Stadtklimaanalyse Limburg an der Lahn

2026

Auftraggeberin

Magistrat der Kreisstadt Limburg a. d. Lahn

Stabsstelle Energie,
Klima- und Umweltschutz
Über der Lahn 1
65549 Limburg a. d. Lahn

Auftragnehmerin

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Tel: (0511) 388 72-00
www.geo-net.de

Gefördert durch

HESSEN
Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat

Klimaplan Hessen WIR ZEIGT WIRKUNG!

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ... 3
Zusammenfassung ... 5
1. Hintergrund und Anlass ... 7
2. Fachliche Grundlagen ... 8
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit ... 8
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse ... 12
2.3 Stadtklima und Lufthygiene ... 14
2.4 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik ... 16
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess ... 19
4. Klima und Klimawandel im Raum Limburg ... 21
4.1 Datengrundlage und Analysemethoden ... 21
4.2 Gegenwärtiges Klima ... 26
4.3 Autochthone Wetterlagen ... 31
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen ... 32
5. Analysemethoden ... 40
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D ... 40
5.2 Status quo und Szenarienentwicklung ... 44
5.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten ... 47
5.4 Rahmen- und Randbedingungen der Modellierung ... 51
5.5 Modellausgabegrößen ... 52
5.6 Qualitätssicherung ... 53
5.7 Unsicherheiten und Herausforderungen ... 53
6. Einzelparameterkarten ... 56
6.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion ... 56
6.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht ... 62
6.3 Wärmebelastung am Tag (PET) ... 65
6.4 Entwicklungsflächen ... 70
7. Klimaanalysekarten ... 80
8. Bewertungs- und Planungshinweiskarten ... 85
8.1 Grundlagen ... 85
8.2 Geometrische Basis ... 86
8.3 Bewertungskarten ... 87
8.4 Planungshinweiskarte Stadtklima ... 105

8.5 Maßnahmen und ihre Wirkungen 129
9. Fazit 147
Abbildungsverzeichnis 149
Tabellenverzeichnis 152
Quellenverzeichnis 153
Glossar 159
Anhang 162

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt eine der zentralen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit dar. Insbesondere Städte sind aufgrund ihrer dichten Bebauung, versiegelten Flächen und hohen Bevölkerungsdichte in besonderem Maße von den Folgen zunehmender Hitzebelastung, Trockenheit und Starkregenereignissen betroffen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung zukunftsfähiger, lebenswerter und klimaangepasster Städte zunehmend an Bedeutung.

Die Stadt Limburg an der Lahn beschäftigt sich seit vielen Jahren mit dem Klimaschutz. Doch ebenso wie der Klimaschutz ist auch die vorausschauende Klimaanpassung entscheidend, um den bereits eingetretenen und bevorstehenden Folgen des Klimawandels wirkungsvoll zu begegnen. Maßnahmen wie die Verbesserung der Durchlüftung, die Reduktion von Hitzespots oder der Erhalt und Ausbau innerstädtischer Grün- und Wasserflächen leisten dabei einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der urbanen Resilienz.

Die Stadt Limburg hat sich dazu entschlossen, eine modellgestützte Stadtklimaanalyse in Auftrag zu geben, bei der neben dem Status quo auch zwei Klimawandelszenarien untersucht werden sollen. Die hochaufgelösten Analysen dienen als klimafachliches Abwägungsmaterial. Ziel ist es, die Belange einer klimaangepassten Stadtentwicklung systematisch zu berücksichtigen und Planungsentscheidungen im Sinne einer nachhaltigen Stadtgestaltung zu unterstützen. Das Projekt wird gefördert mit Mitteln des Landes Hessen.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte, die in einem verwaltungsinternen, amts- und abteilungsübergreifenden Prozess (inklusive Workshops) unter Leitung der Stabsstelle Energie, Klima- und Umweltschutz entwickelt worden ist. Die Planungshinweiskarte macht zum einen eine abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in den Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Limburger Stadtbevölkerung sichtbar. Zum anderen weist das Kartenwerk aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) einen Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu.

Für die Modellrechnung des Status quo wurde eine umfassende Aufbereitung der Daten zu Landnutzung, Topografie und Strukturhöhen mit einer horizontalen Auflösung von 5 m durchgeführt. Als meteorologische Randbedingungen diente ein Sommertag mit idealisierter autochthoner Wetterlage ohne Bewölkung bei einer Bodenfeuchte von 60 %.

Ergänzend wurden zwei Klimawandelszenarien für die zukünftige Klimaperiode 2031 bis 2060 (Zieljahr 2045) modelliert. Diese berücksichtigen neben einer künftig zu erwartenden Stadtkulisse die Bandbreite zwischen einem optimistischen (schwacher Klimawandel) und einem pessimistischen (starker Klimawandel) Entwicklungspfad. Das optimistische Szenario geht – bezogen auf die Referenzperiode 1991 bis 2020 – von einer Temperaturzunahme um +0,7 K aus, während das pessimistische Szenario eine Erwärmung um +1,5 K sowie zusätzlich eine ausgeprägte Bodentrockenheit annimmt.

Die Modellergebnisse – jeweils für den Status quo sowie für beide Klimawandelszenarien – bilden die Grundlage für die Klimaanalysekarten, die Bewertungskarten und die darauf aufbauende Planungshinweiskarte.

Berücksichtigt wurden dabei sowohl die nächtlichen Verhältnisse (Ausgabezeitpunkt 04:00 Uhr; dargestellt sind bodennahe Lufttemperatur, Windfeld, Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftproduktionsrate) als auch die Tagsituation (Ausgabezeitpunkt 14:00 Uhr; dargestellt ist die Physiologisch Äquivalente Temperatur).

Sie beschreiben die wichtigsten klimaökologischen Prozesse der Stadt und sind in Planungsprozessen aus Klimasicht stets hinzuzuziehen. So weisen die großflächigen Agrargebiete im Außenbereich der Stadt Kaltluftentstehungsgebiete auf, deren dort gebildete Kaltluft durch Hangab- und Flurwinde hin zum (belasteten) Siedlungsraum transportiert wird. Während die Stadtteile Limburgs in den Außenbereichen weniger dicht bebaut sind und ein weites Eindringen dieser entlastenden Windsysteme erlauben, nimmt die Bebauungsdichte in Richtung der Innenstadt weiter zu, was zu einem strömungsabbremsenden Effekt führt. Insbesondere in den höher versiegelten Innenstadtbereichen ist daher die Verfügbarkeit eigener, mit flacher Vegetation bestandener Kaltluftproduktionsflächen geboten, ohne die Tagsituation zu vernachlässigen, bei welcher die Reduktion der Wärmebelastung insbesondere durch schattenspendende Bäume prioritär zu betrachten ist.

Ebenfalls Teil der Stadtklimaanalyse Limburgs ist ein umfangreicher Maßnahmenkatalog, welcher allgemeingültige Maßnahmen gegen die Überwärmung formuliert. Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte im Speziellen ist somit die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden (Flächennutzungsplan) erstmalig auch die verbindliche Bauleitplanung (Bebauungspläne) hinreichend gut bedient werden. Damit sind nun auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf von einem externen Gutachter möglich.

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamtstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit. Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Limburger Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist eine Fortschreibung der Stadtklimaanalyse unter Einbeziehung der zwischenzeitlichen baulichen und strukturellen Entwicklungen im Stadtgebiet in angemessenen Zeiträumen anzustreben.

1. Hintergrund und Anlass

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der städtebaulichen Entwicklungen haben die Themen Stadtklima bzw. Klimawandelanpassung in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen – sowohl hinsichtlich der Gesetzgebung (bspw. Novellierung des BauGB 2011 und des UVPG 2017) als auch im Bewusstsein der Bevölkerung. Um den Belangen des Stadtklimas planerisch adäquat begegnen zu können, sind aktuelle Informationen in geeigneter räumlicher Auflösung erforderlich. Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die die Wichtigkeit einer Stadtklimaanalyse verdeutlichen.

- Mit den Klima-Novellen des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 sowie des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) im Jahr 2017 haben sich die für die Stadtklimatologie relevanten Rechtsnormen noch deutlicher als zuvor für stadtklimatische Fragen mit Blick auf das Schutzgut der menschlichen Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse geöffnet. Mit diesen Entwicklungen sind die Ansprüche an die inhaltliche Aussagetiefe und räumliche Aussagegenauigkeit der benötigten Analysen noch einmal deutlich gestiegen.
- Die für Stadtklimaanalysen maßgebliche VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ ist heutzutage ein umweltmeteorologischer Standard, der zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde (VDI 3787, Blatt 1, 2015).
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeinseleffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenarienbasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmaßnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.
- Die Klimafolgenanpassung ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Das Hessische Klimagesetz (HKlimaG) schafft zudem die rechtliche Grundlage für die Erarbeitung einer Klimaanpassungsstrategie. Die Klimaanalyse ist ein wichtiges Element als Grundlage zur Berücksichtigung stadtklimatischer Aspekte in der räumlichen Planung.

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegende Klimaanalyse das übergeordnete Ziel einer Analyse des Stadtklimas von Limburg hinsichtlich Wärmeinsel und thermischem Komfort abgeleitet. In der Umsetzung bedeutet dies eine computermodellgestützte, analytische Fokussierung auf den städtischen Kaltlufthaushalt und die kleinräumige, sommerliche, thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der Planungshinweiskarte soll die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche, kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 2.1) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten (Kap. 2.3). Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die bodennahe atmosphärische Umgebung besitzt vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsummieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommen dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

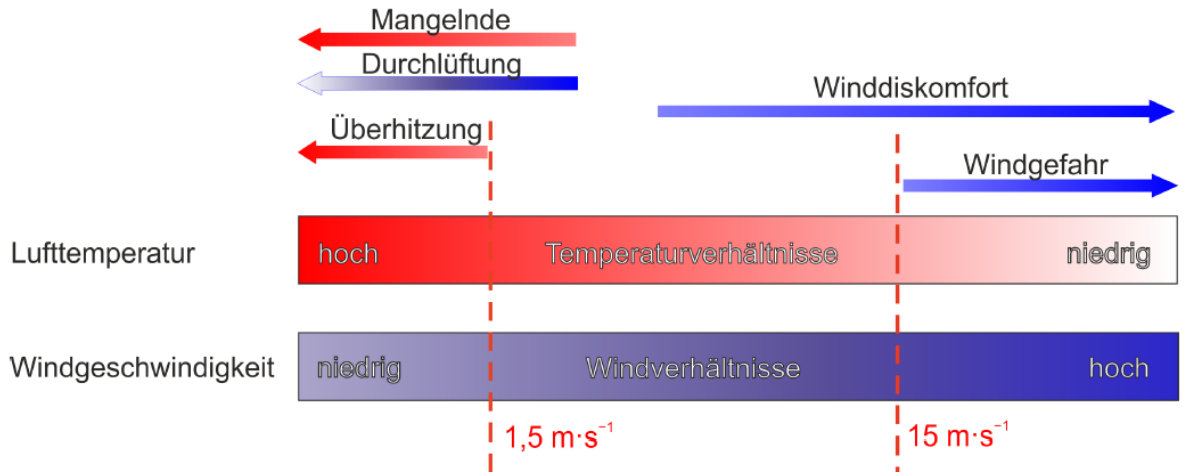


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach (VDI 3787, Blatt 4, 2020)).

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrößen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Mayer & Höppe, 1987). International wird darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) verwendet (Jendritzky et al., 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute weniger gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger, 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen.

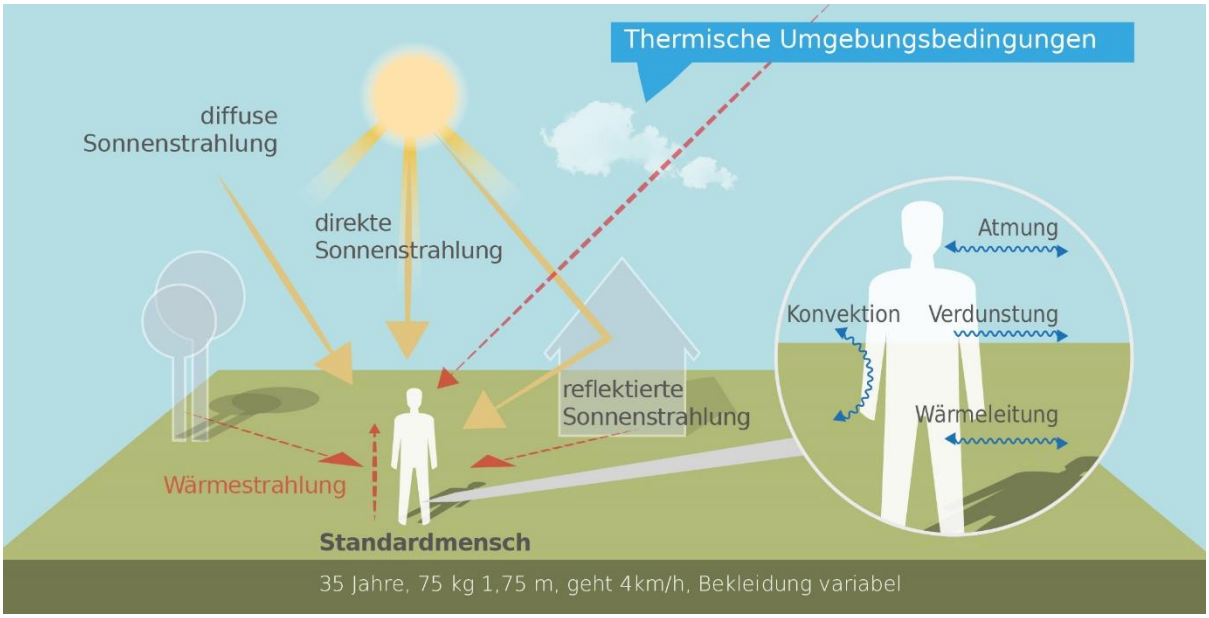


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD, 2022).

