

KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG

**MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE
LA SITUATION AU LUXEMBOURG EN MATIÈRE D'ÉCOLOGIE CLIMATIQUE**

D'ËMWELTVERWALTUNG

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt

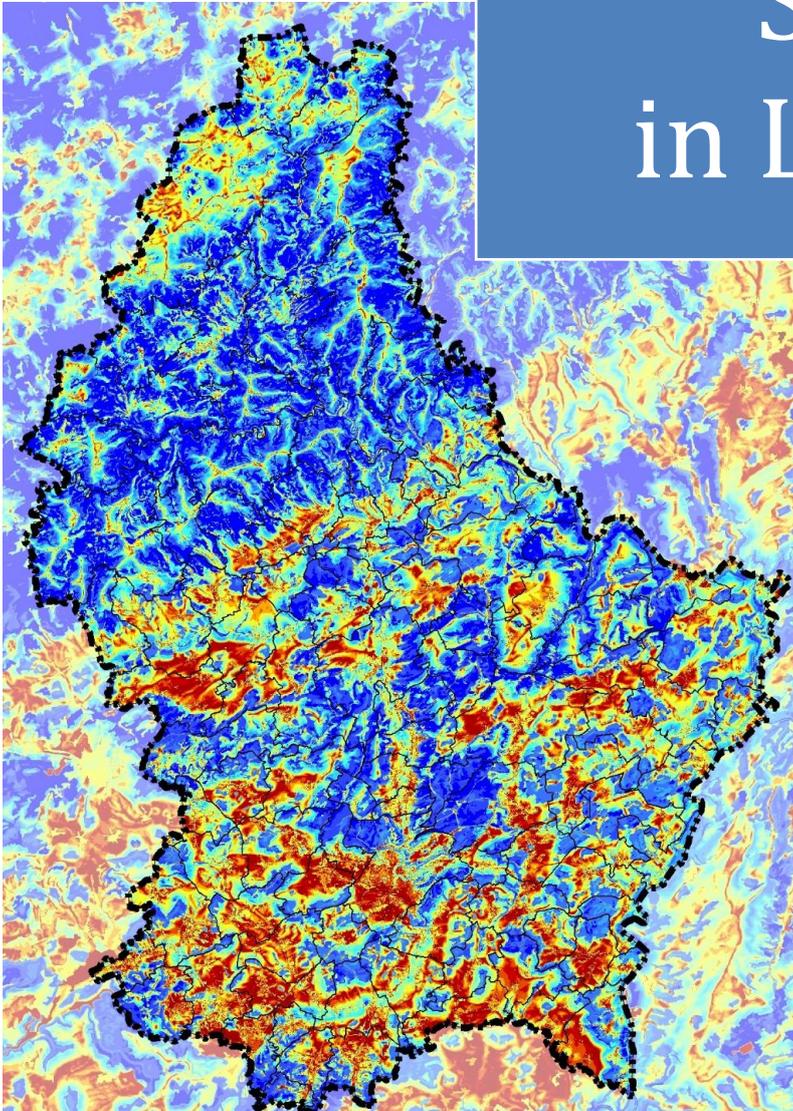
CLIMAT



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de l'environnement

Klimaökologische Situation in Luxemburg



Modellbasierte regionale Klimaanalyse

Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



LIST, Esch-sur-Alzette

LUXEMBOURG
INSTITUTE OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY



Im Auftrag von:



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de l'environnement

Februar

2021

Auftrag: Klimaökologische Situation in Luxemburg:
Modellbasierte regionale Klimaanalyse

Region: Land Luxemburg

Auftraggeber: Administration de l'environnement
1, avenue du Rock'n'Roll
L-4361 Esch-sur-Alzette

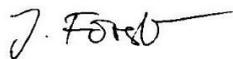
Projektnummer: 2_20_084

Berichtsnummer: 2_20_084_Luxemburg_Klimaanalyse_Bericht_final

Version: 1

Datum: 26. Februar 2021

Erstellt von:



M.Sc. Geographie Josephine FÖRSTER (GEO-NET)

**In Zusammenarbeit
mit:**



Dr. Jürgen JUNK & Dr. Andreas KREIN (LIST)

Geprüft von:



Dipl.-Geogr. Peter TRUTE (GEO-NET)

 GEO-NET
Umweltconsulting GmbH
Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Germany
Tel. +49 (0) 511 388 72 00
Fax +49 (0) 511 388 72 01

info@geo-net.de
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG
kto. 532 248 000
blz 251 900 01

BIC VOHADE2H
IBAN DE81 2519 0001
0532 2480 00
VAT DE 228892587



Inhaltsverzeichnis

GLOSSAR	II
RÉSUMÉ	IV
ZUSAMMENFASSUNG	V
1. EINFÜHRUNG	1
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	2
2.1 Der Wärmeinseleffekt	2
2.2 Das Klima in Luxemburg	4
3. METHODIK DER MODELLGESTÜTZTEN KLIMAANALYSE	9
3.1 Untersuchungsgebiet	9
3.2 Betrachtete Wetterlage	10
3.3 Das mesoskalige Modell FITNAH-3D	11
3.4 Modelleingangsdaten	13
4. MODELLERGEBNISSE	16
4.1 Nächtliches Temperaturfeld	16
4.2 Kaltluftströmungsfeld	18
4.3 Thermische Belastung am Tage	22
4.4 Prozessräume in Luxemburg	24
5. KLIMAANALYSEKARTE	26
6. PLANUNGSHINWEISKARTE	29
6.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation)	29
6.2 Bewertung von Siedlungs- und Verkehrsflächen (Wirkungsraum)	30
6.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	31
6.4 Ergebnisse Planungshinweiskarte	33
7. MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA	37
QUELLENVERZEICHNIS	45
ANHANG	i

Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen \rightarrow *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über \rightarrow *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit 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 Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: \rightarrow *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

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

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (\rightarrow *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (\rightarrow *Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen \rightarrow *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit $m^3/(s \cdot m)$). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den

Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

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 (DWD 2021a, Matzarakis & Mayer 1996, Kuttler 1999).

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Städtische Wärmeinsel (*Urban Heat Island*): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Verkehrsflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.

Résumé

Les îlots de chaleur urbains entraînent un stress bioclimatique plus important, surtout en été. L'effet d'îlot de chaleur décrit la différence de température entre la ville chaude et ses environs plus froids et atteint son maximum pendant la nuit ainsi que dans des conditions météorologiques de rayonnement à vent faible. Ces situations se produisent régulièrement au Luxembourg, le plus souvent au mois d'août.

La présente analyse climatique se concentre en particulier sur le processus d'air froid et sur la situation de stress thermique estival à petite échelle de la population tant de jour que de nuit (ressource protégée de la « santé humaine »). Le climat régional du Luxembourg, qui se forme lors d'une situation météorologique de rayonnement à vent faible en été, a été étudié à l'aide d'une modélisation assistée par ordinateur à haute résolution.

La zone d'étude rectangulaire utilisée pour la modélisation du climat couvre une superficie d'environ 5.170 km² (environ 60,8 km x 85 km), de sorte que les différences d'altitude et d'occupation des sols dans les environs, qui influencent le climat régional luxembourgeois, peuvent être prises en compte. Au total, la zone du modèle est décrite par 8.272.693 cellules de raster, avec des informations sur l'altitude du terrain, l'occupation des sols, la hauteur des structures et le degré d'imperméabilisation stockées pour chaque cellule de raster. Le modèle climatique urbain FITNAH-3D selon Groß (1992) constitue le cadre de base de la modélisation. Les données d'entrée et les résultats du modèle sont basés sur une résolution spatiale horizontale de 25 m x 25 m.

Les résultats du modèle sont résumés dans des représentations cartographiques du champ de température nocturne, du champ d'écoulement nocturne de l'air froid (4 heures respectivement) et de la charge thermique pendant la journée (14 heures). Cette dernière est cartographiée à l'aide de la PET (température physiologique équivalente), qui décrit la « température ressentie ».

En début d'après-midi, la charge thermique dans les villes et les agglomérations est particulièrement élevée, car le rayonnement solaire est très intense à cette période et en même temps de températures de l'air élevées sont atteintes. Les populations d'arbres (par exemple les parcs, les forêts) et les zones aquatiques sont des zones à faible charge thermique et peuvent servir de refuge pendant la journée. En revanche, les zones exposées au soleil (par exemple les places et les pelouses ouvertes) ont une charge thermique beaucoup plus élevée.

Alors que les températures de l'air en ville pendant la journée sont presque aussi élevées que dans les environs, l'îlot de chaleur urbain émerge la nuit. Dans les centres, où se trouvent les densités de bâtiments les plus élevées et, surtout dans les zones d'activités économiques où les degrés d'imperméabilisation sont très élevés, on retrouve la plus forte surchauffe nocturne. La surchauffe diminue à mesure que l'on s'éloigne des centres ou des zones très imperméables, les températures de surchauffe les plus basses étant atteintes dans les zones de peuplement les plus élevés des Ardennes.

Dans des conditions de rayonnement à vent faible, les brises thermiques et vents de pente peuvent contribuer à la réduction des charges thermiques pendant la nuit. La carte de l'analyse climatique identifie les circulations de l'air importantes pour les zones de peuplement, y compris 166 couloirs d'air froid, 511 zones d'échange d'air froid et 10 systèmes de « vents de parc » (*park breeze*). En outre, on identifie les zones de génération d'air froid qui alimentent les différents flux d'air froid ou, dans certains cas, s'étendent au-delà de ceux-ci.

Le résultat principal du processus de travail est une carte indicative de planification avec un catalogue de mesures associé. D'une part, la carte rend visible la nécessité d'une action graduée pour améliorer le confort thermique en été dans toutes les zones de vie/travail et de loisirs (« espace d'action ») de la population au Luxembourg. D'autre part, la carte indicative de planification attribue également une valeur à tous les espaces verts et ouverts du pays (« espace de compensation ») en fonction des fonctions climato-écologiques qu'ils assurent. Enfin, le catalogue de mesures présente des exemples et des possibilités d'amélioration pour la situation climatique au Luxembourg. Il est divisé en trois catégories : « Bien-être thermique dans les espaces extérieurs », « Amélioration de la ventilation nocturne » et « Réduction de la charge thermique intérieure ».

Zusammenfassung

Städtische Wärmeinseln führen insbesondere im Sommer zu einer größeren bioklimatischen Belastung. Der Wärmeinseleffekt beschreibt den Temperaturunterschied zwischen der wärmeren Stadt und ihrem kühleren Umland und erreicht sein Maximum in der Nacht während austauscharmer Strahlungswetterlagen. Diese Situationen treten in Luxemburg regelmäßig und am häufigsten im Monat August auf.

Mit der vorliegenden Klimaanalyse stehen insbesondere der Kaltlufthaushalt sowie die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Bevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht (Schutzgut der „Menschlichen Gesundheit“) im Fokus. Das Luxemburger Regionalklima, welches sich während einer austauscharmen Strahlungswetterlage im Sommer ausbildet, wurde mithilfe einer hochaufgelösten computergestützten Modellierung untersucht.

Das für die Klimamodellierung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von etwa 5.170 km² (ca. 60,8 km x 85 km), sodass Höhenunterschiede und Landnutzung im Umland, die das Luxemburger Regionalklima beeinflussen, berücksichtigt werden können. Insgesamt wird das Modellgebiet mit 8.272.693 Rasterzellen beschrieben, wobei für jede Rasterzelle Informationen zur Geländehöhe, zur Landnutzung, zur Strukturhöhe und zum Versiegelungsgrad hinterlegt sind. Das Stadtklimamodell FITNAH-3D nach Groß (1992) bildet das Grundgerüst für die Modellierung. Die Eingangsdaten und Modellergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 25 m x 25 m.

Die Modellergebnisse werden in kartografischen Darstellungen des nächtlichen Temperaturfeldes, des nächtlichen Kaltluftströmungsfeldes (jeweils 4 Uhr) und der thermischen Belastung am Tag (14 Uhr) zusammengefasst. Letztere wird anhand der PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) abgebildet, welche die „gefühlte Temperatur“ beschreibt.

Am frühen Nachmittag ist die Wärmebelastung in den Städten und Gemeinden besonders hoch, da die Sonneneinstrahlung zu diesem Zeitpunkt sehr intensiv ist und gleichzeitig hohe Lufttemperaturen erreicht werden. Baumbestände (z.B. Parks, Wälder) und Wasserflächen sind Bereiche mit geringer Wärmebelastung und können tagsüber als Rückzugsorte dienen. Dagegen geht von sonnenexponierten Flächen (z. B. Plätze und offene Rasenflächen) eine deutlich stärkere Wärmebelastung aus.

Während in der Stadt tagsüber nahezu ähnlich hohe Lufttemperaturen erreicht werden wie in der Umgebung, tritt in der Nacht die städtische Wärmeinsel hervor. In den Zentren sind die höchsten Bebauungsdichten und, gerade in den gewerblich geprägten Bereichen, hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der stärksten nächtlichen Überwärmung widerspiegelt. Mit steigender Entfernung zu den Zentren bzw. den hoch versiegelten Flächen nimmt die Überwärmung ab, wobei die niedrigsten Siedlungstemperaturen in den höher gelegenen Ortschaften im Bereich der Ardennen erreicht werden.

Unter austauscharmen Bedingungen können Flur- und Hangabwinde in der Nacht zum Abbau der Wärmebelastung beitragen. In der Klimaanalysekarte werden für die Siedlungen wichtige Durchlüftungsbereiche gekennzeichnet, darunter 166 Kaltluftleitbahnen, 511 Kaltluftaustauschbereiche und 10 Parkwindssysteme. Daneben werden Kaltluftentstehungsgebiete identifiziert, die die verschiedenen Kaltluftströmungen speisen bzw. teilweise auch über diese hinausreichen.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebundenem Maßnahmenkatalog. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungsnotwendigkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkungsraum“) der Bevölkerung in Luxemburg sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Land („Ausgleichsraum“) eine Wertigkeit hinsichtlich der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu. Abschließend zeigt der Maßnahmenkatalog Beispiele und Möglichkeiten zur Verbesserung der Klimasituation in Luxemburg auf. Er gliedert sich in die Kategorien „Thermisches Wohlbefinden im Außenraum“, „Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung“ und „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“.

1. Einführung

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Angesichts des weiterhin anhaltenden Bevölkerungswachstums in Luxemburg einerseits als auch der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen andererseits besteht hier Handlungsbedarf (Junk et al. 2019). Aus der Kenntnis des in einer Region vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Als Grundlage für die Analyse und Bewertung der siedlungsklimatischen Zusammenhänge dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Methodischer Ausgangspunkt für die Analyse der klimaökologischen Funktionen ist die Gliederung der Stadtfläche in drei Raumkategorien:

- größtenteils bioklimatisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsräume**)
- Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen (**Ausgleichsräume**)
- Luftaustauschprozesse, welche teils erhebliche Entfernungen überbrückend Wirk- und Ausgleichsräumen miteinander verbinden

Aus dieser Untergliederung in Wirk- und Ausgleichsräume sowie verbindende Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, welches kartographisch in Form der **Klimaanalysekarte** abgebildet ist. Anschließend wurden in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen/Räume gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form von **Planungshinweiskarten** dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klimaökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Durch konkrete Zuordnung planungsrelevanter Aussagen zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z. B. Kaltluftentstehungsflächen können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden sollen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung identifiziert, welche mithin sanierungsbedürftig sind. Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten - und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden - statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode bietet den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Somit liegt eine räumlich hochauflösende Information und Bewertung der klimaökologischen Gegebenheiten für die Nacht- und Tagsituation vor, welche für die verschiedenen Planungsebenen/-träger bereitgestellt werden. Die einzelnen Klimaparameter, die Klimaanalysekarte sowie die Planungshinweiskarte sind im Format DIN A0 jeweils für das gesamte Land (Maßstab 1: 95.000) in der Auflösung 300 dpi erstellt worden. Außerdem sind sie im Anhang im verkleinerten Format DIN A3 zu finden (Abbildungen A1-A6).

2. Fachliche Grundlagen

2.1 DER WÄRMEINSELEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als „städtische Wärmeinsel“ bezeichnet.

Für die Stadtbevölkerung entstehen hohe Belastungen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt sind (autochthone Wetterlagen). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen auf, d.h. Luftmassen aus dem Umland können bis in das Stadtgebiet hinein strömen (**Flurwinde**; Abb. 1).

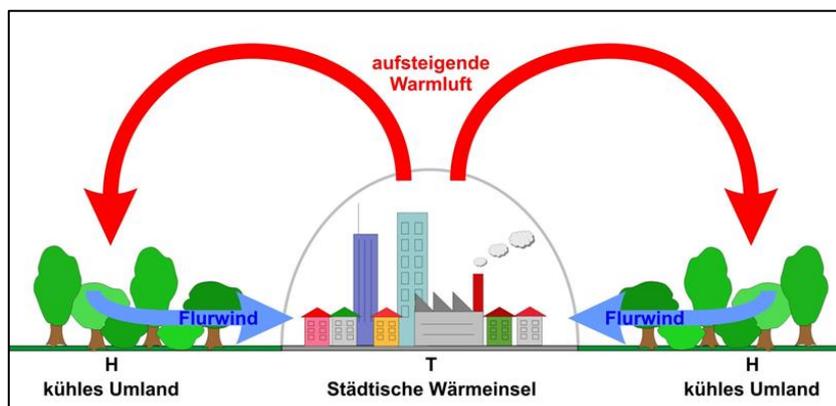


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind (*Croquis du principe de brise thermique*)

Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen (und ggf. innerstädtischen) Grünflächen in das wärmere Stadtgebiet strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse, sodass er nur entlang von Flächen ohne blockierende Bebauung bzw. sonstige Hindernisse erfolgen kann (insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen).

Die Flurwinde, welche insbesondere nachts infolge des Wärmeinseleffektes entstehen, bilden die Realität jedoch nur zum Teil ab (Abb. 2). Bei großen Höhenunterschieden treten zusätzlich Berg- und Talwinde auf, kleinere Höhenunterschiede bewirken bereits Hangauf- bzw. Hangabwinde. Während in der Nacht die Luft hang- bzw. bergabwärts strömt, sind die Luftmassen tagsüber hang- bzw. bergaufwärts gerichtet. Unter austauscharmen Bedingungen treten demnach sowohl thermische als auch reliefbedingte

Strömungen gleichzeitig auf, die sich in Bezug auf Windgeschwindigkeit und Kaltluftvolumenstrom voneinander unterscheiden. Die thermisch hervorgerufenen Winde (Flurwinde) sind in der Regel schwächer als die Hang- und Bergwinde. Für Städte in Tallage, wie z.B. Luxemburg und Ettelbrück, bedeutet dies aber vor allem, dass die Flurwinde in der Nacht mit gleichzeitig auftretenden Hangabwinden verstärkt werden.

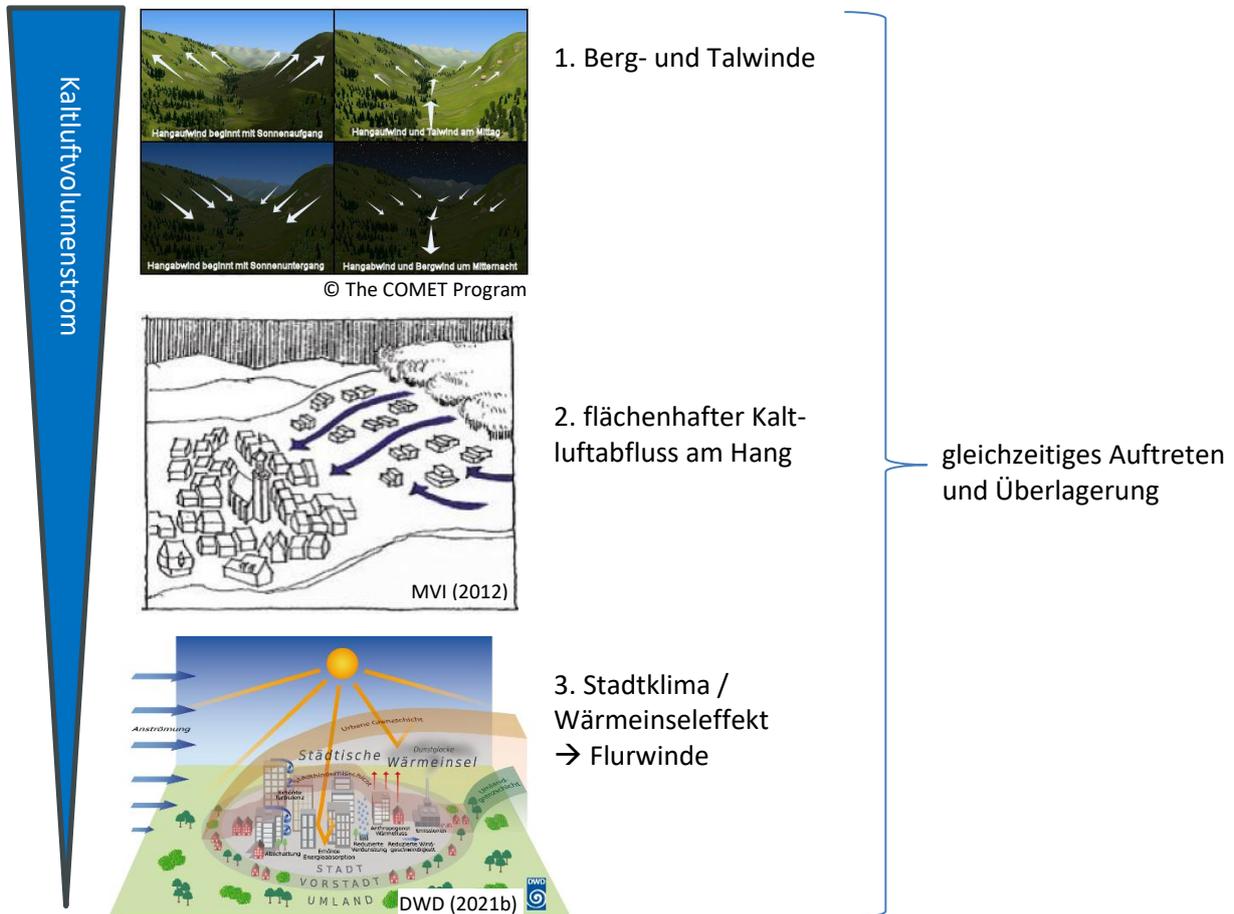


Abb. 2: Vorherrschende Winde bei austauscharmen Wetterlagen: Die Wirkung des Reliefs und der städtischen Wärmeinsel (*Vents dominants dans des conditions à vent faible: l'effet du relief et de l'îlot de chaleur urbaine*)

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme (anthropogener Wärmefluss), kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo¹, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der stärkeren Versiegelung bzw. des geringeren Grünanteils (und zudem meist geringerer Wasserverfügbarkeit) ist die Verdunstung und damit verbundene Kühlleistung in der Stadt herabgesetzt² (Schönwiese 2008).

Verkehr, Industrie und Hausbrand bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch gasförmige Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswir-

¹ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

² In der Stadt steht dem geringeren latenten Wärmestrom ein höherer fühlbarer Wärmetransport gegenüber.

ken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009).

Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insb. da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

2.2 DAS KLIMA IN LUXEMBURG

Das Klima charakterisiert den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren betrachtet. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961 - 1990 festgelegt. Die nationalen Wetterdienste haben aber die Möglichkeit, andere Bezugszeiträume zu verwenden, die auf aktuelleren Daten (z.B. 1991-2020, wie in der Abb. 3) beruhen und dennoch die vorgegebenen Kriterien der WMO erfüllen (MeteoLux 2021).

