelkomplex mit Seitengebäuden (vgl. **Abb. 1.2**). Aktuell handelt es sich bei dem Grundstück größtenteils um eine offene Brachfläche, welches im Osten durch einen dichten Baumbestand begrenzt wird. Das Plangebiet liegt am südlichen Rand der Stadt Luxemburg. Südlich des Plangebiets schließt sich weitere Bewaldung an. In Richtung Südwesten und Süden schließen sich eine Geländeerhebungen an das Plangebiet an. Nördlich des Plangebiets schließen sich das Stade de Luxembourg und die Dienststelle Sport der Stadt Luxemburg an. Außerdem liegt jenseits der Autobahn A6 weiter im Norden das Stadtviertel „Cloche d’Or“ im Stadtteil Gasperich, welches durch gewerbliche Nutzung geprägt ist. Das Hauptgebäude der geplanten Bebauung besteht aus einem Gebäudekomplex mit drei Strahlen, die jeweils etwa 80 m lang und 20 m breit sind. Das Hauptgebäude besteht aus fünf oberirdischen Etagen und die Dächer des Gebäudes werden überwiegend begrünt. Im Süden schließt sich an das Hauptgebäude ein kreisrundes Seitengebäude („Spa“) mit einem Durchmesser von ca. 40 m an, welches oberirdisch ausschließlich eine Erdgeschosssebene besitzt. Ein zweites Seitengebäude östlich des Hauptgebäudes („Staff Village“) ist größtenteils ins Gelände eingelassen und besitzt keine vollständig oberirdischen Etagen.



Abb. 1.2: Plan "Forêt d'Or" (übermitteltes Material aus Oktober 2023).

1.2 Planungshinweiskarte Stadtklima

Die im Zuge der Klimaanalyse Luxemburg (GEO-NET und LIST 2021) erstellte Planungshinweiskarte Stadtklima (Abb. 1.5) bewertet die Stadtstrukturen und Freiflächen hinsichtlich ihrer Bedeutung im klimatischen Wirkungsgefüge und gibt Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen für die räumliche Planung ableiten lassen. Die Belastungssituation im Siedlungsraum (Wirkungsraum) ist im Wesentlichen von der Bebauungsdichte und dem Versiegelungsgrad, sowie der dadurch verursachten nächtlichen Überwärmung abhängig. Kleinräumig können aber noch Grünflächen und lokale Kaltluft wirken. Die bioklimatische Bedeutung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) ist besonders hoch, wenn sie direkt zu einem überdurchschnittlich großen Kaltluftzustrom in den Siedlungsraum beitragen.

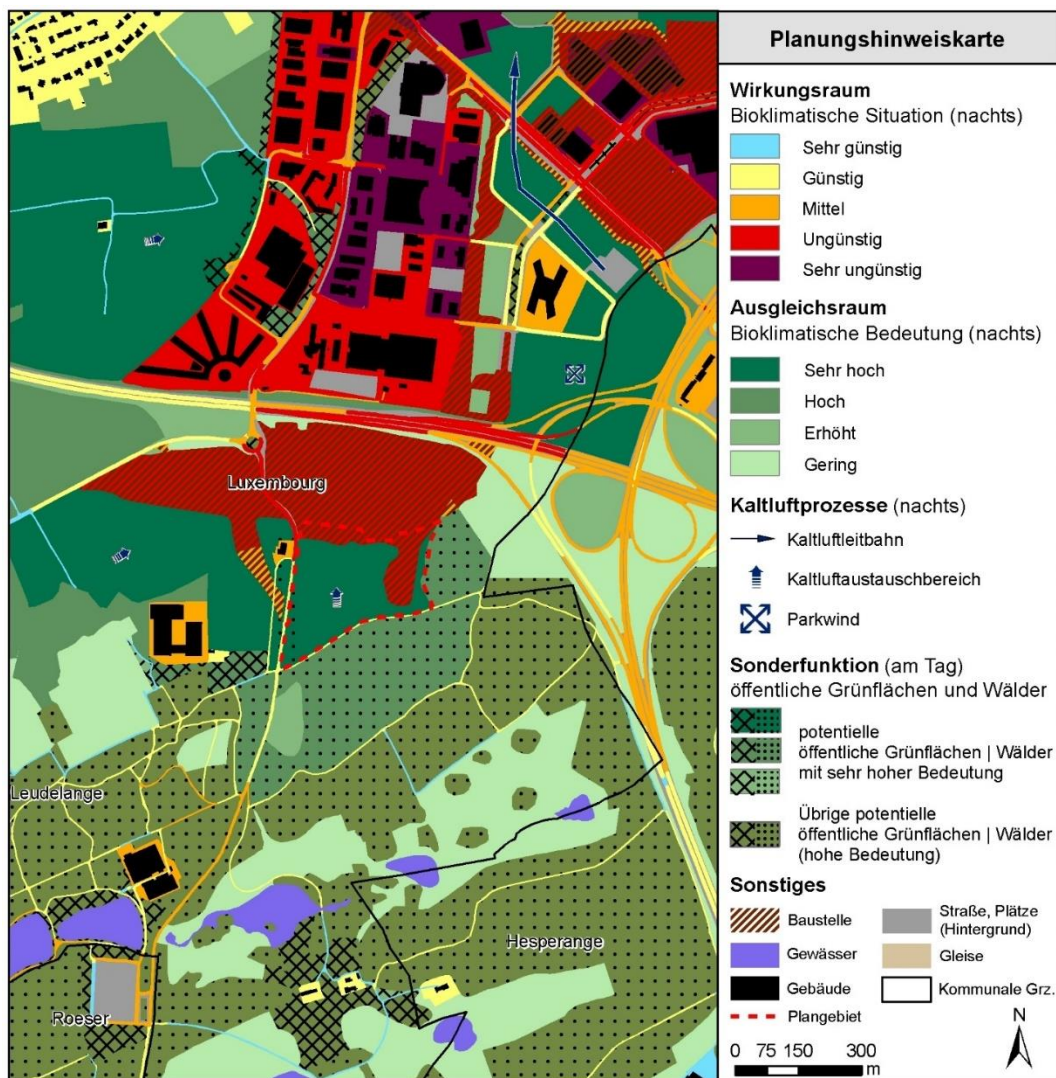


Abb. 1.3: Ausschnitt der Planungshinweiskarte Luxemburg (GEO-NET und LIST 2021).

Das Plangebiet befindet sich in einem Ausgleichsraum von sehr hoher bioklimatischer Bedeutung und ist ein bedeutsamer Kaltluftaustauschbereich (blauer Pfeil). Die Klimaanalyse Luxemburg gibt hierfür folgende allgemeine Planungshinweise an: „Es besteht eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Nutzungsentensivierungen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen.“ Die bioklimatische Situation der nördlich angrenzenden Siedlungsgebiete wurden größtenteils als ungünstig, teilweise auch als sehr ungünstig bewertet.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Planungshinweiskarte den Stand vom Ende des Jahres 2020 repräsentiert, sodass das Gebiet des Stade de Luxembourg in dieser Darstellung bereits als Wirkungsraum, aber noch als Baustelle markiert ist. Des Weiteren ist eine Erweiterung des Quartiers „Cloche d’Or“ zum jetzigen Zeitpunkt in der Planung (Schemas directeurs zum *plan d’aménagement général* (PAP)) vorhanden bzw. zum Teil in Bau. Dies betrifft Freiflächen nordöstlich des Plangebiets jenseits der Autobahn A6 entlang des Bd. de Kockelscheuer. Durch die Bebauung dieser Flächen verändert sich die bioklimatische Funktion dieser Flächen vom Ausgleichs- zum Wirkungsraum. Mit Hinblick auf die dargestellten Kaltluftprozesse ist von einer starken Modifikation bis zu einem Erliegen der Prozesse in diesem Bereich auszugehen. Die in Planung befindlichen Teile der Quartierserweiterung „Cloche d’Or“ wurden im Rahmen dieser Untersuchung in der Modellierung nicht berücksichtigt.

2. Methode

2.1 Datengrundlage und Modellrechnung

Die Modellrechnungen wurden mit dem Strömungs- und Klimamodell FITNAH durchgeführt. Bei einem numerischen Modell wie FITNAH muss 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. Eine wichtige Modelleingangsgröße stellt zudem die Höhe der Baustrukturen dar, welche einen maßgeblichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausübt. Die zukünftige Bebauung des Planareals wurde in Form von Plänen und Schnitten von der Auftraggeberin übermittelt. Auf Grundlage dieser Informationen wurde ein für das Modell geeigneter Nutzungsdatensatz erstellt. Mit der hohen räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m war es möglich, die Gebäudestrukturen realitätsnah zu erfassen und ihren Einfluss auf den nächtlichen Luftaustausch abzubilden. In **Abb. 2.1** und **Abb. 2.2** sind die dem Modell zugrunde liegenden Eingangsdaten für den Ist- und den Plan-Zustand dargestellt.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Ist-Situation

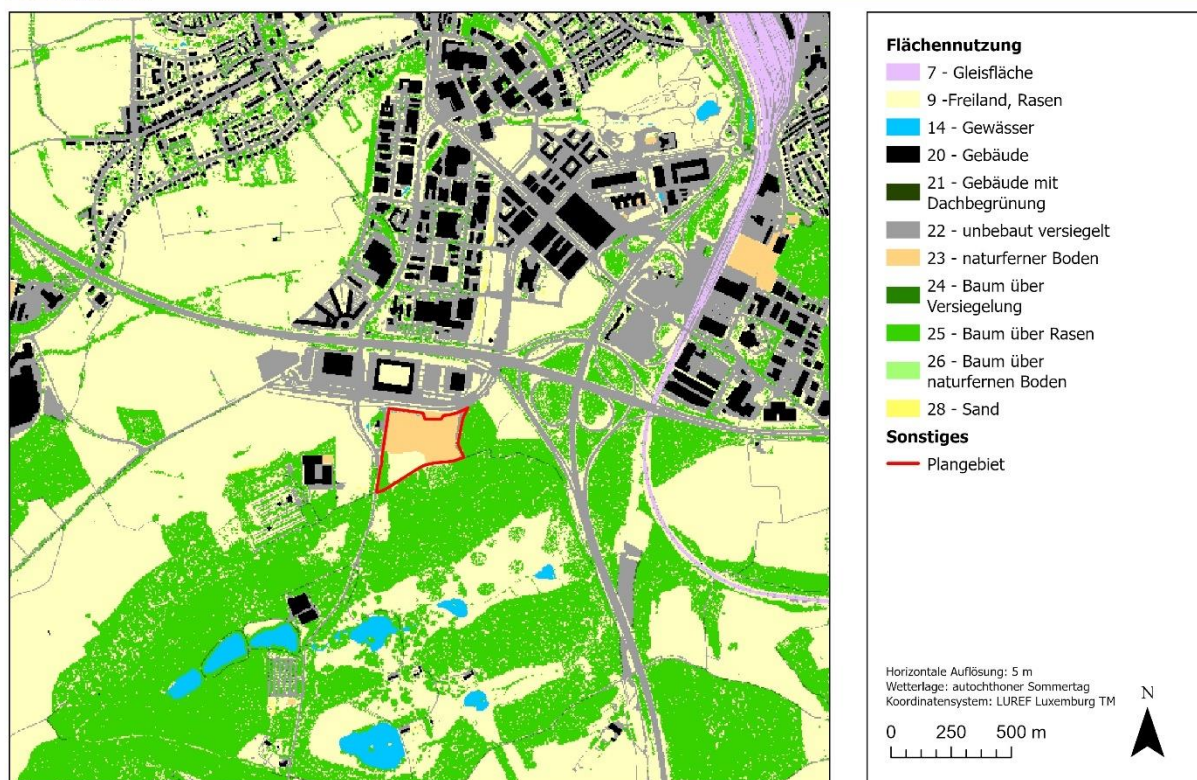


Abb. 2.1: Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg Plan-Situation

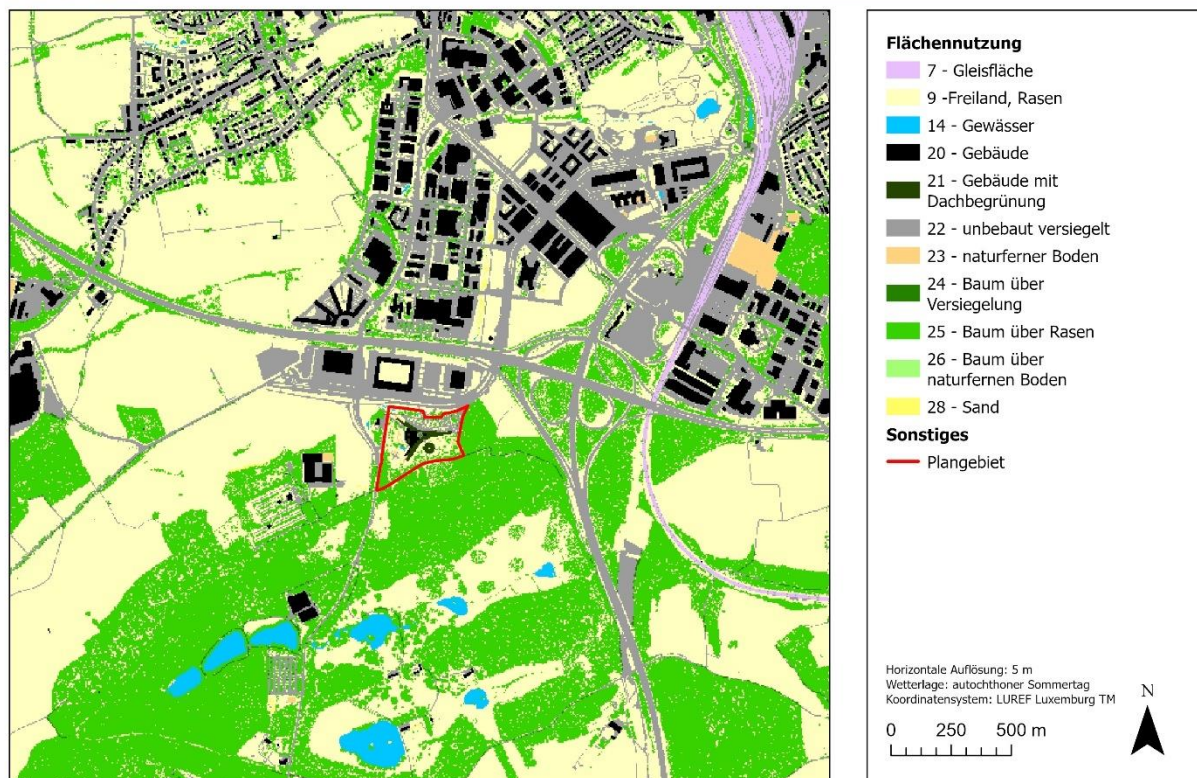


Abb. 2.2: Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet für den Plan-Zustand

2.2 Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen werden die großräumigen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

- Bedeckungsgrad 0/8
- Kein überlagernder geostrophischer Wind
- Relative Feuchte der Luftmasse 50%

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wetter-situation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen.