Da die Indizes hohe Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch simplere Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit T_{max}[1] ≥ 30°C) oder Tropennächte (mit T_{min} ≥ 20°) eine hohe Praxisrelevanz. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird zufolge der VDI 3787, Blatt 2, (2022) auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: „*Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist*“ ((VDI 3787, Blatt 2, 2022), S. 25). Die Arbeitsstättenverordnung (Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung), 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maxi-

[1] Tmax = Maximaltemperatur, Tmin = Minimumtemperatur

mal 26 °C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitsgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: „*Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.*“ ((VDI 3787, Blatt 2, 2022), S. 24). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA, 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürgerinnen und Bürger entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass, unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C; (Beckmann et al., 2021).

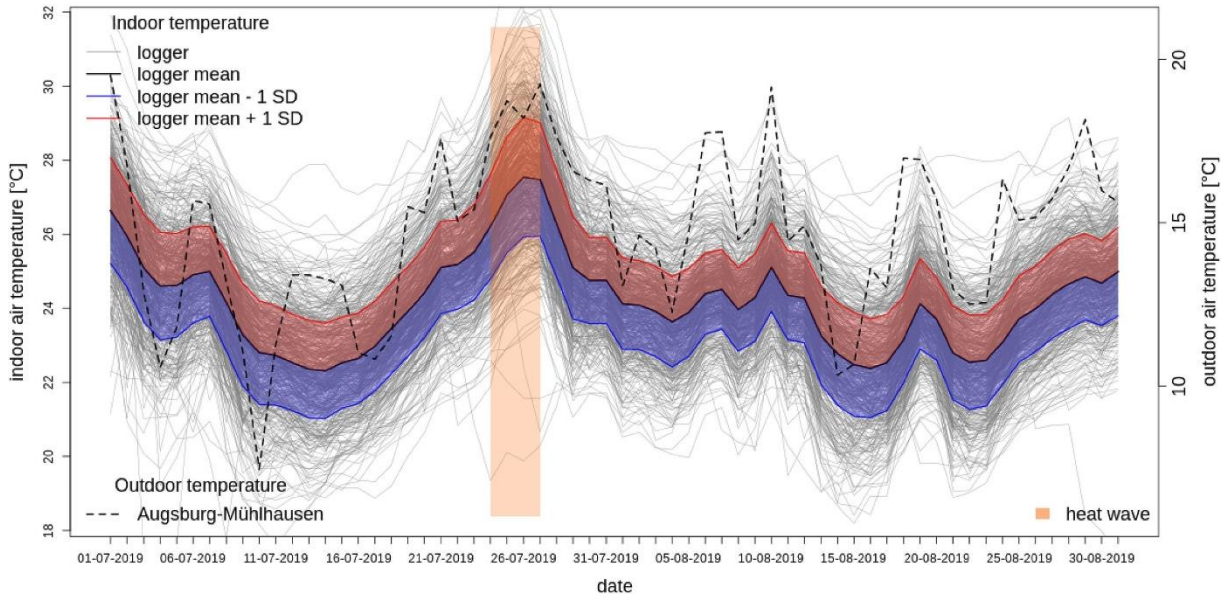


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann et al., 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem Schwellenwert von 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger, 2015). In einer amerikanischen Studie, die

die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlagen vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Cedeño Laurent et al., 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Sandholz & Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnen und Senioren angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt. Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein (Sandholz & Sett, 2019). Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4) (Sandholz & Sett, 2019).

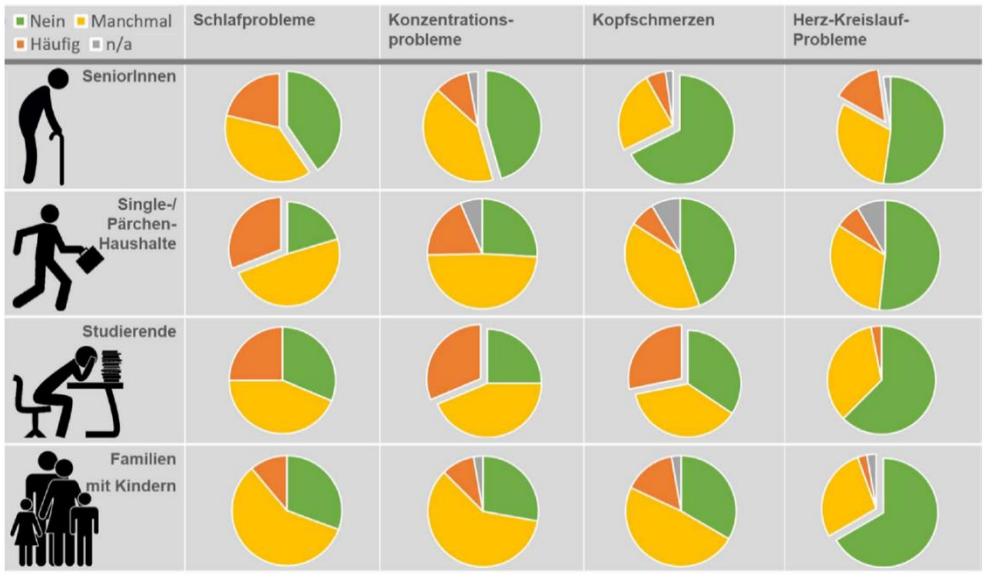


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019).

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden bei den Altersgruppen 75–84 und insbesondere 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von > 20 °C ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (Abbildung 5). Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (An Der Heiden et al., 2019). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – nach den aktuellen Modellierungen zur Temperaturentwicklung entspräche dies für Deutschland bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts einem Anstieg von über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze (UBA, 2021).

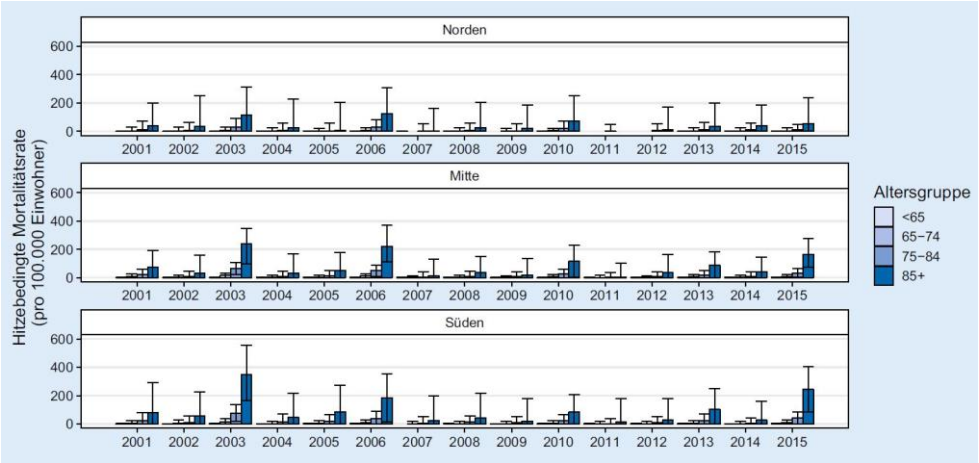


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 – 2015 (An Der Heiden et al., 2019).

2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Einströmen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (Gross, 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Für diese Analyse wird vorausgesetzt, dass die im Folgenden dargestellten relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge als grundlegendes Hintergrundwissen dienen. Sie werden daher überblicksartig dargestellt, um ein gemeinsames Grundverständnis zu schaffen. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindsysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindsysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (DWD, 2025b). Inversionen können durch großräumige Advektion[2] von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.

[2] Advektion = Horizontale Heranführung von Luftmassen

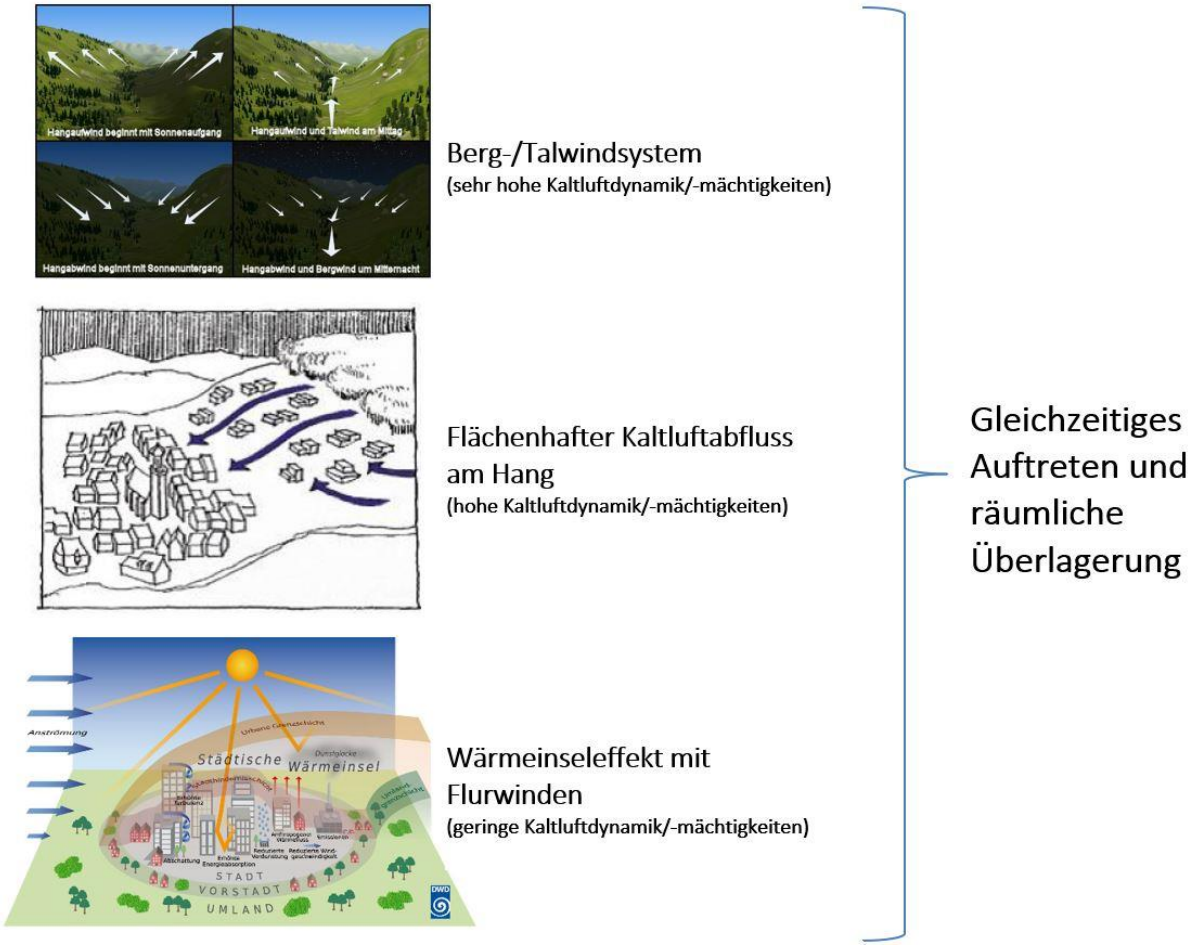


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al., 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, 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. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem[3] Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem"). 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 kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss

[3] Konvektion = Vertikaler Luftaustausch

dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse. Dabei bezeichnet Kaltluft eine Luftmasse mit geringerer Temperatur als die umgebende Luft, wodurch sie dichter und schwerer ist.

Während Flurwindsysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orthographisch bedingte Kaltluftabflüsse[4] von Hängen und insbesondere Berg-Talwindsystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2m/s sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindsystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Vorgaben zur Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, existieren bisher nicht (VDI 3787, Blatt 5, 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative physikalische Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen ermöglichte bauliche Veränderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Dasselbe gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig sein wird und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beitragen wird. Die Fachdisziplin wird vor der Aufgabe stehen, Auswerteverfahren so weiterzuentwickeln, dass die künftig wärmere, klimawandelbedingt weniger wirksame Kaltluft in ihrer Bedeutung für die nächtliche Wärmebelastung adäquat berücksichtigt wird. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMA UND LUFTHYGIENE

Insbesondere in der Stadt beeinflusst neben dem Klima auch der Umweltfaktor Luftgüte maßgeblich die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse ihrer Bewohnerinnen und Bewohner. Städte sind Zentren menschlicher Aktivitäten, durch die täglich große Schadstoffmengen in die Atmosphäre emittiert werden. Gleichzeitig fördert die raumstrukturelle Form der Verdichtung und die damit einhergehende Charakteristik der städtischen Strömungsverhältnisse eine Anreicherung dieser Schadstoffe im Siedlungsraum. Da die Luftqualität und die klimatischen Sonderbedingungen der Städte häufig eng miteinander in Zusammenhang stehen, und sowohl klimatische als auch lufthygienische Aspekte durch den Menschen beeinflussbar sind, empfiehlt es sich, bei der planungsrelevanten Analyse des Stadtklimas immer auch die Lufthygiene zu berücksichtigen.