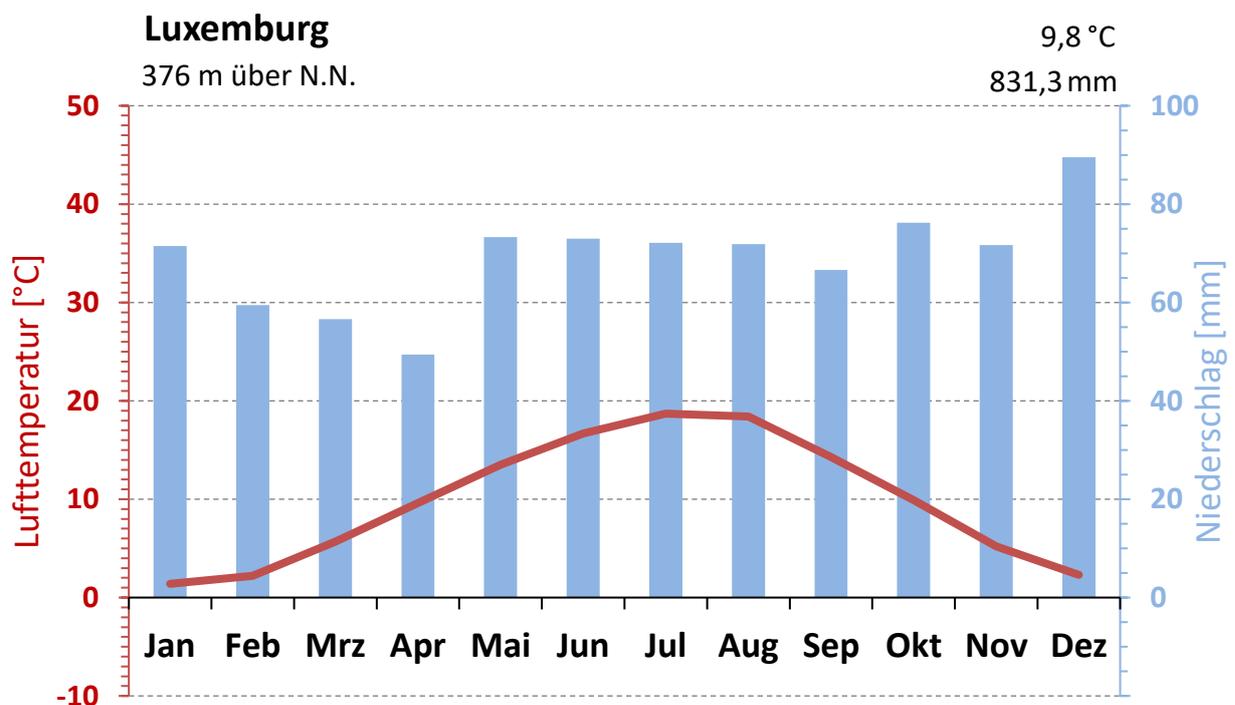


Abb. 3: Klimadiagramm von Luxemburg für den Zeitraum 1991 bis 2020. Es wurden die Daten der MeteoLux-Station Flughafen Findel verwendet (Datenquelle: MeteoLux 2021) (*Diagramme climatique du Luxembourg pour la période 1991 à 2020 utilisant les données de la station MeteoLux de l'aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2021)*)

Luxemburg befindet sich in der außertropischen Westwindzone, deren Wetterablauf von Zyklonen und Antizyklonen geprägt ist (Flohn 1954). Dieser Übergangsbereich zwischen Seeklima und kühlem Kontinentalklima zählt nach Köppen (1936) zum warmgemäßigten Regenklima, bei dem die mittlere Temperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über -3 °C bleibt. Damit liegt Luxemburg innerhalb des Übergangsklimas in einem überwiegend maritim geprägten Bereich mit allge-

mein kühlen Sommern und milden Wintern. Gelegentlich setzt sich kontinentaler Einfluss mit längeren Phasen hohen Luftdrucks durch. Dann kann es in den Sommermonaten bei schwachen östlichen bis südöstlichen Winden zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichen Wetter kommen. Im Winter sind kontinental geprägte Wetterlagen häufig mit Kälteperioden verbunden.

Luxemburg ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,8 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagssumme von 831,3 mm/Jahr, wobei die meisten Niederschläge mit durchschnittlich 89,5 mm im Dezember auftreten (Abb. 3, Bezugszeitraum 1991-2020).

An der MeteoLux-Messstation Flughafen Findel wurden neben Temperatur und Niederschlag unter anderem auch Windrichtung und Windgeschwindigkeit über einen langen Zeitraum gemessen. Diese Messstation dient als Referenz für die Beurteilung der langjährigen mittleren Windverhältnisse des Landes. Die langjährige mittlere stündliche Windgeschwindigkeit liegt bei 5,9 m/s³ (mäßige Brise), wobei auch starke Winde von über 10 m/s – insbesondere in den Wintermonaten – regelmäßig auftreten. Der Wind weht ganzjährig bevorzugt aus nordöstlichen und west- bzw. südwestlichen Richtungen (Abb. 4).

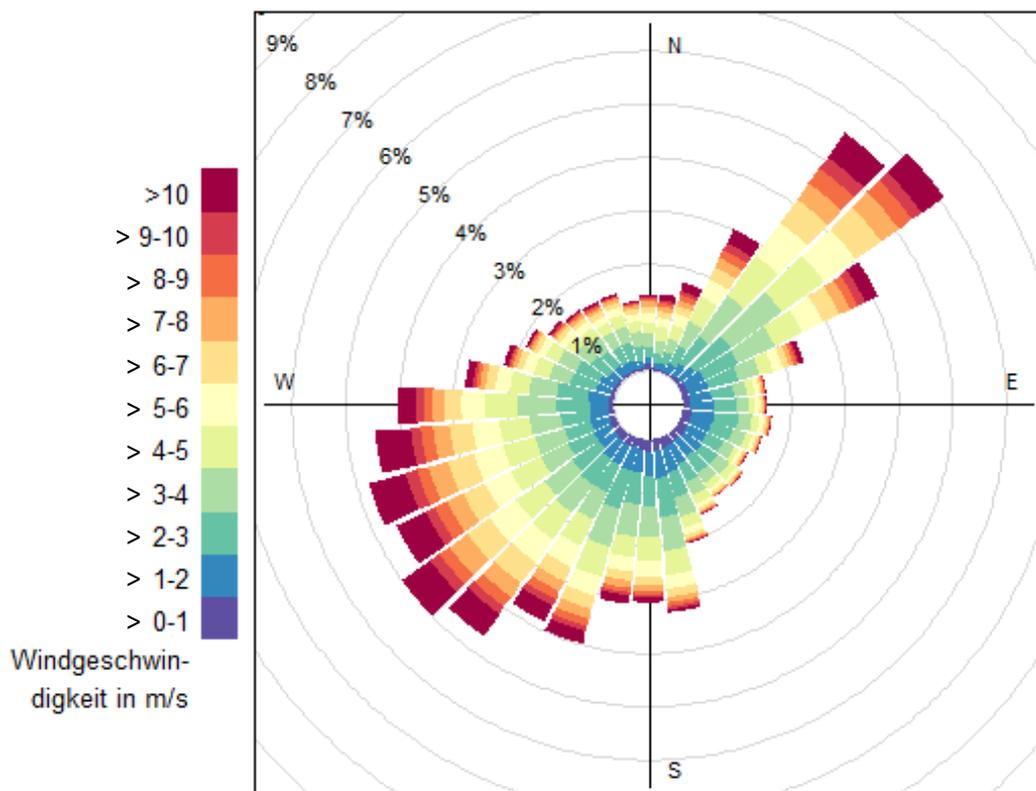


Abb. 4: Windrichtungsverteilung in Luxemburg 2005 – 2019; Station: Luxemburg, Flughafen Findel (Datenquelle: MeteoLux 2020) (*Distribution de la direction du vent au Luxembourg 2005 - 2019; Station: Luxembourg, aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2020)*)

AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Klimaanalyse für das Land Luxemburg legt einen so genannten „autochthonen Sommertag“ (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder synoptischer Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde (vgl. Kap. 3.2). Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage

³ bezogen auf den Messzeitraum 2005-2019, für den die Daten bereitgestellt wurden

ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in welcher die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Gebiet erzeugt.

In Luxemburg treten im langjährigen Mittel rund 28 windschwache Strahlungsnächte⁴ auf, wobei im Sommerhalbjahr und besonders im August die Häufigkeit am größten ist (Abb. 5). Wichtig ist hier festzuhalten, dass die Ermittlung der langjährigen mittleren Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten anhand von Daten der Station Flughafen Findel ermittelt wurde. Diese Station befindet sich jedoch außerhalb der Stadt Luxemburg und in einer sehr windexponierten Lage. Demzufolge werden an diesem Standort besonders hohe Windgeschwindigkeiten und damit wenig austauscharme Bedingungen gemessen. Es ist davon auszugehen, dass in den verdichteten Siedlungskörpern Luxemburgs die Auftrittshäufigkeit dieser lokalen Wetterlagen wesentlich höher ist.

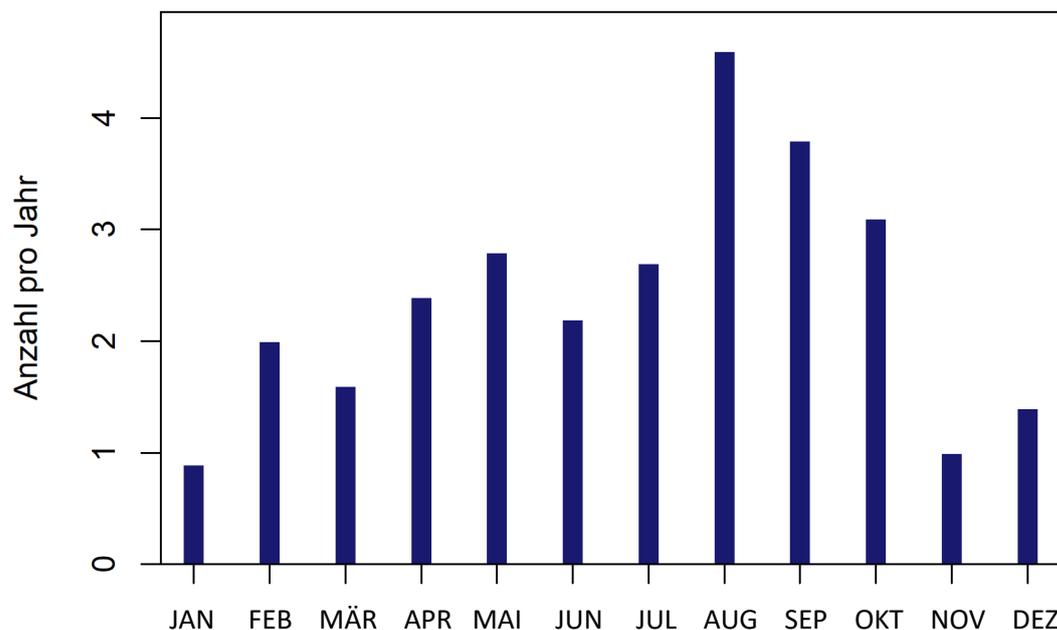


Abb. 5: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten (28,2 pro Jahr) an der Station Luxemburg, Flughafen Findel (2005-2019) (*Nombre mensuel moyen de nuits autochtones à long terme (28,2 par an) à la station de Luxembourg, aéroport de Findel (2005-2019)*)

In der im Rahmen dieser Arbeit modellierten Situation handelt es sich um einen Fall, der eine durchschnittliche Sommersituation an einem Tag (keine extreme Sommerhitze über mehrere Tage) bei wolkenlosem Himmel repräsentieren soll. Die sich ausprägenden Lufttemperaturen entsprechen einem moderaten sommerlichen Niveau, um eine Situation abzubilden, die verhältnismäßig häufig auftreten kann. Ein mittlerer autochthoner Sommertag in Luxemburg hat eine Tagesdurchschnittstemperatur von rund 20,3 °C⁵. In der Abb. 6 ist ein beispielhafter Tagesgang⁶ dargestellt, der ein Temperaturniveau zeigt, welches ungefähr diesem Durchschnittswert entspricht. Um 4 Uhr nachts des 7.8.2013 hat sich die Luft

⁴ Die Voraussetzungen für windschwache Strahlungsnächte sind nach DWD (1997) eine Höchstwindgeschwindigkeit von 2,7 m/s bei gleichzeitig geringer Bewölkung (Bedeckungsgrad höchstens 4 Achtel) während mehrerer Nachtstunden. In der Regel müssen diese Kriterien für 10 Stunden innerhalb des Zeitraums zwischen 17 MEZ und 5 MEZ erfüllt sein, (d. h. es kann dazwischen eine Lücke auftreten), oder an 7 aufeinanderfolgenden Stunden innerhalb dieses Zeitraums, also ohne Lücke. Falls der Bedeckungsgrad nicht vorliegt, muss an exakt den gleichen Stunden eine Temperaturabnahme von mindestens 0,3 K/h erfolgt sein.

⁵ bezogen auf die Messwerte der Station Flughafen Findel in den Sommermonaten Juni, Juli, August im Zeitraum 2005-2019

⁶ Da u.a. der Bedeckungsgrad im Tagesverlauf nicht durchgängig 0/8 entsprach, ergeben sich Unregelmäßigkeiten im Tagesgang der Temperatur (z.B. verhältnismäßig niedrige Temperatur um 14 Uhr).

an der Station Flughafen Findel auf 16,5 °C abgekühlt. Die Modellergebnisse der Nachtsituation – ebenfalls 4 Uhr – zeigen (vgl. Kap. 4.1), dass im Umfeld der Klimastation Temperaturen im Bereich von 16-17 °C erreicht werden. Insofern ergibt sich für die modellierte Situation ein repräsentatives Temperaturniveau, welches gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt. Zu beachten ist jedoch, dass die sich während autochthoner Bedingungen einstellenden relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungen wichtiger sind als das absolute Temperaturniveau. In der Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 6) werden aus diesem Grund die Siedlungs- und Verkehrsflächen auf der Basis der relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Flächen bewertet.

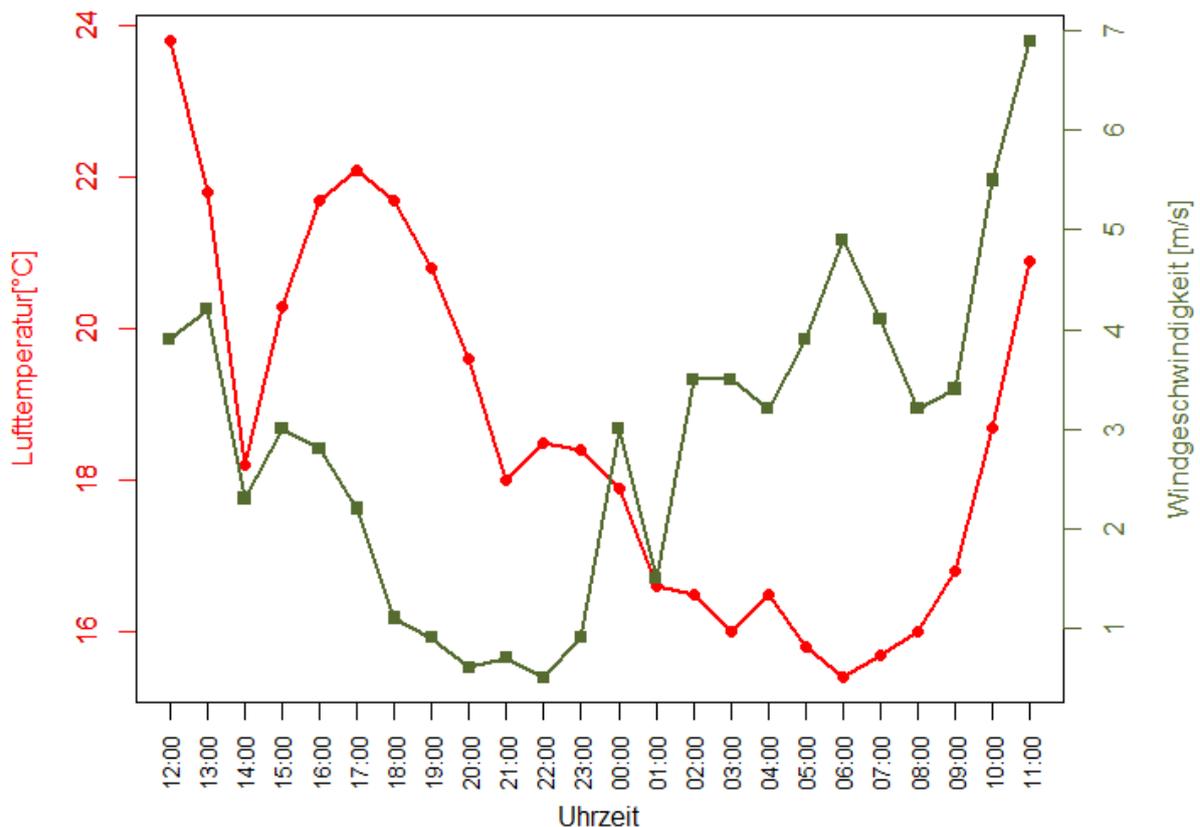


Abb. 6: Tagesgang der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit an einem mittleren (autochthonen) Sommertag: Beispiel des 6./7. August 2013, gemessen an der Station Luxemburg, Flughafen Findel (*Variation diurne de la température de l'air et de la vitesse du vent lors d'une journée moyenne (autochtone) d'été: exemple des 6/7 août 2013, mesurée à la station Luxembourg, aéroport de Findel*)

Die Windrichtungsverteilung um 4 Uhr nachts während austauscharmer Strahlungswetterlagen (Abb. 7) ähnelt der Verteilung der langjährigen mittleren Windverhältnisse aller Wetterlagen und Zeitpunkte (Abb. 4). Demnach treten auch in autochthonen Sommernächten Winde aus Nordosten am häufigsten auf. Winde aus südwestlicher Richtung wurden am zweithäufigsten gemessen. In den Modellergebnissen (vgl. Kap. 4.2) ist im Umfeld der Messstation die häufigste Strömungsrichtung aus Nordosten wiederzufinden. Das Relief am Flughafen Findel ist abfallend von Nordost nach Südwest, sodass sich während autochthoner Sommernächte Hangwinde aus nordöstlicher Richtung ausbilden können.

Die Windgeschwindigkeiten in autochthonen Sommernächten fallen erwartungsgemäß niedriger aus als bei anderen Wetterlagen. Vereinzelt treten zwar auch Windgeschwindigkeiten von 7-8 m/s auf, in den meisten Fällen betragen sie jedoch unter 2,7 m/s (Abb. 7). Da die Windgeschwindigkeiten in 10 m ü. Gr. gemessen werden und die Modellergebnisse auf einer Höhe von 2 m ü. Gr. basieren, ist ein direkter Vergleich der Windgeschwindigkeiten nicht möglich. Es zeigt sich aber, dass die modellierte Windge-

schwindigkeit in 2 m ü. Gr. erwartungsgemäß niedriger ausfällt als die gemessene mittlere Strömung in 10 m über dem Boden.

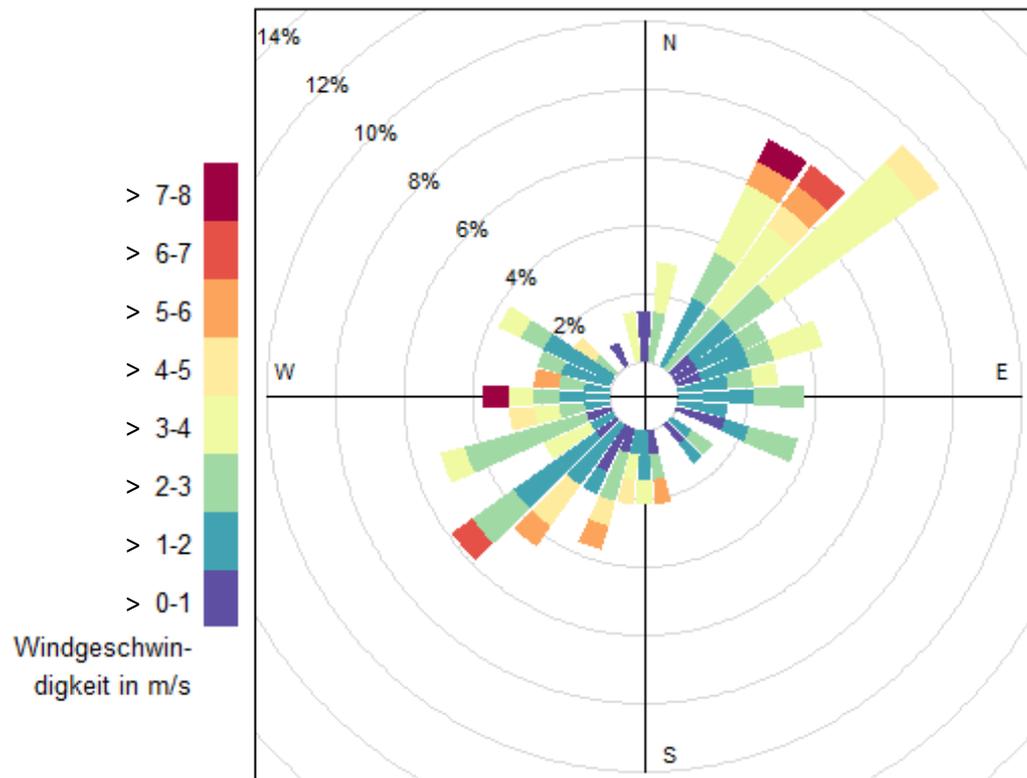


Abb. 7: Windrichtungsverteilung um 4 Uhr nachts während autochthoner Wetterlagen im Sommer 2005 – 2019; Station: Luxemburg, Flughafen Findel (Datenquelle: MeteoLux 2020) (*Distribution de la direction du vent à 4 heures du matin pendant les conditions météorologiques autochtones en été 2005 - 2019; station: Luxembourg, aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2020)*)