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FITNAH-Modellierung zu den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Kaltluftströmungsgeschwindigkeit und Kaltluftvolumenstrom erläutert. Die Ergebnisse werden für die zweite Nachthälfte (Kaltlufthaushalt um 4 Uhr morgens) dargestellt. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen den überwärmten Siedlungsräumen und den kühleren vegetationsgeprägten bzw. unbebauten Flächen. Der 4 Uhr MEZ Zeitpunkt wurde gewählt, da sich die Luftaustauschprozesse zwischen dem Umland und den Siedlungsflächen zu diesem Zeitpunkt vollständig ausgebildet haben. Die sommerliche Wärmebelastung während der Tagesstunden wird über die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) dargestellt und in einem eigenen Kapitel beschrieben (Kap. 3.2). In Abgrenzung zur Lufttemperatur handelt es sich hierbei um die tatsächlich empfundene Temperatur. Ihre Ausprägung wird vor allem über die Intensität der Sonneneinstrahlung bestimmt.

3.1 Ergebnisse Kaltlufthaushalt

3.1.1 Lufttemperatur

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 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 grüneprägten 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.

Ist-Szenario

Das mit dem Klimamodell FITNAH simulierte Lufttemperaturfeld in 2 m über Grund zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens zeigt Werte zwischen 12,6 und 19,2 °C für das gesamte Modellgebiet (**Abb. 3.1**) mit einer mittleren Temperatur von 15,5 °C. Im Plangebiet variieren die Lufttemperaturen zwischen 13,7 °C über den offenen, unversiegelten Flächen und 17,8 °C im Baumbestand und liegen im Mittel bei 15,1 °C.

Im näheren Umfeld des Plangebiets werden vor allem auf den Parkplatzflächen des Stade de Luxembourg im Vergleich höhere Temperaturen mit mehr als 18 °C erreicht. Hierbei handelt es sich um zusammenhängende, versiegelte Flächen, die sich im Tagesverlauf besonders stark aufheizen, sodass im Verlauf der Nacht die gespeicherte Wärme an die Umgebungsluft abgegeben wird. Die bewaldeten Flächen südlich des Plangebiets weisen mit Lufttemperaturen zwischen 16 und 17 °C überdurchschnittliche Werte auf. In Wäldern führen belaubte Baumkronen zu einer Verminderung der nächtlichen Abkühlung im Vergleich zu offenen, unversiegelten Flächen. Verminderte Lufttemperaturen von weniger als 14 °C liegen an offenen, unversiegelten bzw. Flächen mit niedriger Vegetation vor, z.B. den landwirtschaftlich genutzten Flächen westlich sowie südlich des Plangebiets zwischen den Waldflächen. Die Lufttemperatur über Wasserflächen, z.B. den Teichen südlich des Plangebiets, ist stark von der Wassertemperatur abhängig. Wasser hat die Eigenschaft, eine große Menge an Wärme tagsüber aufzunehmen, die in der Nacht an die Luft abgegeben wird. Entsprechend werden hier Temperaturen von etwa 18 °C erreicht.

Plan-Szenario

Das Temperaturfeld in 2 m Höhe für das Planszenario ist in **Abb. 3.2** dargestellt. Bezogen auf das gesamte Modellgebiet verändert sich die durchschnittliche Temperatur um weniger als 0,1 °C. Innerhalb des Plangebiets erhöht sich die durchschnittliche Lufttemperatur um 0,1 °C.

Mit der Realisierung des Vorhabens steigen die nächtlichen Temperaturen nördlich des Gebäudekomplexes. In diesem Bereich kommt es zu einer Versiegelung von Flächen, sodass hier im Planzustand Temperaturen von bis zu 17,8 °C erreicht werden. Südlich des Gebäudekomplexes hingegen werden die Außenflächen des Plangebiets in Rasenflächen mit Baumgruppen umgewandelt. In den offenen Bereichen dieser Flächen werden Temperaturen von minimal 13,2 °C erreicht.

Differenzen

Die Abweichungen zwischen dem Planszenario und dem Basisszenario sind in **Abb. 3.3** als Absolutwerte dargestellt. Die Beschreibung von Temperaturdifferenzen erfolgt üblicherweise in der Einheit Kelvin (K). Im Sinne eines guten Verständnisses der Karten werden die Differenzen in °C angesprochen, welche mit Kelvin gleichgesetzt werden können. Positive Werte zeigen hierbei eine Temperaturerhöhung mit Umsetzung der Planung an, negative Werte hingegen stellen eine Verringerung der Temperatur mit Umsetzung der Planung dar.

Temperaturveränderungen beschränken sich überwiegend auf das Plangebiet. Besonders starke Temperaturzunahmen um bis zu 3,3 °C liegen über den Flächen vor, die mit Umsetzung der Planung zusätzlich versiegelt werden, insbesondere nördlich des geplanten Gebäudekomplexes. Außerdem führen zusätzliche Bäume im Plangebiet dazu, dass die nächtliche Lufttemperatur unterhalb der Baumkrone im Planzustand im Vergleich zum Istzustand lokal leicht erhöht ist (z.B. südwestlich des Gebäudekomplexes). Vor allem südlich und westlich des Gebäudekomplexes wird von einer Verminderung der Temperatur durch Umsetzung der Planung ausgegangen. Hier führt die Umwandlung von Brachflächen in Rasenflächen zu einer Verminderung der Temperatur von punktuell bis zu 3,0 °C.

Die Temperaturveränderungen sind räumlich überwiegend auf das Plangebiet limitiert. Andere besiedelte Bereiche in der Umgebung erfahren mit Umsetzung der Planung keine Veränderung der nächtlichen Lufttemperatur.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Ist-Situation

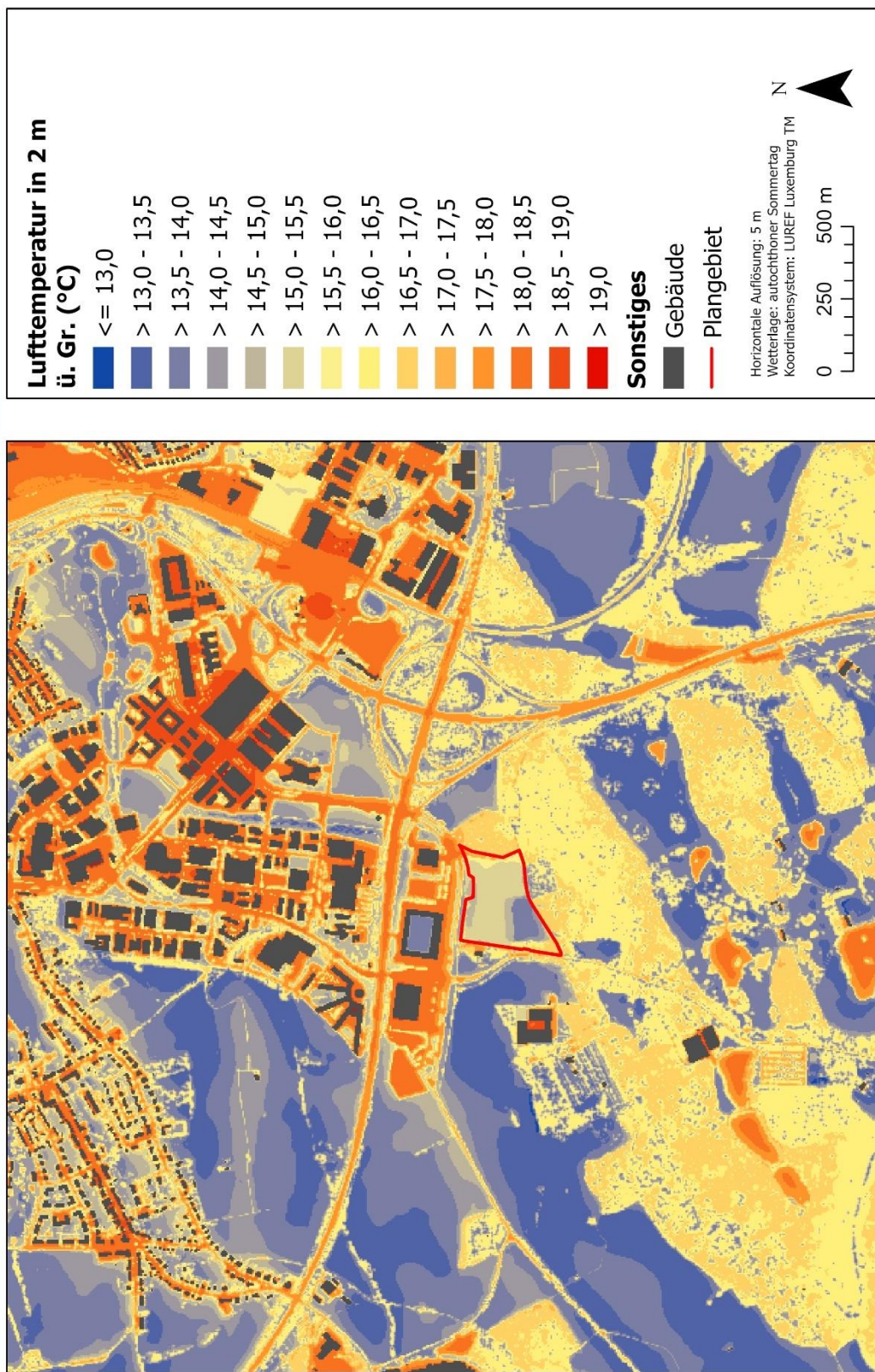


Abb. 3.1: Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. (°C) um 4:00 Uhr in der Ist-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation

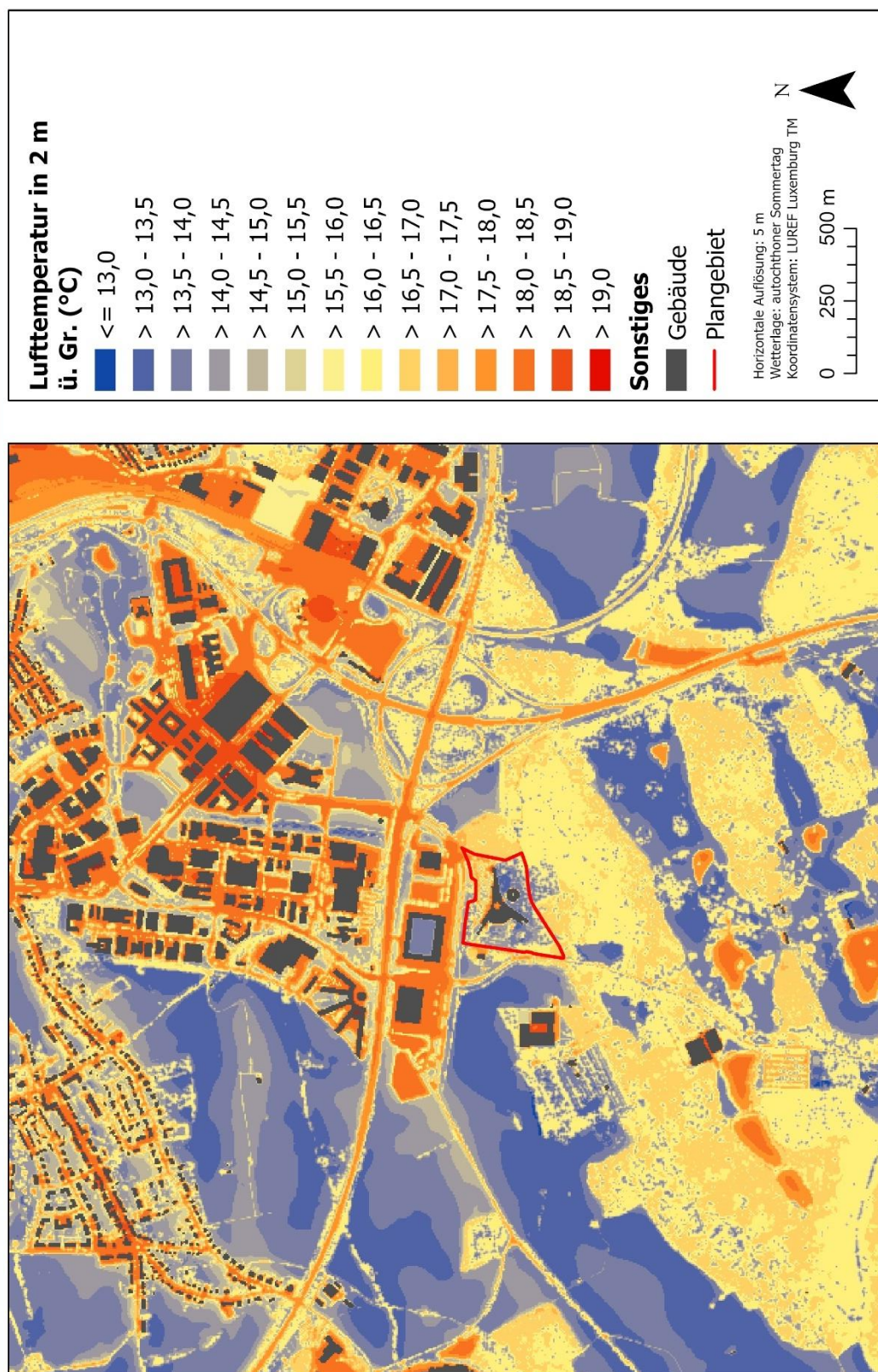


Abb. 3.2: Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. (°C) um 4:00 Uhr in der Plan-Situation.

Klimaökologische Begutachtung der Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation - Ist-Situation

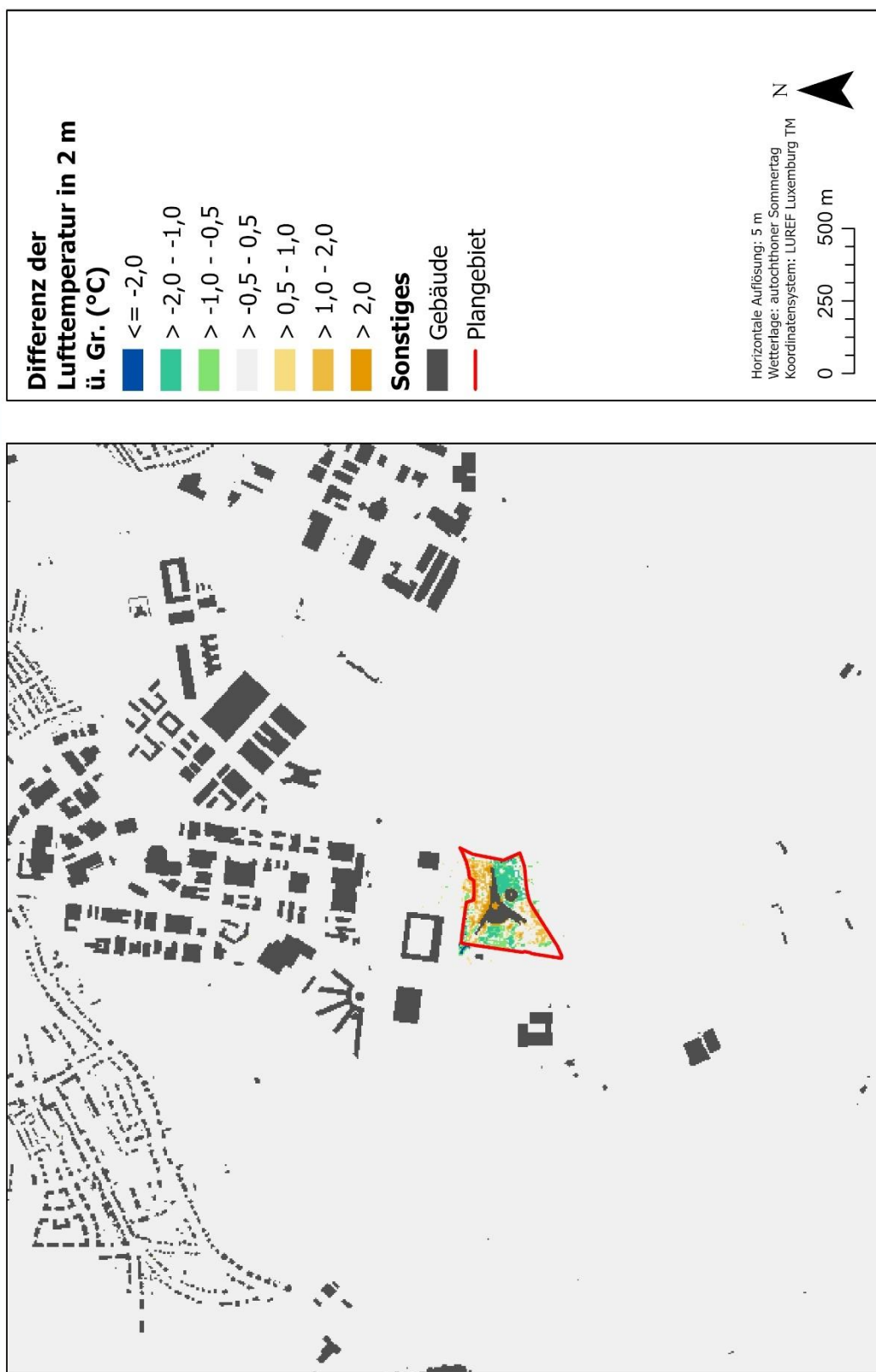


Abb. 3.3: Differenz der Lufttemperatur zwischen Plan- und Ist-Situation.

3.1.2 Kaltluftströmungsfeld

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 (**Abb. 3.4**). An den geneigten 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).

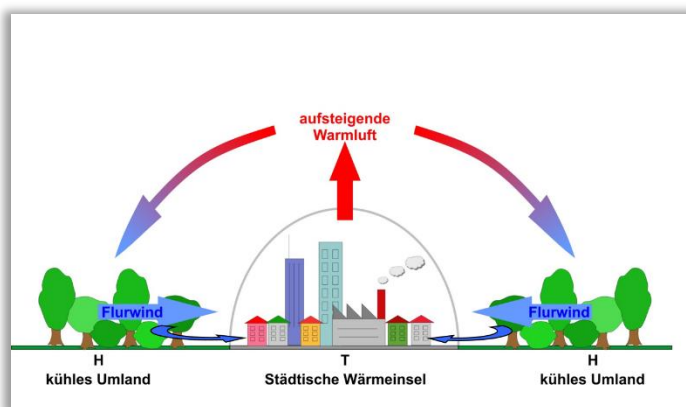


Abb. 3.4: Prinzipskizze Flurwind

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. 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 Abkühlungsraten 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.

Die Ergebniskarten stellen das zum nächtlichen Analysezeitpunkt 04:00 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 50 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 $\geq 0,1$ m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die Ergebniskarten stellen das zum nächtlichen Analysezeitpunkt 04:00 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 50 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 $\geq 0,1$ m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Ist-Szenario

Abb. 3.5 zeigt die Strömungsgeschwindigkeit des modellierten Windfeldes, das sich während einer sommerlichen, windstillen Strahlungswetternacht eigenbürtig ausbildet. Im Gegensatz zu einer austauschstarken „mittleren“ Wettersituation, bei der der Wind Blätter und Äste in den Bäumen bewegt, sind diese Windströmung von mehr als 0,1 m/s gerade noch als kühler Luftzug auf der Haut wahrnehmbar.

Über den unterschiedlich strukturierten Freiflächen im Umfeld des Plangebietes entsteht durch deren Abkühlung Kaltluft (vgl. Kap. 3.1). Deren Strömungsrichtung wird im Wesentlichen durch den Temperaturgradienten hin zu den wärmeren Siedlungsflächen sowie das Relief bestimmt. Dabei entstehen vor allem über den offenen Hanglagen im Plangebiet, sowie westlich bzw. südwestlich des Plangebiets intensive Kaltluftabflüsse. Die Ausprägung der Detailsimulation stimmt hierbei gut mit der Klimaanalyse für Luxemburg (GEO-NET und LIST 2021) überein mit Einschränkungen für Flächen, auf denen zwischenzeitlich neue Bebauung entstanden ist.

Die Detailsimulation bestätigt das Ergebnis der Klimaanalyse Luxemburg, dass das Plangebiet in einem Kaltluftaustauschbereich liegt. Im Plangebiet liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund bei 0,6 m/s und die maximale Windgeschwindigkeit bei 0,8 m/s. Die Luftströmung kommt hierbei vom Hang aus Richtung Süden und setzt sich in Richtung Norden über die Parkplatzfläche östlich des Stade de Luxembourg fort. Eine Abschwächung der Luftströmung erfolgt mit Überschreitung der Autobahn A6 und dem Erreichen der Bebauung nördlich der Autobahn. In der weiteren Umgebung des Plangebiets ergeben sich durch die Topographie weitere, für Siedlungsgebiete relevante Kaltluftzuströme, beispielsweise östlich bzw. nordöstlich des Plangebiets, sowie westlich und nordwestlich des Plangebiets. In den südlich gelegenen Waldgebieten ist von einer geringen Windgeschwindigkeit ($< 0,1$ m/s) auszugehen, da hier dichte Baumbestände als Strömungshindernisse wirken.

Plan-Szenario

Das nächtliche Strömungsfeld für das Planszenario zeigt **Abb. 3.6**. Dabei zeichnet sich die geplante Bebauung als Strömungshindernis ab. Vor allem die von Süden kommende Luftströmung wird durch die geplante Bebauung unterbrochen. Die Windgeschwindigkeit auf den verbleibenden Freiflächen im Plangebiet reduziert sich auf durchschnittlich 0,3 m/s. Das Windfeld zeigt allerdings auch, dass es am westlichen und am östlichen Rand des Plangebiets zu einer Umströmung des geplanten Gebäudekomplexes kommt. Punktuell ergeben sich daraus maximale Windgeschwindigkeiten von bis zu 1,0 m/s. Am östlichen Rand des Plangebiets ist die Luftströmung weiterhin durch die Topographie unterstützt und trägt damit zur Durchströmung der Parkplatzfläche am Stade de Luxembourg bei.

Differenzen

Die Differenzenabbildung macht die Beeinflussung des Windfeldes noch besser sichtbar (**Abb. 3.7**). Positive Werte zeigen eine Zunahme und negative Werte eine Abnahme der Windgeschwindigkeit mit Umsetzung der Planung.

Die geplante Bebauung ist auch auf der zuvor freien Fläche angeordnet, so dass es in diesem Bereich zu einer Absenkung der Windgeschwindigkeiten um bis zu 0,8 m/s kommt. Dies ist insbesondere im Windschatten des Gebäudekomplexes der Fall. Gleichzeitig kommt es zu einer Umleitung der Strömung im Südwesten und im Osten des geplanten Gebäudekomplexes, so dass es hier zu einer Erhöhung der Geschwindigkeiten um bis zu 0,5 m/s kommt. Durch die Modifizierung des Windfeldes erhöht sich darüber hinaus westlich des Plan-

gebiets die Windgeschwindigkeit lokal um bis zu 0,3 m/s. An der Parkplatzfläche östlich des Stade de Luxembourg verringert sich hingegen die Windgeschwindigkeit um bis zu 0,3 m/s. Die Veränderungen der Windgeschwindigkeit beschränken sich räumlich auf einen Abstand von maximal 250 m zum Plangebiet.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Ist-Situation