Ein überwiegender Anteil der Luftschadstoffe im städtischen Umfeld wird durch den Straßenverkehr freigesetzt. Anders als bei industriellen Quellen und Kleinfeuerungsanlagen werden die straßenverkehrsbedingten Emissionen in geringen Höhen und in direkter Nähe zum Schutzgut (menschliche Gesundheit) emittiert. Als

[4] durch Hangneigung ausgelöste Kaltluftabflüsse

Folge davon treten insbesondere an Straßen mit hohen Verkehrsströmen und unmittelbar angrenzender Wohnbebauung hohe Immissionsbelastungen mit Grenzwertüberschreitungen auf. Diese Zusammenhänge betonen die besondere Relevanz der Berücksichtigung des Straßenverkehrs als Schadstoffquelle in stadtklimatischen Untersuchungen.

Kleinfeuerungs- und Industrieanlagen bewirken zusammen in der Regel etwa ein Drittel der relevanten Luftschadstoff-Emissionen. Aufgrund der Quellhöhe können sich die industriebedingten Abgase und in gewissen Grenzen auch die Emissionen der Gebäudeheizungen mit der freien Luftströmung relativ schnell verteilen, sodass ihr Verursacheranteil an der Immissionskonzentration im Bereich von Belastungsschwerpunkten meist geringer ist als ihr Anteil an der Emission. Weitere bedeutende Quellen insbesondere für Feinstaub sind die Landwirtschaft und der Güterumschlag.

Luftschadstoffe bei austauscharmen Wetterlagen

Für das Ziel, die lufthygienische Belastung so gering wie möglich zu halten, stellen austauscharme Wetterlagen ein besonderes Problem dar. Die Durchmischung der Luft ist während solcher Wetterlagen mehr oder weniger stark eingeschränkt, was wegen der vielfach auftretenden Inversionen hauptsächlich für die vertikale, aufgrund des schwachen Windes aber auch für die horizontale Richtung gilt. Halten austauscharme Wetterlagen, insbesondere im Herbst und Winter, über längere Zeit an, können sich Schadstoffe in Bodennähe anreichern und die Immissionsgrenzwerte überschreiten.

Eine spezielle Situation ergibt sich während der durch Kaltluftbildung und Ausgleichsströmungen beeinflussten Nachtstunden. Die Kaltluft kann sich dabei positiv oder negativ auf die lufthygienische Situation auswirken: Zunächst einmal bildet die vom Boden her abkühlende Luft eine stabile vertikale Schichtung aus, die mit einer geringen turbulenten Diffusion und einer eingeschränkten Verdünnung von bodennah emittierten Luftschadstoffen einhergeht. Dieser Effekt kann noch deutlich verstärkt werden, wenn die Schadstoffe innerhalb von stagnierenden Kaltluftschichten freigesetzt werden. Ist die kaltluftproduzierende Fläche hingegen frei von Emittenten, weist die Kaltluft die Qualität der Grundbelastung auf und kann als Frischluftstrom zu einer Verbesserung der Luftqualität in höher belasteten Räumen beitragen. Führt der Strömungsweg der Kaltluft allerdings über Emissionsquellen hinweg in die Siedlungsräume hinein, werden die Luftbeimengungen in mitunter quellferne Flächen transportiert und verursachen dort, insbesondere in Stau-Bereichen, eine signifikante Erhöhung der Luftschadstoffbelastung.

Die im Rahmen der Stadtklimaanalyse vorgenommene lufthygienische Untersuchung einer austauscharmen Wetterlage wird mit dem Modell FITNAH durchgeführt. Als Indikator für die Luftgüte bei austauscharmen Wetterlagen wird die Ausbreitung der Luftschadstoffkomponenten Stickstoffoxid (NOx) im Strömungsfeld der Kaltluft bzw. die daraus resultierende momentane Immissionskonzentration verwendet. Die Ausgangswerte hierfür liefern die Berechnungen der Emissionsmengen auf der Basis des Verkehrsaufkommens.

2.4 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrundeliegenden Methoden und Instrumente unterlagen seither allerdings einer stetigen Fortentwicklung, die durch die Aktivitäten zur Klimafolgenanpassung insbesondere seit den 2010er Jahren stark an Dynamik und Qualität gewonnen hat. Anders als beispielsweise beim lufthygienischen Wirkungskomplex oder der Lärmbelastung gibt es für die thermische Belastung bisher noch keine normative Regelung zu Richt- oder gar Grenzwerten. Als Konsequenz daraus ist die Definition, welches Belastungs-/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z.B. verbindliche Bebauungsplanung, Stadtsanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2008): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Die in VDI 3787 Bl. 1 beschriebene **Klimaanalysekarte** (Zusammenfassung der wesentlichen Analyseergebnisse für die Nachtsituation) wird als Zwischenprodukt und die **Planungshinweiskarte** (klimaökologische Bewertung von Flächen) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse verstanden. Auf die Methodik und Inhalte der Karten wird in den entsprechenden Kapiteln näher eingegangen (Kap. 7 und Kap. 8).

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System[5], das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert (DGNB, 2020). Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

[5] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: https://www.dgnb-system.de)

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung", des „Klimatopansatzes" (bisweilen auch 2D-GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung" (Abbildung 7) (HLNUG, 2022). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der jedoch keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analysenverfahren den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder flächenhaft und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Aus diesen Ergebnissen können in der Nachbearbeitung ("postprocessing") stadtklimatisch relevante Kenngrößen in ihrer quantitativen Ausprägung abgeleitet werden (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes). Numerische Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, Planungsvarianten und Maßnahmen in ihrer Wirkung quantitativ zu analysieren und auf diese Weise einen validen Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von (raum-)planerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Maßstabsebenen leisten zu können.

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalysemethode leisten?	• Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastung- und Ausgleichsräumen	• Klimaeigenschaften der Fläche • Qualitative Einschätzung der Fläche als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft	• Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	• Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/ Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten.	• Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/ Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten.	• Mittlere/ große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen
Erforderliche Daten	• Versiegelungsgrad, z.B. über Luftbildanalyse oder andere • Bebauungsstruktur-/typ	• Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z.B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung)	• Höhendaten, z.B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
	• Flächennutzung	• Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z.B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart	• Nutzungsdaten, z.B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierungen, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/ -höhe, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z.B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalysemethode?	• Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich	• Klimatope • Klimaanalysekarte	• Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntagen (Gegenwart und Zukunft), Analyse zu Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten

Abbildung 7: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (verändert nach HLNUG 2022, 18)

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt. Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch dem Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

Für die Durchführung der Stadtklimaanalyse von Limburg wurde das Modell FITNAH-3D angewandt, welches der Kategorie 2 (RANS-Modelle) angehört. Die Modellausgabegrößen (Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder) liegen hier in einer horizontalen Auflösung von 5 Metern vor.

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet mit den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert, aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff Online-Nesting rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschließenden, gröber aufgelösten umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden, wie es auch bei der Modellierung für Limburg der Fall war.

3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus Analyse, Synthese und planerische Bewertung (Abbildung 8). Die Bearbeitungszeit lag zwischen November 2024 und Anfang 2026. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte, numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse (Kap. 6) und insbesondere die Klimaanalysekarten (Kap. 7).

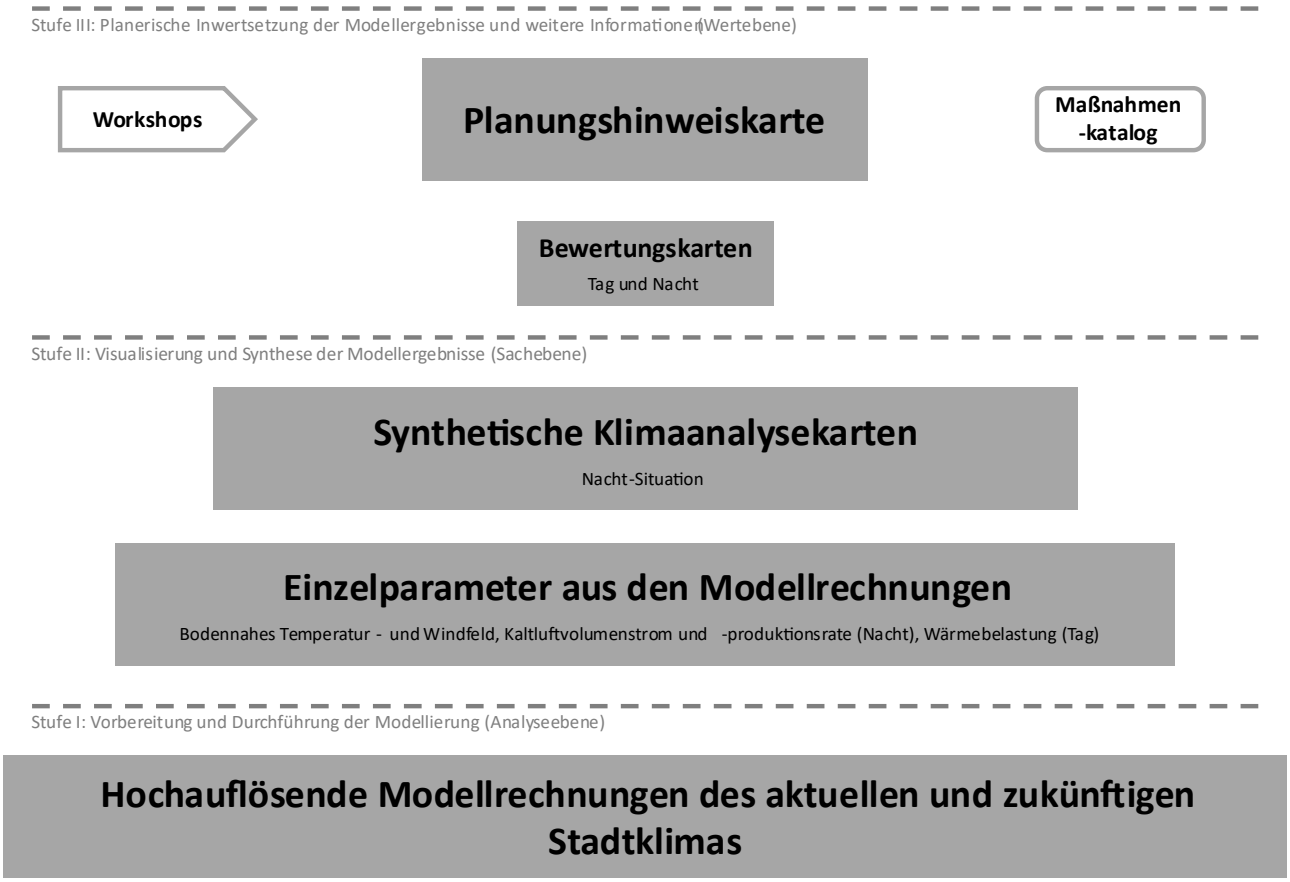


Abbildung 8: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse.

Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der Stabsstelle Energie, Klima- und Umweltschutz und dem Stadtentwicklungsamt und zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[…] *umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“* (Gaede & Härtling, 2010, 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst & Scholles, 2008). Ohne diese Grundannahmen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

Für die beiden zentralen stadtklimatischen Wirkungskomplexe des thermischen Komforts und der Luftqualität ergeben sich in diesem Zusammenhang diametral unterschiedliche Ausgangsbedingungen. So existieren für die Lufthygiene spätestens seit der Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/50/EG; EU 2008) Ziele in Form von Grenz- oder Richtwerten. Die Vorgaben dieser EU-Richtlinie wurden in Deutschland im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in nationales Recht umgesetzt und in der 39. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, Bundesregierung 2010), konkretisiert. Dieser Umstand macht die vorzunehmenden Bewertungen im Sinne einer Nominalskala „Grenzwert überschritten – Maßnahmen notwendig“ bzw. „Grenzwert unterschritten – keine Maßnahmen notwendig“ eindeutig und abschließend.