3. Methodik der modellgestützten Klimanalyse

3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

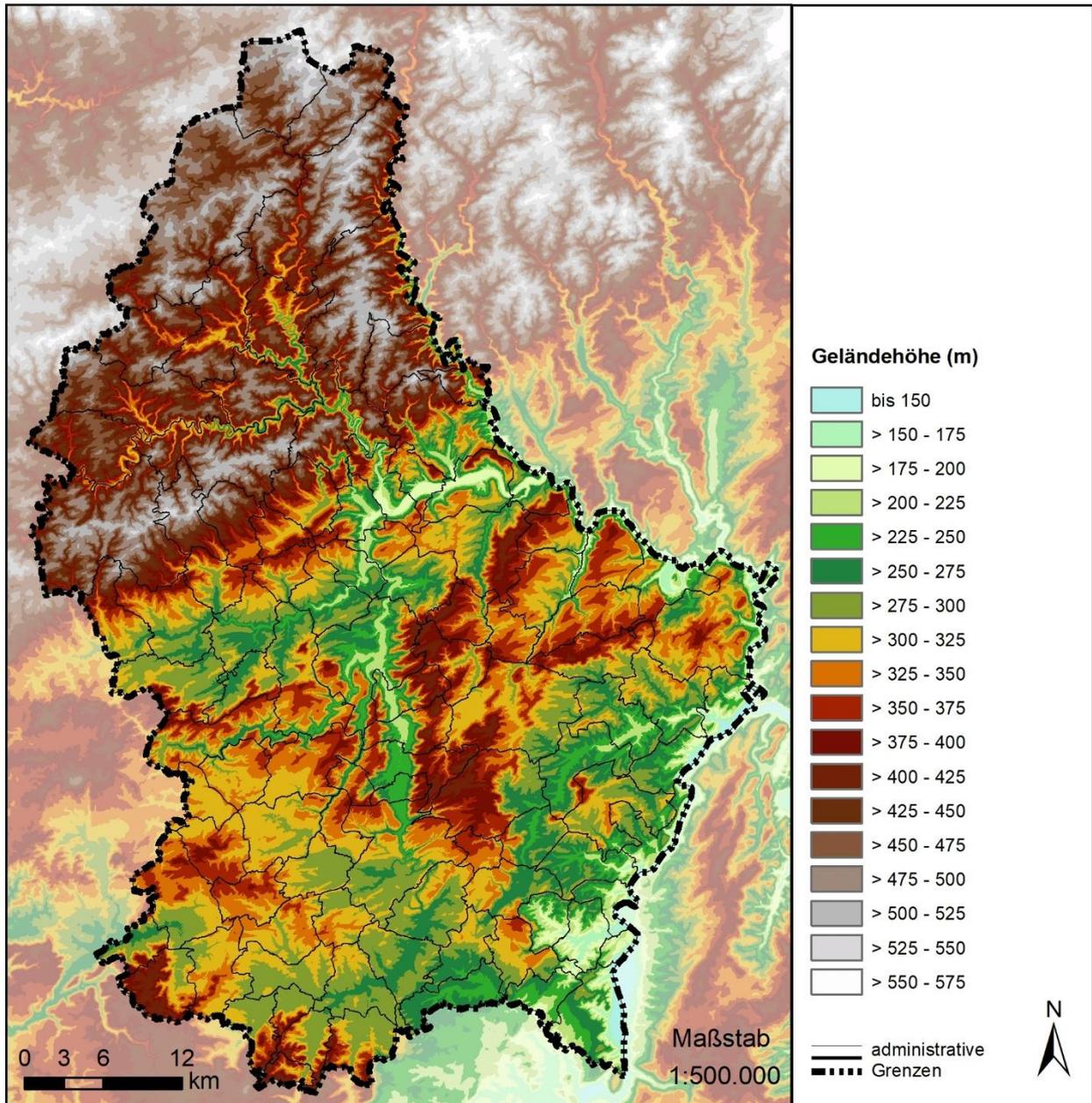


Abb. 8: Für die Modellrechnung bestimmtes Untersuchungsgebiet (Rechteck) und Darstellung der Geländehöhe (Datenquelle: Katasteramt Luxemburg) (*Zone d'étude (rectangle) déterminée pour la modélisation et représentation de l'altitude du terrain (Source de données: Administration du cadastre de Luxembourg)*)

Luxemburg grenzt im Süden an Frankreich, im Westen an Belgien und im Osten an Deutschland. Das Land gliedert sich in Bezug auf das Relief in einen nördlichen Teil (Ösling) sowie einem südlichen Teil (Gutland). Der Norden des Landes ist geprägt durch die hügelige Landschaft der Ardennen und liegt auf einer Höhe von meist 400 bis 500 m ü. N.N (Abb. 8). Der „Kneiff“ ganz im Norden mit 560 m ü. N.N. bil-

det die höchste Erhebung des Landes. Das überwiegend flachere Gutland im Süden befindet sich auf einer durchschnittlichen Höhe von 200 bis 300 m ü. N.N. Am Zusammenfluss von Sauer und Mosel befindet sich mit 130 m ü. N.N. der niedrigste Punkt von Luxemburg.

Das Land erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 57 km in Ost-West und ca. 82 km in Nord-Süd über eine Fläche von 2.586 km² (STATEC 2019). Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von etwa 5.170 km² auf (ca. 60,8 km x ca. 85 km), damit die im Umland gelegenen Höhenunterschiede mit Einfluss auf das Klima erfasst werden.

3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die Klimaanalyse legt einen autochthonen Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Dieser wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt bzw. Region besonders gut ausprägen.

Charakteristisch für solch eine (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung von Flurwinden, d.h. durch den Temperaturunterschied zwischen kühleren Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetriebene Ausgleichsströmungen (vgl. Kap. 2.1). In Abb. 9 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

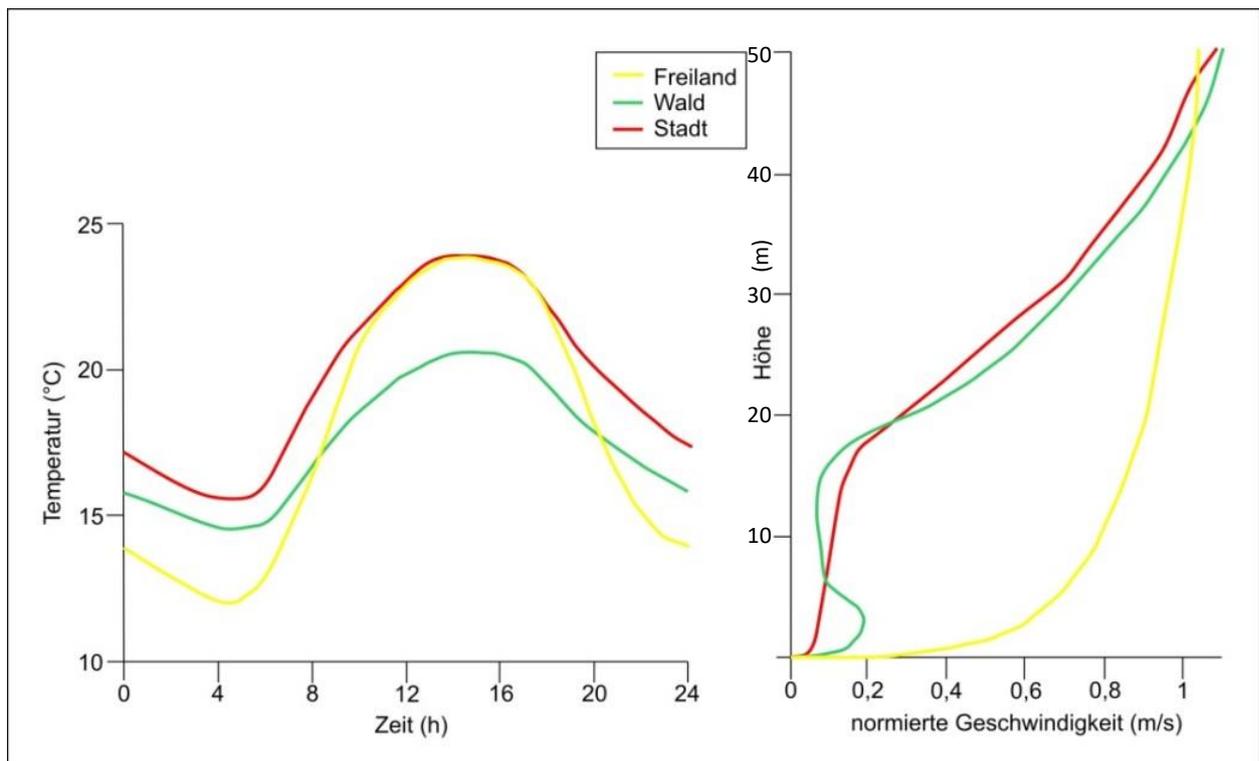


Abb. 9: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992) (*Représentation schématique de la variation diurne de la température de l'air et profil vertical de la vitesse du vent à midi de différentes occupations des sols (propre représentation après Groß 1992)*)

Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprä-

gung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen Luftaustauschs zu den höchsten thermischen Belastungen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere Situation handelt, tritt solch eine Wetterlage regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf.

Für die Klimamodellierung wird die Situation des 21. Juni (Sonnenhöchststand) mit einer 0/8 Bewölkung und einer Bodenfeuchte von 60 % angenommen, sodass der Vegetation Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht (kühlender Effekt)⁷. Der Modellierungszeitraum erstreckt sich von 21 Uhr bis zum Folgetag um 14 Uhr, wobei in der späteren Auswertung (vgl. Kap. 4, 5 und 6) auf die Zeitpunkte um 4 Uhr nachts und um 14 Uhr am Tag fokussiert wurde. Die Starttemperatur der Modellierung beträgt 21 °C in 2 m Höhe. Insofern repräsentiert die Modellrechnung eine meteorologische Situation, die jedes Jahr mehrfach auftritt und keine Extremsituation abbildet.

Es sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass über den Sommer natürlich auch wind- bzw. austauschstärkere Bedingungen mit thermischem Belastungspotential auftreten können (z.B. „Schwüle“). Diese können insbesondere nachts z.T. sogar mit noch höheren Minimaltemperaturen verbunden sein als die Strahlungswetterlagen. Bei diesen „allochthonen Wetterlagen“ entwickeln sich jedoch keine ausgeprägten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland. Folglich bilden sich auch keine Bodeninversionen⁸ und damit auch keine größeren Flurwindssystem bzw. Kaltluftflüsse, die durch planarisches Handeln unterstützt oder gestört werden könnten. Insofern besteht keine fachliche Notwendigkeit, diese explizit in der Klimaanalyse zu berücksichtigen. Der Vollständigkeit halber ist aber noch festzuhalten, dass einstrahlungsreduzierende Maßnahmen (vgl. Kap. 7) auch bei diesen Wetterlagen wirksame Optionen zur Verbesserung des thermischen Wohlbefindens am Tage darstellen.

3.3 DAS MESOSKALIGE MODELL FITNAH-3D

In der Praxis spielen sich umweltmeteorologische Fragestellungen meist in der Größenordnung einer Stadt bzw. Region ab. Die dabei relevanten meteorologischen Phänomene weisen eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden auf. Als mesoskalige Phänomene werden dabei bspw. Flurwinde, Land-See-Winde oder die städtische Wärmeinsel bezeichnet, während der Einfluss von Hindernissen auf den Wind (z.B. Kanalisierung, Umströmung) oder die Wirkung verschattender Maßnahmen mikroskalige Effekte darstellen.

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen solch lokalklimatischer Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Zwar kann die Verteilung meteorologischer Größen wie Wind und Temperatur durch Messungen ermittelt werden, aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung (insb. in komplexen Umgebun-

⁷ Mit der angenommenen Bodenfeuchte von 60 % herrschen Normalbedingungen vor, die einen gesunden Zustand der Vegetation charakterisieren. Unter Trockenstress steht der Vegetation nicht ausreichend Wasser für die Verdunstung zur Verfügung, sodass sie ihre kühlende Wirkung nur zum Teil oder im Extremfall auch gar nicht entfalten kann. Eine höhere Lufttemperatur im Bereich des Vegetationsbestandes und eine geringere Kaltluftproduktion sind die Folge. Weiterhin kann dies auch eine Abschwächung der Flurwinde bedeuten, da der Temperaturunterschied zwischen vegetationsgeprägten und versiegelten Flächen geringer wird.

⁸ Temperaturumkehr (Temperaturzunahme mit der Höhe), die direkt über der Erdoberfläche beginnt. Bodeninversionen haben eine Mächtigkeit von einigen Metern bis Dekametern, in seltenen Fällen auch von wenigen hundert Metern. Sie entstehen bei starker nächtlicher Ausstrahlung und damit Abkühlung der bodennahen Luftschicht.

gen) in benachbarte Räume nur selten möglich. Entsprechend schwierig ist es, aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende (also flächenhafte) stadtklimatologische Bewertung vornehmen zu können.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe meso- und mikroskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988), und der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch. Zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht somit, neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien, ein weiteres leistungsfähiges Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in der Stadt- und Landschaftsplanung zur Verfügung. Die Modelle basieren, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*). Für tiefergehende Informationen zu FITNAH-3D wird u.a. auf Groß (1992) verwiesen.

Mesoskalige Modelle wie FITNAH-3D können demnach deutlich besser zur Beantwortung stadtklimatologischer Fragestellungen herangezogen werden, als rein auf Messkampagnen gewonnene Werte, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH-3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 25 m (mesoskalige Modellrechnung). Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund. Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

3.4 MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die jeweils online verfügbar waren:

- Geländehöhe
 - ↳ Abgeleitet aus einem DGM (Digitales Geländemodell) in 1 m Auflösung⁹
 - ↳ EU-DEM in 25 m Auflösung für den Bereich der Nachbarländer¹⁰
- Landnutzung
 - ↳ Landuse (2018) und Landcover (2018)¹¹
 - ↳ CORINE (2018) für den Bereich der Nachbarländer¹²
 - ↳ Photographies aériennes orthorectifiées (2018)¹³
- Strukturhöhe und Versiegelungsgrad
 - ↳ Parameter in Abhängigkeit der Landnutzung

Bei der vorliegenden mesoskaligen Modellrechnung im 25 m-Raster konnten keine einzelnen Gebäude oder Bäume aufgelöst werden, sodass die Landnutzung, genau wie die Angaben zu Strukturhöhe und Versiegelungsgrad, über verschiedene Klassen parametrisiert wurde (z.B. bei den Bebauungsklassen weist der Stadtkern eine dichtere und höhere Bebauung auf als Einfamilienhausgebiete, die dagegen einen höheren Anteil an Grünflächen enthalten). Dennoch konnten u.a. die Baum- und Gebäudeinformationen aus Landcover (2018) verwendet werden, um die Einteilung der Nutzungsklassen (Abb. 10) zu verbessern.

Die Klimaanalyse bildet den Zustand des Stadtgebiets zu einem bestimmten Zeitpunkt ab (hier: 2018) und ist dabei statisch, d.h. im Rahmen dieser Arbeit können keine Aussagen zu den Auswirkungen zukünftiger Landnutzungsänderungen getroffen werden. Vor diesem Hintergrund werden in der Planungshinweiskarte (vgl. Kap. 6) aktuelle Bauvorhaben kenntlich gemacht, um auf mögliche Klimaänderungen in den betroffenen Bereichen hinzuweisen.

Um die klimatischen Prozesse zwischen Luxemburg und seinen Nachbarländern zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Landesgrenze hinaus. Außerhalb von Luxemburg wurde dabei auf frei verfügbare Daten in geringerer räumlicher Auflösung wie das EU-DEM und CORINE-Daten zurückgegriffen. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels eines aktuellen Luftbildes (2018) abgeglichen.

⁹ <https://data.public.lu/fr/datasets/bd-l-mnt-1m/#> (Administration du cadastre et de la topographie)

¹⁰ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem> (European Environment Agency)

¹¹ <https://data.public.lu/fr/datasets/landcover-landuse-2018/> (Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable & Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire)

¹² <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018> (European Environment Agency)

¹³ <https://data.public.lu/fr/datasets/orthophoto-officelle-du-grand-duche-de-luxembourg-edition-2018/> (Administration du cadastre et de la topographie)

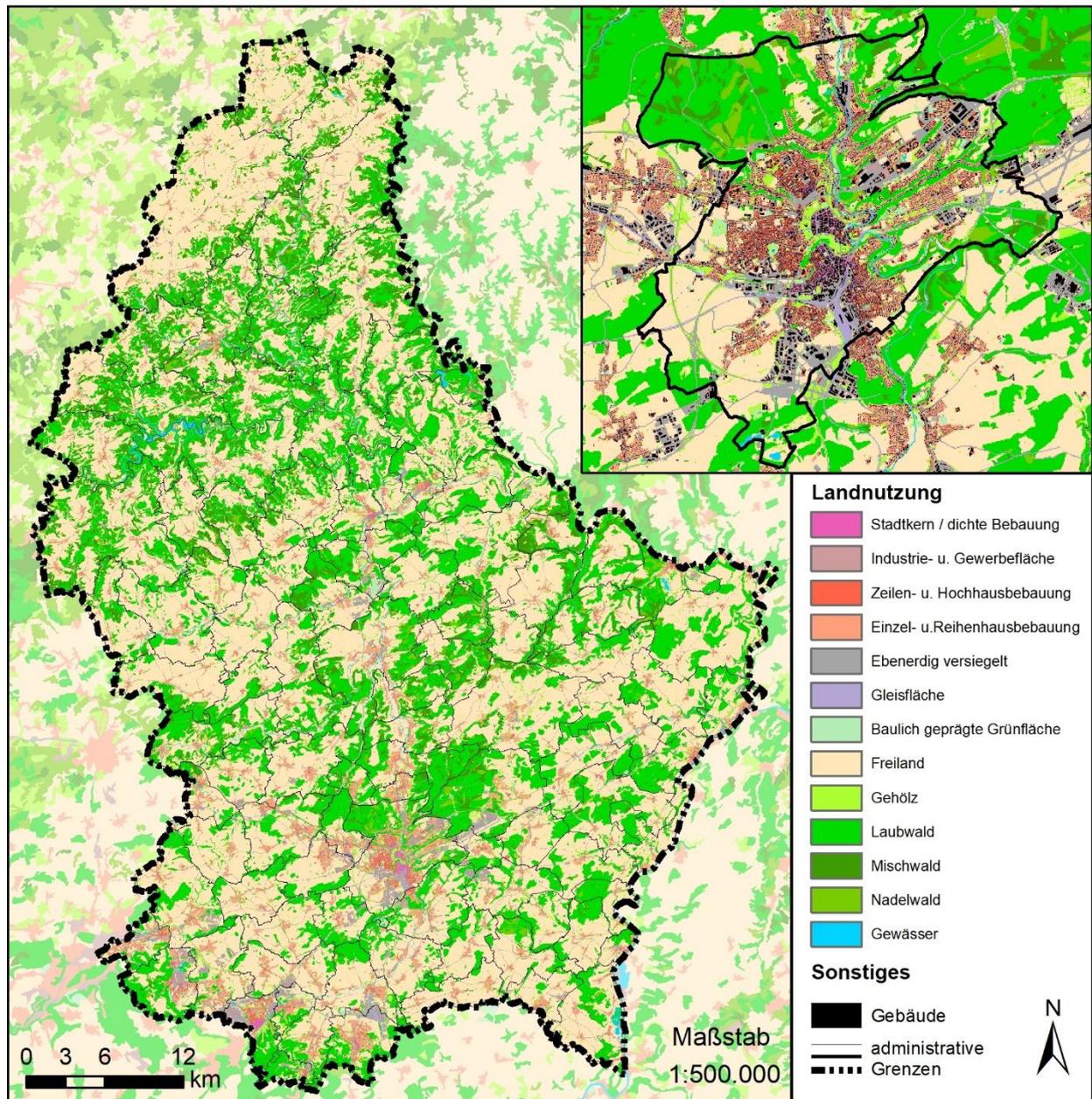


Abb. 10: Landnutzungsklassen und ihre räumliche Ausprägung in Luxemburg (*Les classes d'occupations des sols et leur répartition spatiale au Luxembourg*)

AUFBEREITUNG DER EINGANGSDATEN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 25 m zu erzeugen (Schritt 1 und 2 in Abb. 11). Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die rasterbasierten Modellergebnisse werden nun auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4 in Abb. 11).

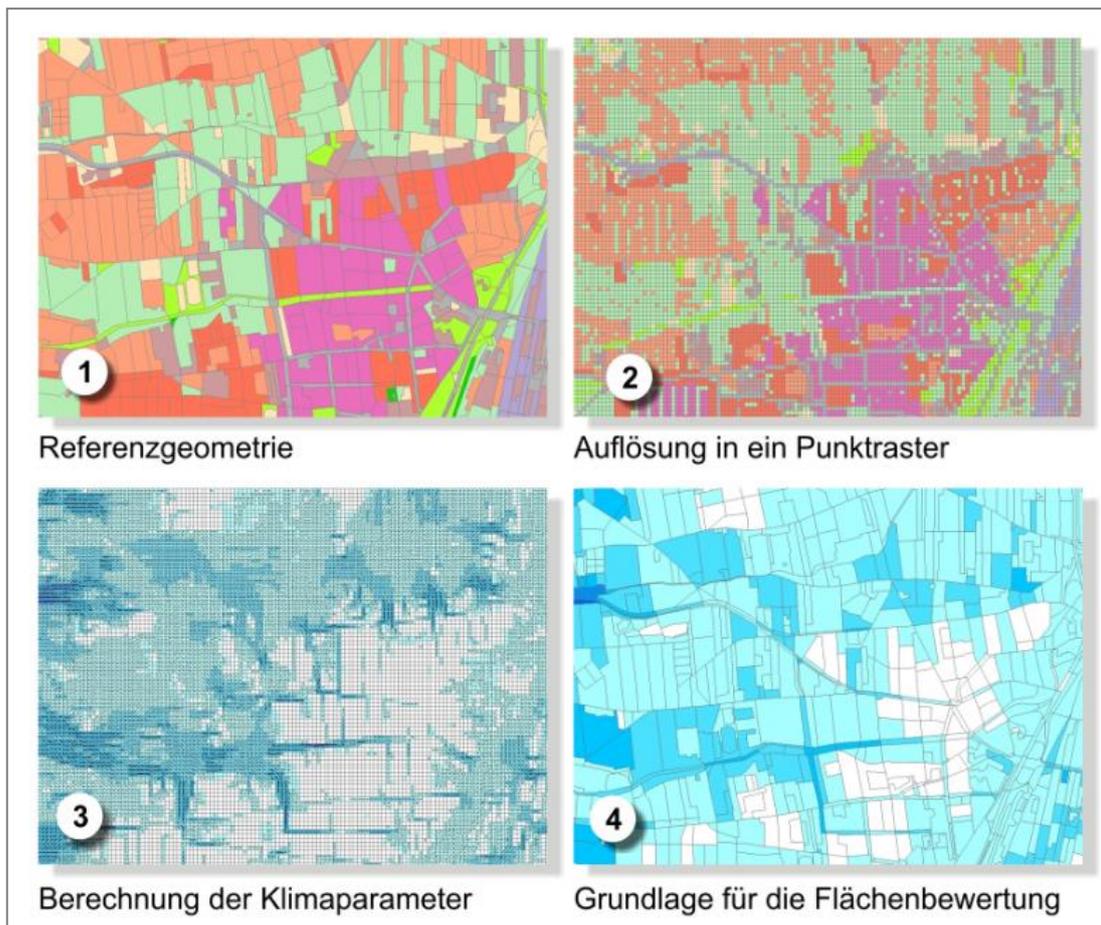


Abb. 11: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation (*Schéma d'attribution des valeurs pour les informations sur les zones et les points*)

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 4 und 5), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung in der Planungshinweiskarte in Kap. 6).

4. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 25 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung).

4.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potentiellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb städtischer Bereiche bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung, etwa in den Planungshinweiskarten, auf diesen beruht.

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für Luxemburg mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird (Abb. 12, Abb. A1 im Anhang). So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von 13,3 °C im Bereich der Ardennen (nördliche Landesgrenze) und Maximalwerten bis 21,5 °C in einem Gewerbegebiet an der Mosel eine Spannweite von 8,2 °C. Die mittlere Temperatur des Landes liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,3 °C.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe einer Stadt bzw. Gemeinde und Dichte der Überbauung abhängig. In den Zentren (z.B. im Stadtzentrum Luxemburgs) sind die höchsten Bebauungsdichten und, gerade in den gewerblich geprägten Bereichen, hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der stärksten nächtlichen Überwärmung widerspiegelt – selbst nachts werden unter den angenommenen Bedingungen noch Temperaturen im Bereich von 19 bis 21,5 °C erreicht. Mit steigender Entfernung zu den Zentren bzw. Gewerbeflächen nimmt die Überwärmung ab, in den aufgelockerten Randbereichen mit Einzel- und Reihenhausbebauung liegt die Temperatur meist mehrere °C unter den Werten der Zentren und Gewerbeflächen (z.B. Siedlung am Kirchberg, nördlich des Europäischen Gerichtshofs mit 15-18 °C). Überwiegend dünn besiedelte Gemeinden, wie z.B. Dippach oder Winrange, überschreiten nur in wenigen Bereichen die 18 °C Marke und sind verhältnismäßig kühl.