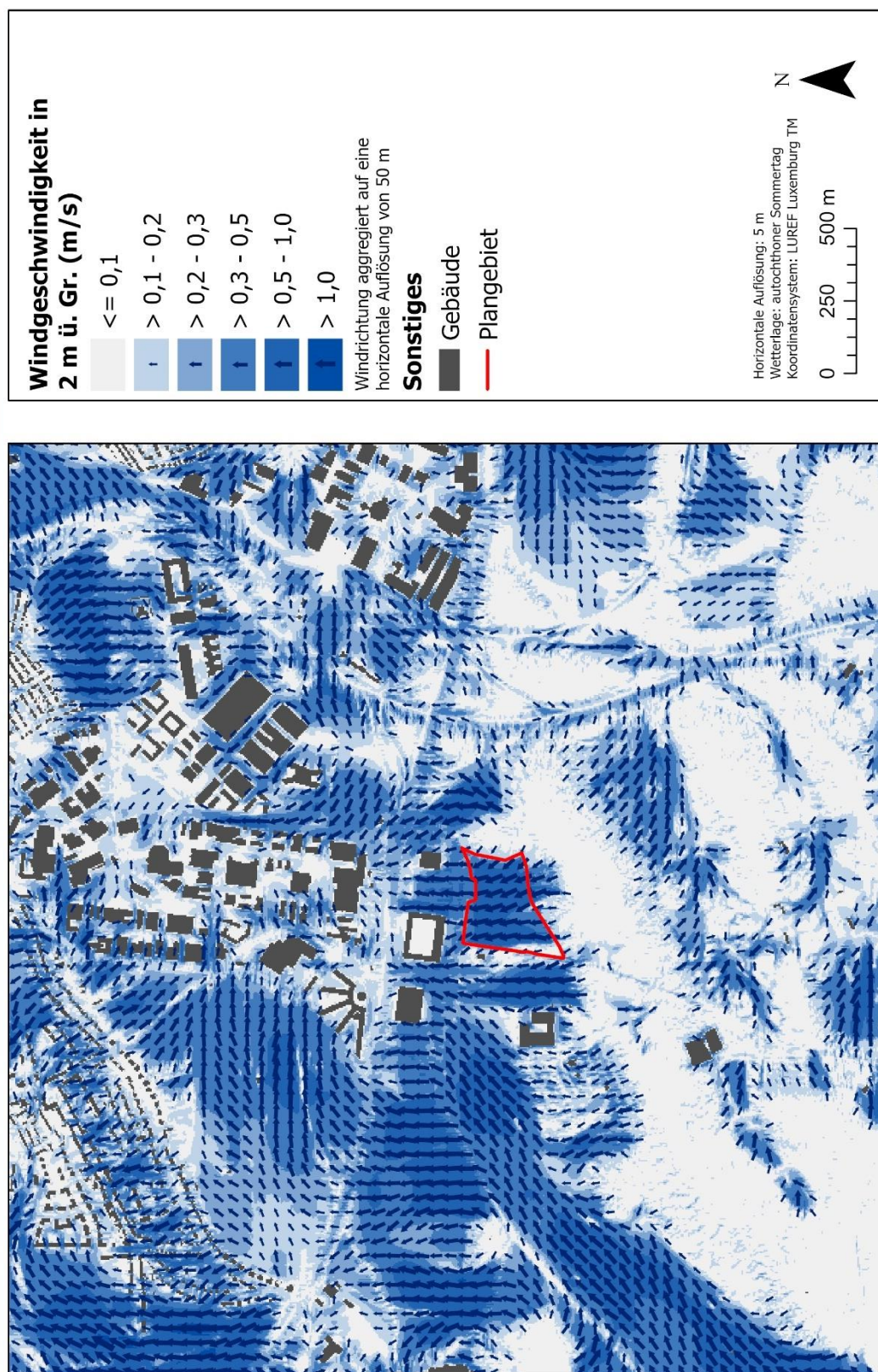


Abb. 3.5: Windfeld in 2 m ü. Gr. in der Ist-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation

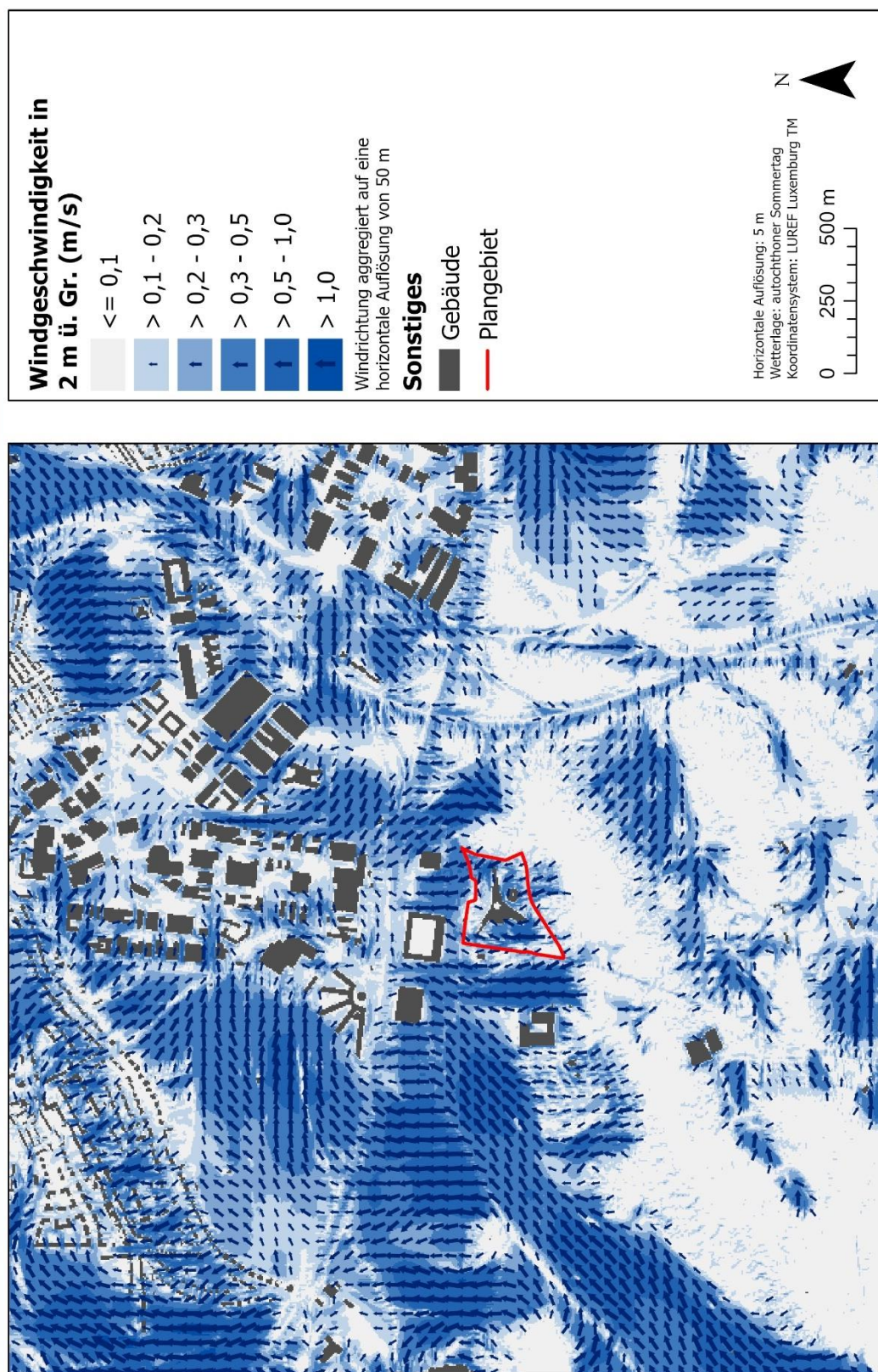


Abb. 3.6: Windfeld in 2 m ü. Gr. in der Plan-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation - Ist-Situation

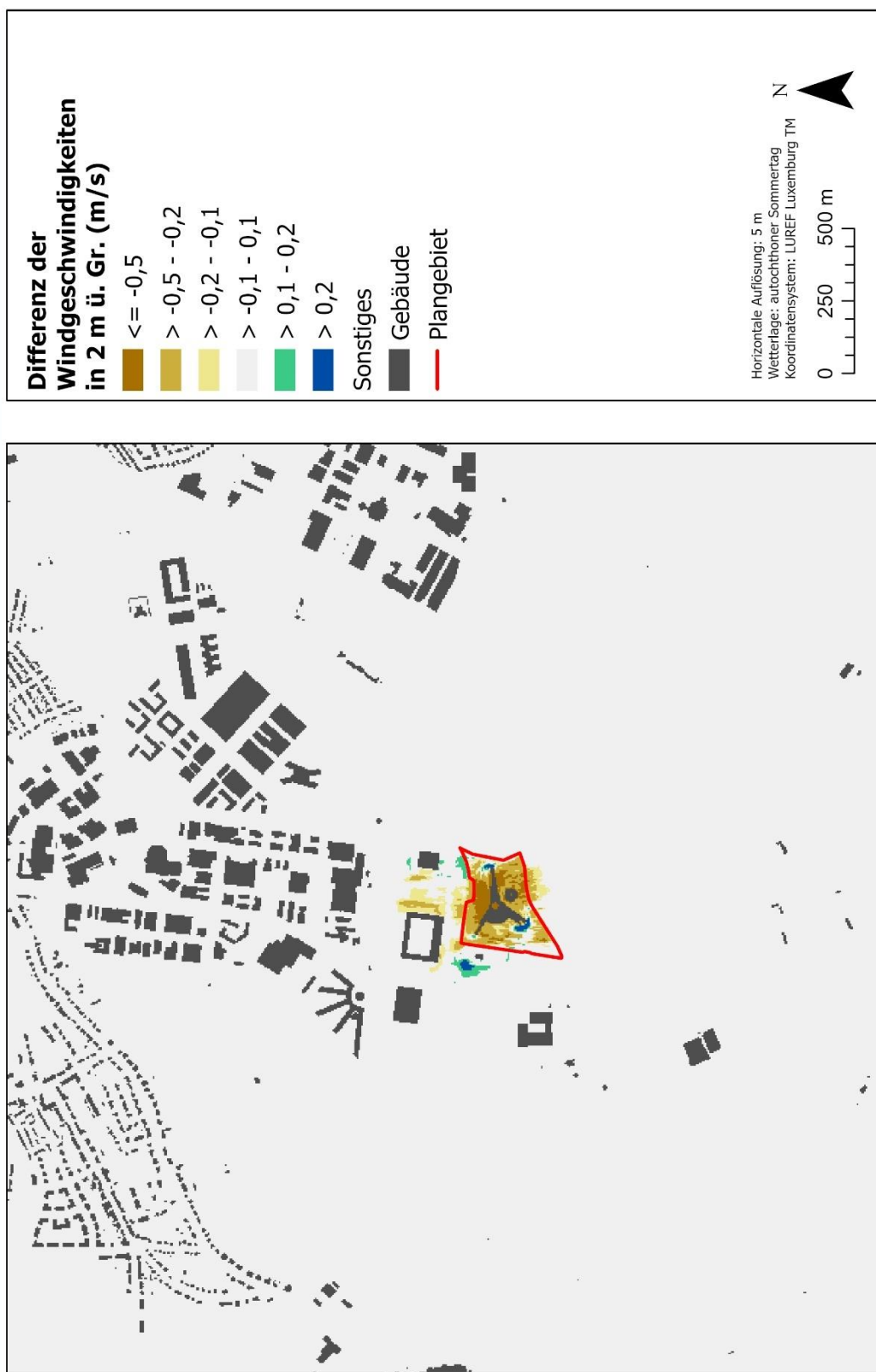


Abb. 3.7: Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen Plan- und Ist-Situation.

3.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld 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 zur Bewertung der Grünflächen

ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

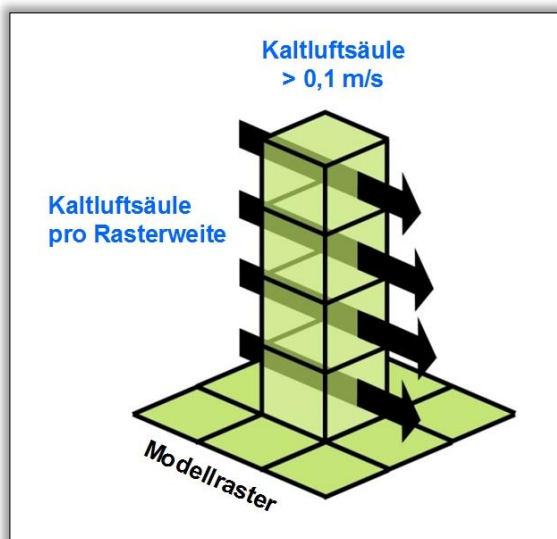


Abb. 3.8: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

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 die dargestellten 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 (Abb. 3.8). Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den *Zustrom von Kaltluft* und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

Ist-Szenario

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abb. 3.9 zeigt den Kaltluftvolumenstrom. Das Plangebiet wird mit etwa $5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ in den bewaldeten Randbereichen bis $21 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ an den offenen Flächen überströmt. Der durchschnittliche Kaltluftvolumenstrom des Plangebiets liegt bei $15 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Die Kaltluftströmung setzt sich von Süden kommend in Richtung Norden fort, wo es lokal zu einer Kanalisierung der Strömung kommt, sodass auch auf der Parkplatzfläche östlich des Stade de Luxembourg Volumenströme von bis $21 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ vorliegen.

Planszenario

Wie Abb. 3.10 für das Planszenario zeigt, führt die Bebauung zu einer Verringerung des Kaltluftvolumenstroms im Plangebiet, sodass diese im Durchschnitt $11 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ beträgt. Vor allem im Windschatten der geplanten Bebauung ergeben sich geringe Volumenströme von weniger als $5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Durch die Umlenkung der Strömung kommt es jedoch sowohl östlich des geplanten Gebäudekomplexes, als auch westlich davon

zu einer Erhöhung der Volumenströme auf bis zu $24 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Über dem Parkplatz östlich des Stade de Luxembourg kommt es ebenfalls zu einer Verringerung des Kaltluftvolumenstroms. Im östlichen Teil werden maximal 20, im westlichen Teil maximal $15 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ erreicht.