Ein rechtlich vergleichbares Äquivalent zum BImSchG mit seinen konkretisierenden Verordnungen und technischen Anleitungen inklusive den aus ihnen ableitbaren Rechtsfolgen existiert für den thermischen Wirkungskomplex nicht. Auch entsprechende Gesetzesinitiativen sind gegenwärtig nicht ergriffen oder geplant. Allenfalls übergeordnete Leitbilder wie der Schutz der menschlichen Gesundheit nach Art. 2 GG oder das Gebot der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse gemäß § 34 Abs. 1 Satz 2 BauGB sowie die Ziele einer nachhaltigen, klimafreundlichen und umweltschützenden Stadtentwicklung nach § 1 Abs. 5 BauGB haben als grundsätzliche Begründungszusammenhänge eine gewisse Relevanz. Für den konkreten Einzelfall helfen sie aber aufgrund ihrer nicht oder nur unzureichend vorhandenen Operationalisierung – d.h. der Übersetzung dieser abstrakten Leitlinien in konkrete, messbare und praktisch umsetzbare Maßnahmen – nicht abschließend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/Zielfindungsprozessen unter Berücksichtigung fachlicher Expertise immer wieder aufs Neue erfolgen.

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für das vorliegende Projekt ein Legitimierungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäß den Ansprüchen und Wertmaßstäben der projektbegleitenden Arbeitsgruppe andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungspro-

zesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.

Regelmäßige Mitglieder der begleitenden Arbeitsgruppe waren Mitarbeitende aus dem Stadtentwicklungsamt, dem Stadtbauamt, dem Tiefbauamt, dem Städtischen Betriebshof und der Stabsstelle Energie, Klima- und Umweltschutz.

Insgesamt fanden drei Workshops der begleitenden Arbeitsgruppe zu den Ergebnissen der Stadtklimamodellierung und zur Planungshinweiskarte Stadtklima statt:

02.06.2025	Workshop I: Methodik der Stadtklimaanalyse, Vorstellung der Einzelparameter (Nachttemperatur, Windfeld, Kaltluftvolumenstrom, PET).
25.08.2025	Workshop II: Vorstellung der Klimaanalysekarten, der Bewertungskarten Tag und Nacht; Ausblick auf und Erwartungen an die Planungshinweiskarte (PHK).
29.09.2025	Workshop III: Vorstellung des Entwurfs zur Planungshinweiskarte Stadtklima. Einführung der Sensitivitätsanalyse.
12.12.2025	Abschlusstermin: Vorstellung der vorläufigen Planungshinweiskarte, Lufthygiene und der Sensitivitätsanalyse.

4. Klima und Klimawandel im Raum Limburg

4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN

Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt. Es gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet im Jahresverlauf wieder und lässt langfristige Veränderungen erkennbar werden (DWD, 2026b).

Die folgende Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Limburg basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2024a, 2024b; Kaspar et al., 2013). Die Daten sind rasterbasiert und liegen auf einem regelmäßigen Gitter für ganz Deutschland vor. Sie weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von monatlichen (z.B. Bodenfeuchte) bzw. jährlichen Mittelwerten (z.B. Sommertage) auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimal- und Maximaltemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Limburgs wurden Gitterzellen aus dem regelmäßigen 1 x 1 km Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und die Daten zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können. Für Parameter, die nicht vom DWD als

Raster bereitgestellt werden (z. B. Tropennächte), wurden Daten von einzelnen Messstationen in / um Limburg ausgewertet.

Die aus Stationsdaten erzeugten Gitterdaten weisen gewisse Unsicherheiten auf, die aus einer über die Zeit veränderten Stationsdichte und der Lage der für die Interpolation verwendeten Stationen resultieren können. Ferner hat sich die Messtechnik im betrachteten Zeithorizont weiterentwickelt, sodass bei älteren Zeitreihen höhere Messungenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen eines jüngeren Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Die Analyse **zukünftiger klimatischer Änderungen** stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative und des ReKliEs-Projektes (Hübener et al., 2017). EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al., 2009; IPCC, 2013). Im Projekt ReKliEs-De wurden insgesamt 28 regionale Klimaprojektionen berechnet, 12 davon mit dynamischen regionalen Klimamodellen (RCMs) für ganz Europa, die restlichen 16 mit statistischen regionalen Klimamodellen (ESDs) nur für Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete (Hübener et al., 2017). Alle Regionalmodelldaten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar. Vom Deutschen Wetterdienst wurden die Regionalmodelldaten biaskorrigiert und mittels geostatistischer Methoden wurde die räumliche Auflösung von ca. 12,5 km auf 5 km erhöht.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik und der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Limburg ein Modellensemble bestehend aus 21 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (DWD, 2024c, 2025a).

Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al., 2024).

Räumliche und Zeitliche Auflösung

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer **zeitlichen Auflösung** von einem Tag und einer **räumlichen Auflösung** von ca. 5 km verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Deutschland flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl passender Gitterpunkte entsprechend den Grenzen Limburgs (s. Abbildung 9). Die an den Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der untersuchten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich gemittelt, um daraus konsistente und repräsentative Gebietsmittelwerte zu erzeugen. Dies führt jedoch beispielsweise dazu, dass Starkregenereignisse, welche oftmals kleinräumig und zeitlich kurz auftreten, von Regionalklimamodellen potenziell nicht erfasst und folglich sogar unterschätzt werden (DWD, 2022).

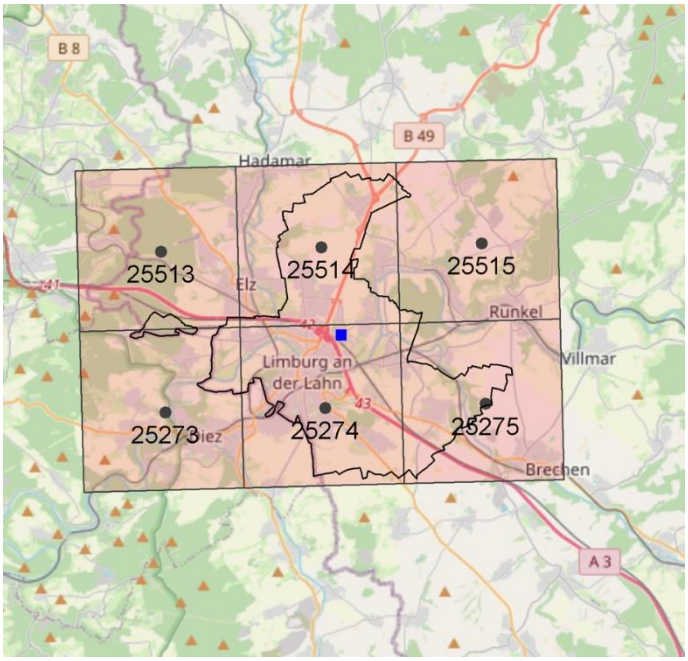


Abbildung 9: Räumliche Ausdehnung der für die Auswertung verwendeten Modell-Gitterpunkte (Hintergrundkarte: OpenStreetMap).

RCP-Szenarien

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO_2-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die Treibhausgasemissionen (Kohlendioxid CO_2, Methan CH_4, Lachgas N_2O, fluorierte Treibhausgase) zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von sogenannten **RCP-Szenarien** (RCP = *Representative Concentration Pathways*) mit unterschiedlicher Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen (s. Abbildung 10). Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5. Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*), die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (DKRZ, 2024). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien[6]), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten und dem DWD[7]-Referenzensemble enthalten, sodass im vorliegenden Bericht weiterhin die RCP-Szenarien verwendet werden. Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 in Bezug zum vorindustriellen Stand um 1860, der im projizierten Verlauf des jeweiligen Szenarios im Jahr 2100 erreicht sein wird und bedeutet somit ein entsprechend Vielfaches der Strahlungsleistung von 1860 (IPCC, 2014; maribus, 2024; Moss et al., 2010).

[6] CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project 6*) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*)

[7] Deutscher Wetterdienst (DWD) – Referenzensemble: Mehrere gerechnete Modellläufe mit leicht variierenden Anfangsbedingungen, um Unsicherheiten in der Prognose abzubilden

Das **RCP-Szenario 2.6** beschreibt zunächst einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis Mitte des Jahrhunderts auf ca. 3 W/m², welcher bis zum Ende des Jahrhunderts langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² absinkt (bedeutet also das 2,6-fache der Strahlungsleistung von 1860). Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario aufgrund drastischer Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 auch als „Klimaschutzszenario" bezeichnet wird.

RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert. Bei diesem Szenario würden die globalen Mitteltemperaturen um 2,6 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau steigen.

Das **RCP-Szenario 8.5** weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem vorindustriellen Zustand bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario" bezeichnet.

Die weltweiten CO_2-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Bisher befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes[8], mit den globalen CO_2-Emissionen auf dem „Pfad" des RCP-Szenarios 8.5 (Gilfillan et al., 2020; Peters et al., 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2-Ausstoßes würde aufgrund der Trägheit des Klimasystems keine signifikante Änderung in Kürze herbeiführen. Aus diesem Grund sind im vorliegenden Bericht vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 können auf Anfrage bei der Abteilung Klima und Umwelt von GEO-NET zur Verfügung gestellt werden.

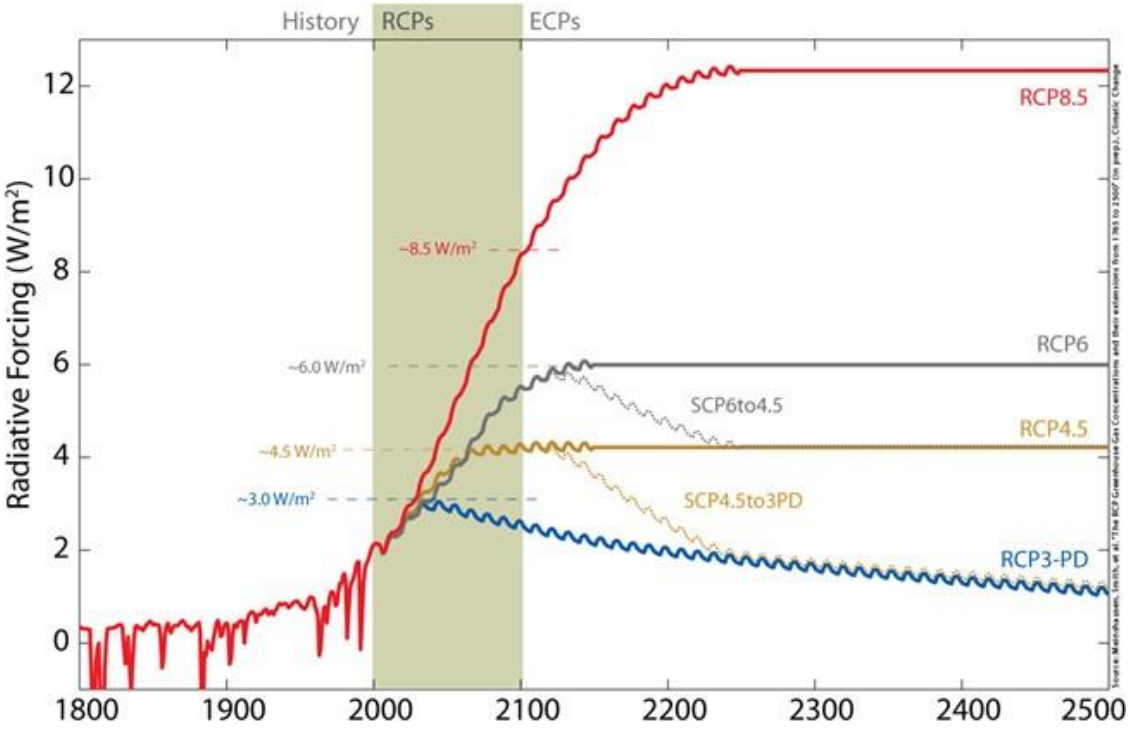


Abbildung 10: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100[9] (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; (Quelle: Meinshausen et al., 2011)).

[8] https://www.globalcarbonproject.org/

[9] ECP = *Extended Concentration Pathways* sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300.

Meteorologische Kenntage

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z.B. die Anzahl von Sommertagen, Heißen Tagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (meist jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{max} \geq 25$ °C für Sommertage, $T_{max} \geq 30$ °C für Heiße Tage (schwellenbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (Hübener et al., 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Limburg wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Die verwendeten Daten wurden im Zuge der Regionalisierung einer Bias-Adjustierung unterzogen. Trotzdem kann ein gewisses Maß an Unsicherheiten immer noch in den Daten enthalten sein. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Unsicherheiten für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben diese Unsicherheiten, also deren Differenz, daher keinen Einfluss und man erhält eine robuste Aussage.

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten Klimanormalperiode von 1961 – 1990, da dieser Zeitraum nur zum Teil von der aktuellen weltweiten Erwärmung betroffen war. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt. Diese wird auch in der aktuellen bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KRA) verwendet (UBA, 2021). Die KRA betrachtet in Bezug auf die Klimawandelfolgen weiterhin zwei Zukunftsperioden in der Mitte (2031 – 2060) und zum Ende (2071 – 2100) des Jahrhunderts.
Es wurden dann sowohl für die Referenz- als auch die Zukunftsperioden für jede Klimavariable zeitliche Mittelwerte berechnet. Von den jeweiligen Mittelwerten der entsprechenden Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach dem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur Interpretation von Modelldaten vorgeschlagenen statistischen Testschemata ermittelt (Linke et al., 2024). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten u.a. Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (s. Abbildung 11).