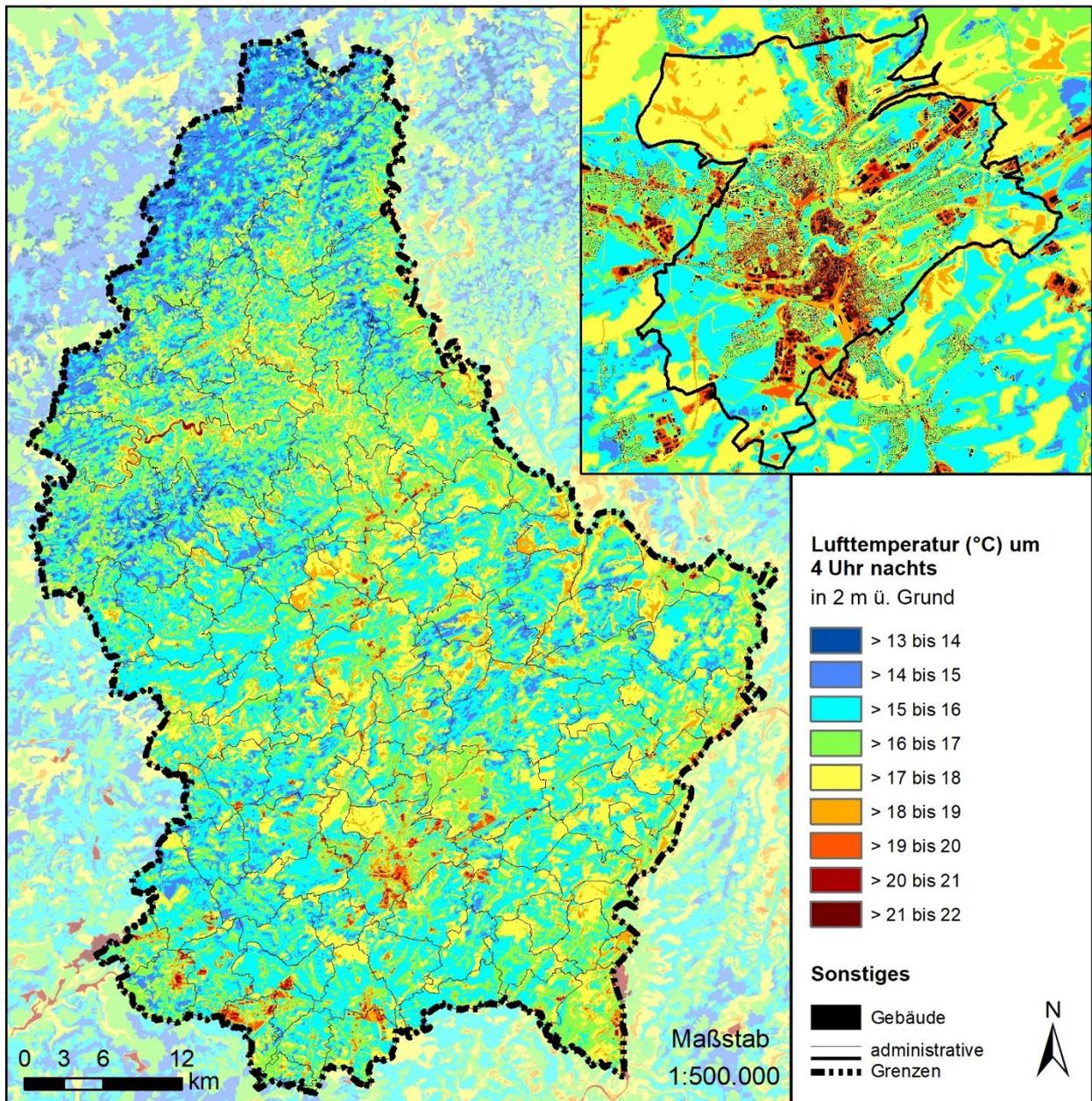


Abb. 12: Nächtliches bodennahe Temperaturfeld in Luxemburg (*Champ de température nocturne près du sol au Luxembourg*)

Unter den Grünflächen zählen die Acker-/ Rasen- und Freiflächen auf größeren Höhenlagen (insbesondere in den Ardennen) zu den kältesten Bereichen des Landes. Dort können die Temperaturen zum Teil auf unter 14 °C fallen. An den Siedlungsrändern und in den kleinen Dörfern versorgen insbesondere die umliegenden Acker-/ Rasen- und Freiflächen die Wohngebiete mit kühler Luft. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen (z.B. Stadtpark Luxemburg mit 15-18 °C) ein höheres Wertespektrum auf, wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So reduziert sich die Temperatur über einer kleineren Grünfläche nicht so stark, wenn sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet ist (z.B. auf Sportplätzen in dicht bebauten Gebieten). Zudem ist auch die Kühlleistung anthropogen geprägter Brachflächen eingeschränkt. In den Städten treten größere Grünareale dagegen mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar – zu nennen sind hier u.a. der Park Merl und der Park de la Pétrusse in Luxemburg sowie der Escher Déierepark.

In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. meist Werte um 16 - 19 °C erreicht werden (z.B. Bambësch, Gebranntebësch). Nachts fällt daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

U.a. die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser¹⁴ sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über größeren Gewässern, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sind und deren Abkühlung verringern können. Dies ist bei großen Seen am stärksten ausgeprägt (z.B. See der Obersauer, Remerschener Seen), in geringerem Maße aber auch bei Fließgewässern (z.B. Alzette) oder Teichen (z.B. im Park Merl) zu erkennen.

4.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung der Stadtkörper herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bauart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 13).

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit m³/s) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt¹⁵ und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit m³/(s*m)). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet.

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Mächtigkeit der Kaltluftschicht nimmt im Verlaufe einer Nacht in der Regel zu und ist, genau wie die Luftaustauschprozesse allgemein, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

¹⁴ Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

¹⁵ In den Ergebnisdaten mit 25 m Rasterauflösung bezieht sich der Wert des Kaltluftvolumenstroms auf einen 1 m breiten Querschnitt. Bei einer Multiplikation des Rasterwertes mit 25 erhält man den Kaltluftvolumenstrom, der durch die 25 m breite Rasterzelle fließt.

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen können. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

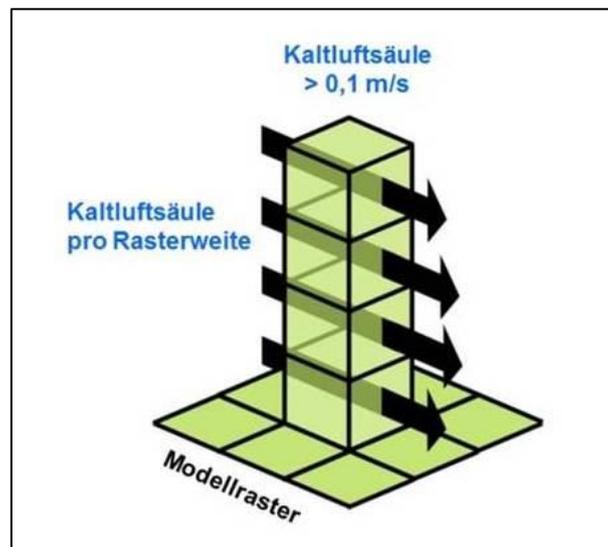


Abb. 13: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom (*Schéma de principe du débit d'air froid*)

Der Kaltluftvolumenstrom (Abb. 14, Abb. A2 im Anhang) zeigt innerhalb des Landes eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von fast $107 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert von Luxemburg liegt bei etwa $16 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$.

Im Fokus der Untersuchung steht die Funktion des Kaltlufthaushalts für die bewohnten Siedlungsflächen Luxemburgs. In vielen Bereichen strömt die über Freiflächen entstehende Kaltluft als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete, wobei die höchsten Volumenströme an den Talhängen (z.B. Tal der Alzette, Sauerthal) zu finden sind. Städte und Ortschaften in Tallage profitieren nachts unter austauscharmen Bedingungen von einer besonders ausgeprägten Kaltluftzufuhr, da die (reliefbedingten) Hangwinde mit (thermisch hervorgerufenen) Flurwinden verstärkt werden. Ortschaften auf Hügel- und Bergkuppen (z.B. Hoscheid) profitieren meist nicht von der Kaltluft der umliegenden Grünflächen, da die Hangwinde bei einer entsprechend ausgeprägten Hangneigung in der Regel stärker sind als die Flurwinde, welche sich zwischen kühleren Grünflächen und warmen Siedlungsflächen einstellen. Hingegen können sich bei größeren Temperaturunterschieden auch über relativ ebenen Flächen höhere Volumenströme ausbilden, wie etwa im Stadtteil Märel von Luxemburg Stadt. Einige der Kaltluftströmungen, von denen der Siedlungsraum profitiert, sind nicht nur in eine Richtung orientiert, sondern verlaufen ausgehend von einem Punkt in nahezu alle Himmelsrichtungen (Parkwinde). Letztere sind vor allem auf begrünten Hügelkuppen zu finden, u.a. in Soleuvre und in der Stadt Luxemburg.

Im Bereich der Siedlung nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung ab und erreicht Werte von meist unter $5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Nur in locker bebauten Bereichen und/oder an steilen Hängen treten trotz der Bebauung deutlich höhere Kaltluftvolumenströme auf. Neben Gebäuden stellen auch Bäume und insbesondere Wälder Hindernisse für die Kaltluftströmung dar, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen (insbesondere in Hanglagen, z.B. Bambësch) bereitstellen. Tendenziell sind diese Kaltluftströmungen jedoch schwächer ausgeprägt als über Freiflächen.

Die für den Siedlungsraum wichtigsten Kaltluftströmungen sind in der Klimaanalysekarte (vgl. Kap. 5) zusammengefasst.

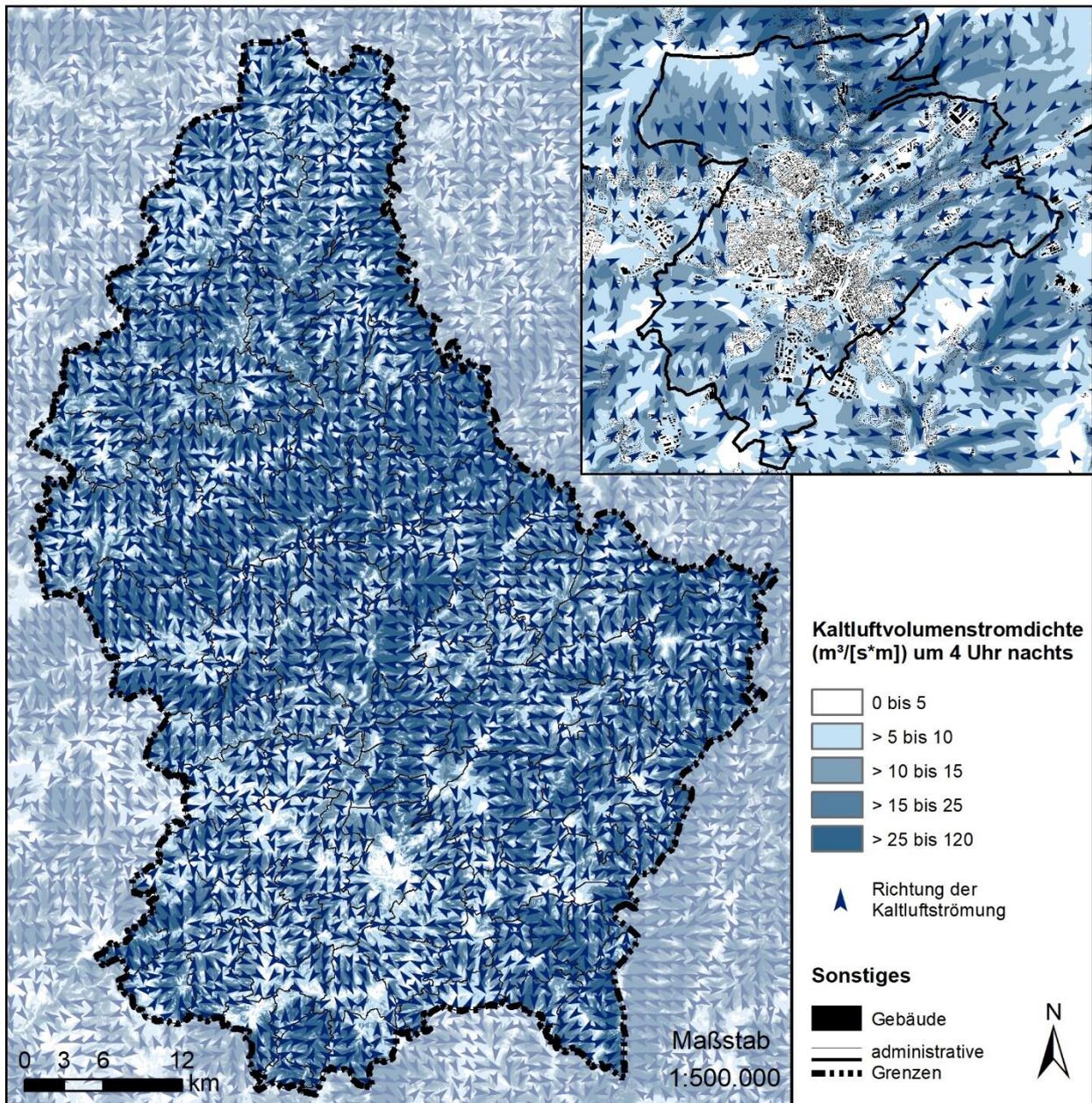


Abb. 14: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in Luxemburg (*Débit d'air froid nocturne au Luxembourg*)

Abb. 15 (bzw. Abb. A3 im Anhang) zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur¹⁶) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potentielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeld folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Innerhalb des Landes sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten mit bis zu 2,7 m/s im Bereich der Freiflächen zu finden. Die höchste Windgeschwindigkeit wird auf einer Ackerfläche im Süden Remichs erreicht. Aufgrund der geringeren Geländerauigkeit treten im Gutland tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten auf als im Ösling. Eine Ausnahme bilden die Städte bzw. Bereiche mit

¹⁶ Die Pfeile wurden in einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.

dichter Bebauung (z.B. auf den Siedlungsflächen der Städte Luxemburg und Esch-sur-Alzette), wo die Hinderniswirkung von Gebäuden stärker hervortritt und großflächige Bereiche bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren.

Aufgrund der geringen Hinderniswirkung können neben ausgedehnten Grünflächen auch Verkehrsräume (z.B. breite Straßen, Gleisanlagen) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen. Weiterhin können innerstädtische Grünflächen zumindest lokal für Entlastung sorgen, etwa im Nahbereich des Stadtparks Luxemburg, dessen angrenzende Bebauung von seiner Kaltluftströmung profitiert.

Für die Strömung in 2 m ü. Gr. stellen Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis dar, jedoch können ausgehend von den Waldrändern auch bodennahe Ausgleichsströmungen Richtung Stadtgebiet einsetzen.

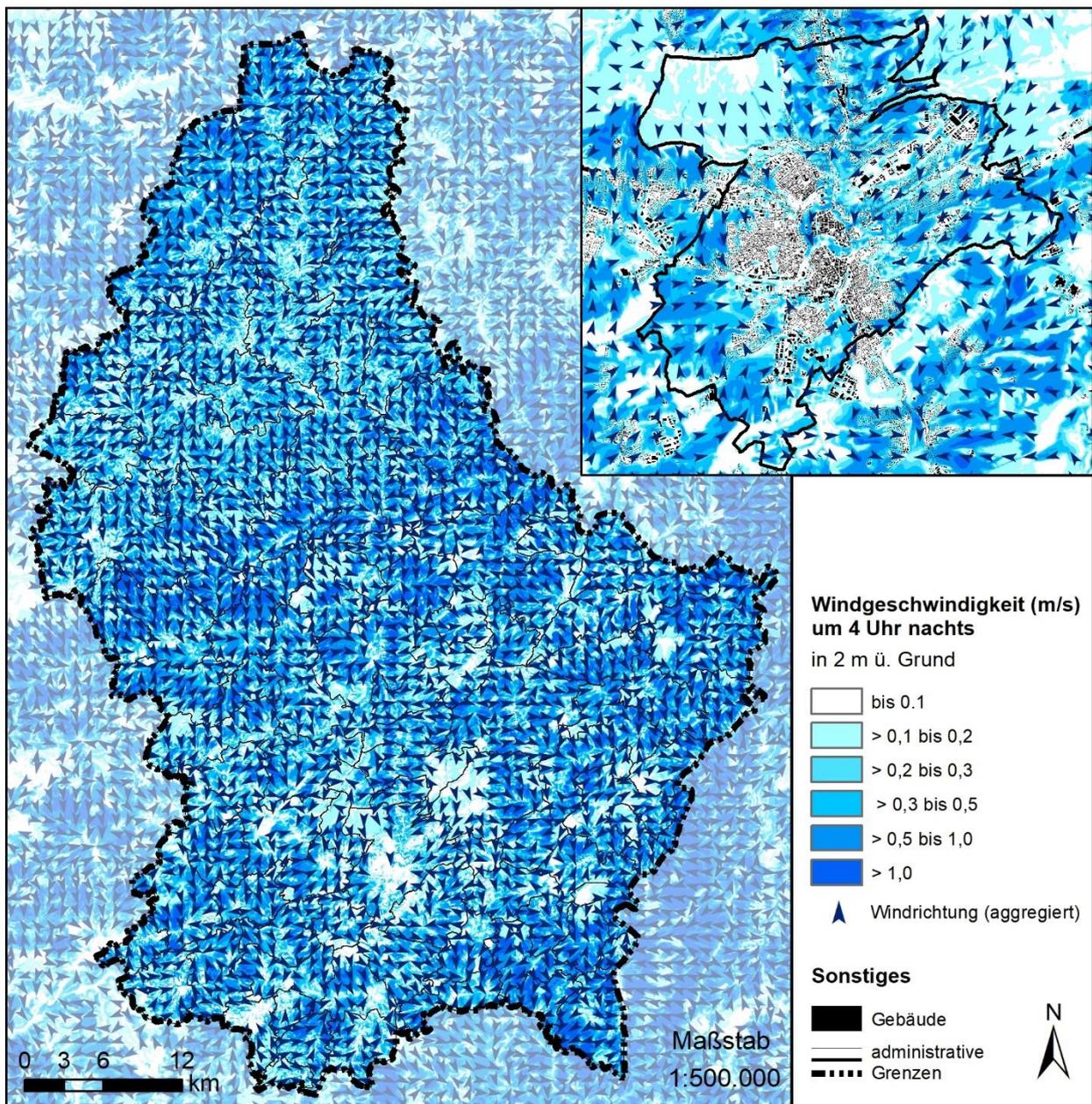


Abb. 15: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in Luxemburg (*Champ d'écoulement nocturne près du sol au Luxembourg*)

4.3 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

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 abschätzen¹⁷.

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis & Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können¹⁸. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte 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 und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tab. 1). Eine Analyse der langfristigen thermischen Belastung basierend auf der Physiologischen Äquivalente Temperatur für Luxemburg geben Matzarakis et al. (2013) und Junk et al. (2014).

Tab. 1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004) (*Attribution des seuils de l'indice d'évaluation PET pendant la journée (selon 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	Schwäche 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

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf (Abb. 16, Abb. A4 im Anhang). So umfasst die PET bei Minimalwerten von etwa 19,5 °C (keine Wärmebelastung) und Maximalwerten bis knapp 46 °C (extreme Wärmebelastung) eine Spannweite von 26,5 °C. Für den Untersuchungstermin liegt die mittlere PET für das gesamte Land bei 33,7 °C.

¹⁷ 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, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

¹⁸ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

Die geringsten Werte sind in Wäldern und über größeren Gewässern (z.B. Echternacher See) zu finden, welche tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben. Insbesondere die Wälder in den Ardennen überschreiten nur selten die 29 °C-Marke (keine bis schwache Wärmebelastung), während die Wälder im Tiefland (z.B. Baurebësch bei Niederanven) auch PET-Werte von etwas mehr als 30 °C erreichen können. Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass alle Wälder am Tag wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung darstellen.

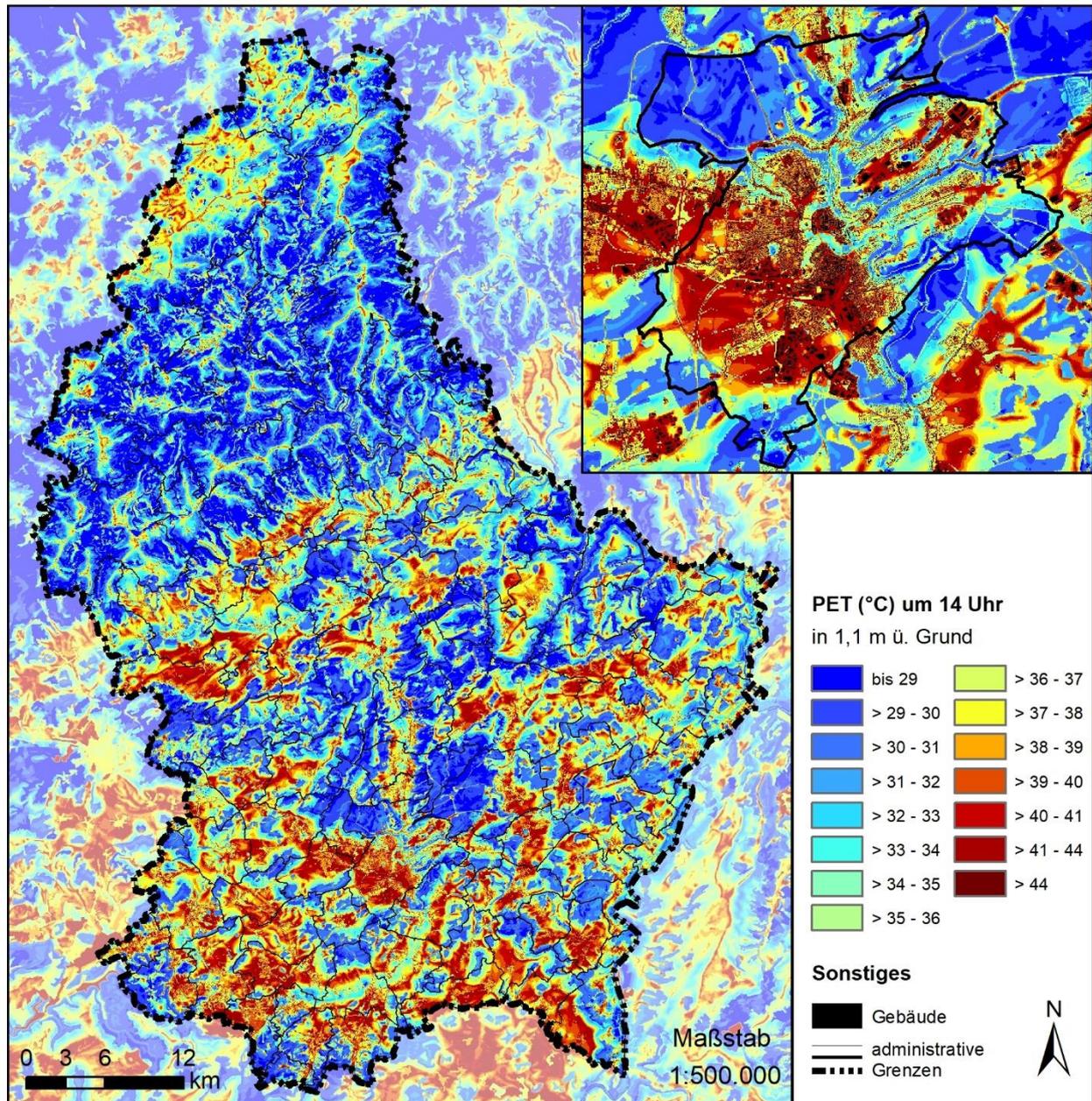


Abb. 16: PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) am Tag in Luxemburg (*PET (température physiologique équivalente) de jour au Luxembourg*)

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine mäßige Wärmebelastung auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer starken Wärmebelastung betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten und dem Verkehrsraum zu finden (mehr als 41 °C PET; extreme Wärmebelastung). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über

unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte. Innerhalb des Stadtgebiets stellen öffentliche Grünflächen wie Parks (u.a. Stadtpark Luxemburg, Park de la Pétrusse, Park Merl) oder zum Teil auch Friedhöfe (z.B. Friedhof Malakoff) mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

Die Ergebnisse sind mit gewissen Einschränkungen behaftet, da einzelne Gebäude und Bäume in der Modellierung nicht einzeln aufgelöst werden konnten. Diese Strukturen beeinflussen mit ihrer Verschattung wesentlich die PET, werden bei einer Auflösung von 25 m jedoch nur parametrisiert erfasst, sodass kleinräumige Analysen kaum möglich sind (wie etwa die thermische Situation im Straßenraum).