Differenzen

In der Darstellung der Differenzen zeigen positive Werte eine Zunahme des Kaltluftvolumenstroms mit Umsetzung der Planung, während negative Werte eine Abnahme darstellen (**Abb. 3.11**). Durch die neue Bebauung erhöht sich der Kaltluftvolumenstrom östlich und westlich des geplanten Gebäudekomplexes um maximal $12,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Dem gegenüber stehen Verminderungen des Kaltluftvolumenstroms, die über das Plangebiet hinausreichen. Dies betrifft Bereiche südlich und östlich des Stade de Luxembourg mit Abnahmen um bis zu $8,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ und einen Teil der Waldfläche südlich des Plangebiets mit einer Abnahme um bis zu $8,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Nördlich der Autobahn A6 sind die Modifikationen des Kaltluftvolumenstroms mit Veränderungen von größtenteils weniger als $1,0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ vernachlässigbar.

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, dass eine Reduktion der Abflussvolumina um mehr als 10 Prozent im Umfeld von bioklimatisch belasteten Siedlungsgebieten als „hohe vorhabenbedingte Auswirkung“ ausweist. Eine Verringerung um 5 – 10 Prozent wird als „mäßige Auswirkung“ eingestuft, unterhalb von 5 Prozent wird die Auswirkung einer Volumenstromverringerng als „geringfügig“ angesehen.

Die Abweichung des Volumenstroms in Prozentpunkten des Planszenarios gegenüber dem Istzustand wird in **Abb. 3.12** dargestellt. Die Abweichungen werden hier blockweise dargestellt, um einerseits durchschnittliche Effekte für benachbarte Grundstücksflächen darzustellen und andererseits potentiell auf einzelnen Rasterzellen berechneten extremen prozentualen Veränderungsrate, die durch geringe, absolute Kaltluftvolumenströme nahe $0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ zustande kommen können, nicht zu stark ins Gewicht fallen zu lassen. Eine Verringerung des Kaltluftvolumenstroms um mehr als 10 Prozent und somit eine „hohe vorhabenbedingte Auswirkung“ liegt sowohl unmittelbar nördlich des geplanten Planungsgebiets, d.h. östlich des Stade de Luxembourg, als auch in dem Waldstück südlich des Plangebiets vor. Die nördlich beeinflussten Gebiete unterliegen einer gewerblichen Nutzung, so dass hier in der Nacht keine Wohnbevölkerung beeinträchtigt wird. Weiterhin sind „mäßige Auswirkungen“ auch für den westlichen Teil des Stade de Luxembourg zu erwarten, wo sich ebenfalls keine Personen in der Nacht zum Schlafen aufhalten. Sowohl für die bebauten Flächen nördlich der Autobahn, als auch für die Flächen, die für die Erweiterung des Quartiers „Cloche d’Or“ vorgesehen sind, liegt die Reduzierung des Kaltluftvolumenstroms bei weniger als 5 %, sodass von nur geringfügigen Auswirkungen auszugehen ist.

Die Planung der Erweiterung des Quartiers „Cloche d’Or“ wurde im Rahmen der Modellierung nicht berücksichtigt. Von den aktuell unbebauten Flächen ergibt sich ein Kaltluftzustrom aus Richtung Osten in die Bestandsbebauung des Quartiers. Eine Quantifizierung von sich überlagernden Effekten der Planung „Cloche d’Or“ und der hier untersuchten Planung des Gebiets „Forêt d’Or“ ist nicht möglich. Durch die Umsetzung der Quartierserweiterung ist allerdings von einer Reduzierung des Kaltluftzustroms aus Richtung Osten auszugehen, wodurch sich eine Überlagerung der Effekte für das gewerblich genutzte Grundstück zwischen der Autobahn A6 und der Rue Emile Bian ergeben kann.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Ist-Situation

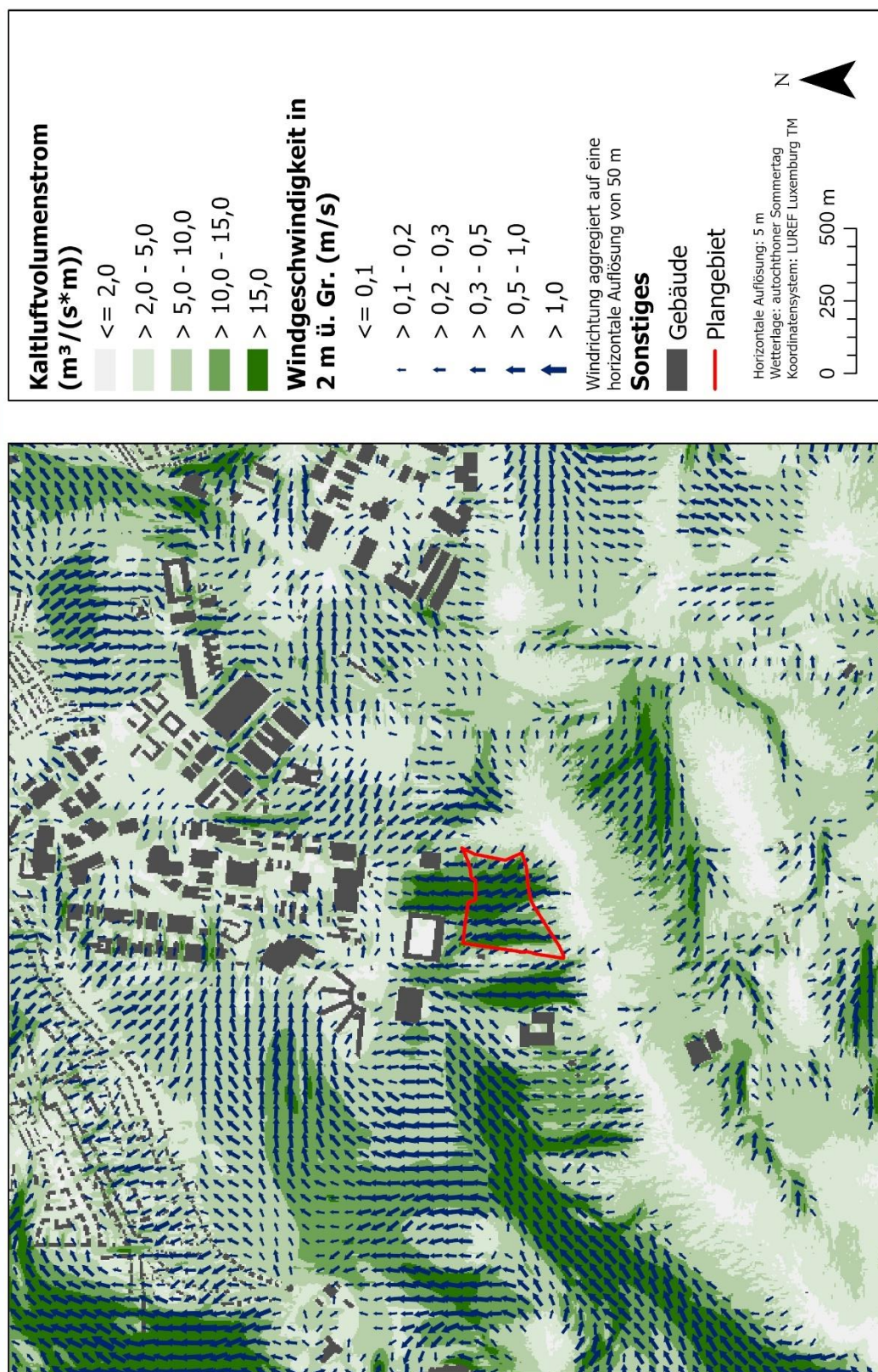


Abb. 3.9: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) in der Ist-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation

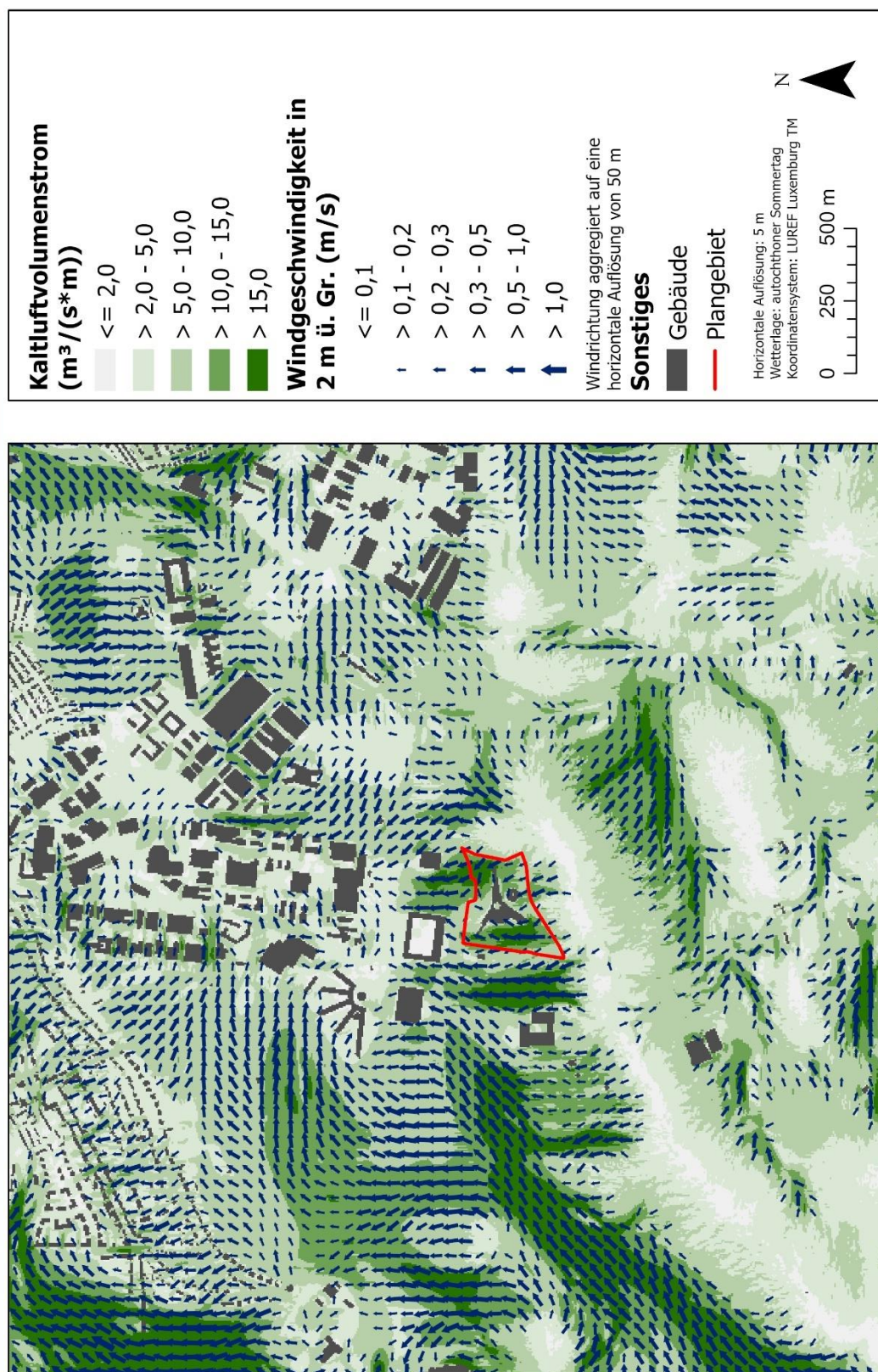


Abb. 3.10: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) in der Plan-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxembourg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation - Ist-Situation