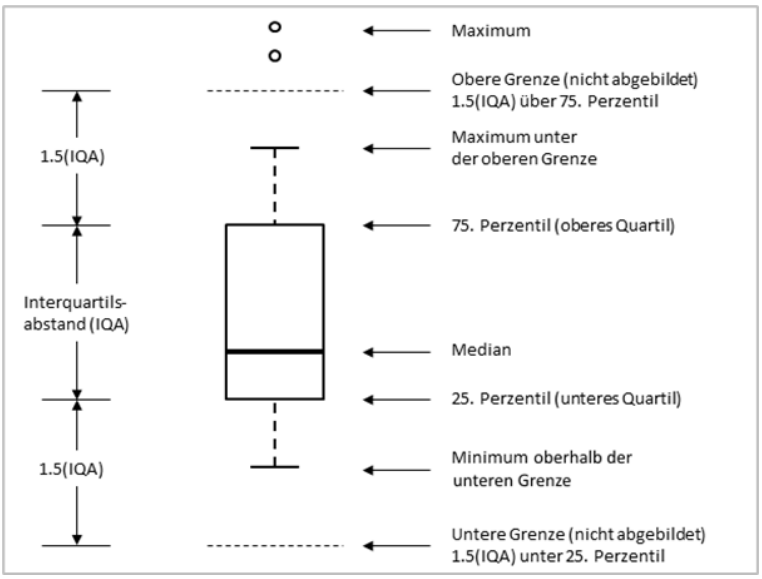


Abbildung 11: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) ist Limburg durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,3 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von ca. 814 mm/Jahr gekennzeichnet. Damit weist Limburg die gleiche Mitteltemperatur wie im deutschlandweiten Durchschnitt (9,3 °C; UBA 2022a), aber eine höhere jährliche Niederschlagsmenge auf (gesamtdeutscher Mittelwert 790 mm/Jahr; UBA 2022b).

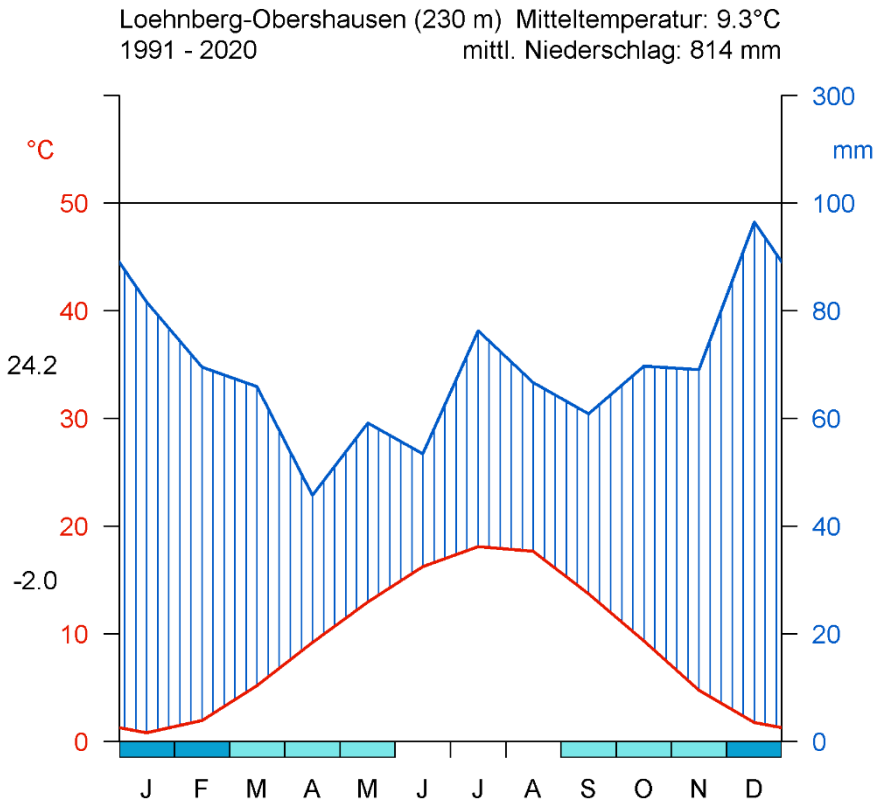


Abbildung 12: Klimadiagramm der Stadt Limburg für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Rasterdatenprodukten des Deutschen Wetterdienstes (nach DWD 2024b)

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Limburg – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Jahresmitteltemperatur im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 bereits um 0,6 °C und seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen sogar um 1,5 °C gestiegen (bezogen auf die Periode 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 14).

Noch stärker als die „schleichende" Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25$ °C) und insbesondere Heißen Tagen ($T_{max} \geq 30$ °C) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Limburg zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 40 auf 49 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 8 auf 11 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 13).

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein mögliches Maß für die Trockenheit ist der Trockenheitsindex nach de Martonne, der sich aus dem Jahresniederschlag und der Jahresmitteltemperatur ergibt (Gavrilov et al., 2019). Der Trockenheitsindex unterliegt in Limburg deutlichen Schwankungen, zeigt seit den 1990er Jahren insgesamt jedoch einen deutlich abnehmenden Trend (vermehrte Trockenheit), wobei der Grenzwert zur (Semi-)Aridität in einigen extrem trockenen Jahren bereits fast unterschritten wurde (Abbildung 15). Die Abnahme des Trockenheitsindex ist nicht der einzige, aber ein wesentlicher Faktor für die Bodenfeuchte, die in Limburg über die letzten 20 Jahre gesehen ebenfalls im Mittel abnimmt (Abbildung 16). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Trockenstress stehen, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind (MWVLW RLP, 2025). Erwartungsgemäß fällt die Bodenfeuchte im Sommer (orange Balken in der Abbildung 16) deutlich geringer aus als in den anderen Jahreszeiten (graue Balken). Noch gab es in Limburg keine Sommer, die im Mittel keine optimale Wasserversorgung der Pflanzen boten, aber es ist davon auszugehen, dass es mindestens lokal in Limburg Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.) auf denen die Pflanzen zeitweise unter Trockenstress stehen.

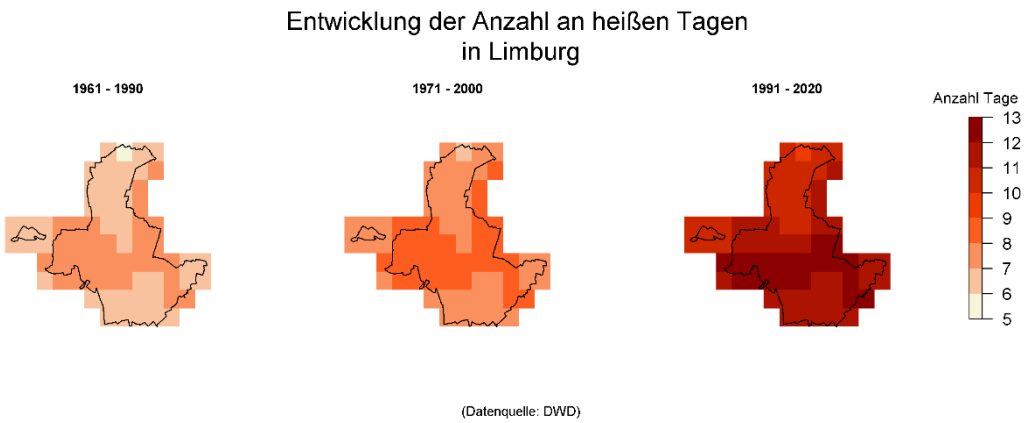


Abbildung 13: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30$ °C) in verschiedenen Perioden in Limburg. [Legendeneinheit = Anzahl heißer Tage] (eigene Berechnung nach DWD, 2024b).

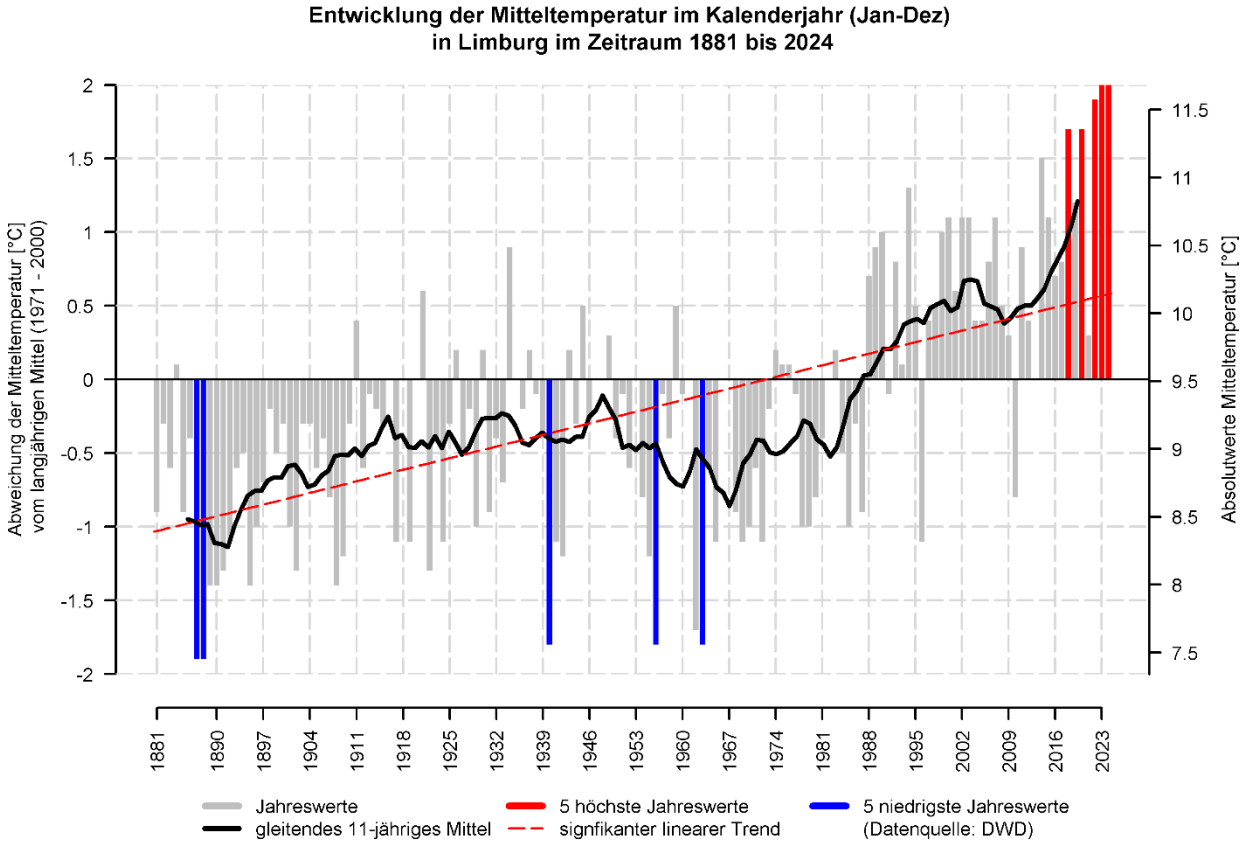


Abbildung 14: Entwicklung der Mitteltemperatur in Limburg im Zeitraum von 1881 bis 2024 (eigene Berechnung nach (DWD, 2024c)).

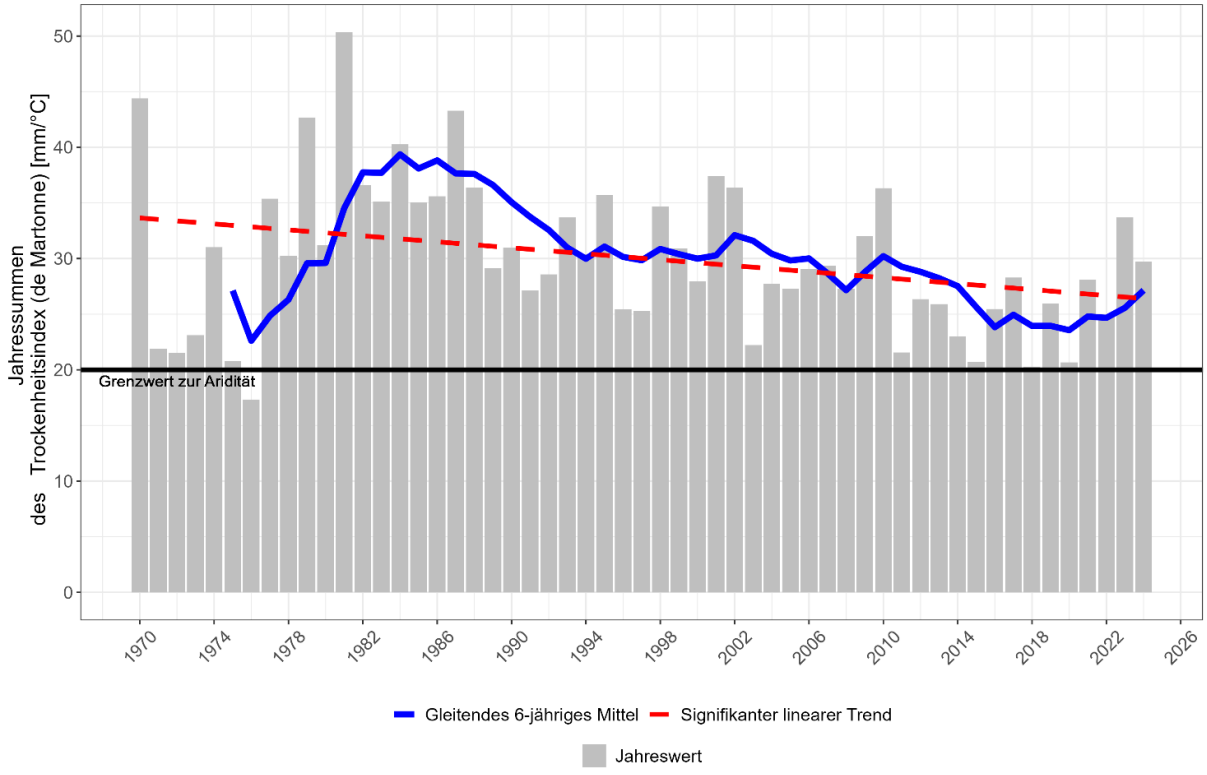


Abbildung 15: Jahreswerte des Trockenheitsindex (de Martonne) in Limburg für den Zeitraum 1970 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b).