4.4 PROZESSRÄUME IN LUXEMBURG

Aus den Modellergebnissen lassen sich zwei verschiedene Prozessräume ableiten, die das Klima des Landes charakterisieren. Der nördliche Raum umfasst den Bereich der Ardennen, während sich der daran angrenzende und tiefer gelegene Raum im mittleren und südlichen Teil des Landes befindet. Letzterer ist durch Flurwinde vom kühleren Umland in die wärmeren Siedlungsbereiche geprägt; je nach Reliefausprägung werden die Flurwinde zum Teil mit leichten Hangabwinden ergänzt. Im nördlichen Raum Luxemburgs treten vorwiegend Bergwinde auf: Hier fließt die Kaltluft aus den Ardennen in Richtung der Täler. Flurwinde zwischen Siedlungen und Grünflächen spielen im nördlichen Prozessraum aufgrund der eher geringen Siedlungsgröße¹⁹ eine untergeordnete Rolle. Die Übergänge zwischen den beiden Räumen sind als fließend zu betrachten, wobei sich der Übergangsbereich ungefähr in den Tallagen südlich der Ardennen befindet. In der Tab. 2 werden die wesentlichen Merkmalsausprägungen der beiden Prozessräume zusammengefasst.

¹⁹ und der damit verbundenen geringen Wärmeinselintensität

Tab. 2: Vergleich der klimaökologischen Prozessräume "Nord" und "Süd" (*Comparaison des zones de processus climato-écologiques du « Nord » et du « Sud »*)

Merkmals	Prozessraum „Nord“	Prozessraum „Süd“
Relief	<ul style="list-style-type: none"> gebirgig Hochflächen und tief eingeschnittene Flusstäler durchschnittliche Höhenlage von 400-500 m ü. N.N. 	<ul style="list-style-type: none"> flach bis hügelig auf 130 bis knapp 436 m ü. N.N. durchschnittliche Höhenlage von 200-300 m ü. N.N.
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> waldreich und grüngerprägt dünn besiedelt 	<ul style="list-style-type: none"> intensive landwirtschaftliche Nutzung (ca. zwei Drittel der Fläche) dichter besiedelt mit einzelnen größeren Städten im Süden industriell geprägt
Lufttemperatur (4 Uhr)	<ul style="list-style-type: none"> nahezu flächendeckend kühl mit durchschnittlich 16 °C Temperaturspanne von 13,3-20,8 °C 	<ul style="list-style-type: none"> durchschnittlich 16,5 °C große Unterschiede zwischen stark versiegelten (max. 21,5 °C) und grüngerprägten Arealen (Minimum bei 14 °C)
Windfeld (4 Uhr)	<ul style="list-style-type: none"> Windgeschwindigkeiten von 0-2,5 m/s aufgrund der höheren Geländerauigkeit tendenziell niedrigere Windgeschwindigkeiten als im Süden meist gut durchlüftete Siedlungen, insbesondere in den Tallagen 	<ul style="list-style-type: none"> Windgeschwindigkeiten von 0-2,7 m/s aufgrund der geringeren Geländerauigkeit tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten als im Norden deutlich herabgesetzte Windgeschwindigkeiten in den Städten (Hindernismwirkung der dichten Bebauung)
Kaltluftvolumenstrom (4 Uhr)	<ul style="list-style-type: none"> dem Muster des Windfeldes folgend höchste Kaltluftvolumenströme an den Talhängen (z.B. Sauertal, max. 97 m³/(s*m)) 	<ul style="list-style-type: none"> dem Muster des Windfeldes folgend höchste Kaltluftvolumenströme an den Talhängen (z.B. Tal der Alzette, max. 107 m³/(s*m))
Kaltluftproduktion (4 Uhr)	<ul style="list-style-type: none"> auf den Grün- und Freiflächen nahezu flächendeckend überdurchschnittlich hoch 	<ul style="list-style-type: none"> insb. in den Tälern und/oder den Acker-/Rasen-/u. Freiflächen überdurchschnittliche Kaltluftproduktionsrate
PET (14 Uhr)	<ul style="list-style-type: none"> aufgrund des hohen Waldanteils und der dünnen Besiedlung verhältnismäßig niedrige PET-Werte durchschnittlich 32 °C (<i>mäßige Wärmebelastung</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> große Unterschiede zwischen Wäldern (Minimum von 19,5 °C) und versiegelten, sonnenexponierten Standorten (max. 46 °C) durchschnittlich knapp 35 °C (<i>mäßige-starke Wärmebelastung</i>)

5. Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Verkehrsflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Außerhalb der Landesgrenze erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund des geringeren Detaillierungsgrads zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefergehende Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insb. zum Rand des Untersuchungsgebiets hin). Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter (vgl. Kap. 4.3). Die Karte der PET (Abb. 16, Abb. A4 im Anhang) stellt somit die „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ dar.

In der Klimaanalysekarte (Abb. 17, Abb. A5 im Anhang) sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen die nächtliche Überwärmung im Vordergrund, welche anhand der Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. erfasst und mit der zugehörigen Intensität des Wärmeinseleffektes (Tab. 3) qualitativ beschrieben wird.

Tab. 3: Nächtliche Lufttemperatur und Wärmeinseleffekt auf den Siedlungs- und Verkehrsflächen (4 Uhr)
(*Température nocturne de l'air et effet d'îlot de chaleur sur les zones de peuplement et de circulation (4 heures)*)

Lufttemperatur [°C] in 2 m ü. Gr.	Wärmeinseleffekt
> 13 bis 14	Nicht vorhanden
> 14 bis 15	Nicht vorhanden
> 15 bis 16	Nicht vorhanden
> 16 bis 17	Sehr gering
> 17 bis 18	Gering
> 18 bis 19	Mittel
> 19 bis 20	Hoch
> 20 bis 21	Sehr hoch
> 21 bis 22	Extrem

Ab einer Lufttemperatur von knapp über 16 °C²⁰ ist von einem Wärmeinseleffekt auszugehen. Den Temperaturen im Bereich von > 16 bis 17 °C wird dementsprechend ein sehr geringer Wärmeinseleffekt zugeordnet. Die Abstufung der Intensitäten von „sehr gering“ bis „extrem“ erfolgte auf der Basis der Statistik der modellierten Lufttemperatur der Luxemburger Siedlungs- und Verkehrsflächen. Zudem stellen 16 °C, 18 °C und 20 °C wichtige Intervallgrenzen dar: Als optimale Schlaftemperaturen werden 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), entsprechend definiert das Climate Service Center Germany seinen „Schlecht-

²⁰ Referenzen: 16,2 °C (=modellierte, mittlere Lufttemperatur über den Luxemburger Grünflächen um 4 Uhr nachts) bzw. 16,3 °C (=modellierte, mittlere Lufttemperatur aller Flächen des Landes um 4 Uhr nachts)

Schlaf-Index“ als Nächte, in denen die Temperatur 18 °C nicht unterschreitet (GERICS 2019). Als besonders belastend gelten Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C.

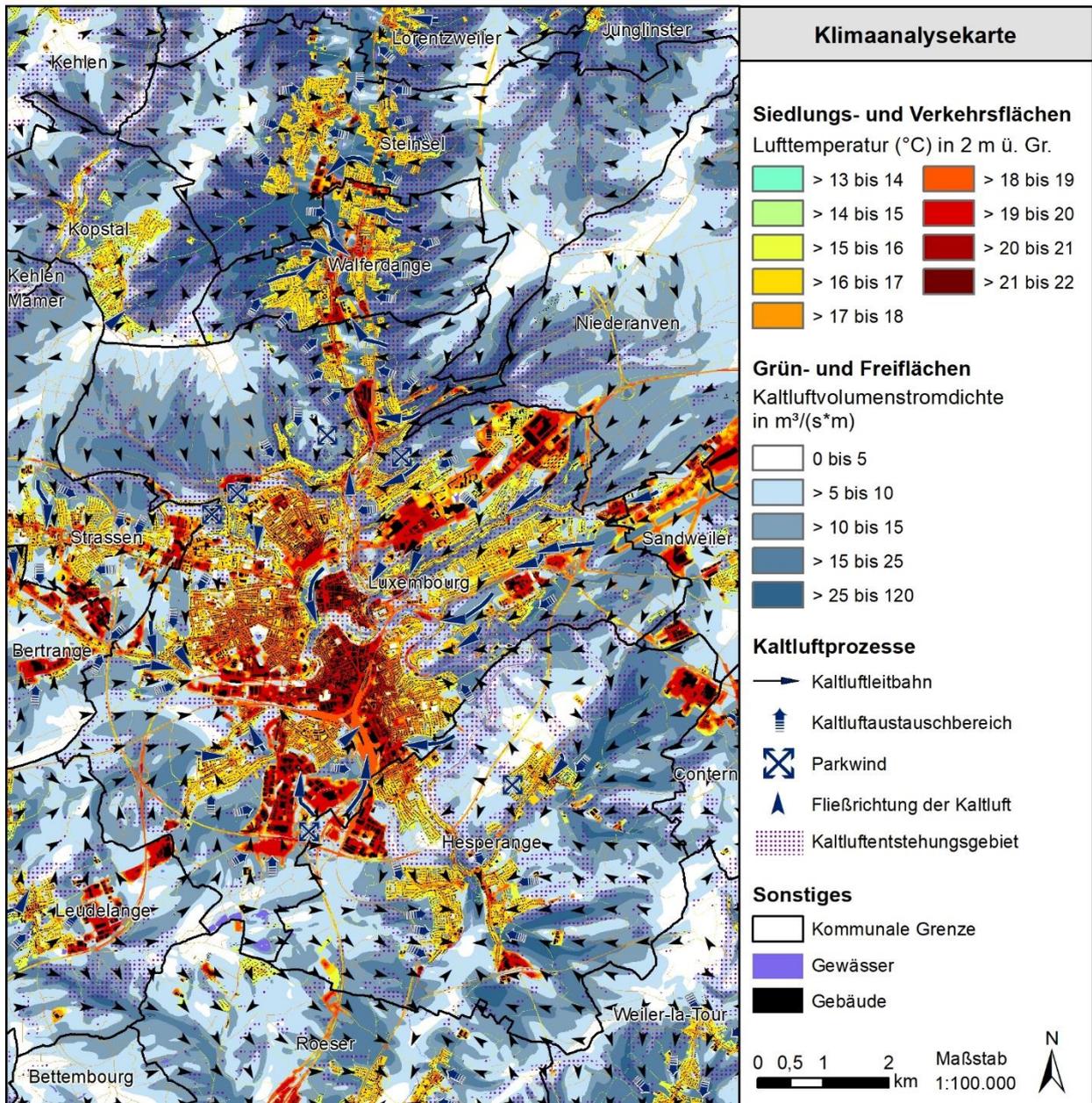


Abb. 17: Klimaanalysekarte in einem Ausschnitt des Landes (verkürzte Legende) (*Carte de l'analyse climatique pour une partie du pays (légende raccourcie)*)

Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 500 m aggregiert. Kleinräumige Windsysteme (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Straßenabschnitten) werden aus der Karte nicht ersichtlich; derartig detaillierte Informationen müssen aus den Rasterergebnissen auf 25 m Basis entnommen werden. Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, welche in Luxemburg eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen die Systeme von Kaltluftleitbahnen, Kaltluftaustauschbereichen und Parkwinden (Funktion: Kaltlufttransport in Richtung der Siedlung) sowie die Kaltluftentstehungsgebiete (Funktion: Kaltluftproduktion). Die drei erstgenannten Elemente wurden nur

für das Umfeld all derjenigen Siedlungsräume definiert, die eine Mindestgröße von 1 km² haben. Ab dieser Größe ist in Anlehnung an Mosimann et al. (1999) von einer Siedlung mit einem planungsrelevanten („Stadt-“)klima auszugehen.

Kaltluftleitbahnen sind lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander verbinden und einen elementaren Bestandteil des Luftaustausches darstellen. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Für das gesamte Land wurden insgesamt 166 verschiedene Kaltluftleitbahnen ausgewiesen, darunter 22 in der Stadt Luxemburg, 5 in Esch-sur-Alzette und 4 in Differdingen. Die Kaltluftleitbahnen sind durch eine bodennahe Strömungsgeschwindigkeit von meist über 0,3 m/s oder eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte von über 16 m³/(s*m) gekennzeichnet. Daneben verfügen sie über einen hohen Grünanteil, sodass sich die Luft während des Transportes nicht wesentlich erwärmt und ausreichend kalte Luft in die Stadt hineingetragen werden kann.

Neben den Kaltluftleitbahnen als linienhafte Strukturen gibt es auch **Kaltluftaustauschbereiche**, welche flächenhaft über unbebauten Bereichen, insbesondere an Hängen, auftreten und ebenfalls zum Siedlungsraum ausgerichtet sind. Mit Blick auf die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit und den Kaltluftvolumenstrom erfüllen sie die gleichen Kriterien wie die Kaltluftleitbahnen, sind aber in Bezug auf ihre Breite nicht durch angrenzende Strukturen (wie z.B. Gebäude oder Wälder) limitiert. In die Kategorie der Kaltluftaustauschbereiche fallen insgesamt 511 Flächen, darunter 21 in der Stadt Luxemburg, 10 in Esch-sur-Alzette und 17 in Differdingen.

In Luxemburg gibt es zudem eine Reihe von (inner-)städtischen Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in die bebaute Umgebung transportieren. Diese sogenannten **Parkwinde**, d.h. thermisch hervorgerufene Ausgleichsströmungen aus einer umbauten Grünfläche, treten auf größeren Grünflächen auf, die in eine deutlich wärmere Umgebung einbettet sind. Da die Parkwinde im Vergleich zu den Kaltluftleitbahnen und -austauschbereichen eher schwach sind, hängt die Reichweite dieser Ausgleichsströmungen auch stark von den Strömungshindernissen in der Umgebung ab. Breite Straßenzüge bzw. rauigkeitsarme Strukturen und eine strömungsparallele Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer Parkluft in den Siedlungsbereich. Anhand der modellierten Ergebnisse konnten 10 verschiedene Bereiche mit Parkwindensystemen identifiziert werden, davon 5 in der Stadt Luxemburg, 4 in Sanem und einer in Hesperingen. Die von den jeweiligen Grünflächen ausgehenden Winde strömen in nahezu fast alle Richtungen und belüften die umgebende Bebauung weitreichend. Die meisten dieser Grünflächen befinden sich zudem in Hügellage, sodass die sich einstellenden Flurwinde durch das Relief noch einmal verstärkt werden.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer besonders hohen Kaltluftproduktionsrate und speisen die verschiedenen Kaltluftströmungen bzw. reichen teilweise sogar über diese hinaus. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mindestens 19 m³/m²h Kaltluft produzieren. Die Grenze entspricht dem Mittelwert der Kaltluftproduktionsrate aller Luxemburger Grünflächen (bezogen auf die Situation um 4 Uhr nachts, 2 m ü. Gr.).

6. Planungshinweiskarte

Im Vergleich zur Klimaanalysekarte berücksichtigt die Planungshinweiskarte neben der Nachtsituation auch die Situation am Tag, wobei die Karte dennoch schwerpunktmäßig auf dem nächtlichen Zustand beruht. Dies liegt unter anderem daran, dass die meisten Klimaanpassungsmaßnahmen (vgl. Kap. 7) vor allem tagsüber ihre Wirkung entfalten und eine Abkühlung in der Nacht durch Maßnahmen nur begrenzt bzw. zum Teil auch gar nicht möglich ist. Des Weiteren sind die vorliegenden Ergebnisse in Bezug auf die PET um 14 Uhr (vgl. Kap. 4.3) mit gewissen Einschränkungen behaftet, da einzelne Gebäude und Bäume²¹ bei der hier verwendeten Rasterauflösung von 25 m nicht einzeln aufgelöst werden konnten. Hinzu kommt, dass sich die Planungshinweise für zukünftige Bauvorhaben vor allem aus der Nachtsituation ableiten lassen. Dies betrifft insbesondere die möglichst von Bebauung freizuhaltenen Bereiche des Kaltlufttransportes (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftaustauschbereiche, Parkwindssysteme) oder schützenswerte Kaltluftentstehungsgebiete. Bei der Tagsituation kommt es vielmehr darauf an, möglichst viele schattige Bereiche zu erhalten bzw. zu schaffen und wertvolle innerstädtische Grünflächen öffentlich zugänglich zu machen, damit sie tagsüber als Rückzugsort dienen können. Die klimaökologische Situation am Tag ist demnach leichter – auch ohne Kartenmaterial – zu verstehen, da hier das Strömungsgeschehen nicht so entscheidend ist wie in der Nacht.

Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Siedlungsraum (Wirkungsraum) sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008a, VDI 2014) und bezieht sich auf das gesamte Land. Ausgehend von ihren Bewertungen wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnene Abwägungsmaterial dar.

6.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer durchschnittlichen, autochthonen Wetterlage im Sommer. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage und einem bestimmten Temperaturniveau die Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

Für die Bewertung meteorologischer Größen bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie bspw. *Hoch* und *Niedrig* oder *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale bzw. regionale Wertenniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a).

Erstrebenswert wäre es zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine ***z-Transformation*** standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmit-

²¹ Diese beeinflussen maßgeblich die Verschattung und damit auch die PET um 14 Uhr.

tel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_i) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; Abb. 18).

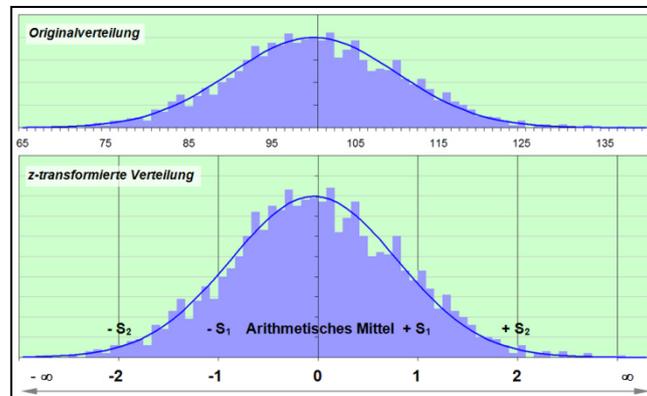


Abb. 18: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern (*Transformation en Z pour la standardisation de l'évaluation comparative des paramètres*)

6.2 BEWERTUNG VON SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

In der Nacht stellt der bewohnte Siedlungsraum den primären Wirkungsraum dar, da sich dort die meisten Menschen aufhalten. Gewerbegebiete und der Verkehrsraum stehen in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, doch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation geschildert.

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede in Luxemburg zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungs- und Verkehrsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 4).

Tab. 4: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung im Siedlungs- und Verkehrsraum mittels z-Transformation (*Classification de la charge thermique nocturne dans les zones de peuplement et de circulation à l'aide de la transformation en Z*)

Mittlerer z-Wert	Qualitative Einordnung	Lufttemperatur [°C] – Siedlungsflächen *	Lufttemperatur [°C] – Verkehrsflächen **
bis -1	1 = Sehr günstig	bis 15,6	bis 16,6
> -1 bis 0	2 = Günstig	> 15,6 bis 17	> 16,6 bis 17,7
> 0 bis 1	3 = Mittel	> 17 bis 18,3	> 17,7 bis 18,8
> 1 bis 2	4 = Ungünstig	> 18,3 bis 19,7	> 18,8 bis 19,9
> 2	5 = Sehr ungünstig	> 19,7	> 19,9

* Mittelwert = 16,96 °C; Standardabweichung = 1,38 °C | ** Mittelwert = 17,73 °C; Standardabweichung = 1,09 °C (Die Klassengrenzen für die Spalten 3 und 4 wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.)

Die Klasseneinteilung erfolgte nach fachgutachterlicher Einschätzung und orientiert sich an den statistischen Lagemaßen der Verteilungen. Neben den typischen z-Grenzen von -1, 0 und 1 (also dem Mittelwert 0 der einfachen Standardabweichung von -1 und 1) wurde für die Bewertungsstufe *Sehr ungünstig* eine z-Grenze von 2 festgelegt. Da Luxemburg aus einer Vielzahl von kleineren, meist kühleren Ortschaften besteht (die in Summe eine große Fläche einnehmen), ist die mittlere nächtliche Lufttemperatur im Wirkungsraum auf einem insgesamt eher niedrigen Niveau. Da aber in den größeren Städten und im Bereich von Gewerbeflächen durchaus höhere Temperaturen erreicht werden, ist eine 2-fache Standardabweichung als Intervallgrenze in diesem Falle angemessen. Zugleich entspricht der z-Wert von 2 einer Temperatur von ungefähr 20 °C („Tropennacht“). Im Gegensatz dazu repräsentieren die Klassen *Sehr günstig* und *Günstig* unterdurchschnittliche Temperaturen für die Luxemburger Siedlungs- und Verkehrsflächen. Da sich die thermischen Eigenschaften der Siedlungsflächen von den Verkehrsflächen unterscheiden, wurde die Statistik beider Räume separat betrachtet.

6.3 BEWERTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)

In den Planungshinweiskarten steht die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es im Hinblick auf planerische Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Gebiet. Der während einer autochthonen Sommernacht über Grünflächen entstehenden Kaltluft wird nur dann eine planerische Relevanz zugesprochen, wenn sie in Zusammenhang mit Siedlungsräumen steht, die von ihrer Ausgleichsleistung profitieren. Erfüllt eine Grünfläche dagegen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellt keinen Ausgleichsraum dar, ist ihre klimaökologische Bedeutung geringer einzustufen. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

Die Grünflächen wurden in einem teilautomatisierten Verfahren bewertet und in vier Stufen von *Gerin-*ge bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Für die Bewertung von Grünflächen rückt der nächtliche Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten Flächen, die die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen, Kaltluftaustauschbereiche und Parkwinde bilden, eine *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung*. Grün- und Freiflächen, die an diese Kernbereiche angrenzen, haben immer noch eine *Hohe bioklimatische Bedeutung*, da die Übergänge von Kern- zu Randbereichen in der Regel fließend sind. Zu den angrenzenden Flächen zählen nicht nur unmittelbar benachbarte Flächen, sondern auch Flächen in einer Entfernung von bis zu 20 Metern. Mit diesem Toleranzbereich können u.a. auch Grün- und Freiflächen berücksichtigt werden, die durch andere Nutzungen (z.B. Straßen, Wege) voneinander getrennt werden.