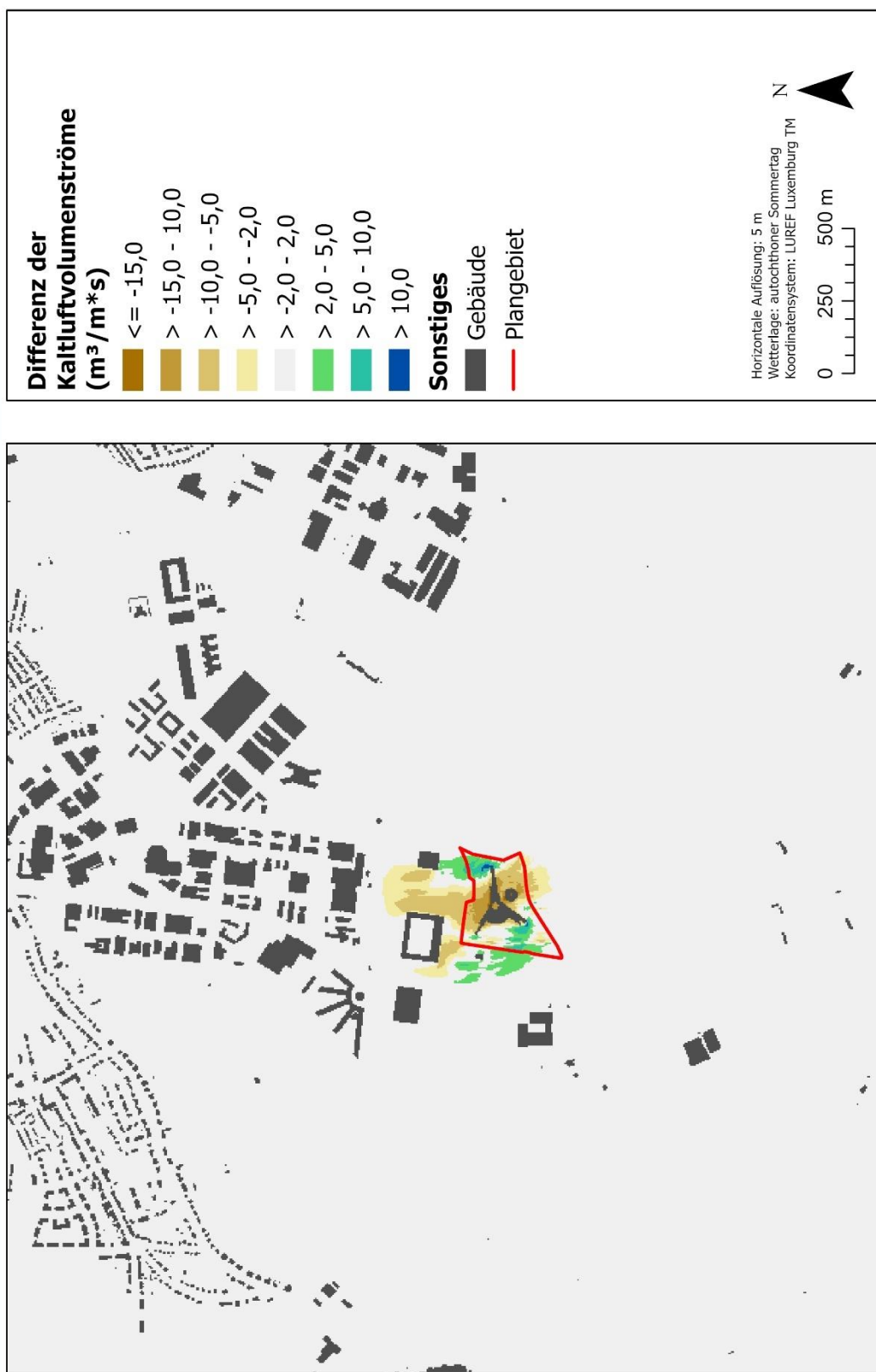


Abb. 3.11: Differenz des Kaltluftvolumenstroms zwischen Plan- und Ist-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxembourg
Nächtliche Situation (4 Uhr) - Plan-Situation - Ist-Situation

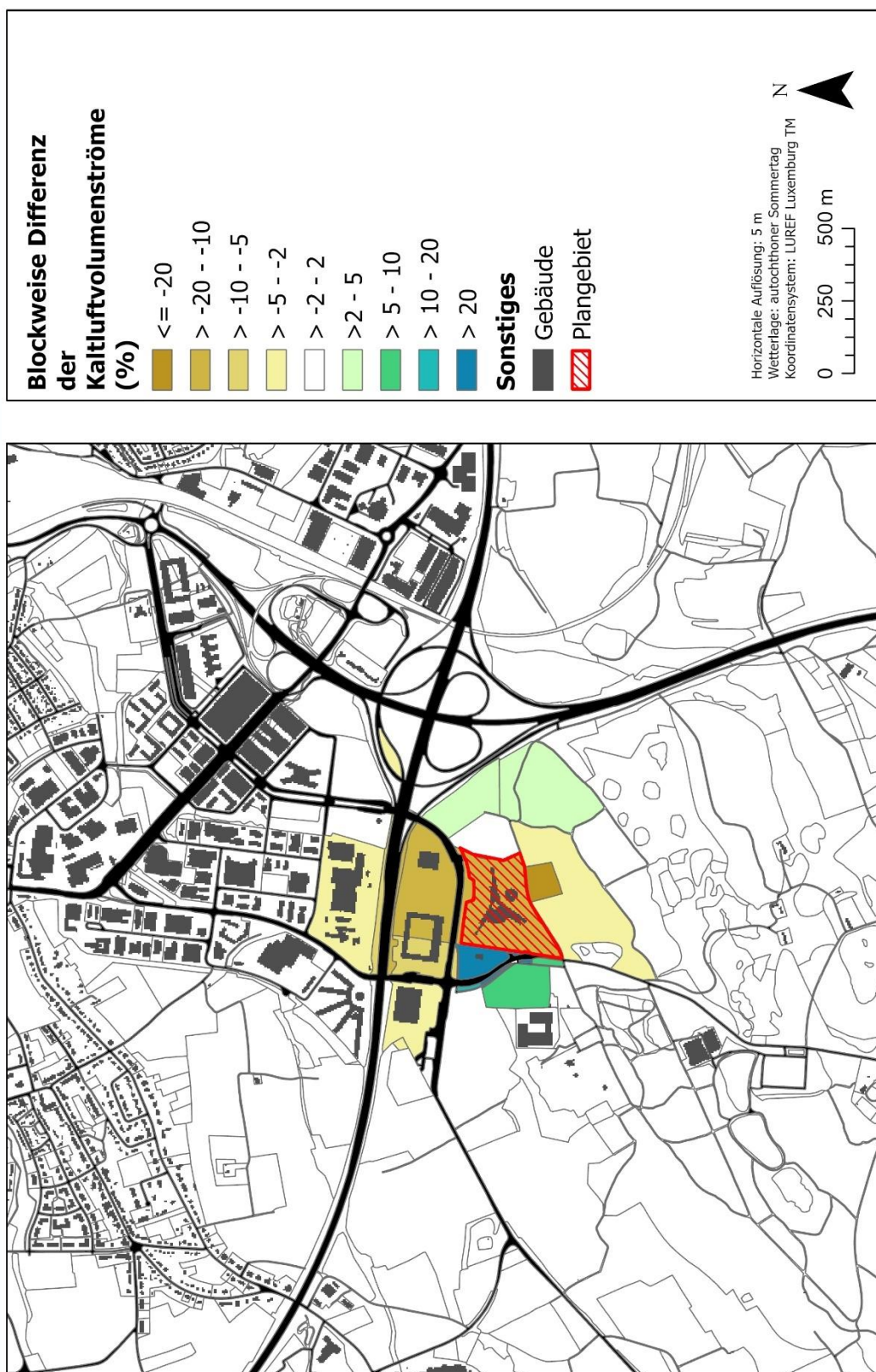


Abb. 3.12: Blockweise, prozentuale Veränderung des Kaltluftvolumenstroms.

3.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹. Beispiele für solche Kenngrößen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr MEZ an einem wolkenlosen Sommertag herangezogen (vgl. HÖPPE und MAYER 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte in Deutschland vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (KUTTLER 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar und kann als die tatsächlich empfundene Temperatur angesehen werden.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 4.1; VDI 2004).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwache Kältebelastung
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

Tab. 3.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI-RL 3787, Blatt 9)

¹ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, männlich, etwa 35 Jahre; vgl. JENDRITZKY et al. 1990).

Ist-Szenario

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird (**Abb. 3.13**). Somit finden sich niedrigste PET-Werte und eine schwache bis mäßige Wärmebelastung ($PET < 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) vor allem im Bereich höherer Vegetation (z.B. im Waldgebiet südlich des Plangebiets). Im Schattenbereich größerer Gebäude liegen PET-Werte um $27\text{--}33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Wiesen und andere landwirtschaftliche Flächen ohne höhere Vegetation (z.B. westlich des Plangebiets) zeigen eine Werteausprägung um $37\text{ bis }40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und damit eine starke Wärmebelastung. Die höchste Belastung mit Werten von bis zu $44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ist in stark versiegelten Bereichen im Siedlungsgebiet zu finden. Dies betrifft im dargestellten Untersuchungsraum vor allem Straßenräume und versiegelte Plätze in direkter Nähe größerer Gebäude.

Die mittlere PET im dargestellten Untersuchungsgebiet beträgt $31,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und im Bereich des Plangebiets sind es $31,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (mäßige Wärmebelastung). Das Plangebiet selbst ist durch den geringen Vegetationsbestand zwar größtenteils direkt durch die Sonne beschienen, die umgebenden Waldflächen wirken sich allerdings tagsüber kühlend auf die nähere Umgebung aus. Die Waldgebiete weisen keine - bis schwache Wärmebelastung auf. Die maximale PET im Plangebiet liegt bei $34,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und entspricht somit einer „mäßigen“ Wärmebelastung. Zu beachten ist, dass die PET aufgrund des direkten Einflusses der Strahlung kleinräumig sehr variiert.

Planszenario

Mit Umsetzung der Planung verringert sich die mittlere PET im Plangebiet auf $29,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies wird erreicht durch zusätzliche Verschattung im Plangebiet durch zusätzliche Bäume, insbesondere südlich des geplanten Gebäudekomplexes (**Abb. 3.14**). Die Außenbereichsflächen der Planung erfahren durch die Neupflanzung von Bäumen um das Gebäude herum eine Aufwertung der bioklimatischen Situation am Tag. Im Bereich der Baumpflanzungen wird die Wärmebelastung schwach bis mäßig berechnet. Auch im unmittelbaren Schatten des Gebäudes ist eine Verringerung der PET festzustellen. Hier ist die Wärmebelastung mäßig. Durch die zusätzliche Bebauung ergeben sich allerdings auch Bereiche außerhalb der Verschattung, die durch die zusätzliche Rückstrahlung von Wärme durch das Gebäude eine höhere PET zeigen. Dies betrifft v. a. die Süd- und Westfassaden des neuen Gebäudekomplexes. Hier treten größtenteils starke Wärmebelastungen auf. Entsprechend werden vereinzelt, z.B. am südwestlichen Strahl des Gebäudekomplexes, im Plangebiet PET-Werte von mehr als $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht, was einer „extremen Wärmebelastung“ entspricht.

Differenzen

Die dargestellten Differenzen verdeutlichen, dass die Veränderung der PET sehr kleinräumig beeinflusst ist, d.h. dass insbesondere durch Bäume als verschattende Elemente eine Abnahme der PET um teils über $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erzielt wird (**Abb. 3.15**). Die zusätzliche Bebauung hingegen führt teilweise zu einer Zunahme der PET um bis zu $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vor allem an den Fassaden auf der Südseite des Gebäudes. Allerdings werden auch nördlich des geplanten Gebäudekomplexes bis zu $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ höhere PET-Werte erwartet, da zum einen hier unversiegelte Flächen versiegelt werden und zum anderen die geplante Bebauung die kühlende Wirkung der Waldflächen im Süden reduziert. Die Veränderungen der PET beschränken sich allerdings im Wesentlichen auf die Planfläche selbst, darüber hinaus liegt die Veränderung der PET größtenteils bei weniger als $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und beschränkt sich

räumlich auf etwa 60 m Abstand zum Plangebiet. Nach Norden ist dadurch hauptsächlich Bd. de Kockelscheuer betroffen, im Süden das Waldstück.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Tägliche Situation (14 Uhr) - Ist-Situation

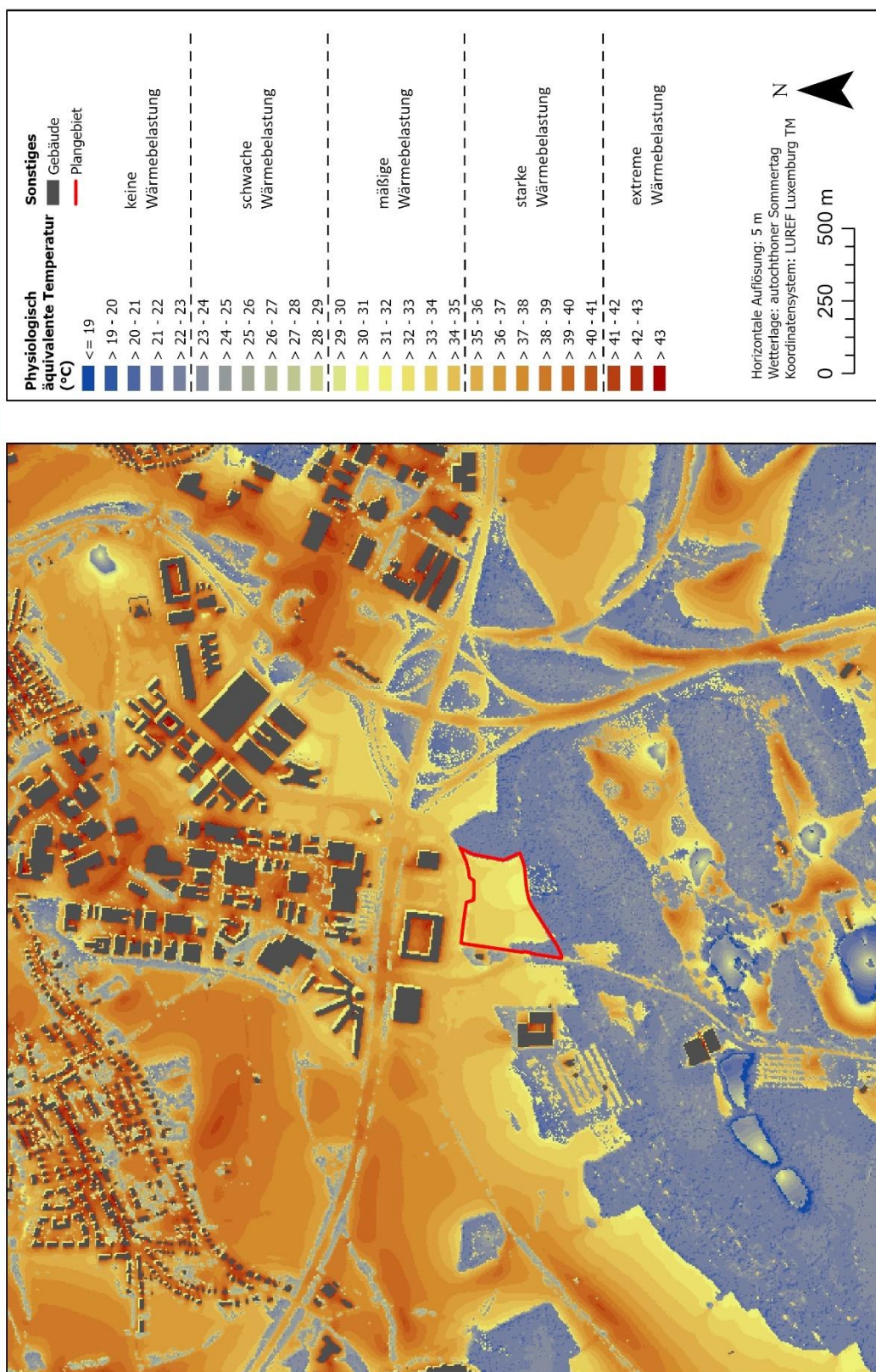


Abb. 3.13: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET, °C) in der Ist-Situation