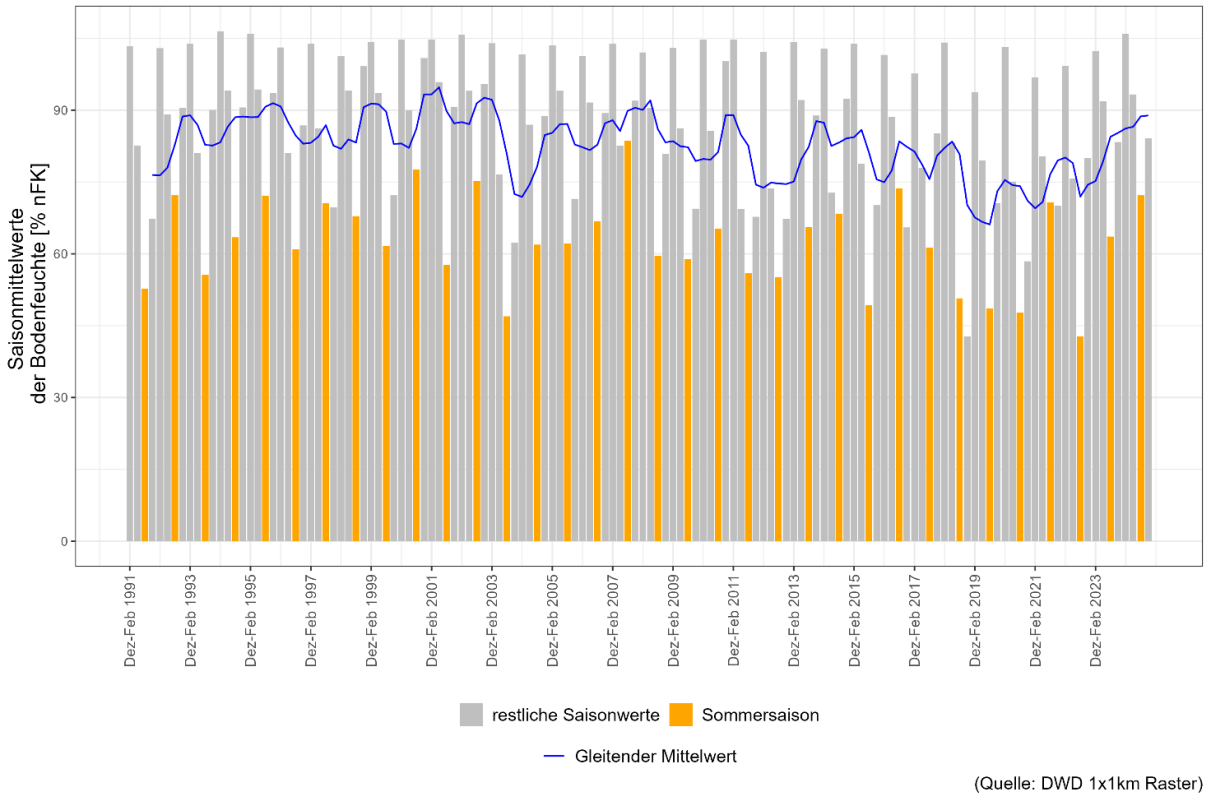


Abbildung 16: Saisonmittelwerte der Bodenfeuchte (in % nFK) in Limburg im Zeitraum 1991 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b).

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Bad Marienberg (nördlich von Limburg) dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Limburg. An der Station Bad Marienberg liegt die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit bei 3,5 m/s, am häufigsten traten dort Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s (leichte Brise) auf. In den Nachtstunden häufen sich Winde aus Südwest, gefolgt von sekundären Maxima aus südöstlicher Richtung. Am Tage kommt der dominierende Wind aus Südwesten, während Winde aus dem Süden die zweithäufigste Windrichtung darstellen (Abbildung 17).

Auf das im Rahmen der Stadtklimaanalyse modellierte kleinräumige Windfeld übt die übergeordnete Windrichtung hingegen nur einen geringen Einfluss aus, stattdessen werden die örtlich entwickelten, landschaftsgesteuerten Luftaustauschprozesse während einer windschwachen, sommerlichen, autochthonen Wetterlage aufzeigt.

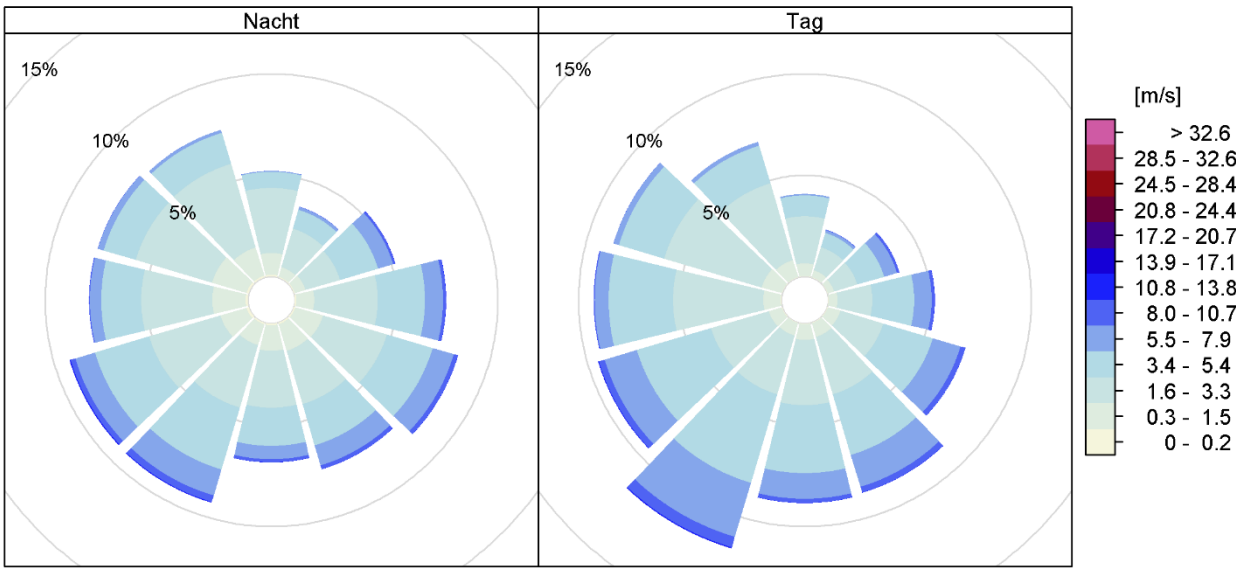


Abbildung 17: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Limburg für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf der DWD-Station Bad Marienberg (DWD, 2024a).

Mit der zunehmenden Erwärmung steigt das Potenzial für Starkniederschläge (Niederschlag ab 30 mm pro Tag), die statistisch schwer zu erfassen sind, da sie eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität besitzen und oftmals nur lokal auftreten. Eine flächendeckende Erfassung solcher Ereignisse mittels Radar ist erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts möglich (Radar-Online-Aneichung[10]; vgl. DWD, 2023a). Diese Zeitreihen sind jedoch noch zu kurz, um gesicherte klimatische Aussagen treffen zu können. Längere Zeitreihen liegen für Tageswerte des Niederschlags vor. Dabei können nur Häufigkeiten von Niederschlägen über einem bestimmten Schwellenwert ausgewertet werden (bspw. Tage > 10 mm Niederschlag), eine Kombination mit der Dauer des zugehörigen Ereignisses ist nicht möglich.

Als Starkniederschläge (synonym: Starkregen) werden Niederschläge bezeichnet, die eine hohe Intensität, d.h. eine im Verhältnis zu ihrer Dauer große Niederschlagssumme aufweisen. Starkregenereignisse können dabei sowohl Niederschläge kurzer Dauer als auch mehrerer Stunden oder über Tage anhaltende Niederschläge sein (Rauthe et al., 2014). Neben der Dauer eines solchen Ereignisses ist die Größe der betroffenen Fläche wesentlich.

[10] Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb für Deutschland.

Der DWD warnt vor Starkregen in drei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden (DWD, 2026a):

- Regenmenge 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden (markante Wetterwarnung)
- Regenmenge > 25 bis 40 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m² bis 60 l/m² in 6 Stunden (Unwetterwarnung)
- Regenmenge >40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden (Warnung vor extremem Unwetter)

In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

Starker Niederschlag: N ≥ 10 mm/d ; Stärkerer Niederschlag: N ≥ 20 mm/d ; Starkniederschlag: N ≥ 30 mm/d

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in Limburg keine signifikanten Änderungen an Tagesniederschlägen von mehr als 10, 20 bzw. 30 mm zu erkennen. Für die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 30 mm deutet sich eine leicht abnehmende Häufigkeit an (vgl. Abbildung 18), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.

Für die Stadt Limburg wurden in einem weiteren Projekt Starkregengefahrenkarten sowie Starkregenrisikokarten erstellt. Die Starkregenrisikokarten sind auf der Website der Stadt einzusehen.[11]

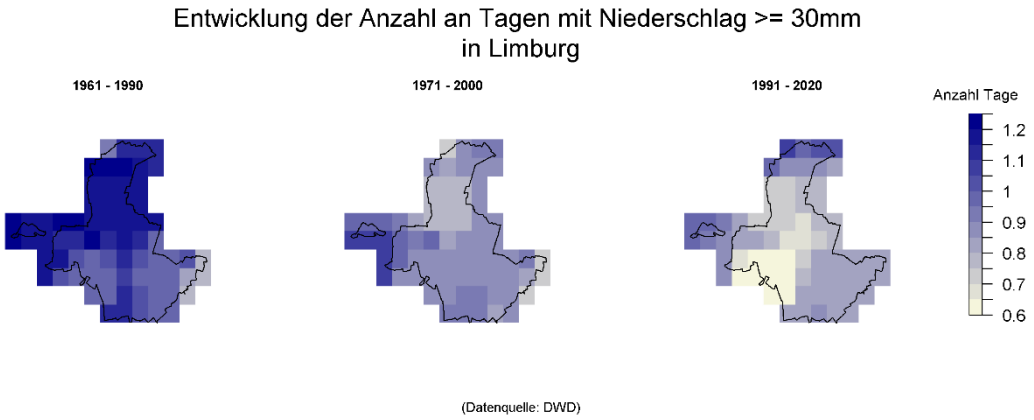


Abbildung 18: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit Starkregen (Niederschlag > 30 mm) in Limburg [Legendeneinheit = Tage mit Starkregen pro Jahr] (nach DWD 2024b).

4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen nach VDI 3787, Blatt 9 (2004) einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt. Diese Situation bringt die höchsten thermischen Belastungen innerhalb der Stadt mit sich und die lokalklimatischen Besonderheiten in Limburg prägen sich besonders stark aus. Das sind zum einen der Wärmeinseleffekt und die sich aus sich selbst entwickelnde Kaltluftdynamik, die durch keine überlagerte Strömung beeinflusst wird. Somit sind bei einer autochthonen Wetterlage die Kaltluftleitbahnen identifizierbar.

[11] Starkregengefahrenkarte Limburg an der Lahn: https://www.limburg.de/Rathaus-Leben/Energie-Klima-und-Umweltschutz/Starkregen/

Um autochthone Nächte zu ermitteln, braucht es Angaben zur stündlichen Windgeschwindigkeit, zur Lufttemperatur und zum Bedeckungsgrad (Berechnung nach Augter, 1997, unveröffentlicht; zitiert in) Schlünzen et al., 2018), welche über die repräsentative Station Bad Marienberg des DWD ausgewertet wurden (Abbildung 19). Dort traten zwischen 1991 und 2020 im Mittel 23,4 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind. Absolut betrachtet ist die Anzahl an autochthonen Nächten an der Station Bad Marienberg jedoch recht gering, so kommen in den Sommermonaten Juni, Juli und August im Mittel nur 1,7 autochthone Nächte vor.