Zudem spielen die Kaltluftproduktivität und der Siedlungsbezug von Grünflächen eine Rolle. Gut durchströmte Grünflächen, die an thermisch belastete Siedlungsflächen angrenzen, können potentiell auch dann kalte Luftmassen heranzuführen, wenn sie z.B. nicht die Kriterien einer Kaltluftleitbahn erfüllen. Auch in diesem Fall gilt der Toleranzbereich von 20 Metern, sodass die Grün- und Freiflächen nicht unmittelbar an den Siedlungsraum angrenzen müssen. Zudem haben Flächen mit hoher Kaltluftproduktivität (Kaltluftentstehungsgebiete) das Potenzial, auch in größerer Entfernung zur Siedlung eine wichtige Klimafunktion bereitzustellen, indem sie die Leitbahnen oder bzw. wichtige Austauschbereiche mit Kaltluft speisen. Eine Grün- und Freifläche wird als Kaltluftentstehungsgebiet definiert, wenn mindestens 30 % der Fläche das Kriterium eines Kaltluftentstehungsgebietes (Kaltluftproduktionsrate $\geq 19 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$)

erfüllen²². Im Einzelnen wurde der in Abb. 19 dargestellte hierarchische Bewertungsschlüssel verwendet.

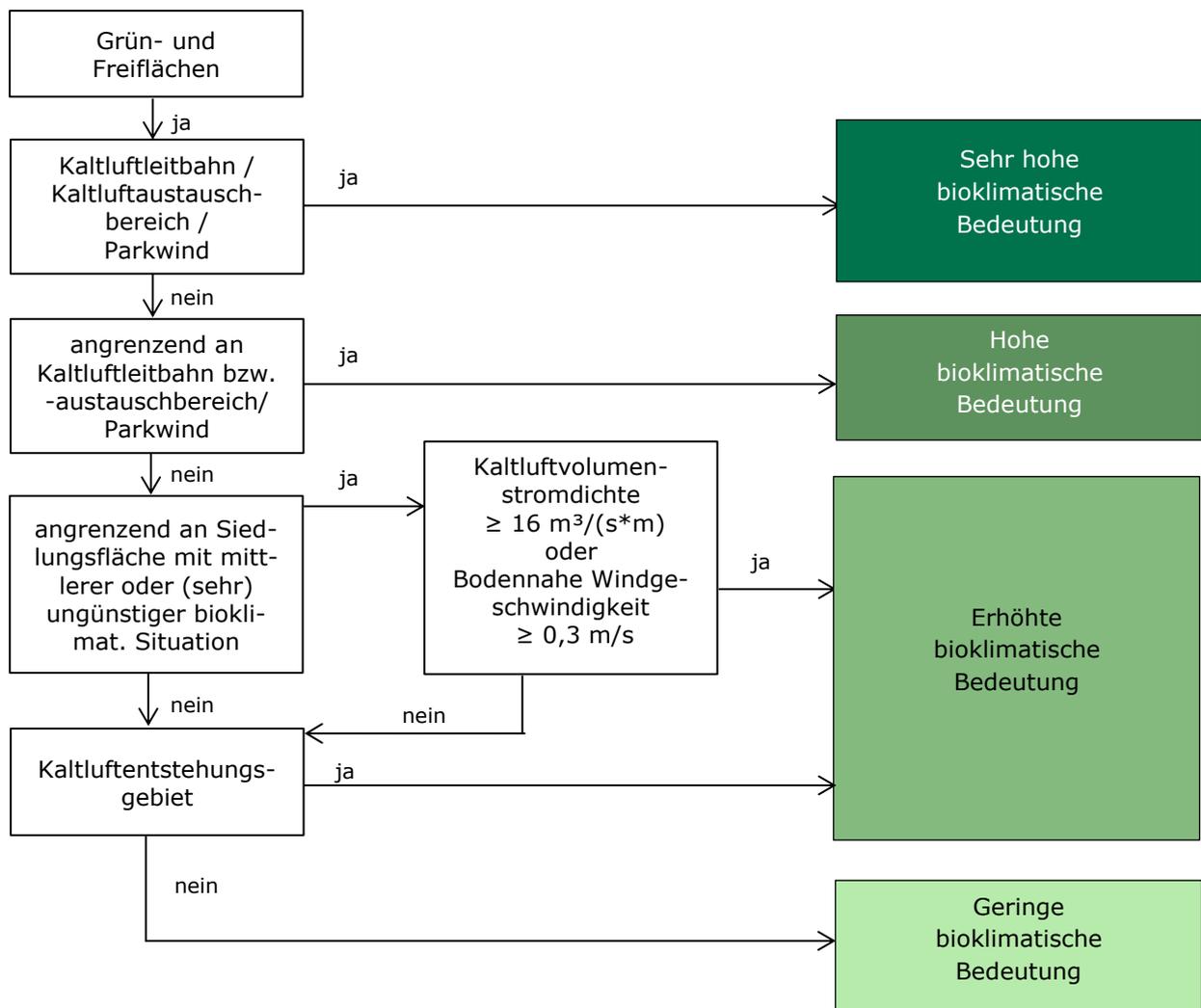


Abb. 19: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Planungshinweiskarte (*Schéma d'évaluation de l'importance des espaces verts dans la carte indicative de planification*)

²² Mit der violetten Punktsignatur wurden in der Klimaanalysekarte die Kaltluftentstehungsgebiete rasterbasiert (zellenweise für jede 25 m x 25 m große Rasterzelle) dargestellt, wogegen in der Bewertung der Grünflächen die Kaltluftentstehungsgebiete polygonbasiert (d.h. auf einzelne Flächen bezogen) betrachtet werden mussten.

SONDERFUNKTION VON ÖFFENTLICHEN GRÜNFLÄCHEN UND WÄLDERN

Wäldern kommt aufgrund ihrer Wirkung als Kühlinself am Tag auch dann eine besondere klimaökologische Bedeutung zu, wenn sie nicht Bestandteil eines nächtlichen Kaltluftluftsystems sind. Des Weiteren können öffentliche Grünflächen insbesondere tagsüber als wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen. Öffentlich zugängliche Grünflächen sollten nach Möglichkeit über eine hohe Mikroklimavielfalt und/oder einen hohen Baumanteil verfügen, damit sie ihre bioklimatische Gunstwirkung tagsüber bestmöglich entfalten. Um der Bedeutung von (potentiellen) öffentlichen Grünflächen und Wäldern für das Bioklima am Tag gerecht zu werden, wird die auf der Nachtsituation basierende 4-stufige Bewertung der Grün- und Freiflächen um eine Sonderfunktion (am Tag) ergänzt.

Unterschieden werden dabei öffentliche Grünflächen und Wälder mit hoher und sehr hoher Bedeutung. Werden diese zur aktiven Hitzeerholung tagsüber von der Bevölkerung aufgesucht und erfüllen zusätzlich mindestens eine erhöhte Bedeutung in der Nacht, weisen sie mit dieser Doppelfunktion²³ die höchste Schutzbedürftigkeit auf (sehr hohe Bedeutung). Alle übrigen öffentlichen Grünflächen und Wälder werden lediglich zur aktiven Hitzeerholung tagsüber von der Bevölkerung aufgesucht; ihre Bedeutung ist damit immer noch als „hoch“ einzustufen.

6.4 ERGEBNISSE PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Unterschiede zwischen den klimaökologischen Prozessräumen „Nord“ und „Süd“ (vgl. Kap. 4.4) werden nicht nur in den einzelnen Klimaparametern (Lufttemperatur Wind, usw.), sondern auch in der Planungshinweiskarte (Abb. 20, Abb. A6 im Anhang) deutlich.

So wird der Norden des Landes vorrangig von Grün- und Freiflächen mit erhöhter Bedeutung geprägt, während Ausgleichsräume mit (sehr) hoher oder geringer Bedeutung flächenmäßig einen deutlich kleineren Anteil ausmachen. Die erhöhte Bedeutung der Grün- und Freiflächen im Norden des Landes ist insbesondere auf ihre hohe Kaltluftproduktivität zurückzuführen. Aufgrund der geringen Siedlungsdichte²⁴ gibt es im nördlichen Bereich nur wenige Ausgleichsflächen mit einer hohen oder sehr hohen bioklimatischen Bedeutung. Da die bioklimatische Situation auf den Siedlungsflächen im Norden jedoch vorrangig (sehr) günstig ist, sind die meisten Siedlungsbereiche auch nicht auf die Klimafunktionen der umgebenden Ausgleichsräume angewiesen.

Der südliche und größere Teil des Landes gestaltet sich deutlich heterogener in Bezug auf die Bedeutung der Ausgleichsräume und die Situation im Wirkungsraum. Einerseits gibt eine Reihe von thermisch eher unbelasteten Gemeinden (z.B. Heffingen, Waldbillig, Kopstal und Weiler-la-Tour), andererseits finden sich in den Zentren größerer Städte (z.B. Luxemburg und Esch-sur-Alzette) und auf größeren Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. in Mondrange, Differdange) ausgedehnte Bereiche mit (sehr) ungünstiger bioklimatischer Situation. Bei den Ausgleichsräumen wechseln sich sehr bedeutende Grünflächen (z.B. im Tal der Alzette bei Steinsel und Walferdange) mit weniger bedeutenden Grünflächen (z.B. in Dalheim) ab.

Mit Blick auf die klimaökologische Situation am Tag sind eine Reihe von öffentlichen Grünflächen und Wäldern hervorzuheben, die der Bevölkerung als Rückzugsorte dienen und zum Abbau der Wärmebelas-

²³ Hier ist von einer Doppelfunktion die Rede, da eine (human)bioklimatische Funktion sowohl am Tag als auch in der Nacht erfüllt wird.

²⁴ Ausgleichsräume mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung haben per Definition immer einen räumlichen sowie strömungsrelevanten Bezug zu den Siedlungsflächen (vgl. Kaltluftleitbahnen und -austauschbereiche sowie Parkwinde in Kap. 5 in Zusammenhang mit dem Bewertungsschema von Grün- und Freiflächen in Kap. 6.3)

tung beitragen können (Sonderfunktion). Zu den besonders bedeutsamen Bereichen zählen insbesondere diejenigen öffentlichen Grünflächen und Wälder, welche sich in fußläufiger Erreichbarkeit zum Wohnort befinden. Das BBSR (2017) unterscheidet in Bezug auf die Grünerreichbarkeit zwei Entfernungen: Eine sehr gute fußläufige Erreichbarkeit wird bis zu einer Entfernung von 300 m Luftlinie definiert – diese entspricht einem Fußweg bis ca. 500 m. Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m/s (3,6 km/h) würde dies eine Wegstrecke von weniger als 10 Minuten bedeuten. Bis zu einer Entfernung von 700 m Luftlinie (ca. 1000 m Fußweg) wird eine Grünfläche als erreichbar angesehen und kann als Ausgleichsraum dienen, insb. wenn es sich um größere Grünflächen handelt. Somit geht vor allem von den innerstädtischen, öffentlichen Grünflächen und stadtnahen Wäldern (z.B. Bambösch) auch dann eine besondere Schutzbedürftigkeit aus, wenn diese in der Nacht keine relevanten Klimafunktionen bereitstellen.

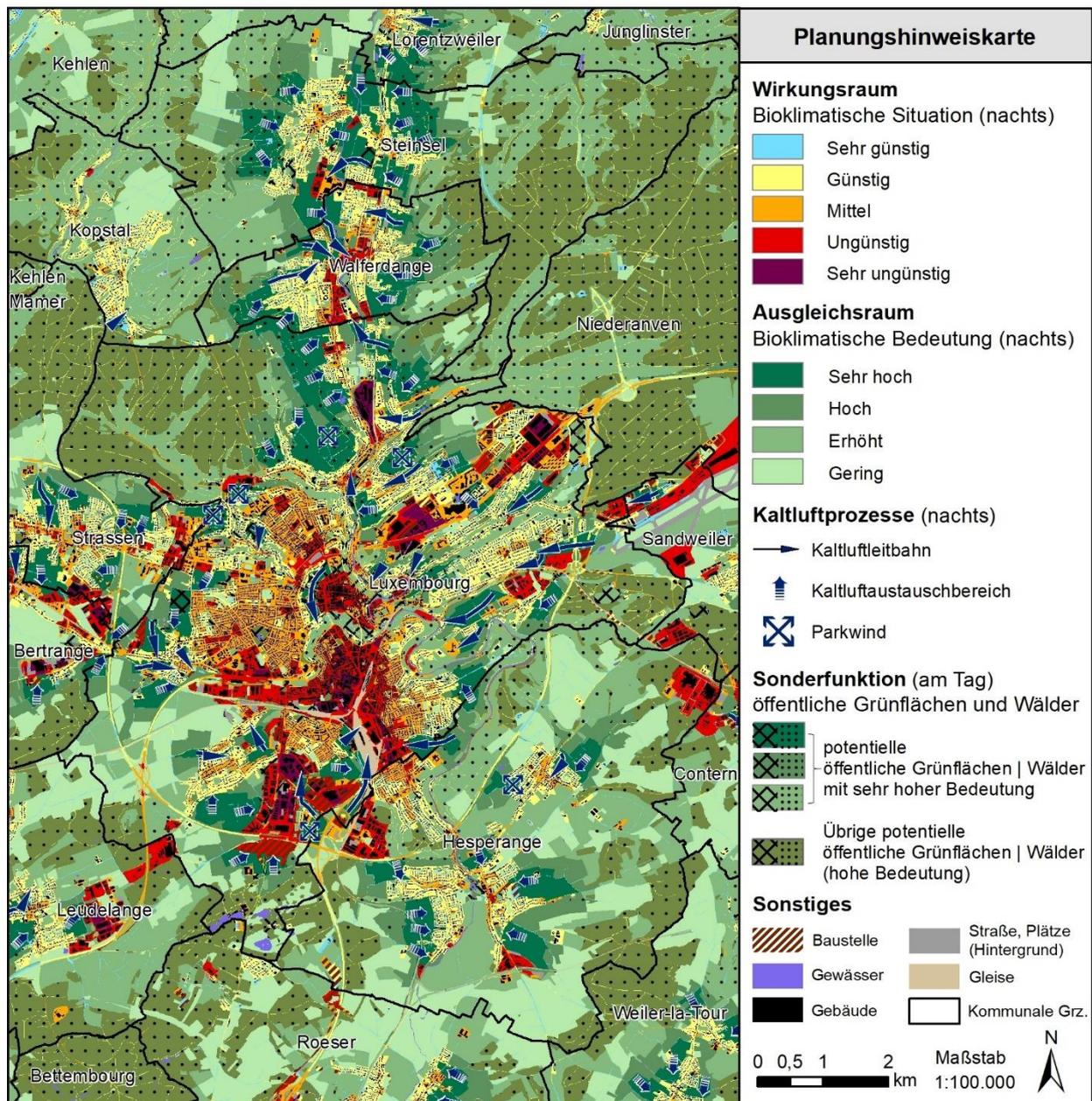


Abb. 20: Planungshinweiskarte in einem Ausschnitt des Landes (verkürzte Legende) (*Carte indicative de planification pour une partie du pays (légende raccourcie)*)

Die Bewertung von Grün- und Freiflächen als Ausgleichsräume bzw. der Belastungssituation in den Wirkungsräumen mündet in die Formulierung von Planungshinweisen. Ausgehend von ihren Bewertungen wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben, die in der Tab. 5 für den Wirkungsraum und in der Tab. 6 für den Ausgleichsraum zusammengefasst sind. Des Weiteren wurden auch die Flächenanteile jeder Bewertungsklasse ermittelt.

Tab. 5: Wirkungsraum: Flächenanteile in Luxemburg und dazugehörige Planungshinweise (*Espace d'action: parts de surface au Luxembourg et indications de planification associées*)

Bewertung des Wirkungsraumes	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlung	Verkehr	
1 = Sehr günstig	6,5	≈ 39	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
2 = Günstig	56,7	≈ 39	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
3 = Mittel	20,0	≈ 17	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
4 = Ungünstig	13,9	≈ 4,5	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
5 = Sehr ungünstig	2,9	≈ 0,5	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Unter anderem wird deutlich, dass fast zwei Drittel (63,2 %) der Luxemburger Siedlungsflächen und knapp vier Fünftel (78 %) der Luxemburger Verkehrsflächen günstige bis sehr günstige bioklimatische Bedingungen aufweisen (vgl. Tab. 5). Für einen Großteil des Wirkungsraumes sind demnach keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass sich die thermische Belastung infolge des Klimawandels oder durch Nutzungsintensivierungen (z.B. Nachverdichtungen) nicht wesentlich erhöht. Die Handlungsnotwendigkeit nimmt mit steigender bioklimatischer Belastung zu und ist auf den bioklimatisch sehr ungünstigen Wirkungsräumen (2,9 % der Siedlungsflächen und 0,5 % der Verkehrsflächen) prioritär. In Bezug auf die Prioritätensetzung und die Wahl der Klimaanpassungsmaßnahmen (vgl. Maßnahmenkatalog in Kap. 7) muss dabei zwischen bewohnten und unbewohnten Flächen unterschieden werden. Bei Wohnbauflächen und daran unmittelbar angrenzenden Verkehrsflächen ist auf ein angemessenes Bioklima sowohl am Tag als auch in der Nacht hinzuwirken. Bei den Industrie- und Gewerbeflächen sowie den übrigen Verkehrsflächen ist (aufgrund der mangelnden Betroffenheit in den Nachtstunden) vorzugsweise die klimaökologische Situation

am Tag zu beachten. Schatten spendende Maßnahmen, insbesondere durch Bäume, sind auf den unbebauten Flächen demnach wichtiger als Maßnahmen zur Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung.

Im gesamten Land erfüllen 8,3 % (vgl. Tab. 6) der Ausgleichsräume in der Nacht eine wichtige Funktion als Kaltluftlieferant für den Siedlungsraum und haben damit eine hohe oder sehr hohe Bedeutung. Bei 39,4 % aller Ausgleichsräume Luxemburgs handelt es sich um (potentielle) öffentliche Grünflächen und Wälder, welche tagsüber wichtige Klimafunktionen bereitstellen (Sonderfunktion am Tag). Auch diese Flächen sind, unabhängig von ihrer Bedeutung in der Nacht, besonders schützenswert und bedeutsam. Den höchsten Schutzstatus haben 18,6 % der Ausgleichsräume mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, da diese sowohl tagsüber als auch nachts die wichtigsten Ausgleichsflächen darstellen. Beispiele sind unter anderem der Stadtpark Luxemburg, der Friedhof Merl in Luxemburg sowie der Park Gaalgebierg in Esch-sur-Alzette.

Den sehr bedeutenden Ausgleichsräumen stehen Grün- und Freiflächen mit geringer Bedeutung in der Nacht gegenüber, welche einen Flächenanteil von 28,7 % ausmachen. Davon erfüllen etwas weniger als die Hälfte (45,3 %) dieser Flächen auch keine Sonderfunktion am Tag; auf alle Ausgleichsräume Luxemburgs bezogen sind es jedoch nur 13 % der Luxemburger Grün- und Freiflächen. Hierbei handelt es sich vorrangig um siedlungserne Ackerflächen, z.B. nördlich von Kayl oder östlich von Dudelange.

Tab. 6: Ausgleichsraum: Flächenanteile in Luxemburg und dazugehörige Planungshinweise (*Espace de compensation: parts de surface au Luxembourg et indications de planification associées*)

Bedeutung des Ausgleichsraums	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	insgesamt	davon mit Sonderfunktion am Tag	
1 = Sehr hoch	3,7	18,6	Es besteht eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Nutzungsintensivierungen. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen. Ausgleichsräume mit entsprechender Doppelfunktion ²⁵ weisen die höchste Schutzbedürftigkeit auf.
2 = Hoch	4,6	29,2	Es liegt eine hohe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Nutzungsintensivierungen vor. Die gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist zu erhalten und ggf. mithilfe von Grünverbindungen auszubauen. Ausgleichsräume mit entsprechender Doppelfunktion für Tag und Nacht weisen die höchste Schutzbedürftigkeit auf.
3 = Erhöht	63,0	34,4	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber baulichen Nutzungsintensivierungen. Ausgleichsräume mit entsprechender Doppelfunktion für Tag und Nacht weisen die höchste Schutzbedürftigkeit auf.
4 = Gering	28,7	54,7	Es besteht eine geringe Empfindlichkeit gegenüber baulichen Nutzungsintensivierungen. Ausgenommen sind Ausgleichsräume mit einer entsprechenden Sonderfunktion am Tag; von diesen Flächen geht immer noch eine hohe Schutzbedürftigkeit und Bedeutung aus.

Generell gilt, dass im Falle einer Nutzungsänderung (u.a. Bebauung oder Schaffung eines neuen Parks) auf der Fläche selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass öffentliche Grünflächen ihre Gunstwirkung am Tag nur entfalten können, wenn ein ausreichender Baum- bzw. Verschattungsanteil vorhanden ist.

²⁵ d.h. (human)bioklimatische Funktion für Tag und Nacht

7. Maßnahmenkatalog Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Luxemburg wurde ein Katalog aus 20 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert. Die Maßnahmen sind stickpunktartig in Tab. 7 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Außenraum²⁶
- Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum²⁷

Der Maßnahmenkatalog soll dazu dienen, bioklimatisch günstige Strukturen zu erhalten und bioklimatische belastende Strukturen zu optimieren. Er stützt sich allein auf bioklimatische Aspekte und ist mit anderen (z.B. ökologischen oder stadtplanerischen) Belangen abzuwägen.

Soweit möglich sollte der Grünanteil im Stadtgebiet erhöht werden, insbesondere in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung oder die Erhöhung der Biodiversität und haben Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

Neben ihres Potentials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tag und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisiertem Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen²⁸. Großkronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können.

²⁶ Bereich außerhalb von Gebäuden

²⁷ Gebäudeinnenraum; in diese Kategorie fallen insbesondere Maßnahmen, die direkt am oder im Gebäude umgesetzt werden

²⁸ z.B. haben Eichen, Weiden und Pappeln hohe Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen; besser geeignet sind daher u.a. Ahornarten und Eschen

nen. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden.

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tag. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinselseffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M20: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch eine geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente²⁹ oder energetische Sanierung³⁰ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

Bei **Nachverdichtung** im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

²⁹ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

³⁰ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.