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Tägliche Situation (14 Uhr) - Plan-Situation

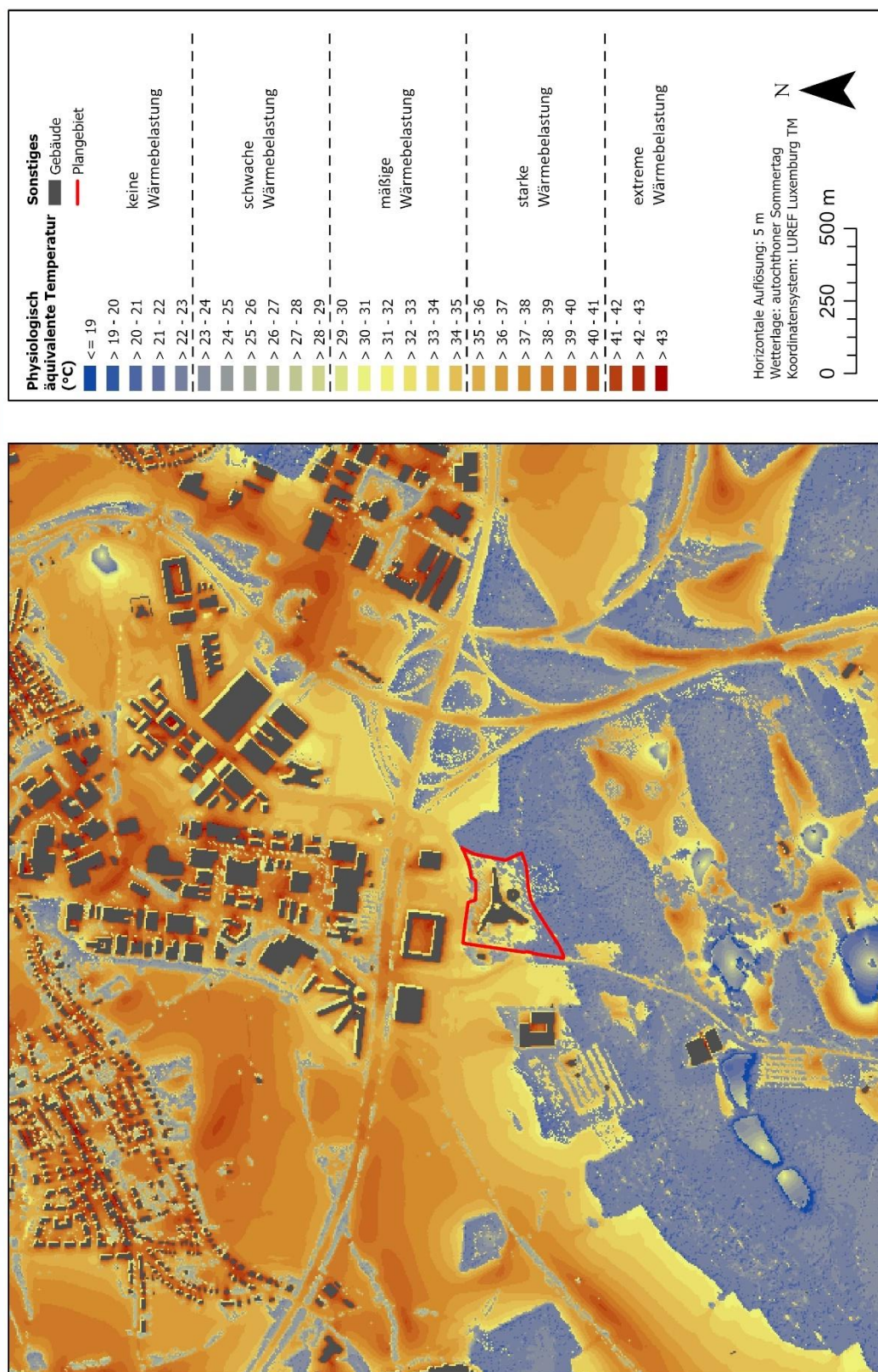


Abb. 3.14: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET, °C) in der Plan-Situation.

Klimaökologische Expertise zur Planung "Forêt d'Or" - Bd. de Kockelscheuer - Luxemburg
Tägliche Situation (14 Uhr) - Plan-Situation - Ist-Situation

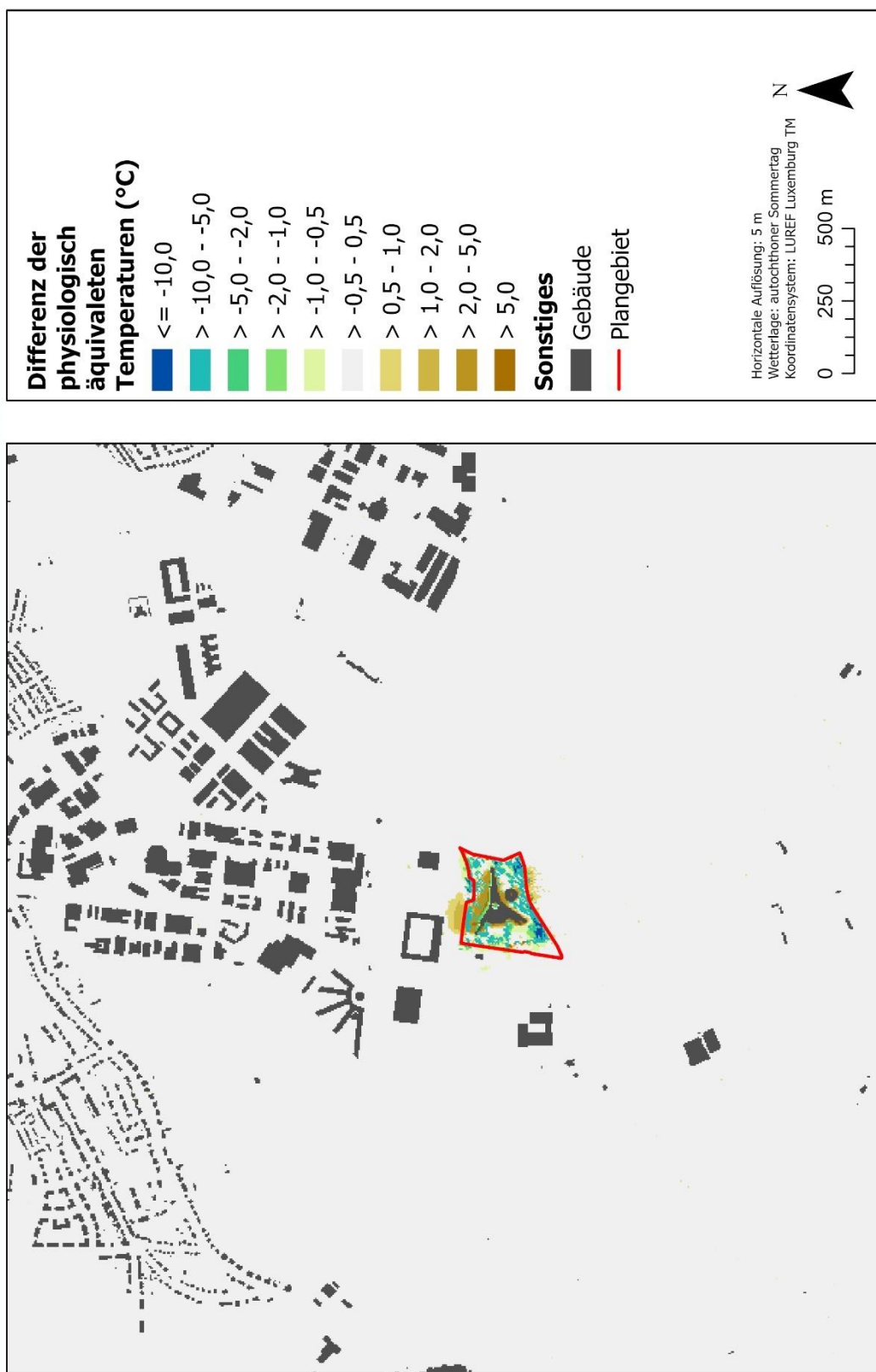


Abb. 3.15: Differenz der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET, °C) zwischen Plan- und Ist-Situation.

4. Fazit

Durch die modellgestützte Analyse wurden die planungsbedingten Auswirkungen auf das Bioklima anhand einer Gegenüberstellung des Ist- und Planzustandes untersucht. Insbesondere mit Hinblick auf die Lage des Plangebiets in einem Kaltluftaustauschgebiets wurden die Auswirkungen auf die in der Nähe liegenden Siedlungsgebiete überprüft. In der Ist-Situation bestätigten sich die Ergebnisse aus der Klimaanalyse Luxemburg, d.h. dass ein Kaltluftzustrom aus Richtung Süden das Plangebiet durchströmt. Hierbei spielt die Ausprägung von Hangabwinden, über die die Kaltluft transportiert wird, eine entscheidende Rolle.

In der **Tagsituation** weisen offene Freiflächen und sonnenbeschienene, dichte Siedlungsbereiche mit einem hohen Versiegelungsgrad besonders hohe PET-Werte auf, während in verschatteten Bereichen, vor allem in Waldgebieten geringe PET-Werte zu finden sind. Durch die geplante Bebauung ergeben sich Veränderungen in der PET und somit in der Wärmebelastung. **Die Veränderung beschränkt sich größtenteils auf das Plangebiet. Neben Flächen, auf denen eine Zunahme der Wärmebelastung zu erwarten ist (Süd- und Westfasaden des neuen Gebäudekomplexes, versiegelte Flächen), ergeben sich auch Flächen, für die die Wärmebelastung abnimmt (Gebäudeschatten, Neupflanzung von Bäumen auf gegenwärtigen Brachflächen).**

In der **Nachtsituation** werden besonders hohe bodennahe Lufttemperaturen in dicht besiedelten Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad erreicht, während vor allem offene Freiflächen mit niedriger Vegetation niedrige Temperaturen aufweisen. **Durch die geplante Bebauung ergeben sich Veränderungen in der Lufttemperatur, die sich überwiegend auf das Plangebiet beschränken. Neben lokalen Temperaturzunahmen durch zusätzliche Versiegelung sind auch lokale Temperaturabnahmen durch Begrünung von Brachflächen zu erwarten.**

Das nächtliche Strömungsfeld wird durch das Zusammenspiel von Hangabwinden und Flurwinden geprägt. Hohe Windgeschwindigkeiten und Kaltluftvolumenströme ergeben sich über offenen Flächen, während in Waldgebieten und dicht besiedelten Bereichen durch Bäume bzw. Gebäude als Strömungshindernisse der Kaltluftvolumenstrom deutlich reduziert ist. Die vorliegende Planung sieht die Bebauung eines Gebäudekomplexes auf einer Freifläche vor. Entsprechend ist mit Umsetzung der Planung mit einer Reduzierung des Kaltluftvolumenstroms zu rechnen. Der in der VDI 3787 Blatt 5 (VDI 2003) definierte Schwellenwert einer Verringerung des Kaltluftvolumenstroms von über 10 %, der eine „**hohe vorhabenbedingte Auswirkung**“ anzeigt, wird **nur im nahen Umfeld des Stade de Luxembourg** überschritten, was gewerbliche genutzt wird und dementsprechend nicht die Wohnsituation in der Nacht verschlechtert. **Für das weitere Umfeld des Plangebiets ist von nur von einer geringfügigen Beeinträchtigung auszugehen.** Die weiteren Kaltluftaustauschbereiche in der weiteren Umgebung werden durch die geplante Bebauung nicht beeinträchtigt.