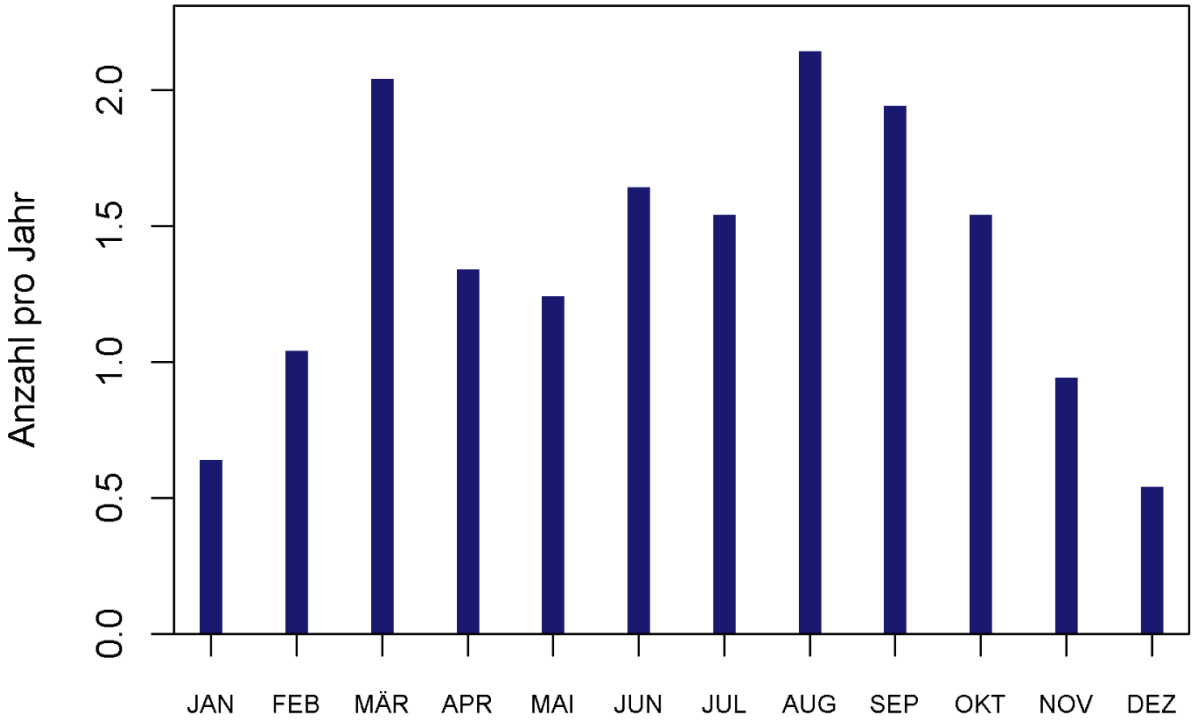


Abbildung 19: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Limburg (23,4 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der DWD-Station 4371 – Bad Marienberg (DWD, 2024a).

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

4.4.1 TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Limburg bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 20 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen (Tabelle 1).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus, eine Reduzierung des Strahlungsantriebs[12] bis zum Ende des Jahrhunderts wird nicht angenommen. Im RCP-Szenario 8.5 wird ein steiler Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die Auswertung erfolgt für drei Zukunftsperioden á 30 Jahren

[12] Änderung der Nettostrahlung (Einstrahlung minus Ausstrahlung, in Watt pro Quadratmeter) an der Oberseite der Atmosphäre aufgrund der Änderung eines Treibers des Klimawandels (bspw. Kohlendioxidkonzentration).

(2031-2060; 2041-2070; 2071-2100). In allen Zeiträumen zeigen sich deutliche Temperaturzunahmen, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem Minimum und Maximum des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 20 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1991 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

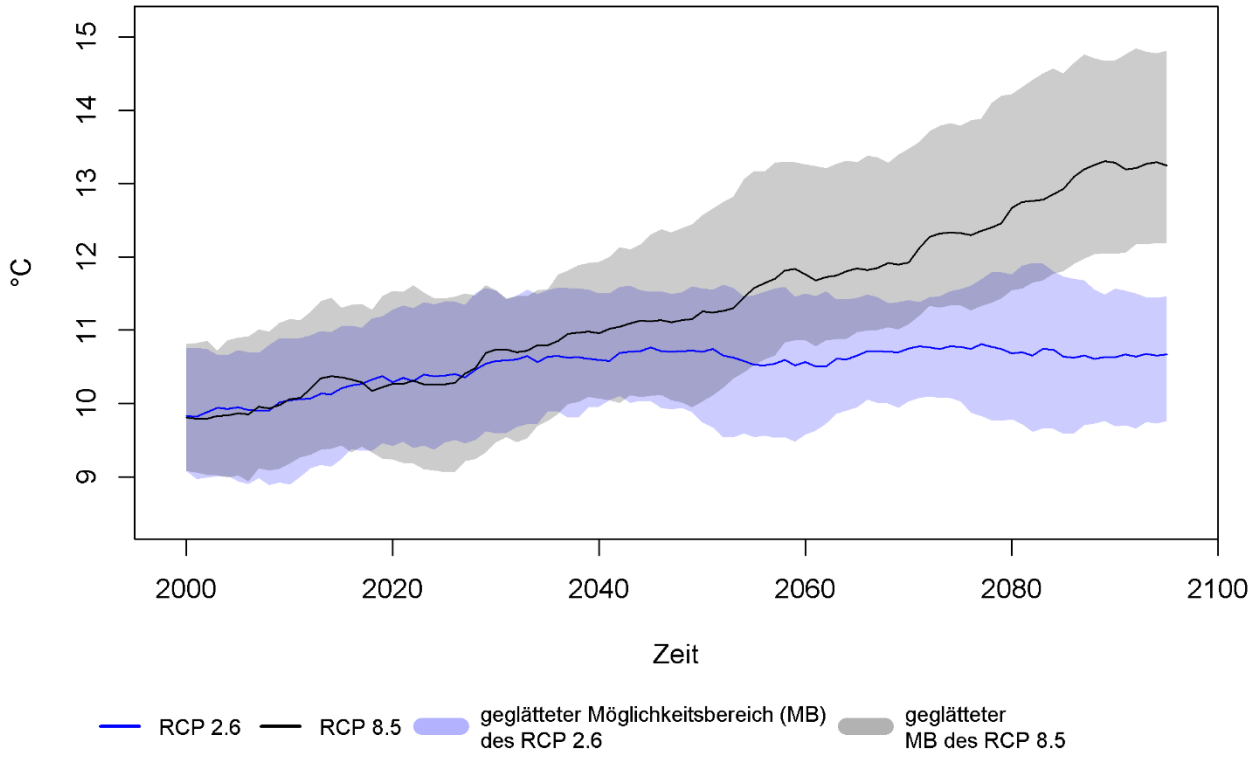


Abbildung 20: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Limburg (alle untersuchten RCP-Szenarien).

Im Jahresverlauf ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst. Dieses Muster zeigen alle RCP-Szenarien, wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen in Abbildung 21).

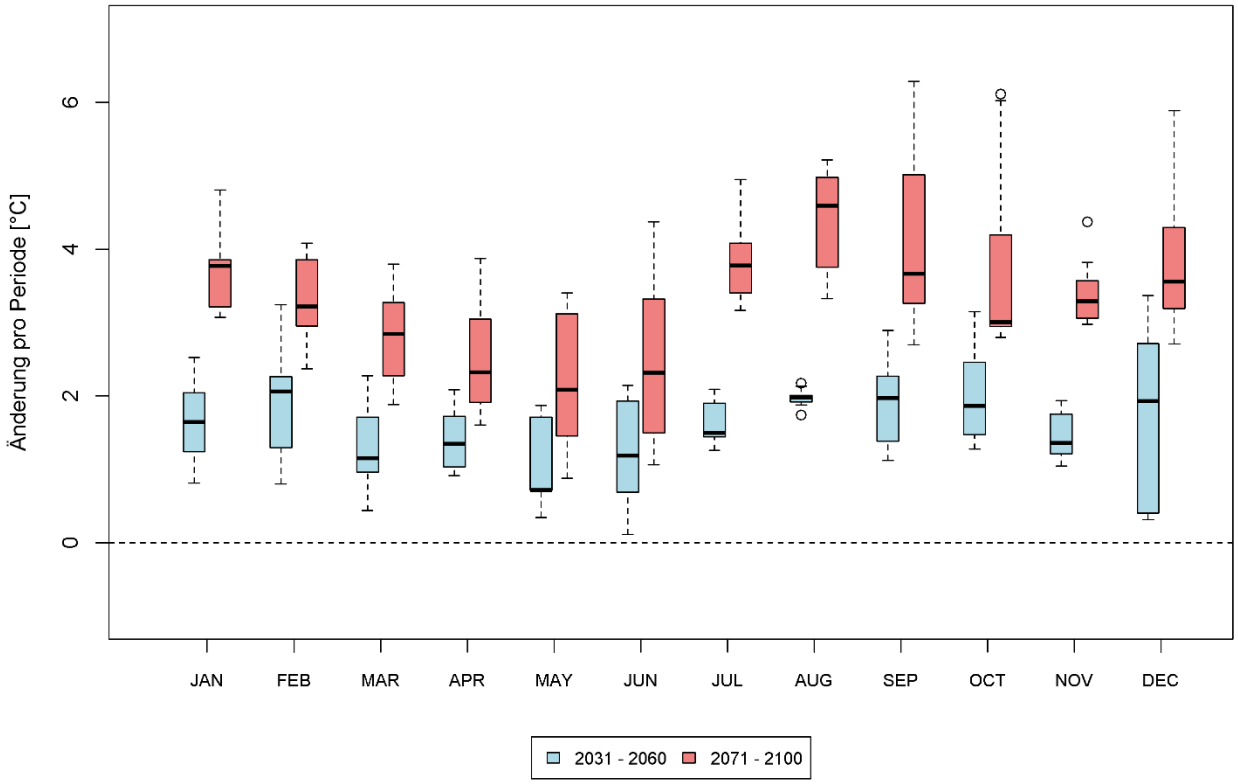


Abbildung 21: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Limburg (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Tabelle 1: Langjährige Änderung der Temperatur in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Variable	Klima-Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		Zukunftsperioden								
		Nahe Zukunft			Mittelfristige Zukunft			Ferne Zukunft		
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P0	P50	P100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresmittel-temperatur [°C]	RCP 2.6	0,2	0,7	1	0,4	0,7	0,9	0,4	0,8	0,9
	RCP 8.5	0,6	1	1,5	0,9	1,4	2	2,1	2,8	3,9
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	-0,1	1,4	3,8	0,4	1	3,2	0,3	2	3,4
	RCP 8.5	0,9	2,4	4,6	1	2,6	5,3	3,7	5,7	8,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	-0,1	0,7	1,6	-0,1	0,9	1,8	0,1	1	1,9
	RCP 8.5	0,6	1,2	2,5	0,9	1,7	4,2	3,5	4,2	6,9

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an **Sommertagen** und **Heißen Tagen** zukünftig deutlich zu (Tabelle 2). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit 23,6 Heißen Tagen mehr pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1991 – 2000) durchschnittlich 7,9-mal jährlich auftraten.

Tropennächte treten in Limburg derzeit statistisch nicht auf (im Mittel 0 Tropennächte pro Jahr). In der nahen Zukunft (2031 – 2060) erhöht sich die Zahl der Tropennächte pro Jahr nur geringfügig (Tabelle 2), wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. Erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 nur geringfügig ansteigt, prognostiziert das RCP 8.5 für den Zeitraum bis 2070 eine Zunahme um 2,3 Nächte dieser Art. In der 3. Zukunftsperiode steigt die Änderung im stärksten Szenario gar bis auf 8,2 zusätzliche Tropennächte pro Jahr für Limburg an. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen ist bereits für den Status quo eine noch höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für **Hitzeperioden** gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Limburg zukünftig länger andauern. Im RCP 8.5 Szenario betrüge die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts 5,4 Tage (die durchschnittliche Länge im Zustand von 1991-2020 beträgt 3,2 Tage).