Tab. 7: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für Luxemburg (Maßnahmenkatalog) (*Recommandations pour des mesures spécifiques à l'unité spatiale et efficaces pour le climat urbain au Luxembourg (catalogue de mesures)*)

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM				
M01	Innen-/Hinterhofbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Vegetation und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Innen- und Hinterhöfe
M02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	<ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
M03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	<ul style="list-style-type: none"> Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	<ul style="list-style-type: none"> Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
M05	Blau-grüne Verkehrsraumgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> Blaue oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum (blau-grün muss nicht zwangsläufig in Kombination erfolgen) Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) sowie Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber (bei Pflanzung neuer Bäume) und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
M06	Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	<ul style="list-style-type: none"> Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld
M07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	<ul style="list-style-type: none"> Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M08	Erhalt und Verbesserung der Kaltluftproduktion	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Kaltluftentstehungsgebieten und Aufwertung von Flächen mit geringerer Kaltluftproduktion Verbesserung des Bodenaufbaus (Bodenlockerung, Bodenauftrag, usw.), Bodenschutz, Etablierung von verdunstungsstarken Pflanzen, Bewässerungsmaßnahmen, Begrünung und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insbesondere nachts, aber auch tagsüber Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen
M09	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe rechts) 	<ul style="list-style-type: none"> Bedeutung für den Kaltfluthaushalt Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
M10	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	<ul style="list-style-type: none"> Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	<ul style="list-style-type: none"> Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	Gewässer, Grün- und Freiflächen

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
VERBESSERUNG DER NÄCHTLICHEN DURCHLÜFTUNG				
M11	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	<ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe
M12	Entdichtung (Rückbau)	<ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen sowie Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen
M13	Vermeidung von Austauschbarrieren	<ul style="list-style-type: none"> Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen 	<ul style="list-style-type: none"> Schutz des Luftaustauschsystems 	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	<ul style="list-style-type: none"> Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM				
M15	Dachbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich Synergien zum Niederschlagswassermanagement, Biodiversität und Klimaschutz 	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
M16	Fassadenbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas Synergien zur Luftreinhaltung und Biodiversität sowie zum Lärm- und Gebäudeschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
M17	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie 	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung tagsüber und nachts Verbesserung des Innenraumklimas Synergien zum Klimaschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand)
M18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	<ul style="list-style-type: none"> Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung 	<ul style="list-style-type: none"> In erster Linie Klimaschutzmaßnahme Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 	Gebäude (Bestand)
M19	Technische Gebäudekühlung	<ul style="list-style-type: none"> Möglichst ressourcenschonende Lösung: Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird Erdkältenutzung Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 	Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können
M20	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	<ul style="list-style-type: none"> Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume möglichst nicht nach Süden /zur warmen Straße ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)

HINWEISE ZUR WIRKSAMKEIT VON MAßNAHMEN

Zu den weitestgehend gesicherten Erkenntnissen gehört zu allererst die Feststellung, dass sich mit vielen der bekannten Maßnahmen (vertikale Gebäudebegrünungen, Albedoerhöhungen, Entsiegelungen, Stadtbäume) positive Effekte für den thermischen Komfort erzielen lassen. Abb. 21 verdeutlicht an einem Fallbeispiel aus dem Stadtentwicklungsplan Klima Berlin (SenSW 2010), dass sich die stärksten Wirkungen durch die kleinräumige Kombination von Maßnahmen ergeben. Der Grundsatz „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ scheint auch hier zu gelten. Die Abbildung verdeutlicht aber auch eine weitere Erkenntnis, die mit hinreichender Sicherheit übertragbar sein dürfte. Die klassischen Maßnahmen weisen insbesondere tagsüber eine signifikante Wirksamkeit auf, während sie in den Nachstunden kaum zur Abkühlung beitragen (z.B. Albedoerhöhung) oder sogar zu einer weiteren Erwärmung der Umgebung (z.B. Wasserflächen, Stadtbäume) beitragen können (vgl. auch Stadt Zürich 2020).

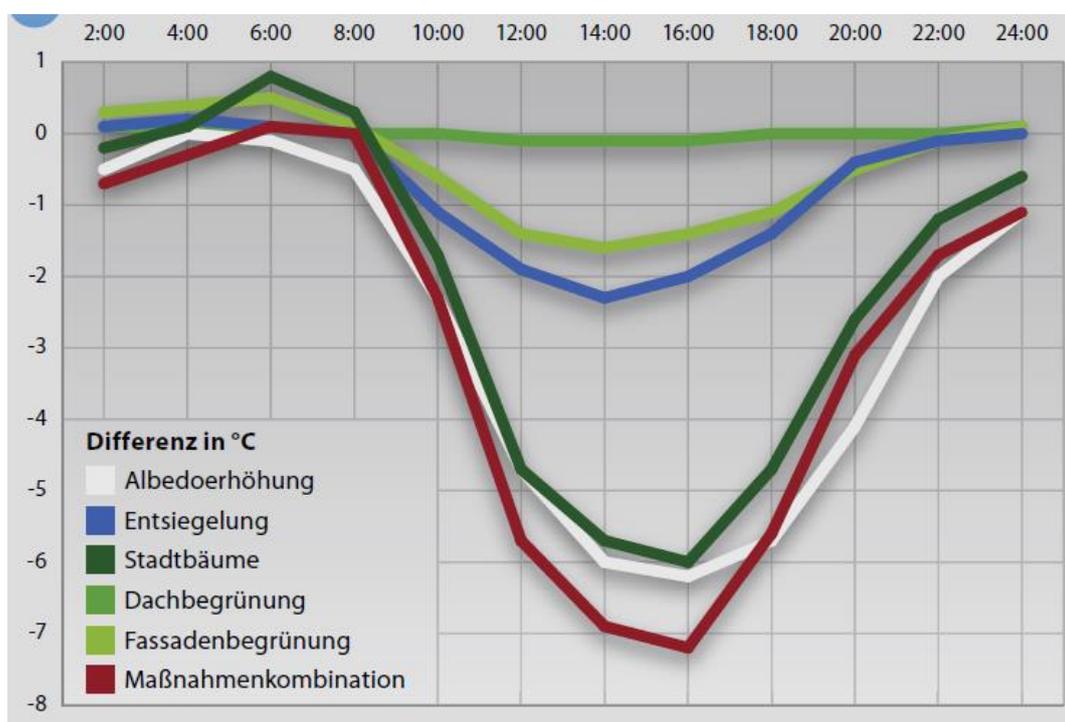


Abb. 21: Veränderungen durch Anpassungsmaßnahmen am Beispiel eines Tagesverlaufs der Außentemperatur in zwei Metern Höhe (*Changements dus aux mesures d'adaptation en utilisant l'exemple d'une variation diurne de la température extérieure à une hauteur de deux mètres*)

Da die nächtliche Abkühlung durch Maßnahmen im Außenraum³¹ nur bedingt möglich zu sein scheint (insbesondere aufgrund des Klimawandels sowie weiterer Verdichtung), kommt zwei Maßnahmenpaketen eine besondere Bedeutung zu: zum einen der Erhalt und die Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung des Stadtkörpers, zum anderen Maßnahmen an den Gebäuden selbst einschließlich ihrer unmittelbaren Kühlung. Der baulich-technischen Gebäudekühlung haftet dabei stets der Ruf der Umweltschädlichkeit an. Allerdings existieren bereits heute nachhaltige Lösungen oder befinden sich in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase, z.B. Kompressionskältemaschinen oder Ab- und Adsorptionskältemaschinen, adiabatische (Abluft-)Kühlung (UBA 2020). Auch die in der DIN 4108-2 zum sommerlichen Wärmeschutz subsummierten Maßnahmen (innovative Glastechniken, Außenjalousien, smarte Nachtlüftungssysteme) gehören in diesen hochwirksamen Maßnahmenkomplex.

³¹ Bereich außerhalb von Gebäuden

Einen besonderen Hinweis bedarf die – insbesondere extensive, meist aber auch intensive – Dachbegrünung. Die Dachbegrünung hat vielfältige positive Effekte, zum Beispiel die Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum und Synergien zum Niederschlagswassermanagement, zur Biodiversität und zum Klimaschutz und wurde daher als Maßnahme M15 auch in den Maßnahmenkatalog aufgenommen. Im Hinblick auf den thermischen Komfort im Außenraum (im Aufenthaltsbereich des Menschen, bis 2 m. ü. Gr.) existiert allerdings keine Untersuchung, die eine entsprechende Wirkung nachweisen konnte. Die Maßnahme ist schlichtweg zu weit entfernt vom zu betrachtenden Bodenniveau. Eine australische Studie (Coutts et al. 2014) empfiehlt daher, die blau-grünen Maßnahmen auf das Straßenniveau zu konzentrieren und die Dächer mit einer hohen Albedo zu versehen. Es sei hinzugefügt, dass auch hier mit flachen Gebäude <5m (z.B. Garagenhöfe, Bungalows) Ausnahmen existieren, von deren intensiven Gründächern in bestimmten Konstellationen auch eine positive Wirkung für den thermischen Komfort im Außenraum ausgehen kann (vgl. KURAS 2017).

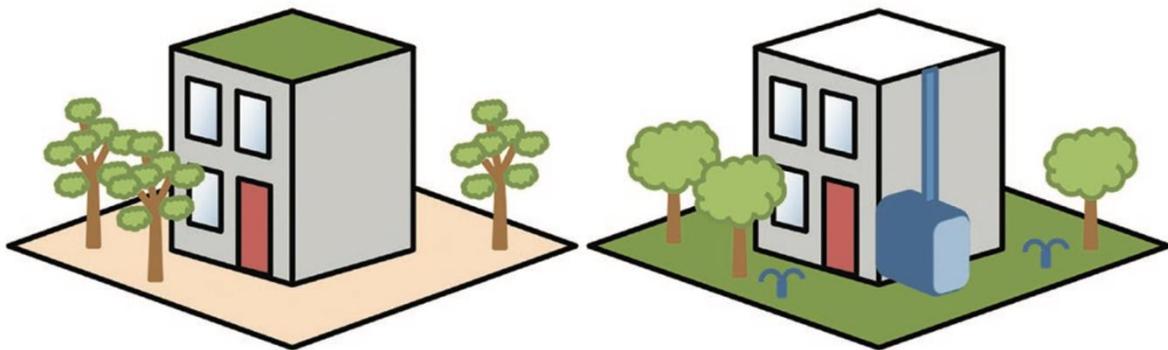


Figure 14: Human thermal comfort can be maximised by providing water at street level, rather than retaining on the rooftop

Abb. 22: Blau-grüne Straßenraumgestaltung ist bioklimatisch wirksamer als Dachbegrünung (Coutts et al. 2014)
(*L'aménagement bleu-vert de l'espace routier est plus efficace sur le plan bioclimatique que les toits végétalisés* (Coutts et al. 2014))

Quellenverzeichnis

- BBSR (2017) – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Coutts, A., M. Loughnan, N. Tapper, E. White, J. Thom, A. Broadbent and R. Harris (2014): Impacts of water sensitive urban design solutions on human thermal comfort. Green Cities and Microclimate - B3.1 -2-2014.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Interne Ausarbeitung, unveröffentlicht.
- DWD (2021a) – Deutscher Wetterdienst: Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrenindizesthermisch/gefuehltetemp.html>
- DWD (2021b) – Deutscher Wetterdienst: Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_warmeinseln/projekt_waermeinseln_node.html
- Flohn, H. (1954): Witterung und Klima in Mitteleuropa. 2. Auflage, Forschungen zur deutschen Landeskunde, 78 S., Hinzl Verlag Stuttgart.
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht-Schlaf-Index (Homepage). Online: https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php.de
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- Junk, J., A. Matzarakis, A. Ferrone and A. Krein (2014). Evidence of past and future changes in health-related meteorological variables across Luxembourg. Air Quality, Atmosphere & Health 7: 71-81.
- Junk, J., K. Goergen and A. Krein (2019): Future Heat Waves in Different European Capitals Based on Climate Change Indicators. International Journal of Environmental Research and Public Health 19: 13.
- Köppen, W. (1936): Das geographische System der Klimate. Berlin.
- KURAS – Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme (2017): KURAS-Leitfaden. Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. <http://kuras-projekt.de/downloads/erzeugnisse-regenwasserbewirtschaftung/>
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn.
- Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie-Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A. and H. Mayer (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. WHO Newsletter No. 18: 7-10.
- Matzarakis, A., J. Rammelberg and J. Junk (2013). Assessment of thermal bioclimate and tourism climate potential for central Europe—the example of Luxembourg. Theoretical and Applied Climatology 4: 193-202.

- Mayer, H., W. Beckröge und A. Matzarakis (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- MeteoLux (2020): Angefragte Klimadaten für die Station Flughafen Findel. <https://www.meteolux.lu>
- MeteoLux (2021): Normal- und Extremwerte. Online: <https://www.meteolux.lu/de/klima/normal-und-extremwerte/?lang=de>
- Mosimann, T., T. Frey und P. Trute (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- SenSW (2010) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen: Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- STATEC (2019): Luxemburg in Zahlen – 2019. Online: <https://statistiques.public.lu/catalogue-publications/luxembourg-en-chiffres/2019/luxemburg-zahlen.pdf>
- UBA (2016) – Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur. Online: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur
- UBA (2020) – Umweltbundesamt: Gebäudeklimatisierung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/gebäudeklimatisierung>
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.

Anhang

Abb. A1: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld in Luxemburg (*Champ de température nocturne près du sol au Luxembourg*) (DIN A3)

Abb. A2: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in Luxemburg (*Débit d'air froid nocturne au Luxembourg*) (DIN A3)

Abb. A3: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in Luxemburg (*Champ d'écoulement nocturne près du sol au Luxembourg*) (DIN A3)

Abb. A4: PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) am Tag in Luxemburg (*PET (température physiologique équivalente) de jour au Luxembourg*) (DIN A3)

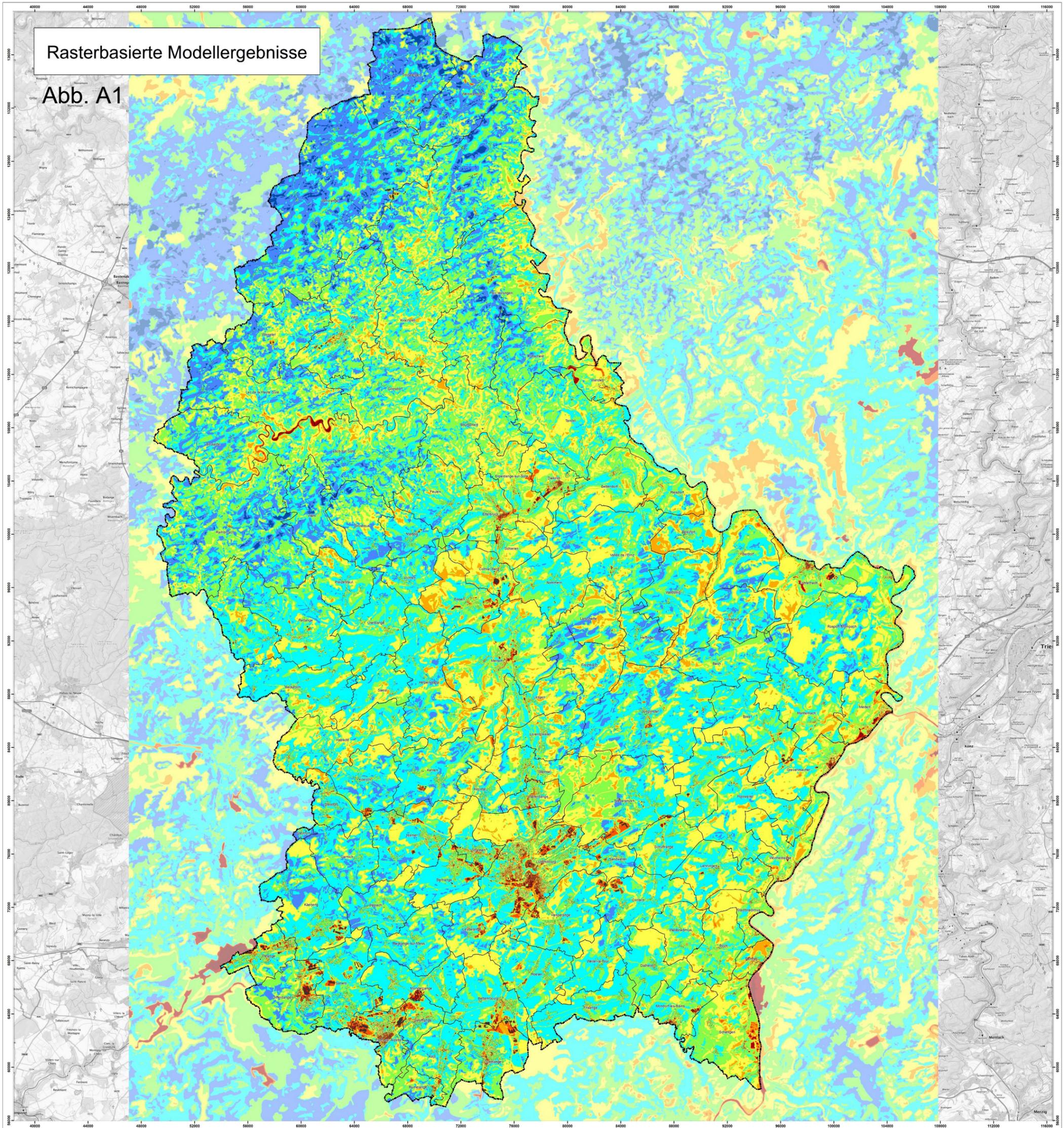
Abb. A5: Klimaanalysekarte Luxemburg (*Carte de l'analyse climatique de Luxembourg*) (DIN A3)

Abb. A6: Planungshinweiskarte Luxemburg (*Carte indicative de planification de Luxembourg*) (DIN A3)

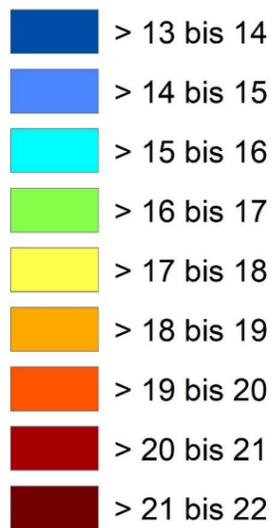
Hinweis: Die Abbildungen im Anhang wurden von ihrer Originalgröße (DIN A0) in das DIN A3-Format verkleinert. Der angegebene Kartenmaßstab von 1:95.000 bezieht sich auf das Originalformat DIN A0. Die Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte liegen als A0-Poster auch in französischer Sprache vor.

Rasterbasierte Modellergebnisse

Abb. A1



Lufttemperatur (°C) um 4 Uhr in 2 m ü. Grund



Sonstiges



PROJEKTTITEL
KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE

KARTENTHEMA
RASTERBASIERTE MODELLERGEBNISSE

DATENBASIS
STAND 2018

REVISIONSSTAND
REV00 (16.02.2021)

bearbeitet von
JOSEPHINE FÖRSTER

Projektleitung
PETER TRÜTE

interne Projektnummer
2_20_084

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
25 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCHTHON [0/8 BEWÖLKUNG]

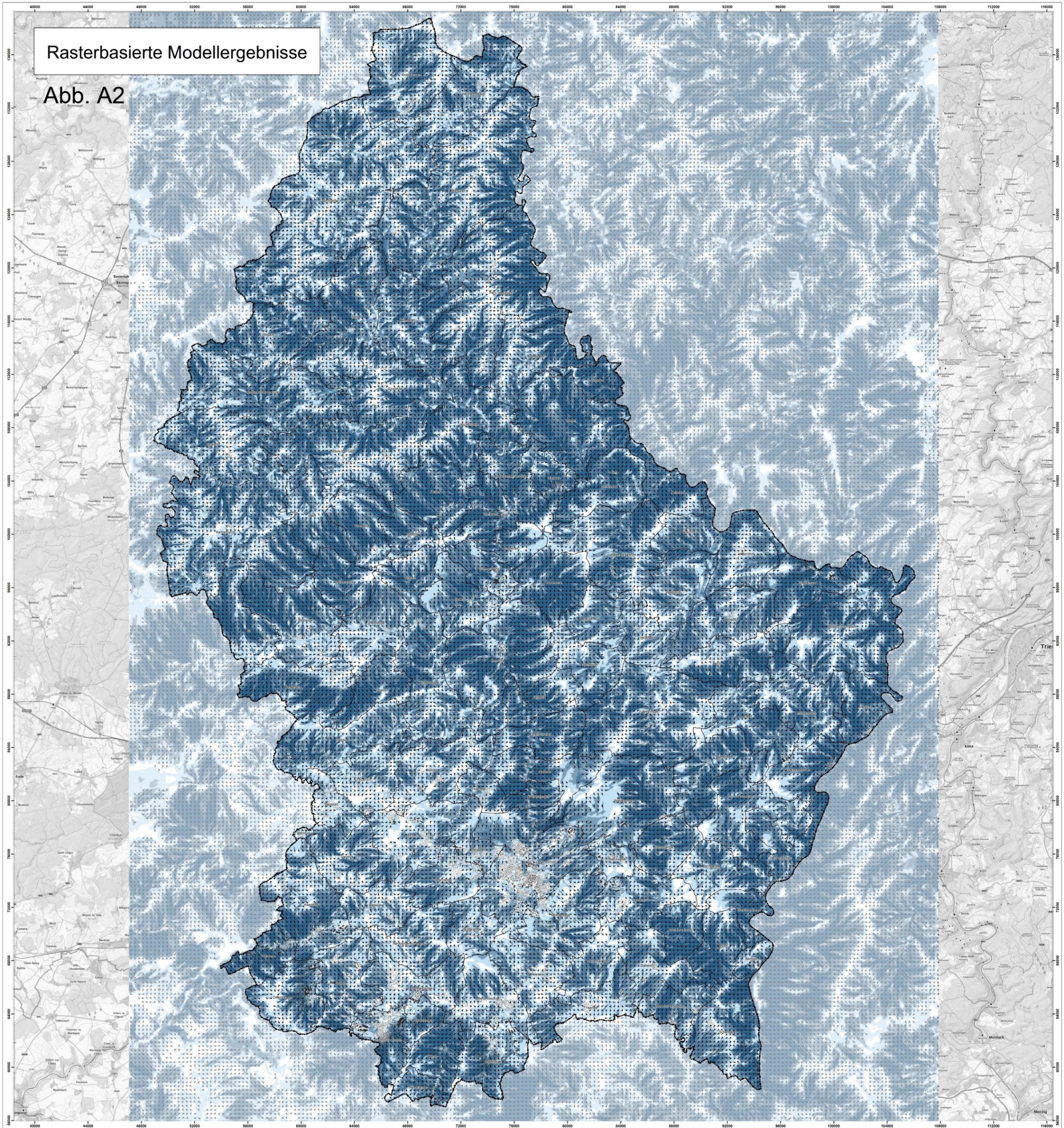
MASSSTAB: 1:95.000

KOORDINATENSYSTEM:
LUREF



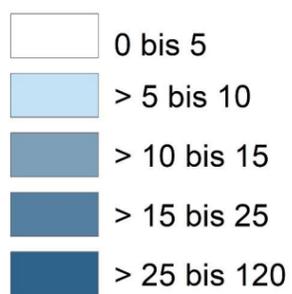
Rasterbasierte Modellergebnisse

Abb. A2



Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s \cdot m)$

um 4 Uhr



▲ Richtung der Kaltluftströmung (aggregiert auf 300 m)

Sonstiges



PROJEKTITEL
KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE

KARTENTHEMA
RASTERBASIERTE MODELLERGEBNISSE

DATENBASIS
STAND 2018

REVISIONSSTAND
REV00 (16.02.2021)

bearbeitet von
JOSEPHINE FÖRSTER

Projektleitung
PETER TRÜTE

interne Projektnummer
2_20_084

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
25 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCHTHON [0/8 BEWÖLKUNG]