In dieser Untersuchung wurde die Quartierserweiterung „Cloche d’Or“ nicht in die Modellierung einbezogen, sodass ggf. überlagernde Effekte nicht quantifiziert werden können. Aufgrund des räumlich begrenzten Effekts der hier untersuchten Planung „Forêt d’Or“ auf den Kaltluftvolumenstrom erscheinen überlagernde Effekte möglich, allerdings auf ein einzelnes, gewerblich genutztes Grundstück begrenzt.

In der Gesamtbetrachtung ist die Planung „Forêt d’Or“ nicht frei von Einflüssen auf die Umgebung, die Auswirkungen auf Kaltluft und Wärmebelastung sind allerdings aus klimaökologischer Sicht vertretbar. Mit

Fokus auf das Schutzgut der menschlichen Gesundheit sind die Auswirkungen des Planvorhabens aus klimaökologischer Sicht mit gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnissen grundsätzlich vereinbar.

5. Allgemeine Planungshinweise

Folgende Planungshinweise sind als allgemeine Empfehlungen zur Reduzierung der Wärmebelastung am Tag zu verstehen, die nicht immer vollumfänglich realisierbar oder gar realistisch sind. Einige der hier angegebenen Planungshinweise haben darüber hinaus in der untersuchten Planung bereits Berücksichtigung gefunden. Dennoch sollen an dieser Stelle die Liste der Möglichkeiten aufgezählt werden. Die Planungshinweise beziehen sich allein auf bio- und stadtklimatische Aspekte und sind mit anderen, z.B. ökologischen -, stadtplanerischen oder Lärmschutz-Belangen abzuwägen. Sie zeigen die aus klimatischer Sicht sinnvolle Maßnahmen zur Verbesserung des Klimas auf:

- Umsetzung der geplanten Dachbegrünung für einen positiven Einfluss auf das Bioklima und die Wärmespeicherung in der Gebäudehülle.
- Einsatz von Fassadenbegrünung vorrangig an Süd- und Westfassaden bzw. Umsetzung der geplanten Balkonbegrünung
- Verringerung der Versiegelung z.B. durch versickerungsfähiges Pflaster oder Rasengittersteine
- Einsatz heller Oberflächenbeläge (Fassaden und Bodenbeläge), um die nächtlichen Temperaturen im Hofbereich zu verringern.
- Zusätzliche Beschattung der Südwestfassaden und sowie nicht verschatteter der Parkplatzflächen mit starker bzw. extremer Wärmebelastung vorzugsweise mit Bäumen, alternativ mit technischen Lösungen (z.B. Markisen), um die Wärmespeicherung zu verringern und die Aufenthaltsqualität am Tage zu optimieren.
- Umsetzung der in der Planung festgehaltenen, vielfältigen Ausgestaltung der Grünflächen, ggf. mit Einrichtung zusätzlicher Schattenflächen (durch Baumpflanzungen) in bisher wenig verschatteten Bereichen und Aufenthaltsbereichen zur Optimierung des klimaökologischen Nutzens

Im Folgenden werden die aus bioklimatischer Sicht wichtigen Planungshinweise in allgemeiner Form genauer erläutert.

Planungshinweise

Entsiegelung, mikroklimatische Vielfalt

Wege, Plätze, Parkplätze und Randbereiche der Rad- und Fußwege sollten möglichst wenig versiegelt werden, um die Oberflächentemperaturen zu reduzieren und Verdunstungskühle zu ermöglichen. Für die Gestaltung der Parkierungsflächen und Nutzflächen gibt es viele Möglichkeiten, wie Pflasterrasen, Rasengittersteine oder Schotterrassen.

Freiflächen können mit gut wasserversorgten Wiesenflächen und kleinen Baumgruppen gestaltet werden, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Retentionsraum für Starkregenereignisse), kleinteili-

gem Relief („Hügellandschaft“), verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind. Dieser vielfältige „Savannentyp“ ermöglicht die Ausbildung eines optimalen Bioklimas sowohl am Tag als auch in der Nacht.

Verschattung von Straßen, Wegen, Stellflächen und Aufenthaltsbereichen

Eine intensive Begrünung mit Bäumen steigert die Aufenthaltsqualität im Freien beträchtlich, da somit große beschattete Bereiche geschaffen werden. Vor allem Fußgängerwege sowie Fahrradwege bedürfen im Sommer guter Verschattung. Ebenso sollten Fahrzeugstellplätze sowie Aufenthaltsbereiche soweit möglich durch Bäume und Sträucher beschattet werden. Um die nächtliche Abkühlung durch einen zu dichten Baumbestand nicht zu sehr einzuschränken, sollten neben verschatteten Bereichen aber auch offene Grünflächen vorgehalten werden. Ein Baumbestand von ca. 30 % einer Grünfläche gilt hier als zielführend. Bei der Auswahl der Bäume sollte auf deren Trockenheits- und Hitzeresistenz geachtet werden. Die GALK-Broschüre „Zukunftsbäume für die Stadt“ (GALK 2023) kann in diesem Zusammenhang als Orientierung dienen.

Verschattung von Gebäuden

Die Verschattung von Gebäuden und Freiflächen durch Bäume oder auch durch bautechnische Maßnahmen (Ausführungsbeispiele hierfür sind Vordächer, Vertikallamellen, Markisen und Sonnensegel) ist eine gute Maßnahme der Hitzevorsorge. Das primäre Ziel ist es, die direkte Aufheizung sowie die Wärmespeicherung der Gebäude über die Gebäudehülle (Dach, Fassade, Fenster) oder auch der befestigten Erschließungsflächen zu verringern. Sonnenexponierte Gebäudeseiten sind dabei von besonderer Bedeutung und sollten verschattet werden. Laubbäume mit weiten Kronen sind gegenüber Nadelbäumen zu bevorzugen, da sie im Winter einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von ggfs. Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können.

Erhöhung der Oberflächenalbedo (Reflexion)

Die Anwendung von geeigneten Baumaterialien und hellen Anstrichen kann dazu beitragen, der Aufheizung von versiegelten Oberflächen und Gebäuden am Tage entgegenzuwirken, so dass sie nachts weniger Wärme an ihre Umgebung abgeben. Gleiches gilt für die Dachbegrünung sowie für Fassadenbegrünung. Letztere wirkt sogar zweifach positiv auf einen Gebäudebestand ein, da einerseits durch die Schattenspende die Wärmeeinstrahlung am Tage reduziert wird und andererseits die Verdunstungskälte des Wassers an Pflanzenbestandteilen einen abkühlenden Effekt auf umgebende Luftmassen hat. Anwendungsschwerpunkte sollten auch in diesem Fall die nach Süden ausgerichteten Gebäudefassaden sein.

6. Literatur

- DEUTSCHE GARTENAMTSLEITERKONFERENZ (GALK) (2023): Zukunftsbäume für die Stadt – Auswahl aus der GALK-Straßenbaumliste. Herausgeber: Bund Deutscher Baumschulen (BDB) e.V.
<https://www.galk.de/component/jdownloads/send/4-informationsflyer/664-broschuere-zukunftsbaeume-galk-und-bdb-2020>
- GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH & LUXEMBOURG INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (LIST) (2021): Modellbasierte regionale Klimaanalyse. Auftraggeber: Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg – Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable.
- HÖPPE, P. & H. MAYER (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1), S. 22-29.
- JENDRITZKY, G. ET AL. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes KlimaMichel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wiss. Mitt. aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig. Band 13.
- MOSIMANN, TH., P. TRUTE & TH. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Heft 4/99, S. 202-275.
- VDI (2003): Richtlinie VDI 3787 Blatt 5 Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2008): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 15.01.2024

Erstellt von:



Dr. Lars Gerling (M. Sc. Geoökologie)

Geprüft von:



Dr. Cornelia Burmeister (Dipl. Geographin)

Die Erstellung der Klimaexpertise erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Klimaexpertise bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.

7. Glossar

Ausgleichsleistung: Durch lokalen → Luftaustausch bzw. Lufttransport zwischen → Ausgleichs- und → Wirkungsraum wird eine positive Beeinflussung der bioklimatischen bzw. lufthygienischen Verhältnisse erzielt.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen Wirkungsraum angrenzt oder mit diesem über wenig raue Strukturen (→ Leitbahnen) verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → Strahlungswetterlage

Autochthone Wetterlage: → Strahlungswetterlage

Autochthones Windfeld: Kaltluftabflüsse und Flurwinde, welche sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → Strahlungswetterlage ausbilden.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (=atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf Menschen.

Eindringtiefe: Reichweite einer Kalt-/Frischluchtströmung in den → Wirkungsraum hinein, ausgehend vom Bebauungsrand.

Flurwind: Thermisch bedingte schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Flächen (z.B. innerhalb einer Bebauung oder auch im Umland) und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Er strömt vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in das Zentrum der Überwärmung (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum) ein.

Inversion: Wenn am Tage bei intensiver Sonneneinstrahlung der Boden und die darüber lagernde Luft aufgeheizt werden, steigt diese auf und führt zu einer guten Durchmischung der Luftschicht. Die Temperatur der Luft nimmt dabei mit der Höhe allmählich ab. Während einer nächtlichen → Strahlungswetterlage kann eine umgekehrte Situation entstehen, bei der die oberen Luftschichten wärmer sind als die im bodennahen Bereich. Der Luftaustausch mit der Höhe ist dann reduziert, da die Kaltluft aufgrund ihrer höheren Dichte am Erdboden verbleibt.

Kaltluftabfluss: An wenig rauen Hängen und Tälern mit genügendem Gefälle (theoretisch ab etwa 0,5°) setzt sich die Kaltluft aufgrund der Schwerkraft, dem Gefälle folgend, in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

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. Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Dies kann man so veranschaulichen, indem man sich ein quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht² bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom.

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius (°C) interpretiert werden.

PET (Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Klimafunktionen: Prozesse und Wirkungen in der Landschaft, die das örtliche Klima mitbestimmen und Belastungen von Organismen durch besondere Klimabedingungen erhöhen oder abbauen.

Klimaökologie: Analysiert den Einfluss von Klimaelementen und des Klimas auf das Landschaftsökosystem und seinen Haushalt. Untersucht wird weiterhin die Steuerung der bedeutsamen, bodennahen atmosphärischen Prozesse durch die allgemeinen landschaftlichen Strukturgrößen (Relief, Überbauung...).

Komfortraum: Vielfältig strukturierte, bewachsene Freiflächen in Nachbarschaft zum Wirkungsraum mit günstigen bioklimatischen und/oder lufthygienischen Bedingungen. Ihre wichtigsten Eigenschaften sind Immissionsarmut und Klimavielfalt, d.h. es besteht ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten.

Leitbahnen: Linear ausgerichtet, wenig raue Freiflächen, die den lokalen Luftaustausch fördern, insbesondere den Transport von Kalt-/Frischluft aus dem Ausgleichsraum in den Wirkungsraum. Die Leitbahneigenschaften bestimmen, in welchen Umfang eine Ausgleichsleistung erbracht wird.

Luftaustausch: Transport von Luftmassen mit bestimmten Eigenschaften durch turbulente Diffusion. Es werden austauschschwache Situationen mit Windgeschwindigkeiten $\leq 1,5$ m/s von austauschstarken mit Windgeschwindigkeiten $\geq 5,5$ m/s unterschieden.

Rauigkeit: Gibt die durch Bebauungs- und/oder Vegetationsstrukturen hervorgerufene Veränderungen des Windfeldes wieder. Als Maß der Rauigkeit fungiert der z_0 -Wert, der in Meter angegeben wird.

Reichweite: → Eindringtiefe

Strahlungswetterlage: Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird bei dieser Wetterlage vornehmlich

² Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wird

durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt. Voraussetzung für ihre Ausbildung sind eine geringe Bewölkung von weniger als 3/8 und eine mittlere Geschwindigkeit des Windes von unter 1,5 m/s.

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04 Uhr morgens simulierte flächendeckende Strömungsfeld der Kaltluftabflüsse und Flurwinde während einer windschwachen → Strahlungswetterlage.

Ventilationsbahn: Leitbahn, die während austauschstärkerer Wetterbedingungen den Gradientwind aufnimmt und zur Be- und Entlüftung des Wirkungsraumes beiträgt.

Wärmebelastung: Durch Behinderung der Wärmeabgabe des Körpers hervorgerufenen Unbehaglichkeitsempfinden. Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit hoher Temperatur, hoher Feuchte und geringer Luftbewegung auf (Schwüle).

Wärmeinsel: Derjenige städtische Lebensraum, der gegenüber der Umgebung vor allem abends und nachts eine höhere Lufttemperatur aufweist. Es bilden sich i.d.R. mehrkernige Wärmeinseln in einer Stadt aus. Die Jahresmitteltemperaturen sind in diesen Räumen um 0,5 bis 1,5 Kelvin gegenüber dem Umland erhöht.

Wirkungsraum: Bebaute (oder zur Bebauung vorgesehene), bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Räume (Belastungsraum), der an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzt oder über wenig raue Strukturen angebunden ist. Durch lokale Luftaustauschprozesse erfolgt eine Zufuhr von Kalt-/Frischluft aus dem → Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.