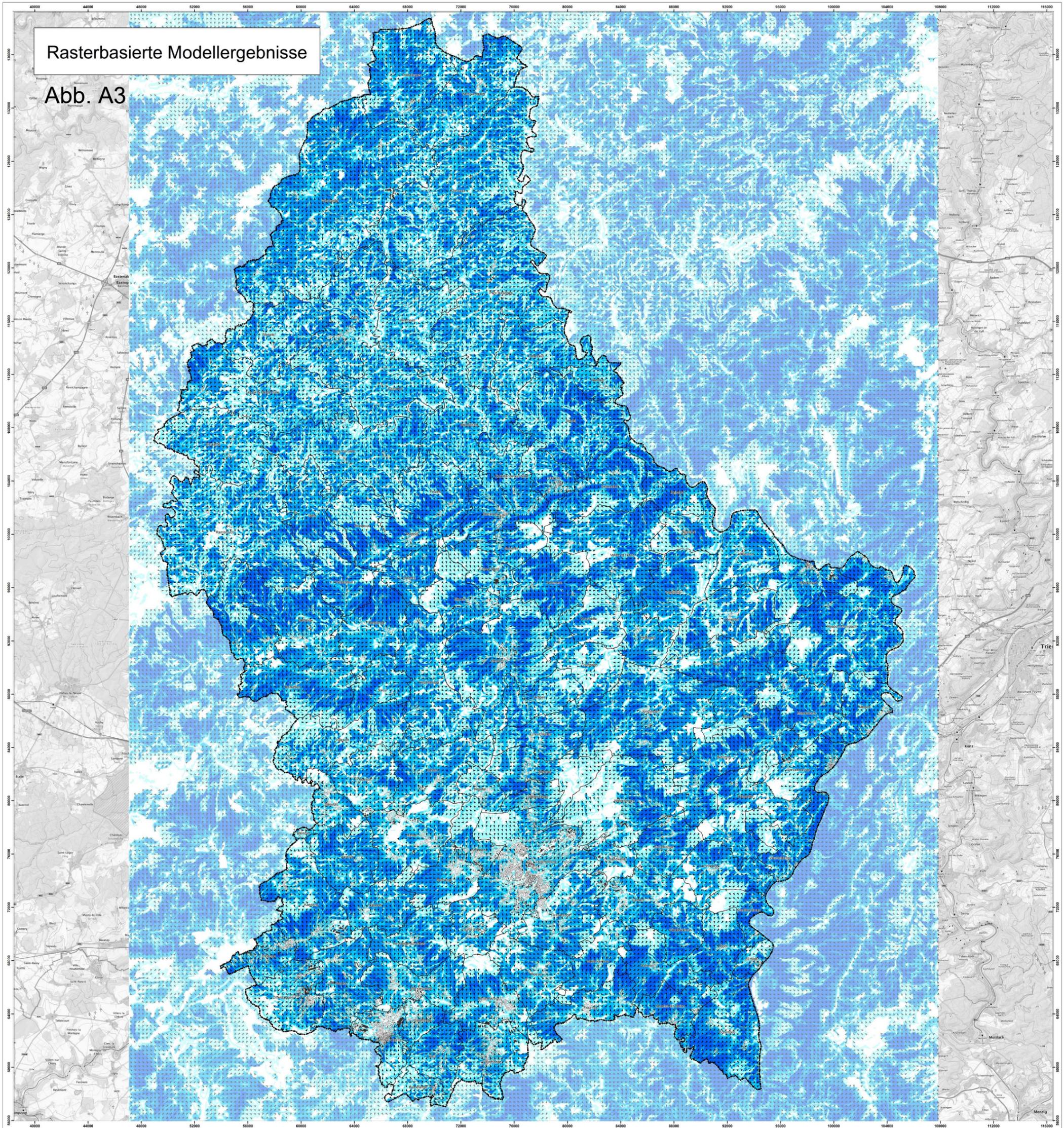
MASSSTAB: 1:95.000

KOORDINATENSYSTEM:
LUREF

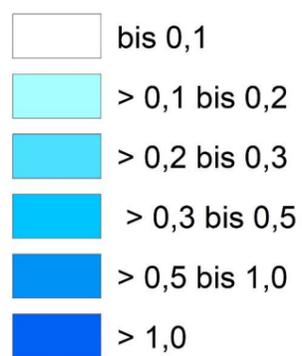


Rasterbasierte Modellergebnisse

Abb. A3



Windgeschwindigkeit (m/s) um 4 Uhr in 2 m ü. Grund



▲ Richtung der Kaltluftströmung
(aggregiert auf 300 m)

Sonstiges



PROJEKTTITEL
KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE

KARTENTHEMA
RASTERBASIERTE MODELLERGEBNISSE

DATENBASIS
STAND 2018

REVISIONSSTAND
REV00 (16.02.2021)

bearbeitet von
JOSEPHINE FÖRSTER

Projektleitung
PETER TRÜTE

interne Projektnummer
2_20_084

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
25 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCHTHON [0/8 BEWÖLKUNG]

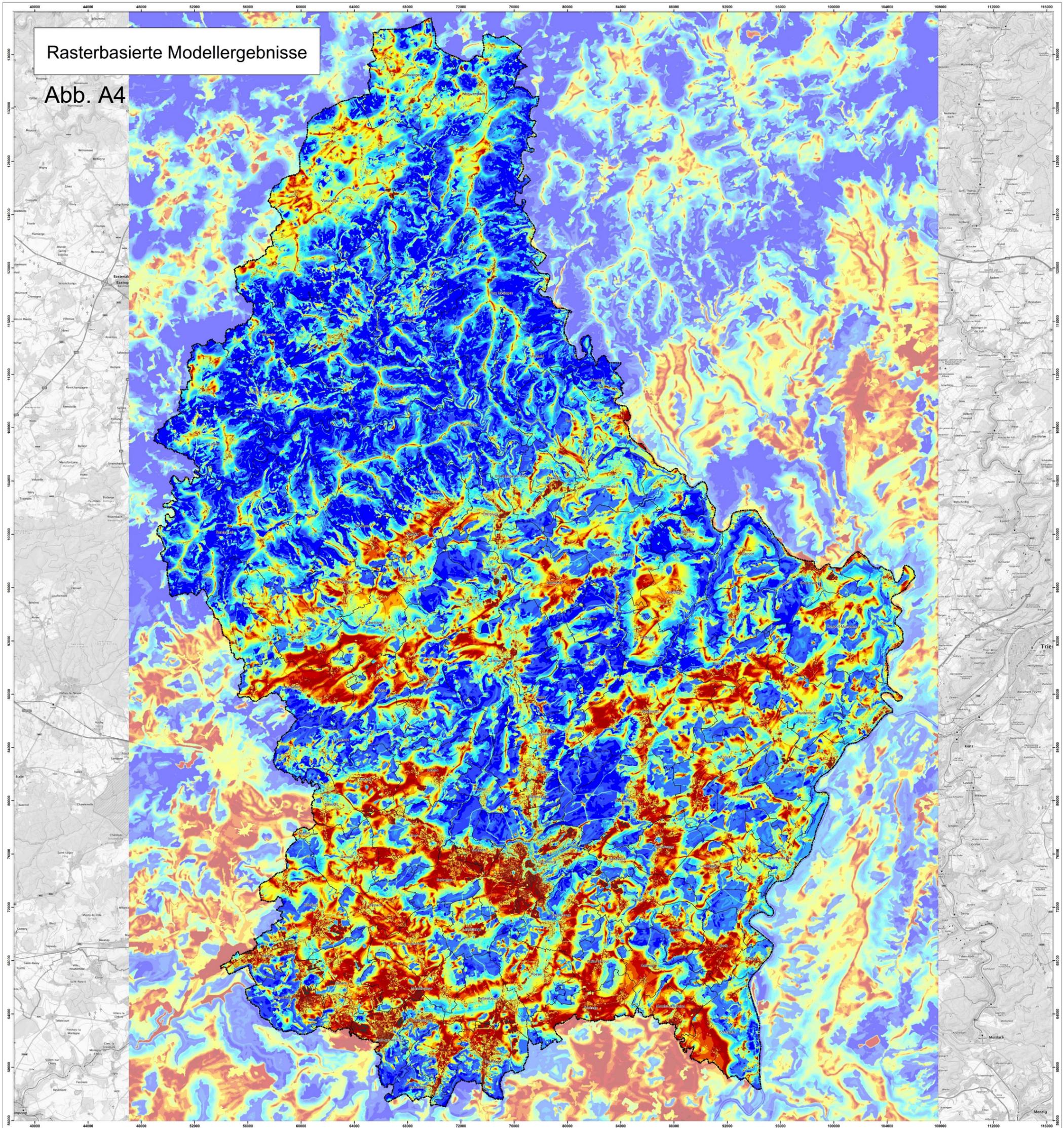
MASSSTAB: 1:95.000

KOORDINATENSYSTEM:
LUREF

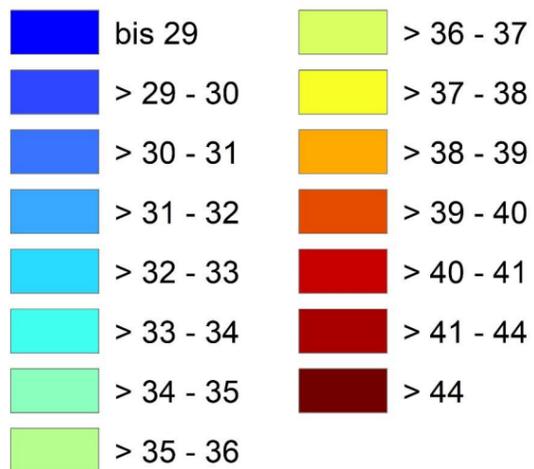


Rasterbasierte Modellergebnisse

Abb. A4



PET (°C) um 14 Uhr in 1,1 m ü. Grund



Sonstiges



PROJEKTITTEL
KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE

KARTENTHEMA
RASTERBASIERTE MODELLERGEBNISSE

DATENBASIS
STAND 2018

REVISIONSSTAND
REV00 (16.02.2021)

bearbeitet von
JOSEPHINE FÖRSTER

Projektleitung
PETER TRÜTE

interne Projektnummer
2_20_084

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
25 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCHTHON [0/8 BEWÖLKUNG]

MASSSTAB: 1:95.000

KOORDINATENSYSTEM:
LUREF



LUXEMBURG
INSTITUTE OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY



GEO-
NET

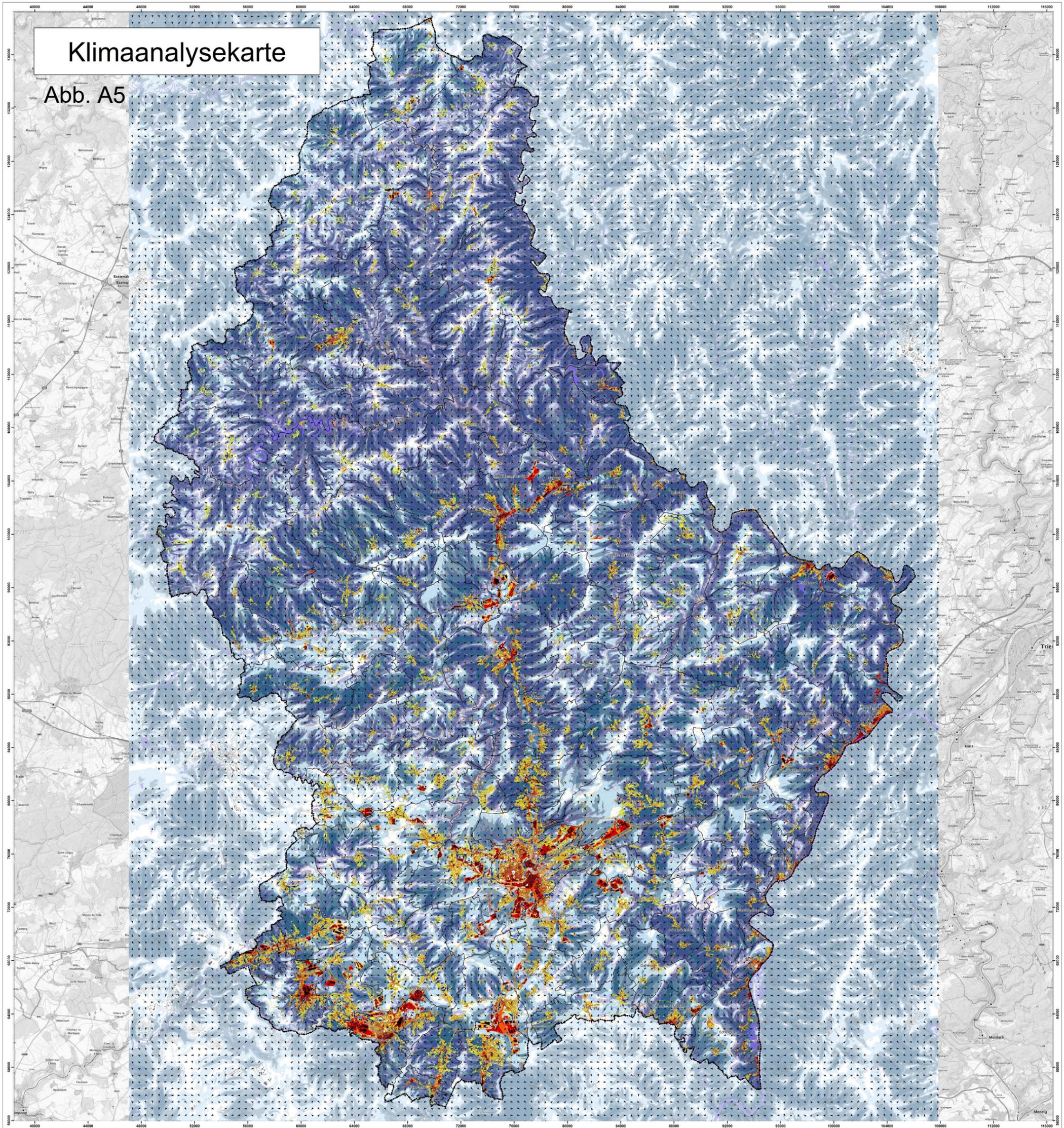
GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH
GROSSE PFÄHLSTR. 5A
30161 HANNOVER
+49 511 388 7200
INFO@GEO-NET.DE



In Auftrag von
LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable
Administration de l'Environnement

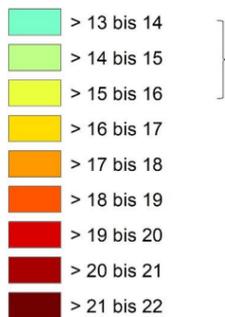
Klimaanalysekarte

Abb. A5



Siedlungs- und Verkehrsflächen

Lufttemperatur (°C)
in 2 m ü. Grund

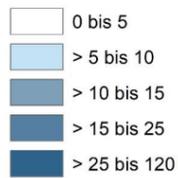


Wärmeinsel-
effekt

nicht vorhanden
 sehr gering
 gering
 mittel
 hoch
 sehr hoch
 extrem

Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s \cdot m)$



Kaltluftprozesse



Sonstiges



PROJEKTTITEL
 KLIMÄKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
 MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE
KARTENTHEMA
 KLIMAANALYSEKARTE (04:00 UHR NACHTSITUATION)
DATENBASIS
 STAND 2018
REVISIONSSTAND
 REV01 (15.02.2021)
 bearbeitet von
 JOSEPHINE FÖRSTER
 Projektleitung
 PETER TRÜTE
 Interne Projektnummer
 2_20_084
VERWENDETES MODELL
 FITNAH-3D
HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
 25 m
METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
 BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
 MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
 STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
 BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCHTHON [0/8 BEWÖLKUNG]

MASSSTAB: 1:95.000
 KOORDINATENSYSTEM:
 LUREF



Planungshinweiskarte

Abb. A6

PROJEKTITEL
KLIMAÖKOLOGISCHE SITUATION IN LUXEMBURG:
MODELLBASIERTE REGIONALE KLIMAANALYSE

KARTENTHEMA
PLANUNGSHINWEISKARTE

DATENBASIS
STAND 2018

REVISIONSSTAND
REV01 (15.02.2021)

bearbeitet von
JOSEPHINE FÖRSTER

Projektleitung
PETER TRÜTE

Interne Projektnummer
2_20_084

VERWENDETES MODELL
FITNAH-3D

HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG
25 m

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN
BASISDATUM: 21.06. [SONNENHÖCHSTAND]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 FOLGETAG
STARTTEMPERATUR: 21 °C IN 2 m HÖHE
BODENFEUCHTE: 60 %
WETTERLAGE: AUTOCTHON [0/8 BEWÜLKUNG]

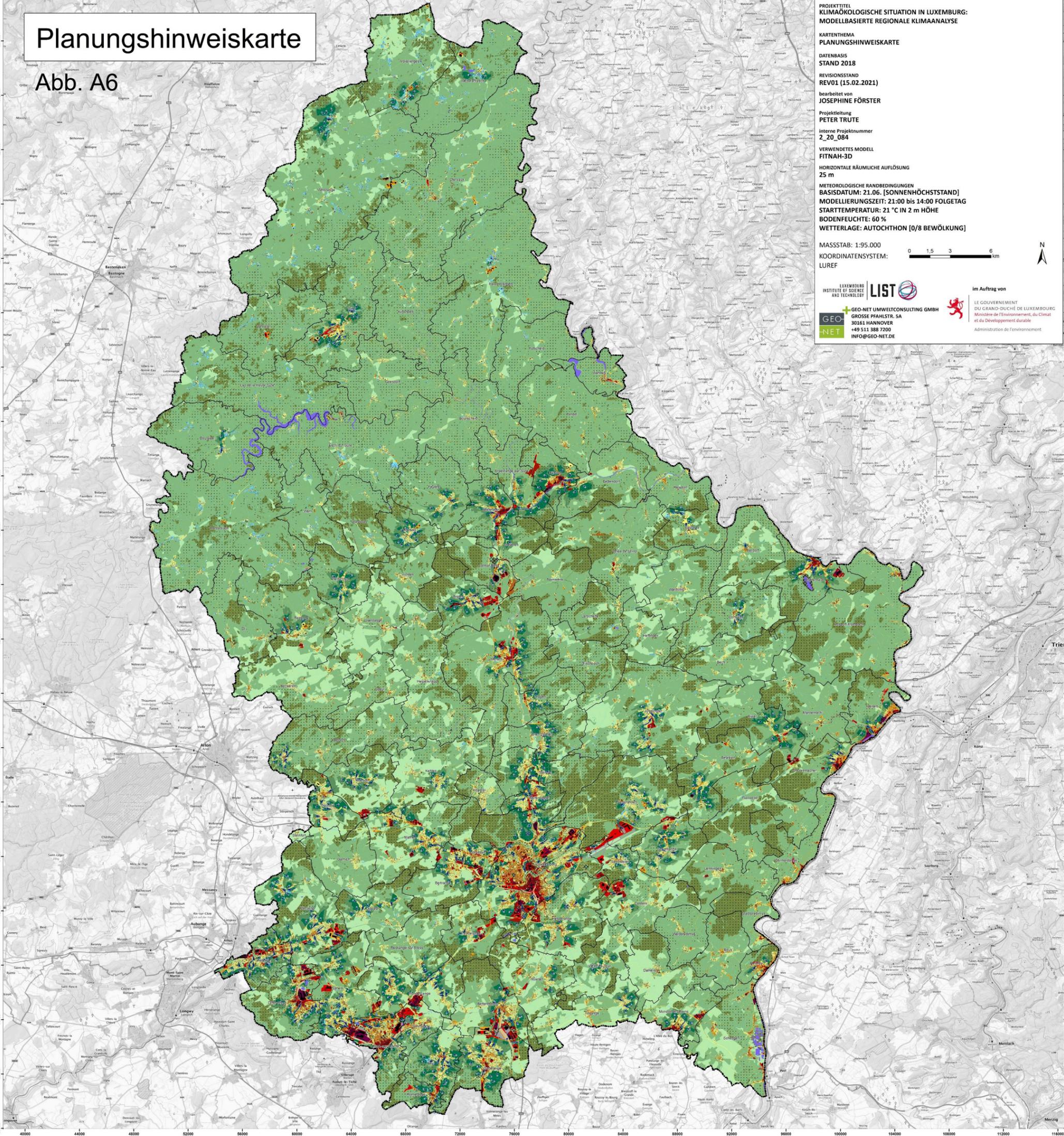
MASSSTAB: 1:95.000

KOORDINATENSYSTEM:
LUREF

0 1,5 3 6 km



im Auftrag von
LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable
Administration de l'Environnement



Wirkungsraum: Siedlungs- und Verkehrsflächen

Bewertungsgegenstand ist die sommerliche humanbioklimatische Belastungssituation im Wirkungsraum in der Nacht. Je höher die Belastung, desto höher ist das Handlungsbedarf für proaktive Anpassungsmaßnahmen.

- Sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- Günstige bioklimatische Situation**
Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entseigelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen

Bewertungsgegenstand ist die sommerliche kaltlufthaushaltliche Bedeutung der Grün- und Freiflächen für die Entlastung des Wirkungsraumes in der Nacht. Je höher die Bedeutung, desto höher ist die Empfindlichkeit der Flächen gegenüber - vor allem baulichen - Nutzungsintensivierungen und damit ihre Schutzbedürftigkeit.

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Flächen, die die Kernbereiche der wirkraumbezogenen Kaltluftleitbahnen, Kaltluftaustauschbereiche und Parkwinde bilden.
- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Flächen, die den Randbereich der wirkraumbezogenen Kaltluftleitbahnen, Kaltluftaustauschbereiche und Parkwinde darstellen.
- Erhöhte bioklimatische Bedeutung**
Gut durchlüftete Bereiche, die an belastete Siedlungsflächen (= mittlere bis sehr ungünstige bioklimatische Situation) angrenzen oder Flächen mit besonders hoher Kaltluftproduktivität.
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Alle übrigen Flächen des Ausgleichsraums.

Kaltluftprozesse

- Kaltluftleitbahn (linear)
- Kaltluftaustauschbereich (flächenhaft)
- Parkwind (flächenhaft in mehrere Richtungen)

Sonderfunktion von (potentiellen) öffentlichen Grünflächen und Wäldern

Wäldern kommt aufgrund ihrer Wirkung als Kühninsel am Tag auch dann eine besondere klimaökologische Bedeutung zu, wenn sie nicht Bestandteil eines nächtlichen Kaltluftsystems sind. Desweiteren können öffentliche Grünflächen insbesondere tagsüber als wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen. Öffentlich zugängliche Grünflächen sollten nach Möglichkeit über eine hohe Mikroklimavielfalt und/oder einen hohen Bauteil verfügen, damit sie ihre bioklimatische Gunstwirkung tagsüber bestmöglich entfalten.

- (potentielle) öffentliche Grünflächen | Wälder mit sehr hoher Bedeutung
- Wälder bzw. öffentliche Grünflächen, die zur aktiven Hitzeerholung tagsüber von der Bevölkerung aufgesucht werden können und zusätzlich mindestens eine erhöhte Bedeutung (entsprechende Stufe ist dem Grünton zu entnehmen) für das Kaltluftprozessgeschehen in der Nacht haben. Wälder und öffentliche Grünflächen mit dieser Doppelfunktion weisen die höchste Schutzbedürftigkeit auf.
- Übrige (potentielle) öffentliche Grünflächen | Wälder (hohe Bedeutung)
Wälder bzw. öffentliche Grünflächen, die zur aktiven Hitzeerholung tagsüber von der Bevölkerung aufgesucht werden können.

Sonstiges

- Baustelle
Änderungen der bioklimatischen Situation im Wirkungsraum oder der bioklimatischen Bedeutung im Ausgleichsraum sind auf der Fläche selbst und ihrem näheren Umfeld möglich.
- Gewässer
- Gebäude
- Straßen, Plätze (Hintergrund)
- Gleise
- Landesgrenze Luxemburg
- Kommunale Grenze