Tabelle 2: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Kenntag	Klima-Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2000								
		Nahe Zukunft			Mittelfristige Zukunft			Ferne Zukunft		
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Sommertage	RCP 2.6	5	13,1	18,5	5,1	12,7	18	7,7	13,2	18,3
(T_{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 8.5	13,6	18,3	24,3	15,8	22,2	32,2	24,9	36,7	56,2
Heiße Tage	RCP 2.6	1,1	3,9	8	2,2	4,7	8,8	3,8	6,4	8,7
(T_{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 8.5	3,9	8,8	13,3	5,8	10,4	20,8	15	23,6	35,1
Tropennächte	RCP 2.6	-0,2	0,1	0,7	-0,1	0,1	0,6	-0,1	0,3	0,9
(T_{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 8.5	0,8	1,2	2,2	1,2	2,3	4,3	4,8	8,2	18

4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG UND TROCKENHEIT

In Bezug auf die Jahresniederschlagssumme sind in Limburg unterschiedliche Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigt das RCP-Szenario 8.5 einen stärkeren Anstieg der Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert als das RCP-Szenario 2.6 (Tabelle 3). Mit Blick auf den Erwartungsbereich zeigt sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen lassen – der zukünftige mittlere Jahresniederschlag weicht um bis zu 11 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Insgesamt kann für Limburg eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann und wie viel Regen fällt, entscheidend für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Ebenso wirkt sich die mit steigenden Durchschnittstemperaturen zunehmende potentielle natürliche Verdunstung (potNat) der Vegetation auf den Wasserhaushalt aus und kann zu Bilanzdefiziten führen. Der Blick auf den Jahresverlauf offenbart saisonale Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags. In allen RCP-Szenarien ist eine Tendenz geringerer Niederschläge im Sommer und leicht höherer Werte in den übrigen Monaten zu erkennen. Am stärksten treten diese Effekte bei langfristiger Betrachtung bis Ende des Jahrhunderts und im RCP-Szenario 8.5 auf, insbesondere für den Juli, August und September werden geringere Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 22). Das RCP-Szenario 2.6 weist, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf (ohne Abbildung). Die in den Abbildungen wahrnehmbare Niederschlagsverschiebung mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der mittleren Niederschlagssumme in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Variable	Klima-Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		Nahe Zukunft			Mittelfristige Zukunft			Ferne Zukunft		
		2031-2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-33,7	8,3	87,9	-52	29,6	51,1	-19,3	11,6	37,1
	RCP 8.5	6,6	37,9	75,2	1,5	29,2	89,6	12,5	69,3	112,5

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung von Trockenperioden sind nur bedingt Aussagen aus den EURO-CORDEX-Daten möglich, da der Parameter Bodenfeuchte nicht im Datensatz enthalten ist. Zudem wird zwar die Auftrittshäufigkeit von mittleren, langen oder extremen Trockenperioden untersucht (15-21, 22-28 oder mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag), doch treten diese zukünftig so selten auf, dass die Änderungen sehr gering ausfallen und statistisch nicht signifikant sind.

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend feuchter sind

(leichte positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz), sind im RCP 8.5 in den Monaten Juli bis September Abnahmen erkennbar (Abbildung 22). Die saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz gilt für alle Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. und 2. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus, für die 3. Zukunftsperiode wurden vergleichsweise die stärksten Abnahmen ermittelt. Auch die Anzahl an Tagen mit sehr geringem Niederschlag (unter 1 mm pro Tag) nimmt in den betrachteten Zukunftsszenarien zu (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Langjährige Änderung der Trockentage in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Variable	Klima-Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		Nahe Zukunft			Mittelfristige Zukunft			Ferne Zukunft		
		2031 - 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Trockentage [n/Jahr] (Anzahl von Tagen mit N < 0,1 mm/d)	RCP 2.6	18,2	23,1	30,8	20,5	24,8	32,6	16,4	25	29,1
	RCP 8.5	23,1	24,7	29	24,4	26,5	30,4	20,5	24,4	36,5

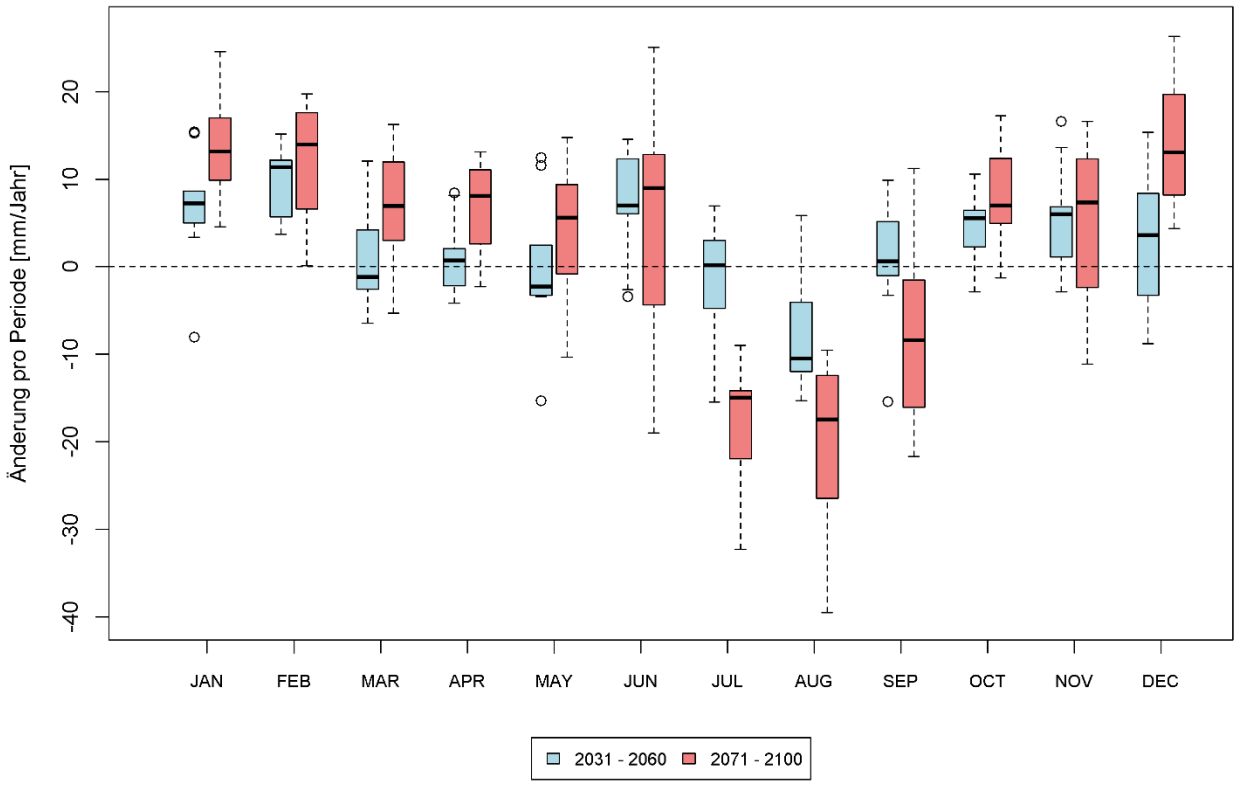


Abbildung 22: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Limburg (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist besonders für Städte und Gemeinden die Frage der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit haben gezeigt, dass diese ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen.

Starkregenereignisse (N ≥ 30 mm/d) treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge (N ≥ 20 mm/d) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abbildung 23).

Aufgrund des enormen Schadenpotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse N ≥ 10 mm/d und N ≥ 20 mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind. Statistisch betrachtet treten Starkniederschläge (≥ 30 mm/d) momentan nicht auf (im Mittel 0 Ereignisse pro Jahr), in der Realität kommen sie jedoch bereits vor. Valide Prognosen für die zukünftige Entwicklung sind derzeit kaum möglich, da Starkregenereignisse eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität haben. Langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit 0,8 zusätzlichen Starkniederschlagereignis pro Jahr gerechnet (Abbildung 24).

Angesichts kaum veränderter oder gar zunehmender Jahresniederschlagssummen muss im Mittel die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag bei zunehmender **Niederschlagsintensität** abnehmen. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist daher mit einer Abnahme von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d verbunden. Das bedeutet: Es regnet weniger, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

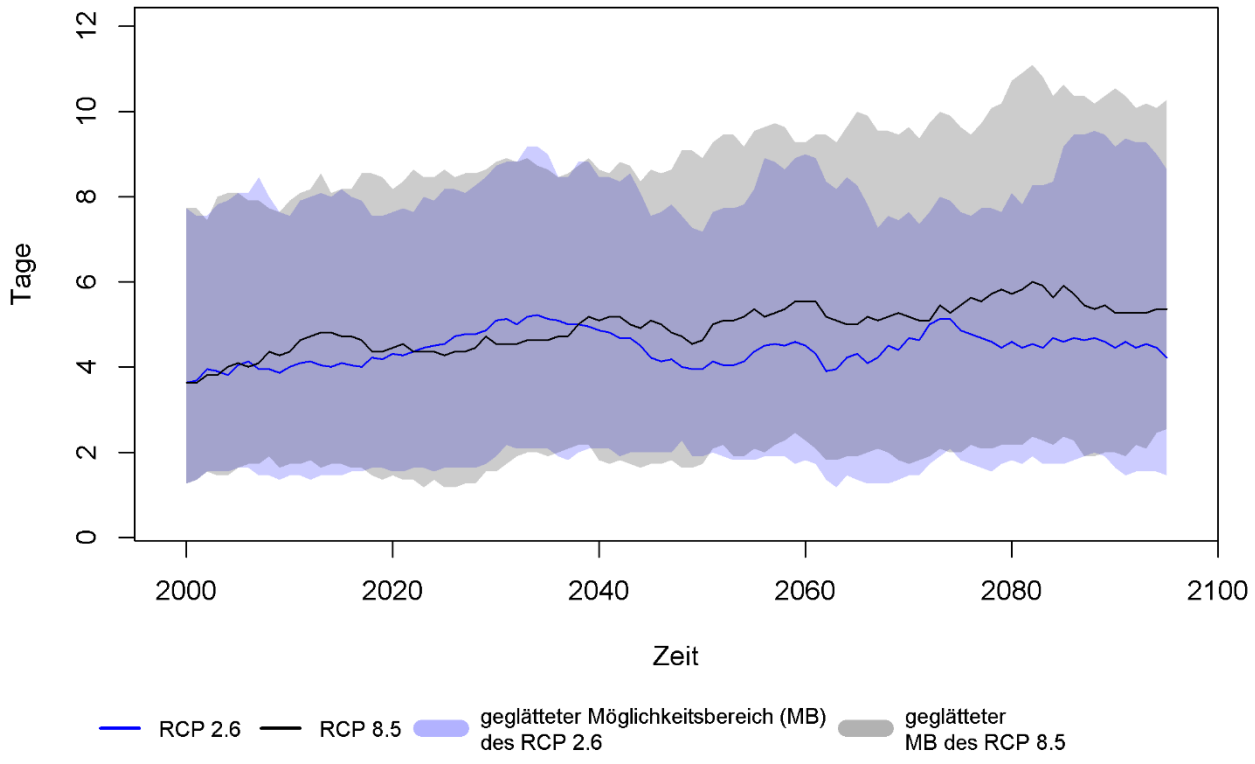


Abbildung 23: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag (N ≥ 20 mm/d) in Limburg (alle Szenarien).

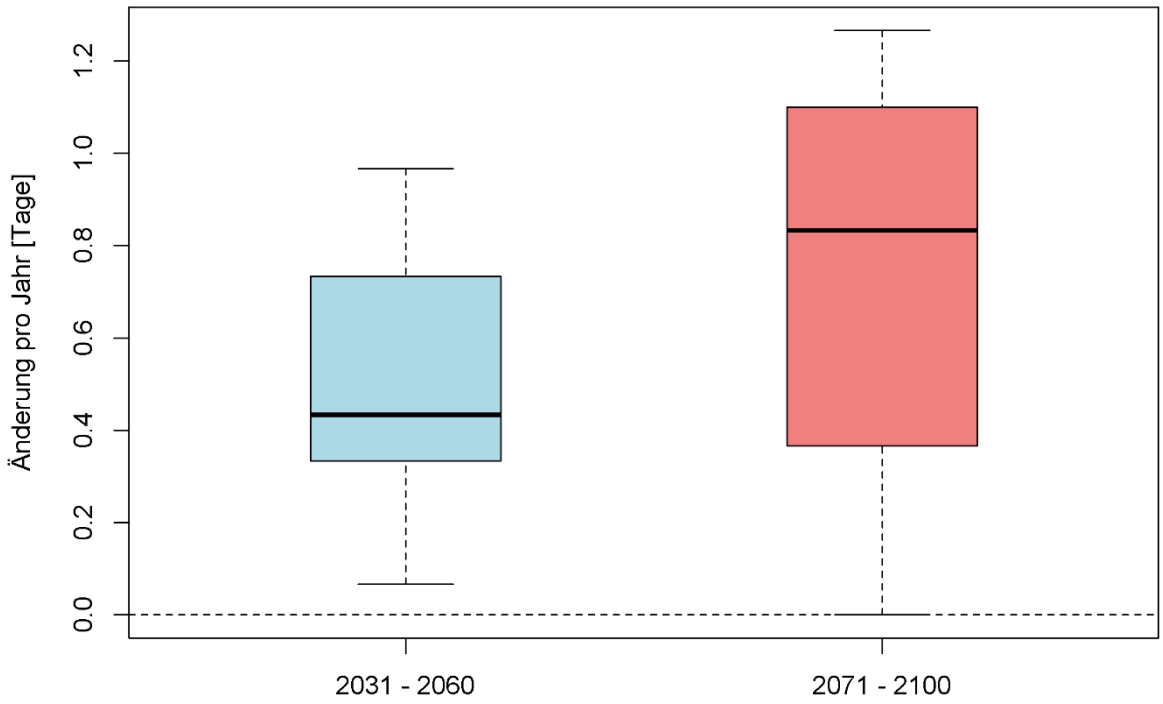


Abbildung 24: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit N ≥ 30 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Limburg (RCP 8.5).

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insb. extremen) Niederschläge ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass Starkregenereignisse oftmals kleinräumig auftreten und somit von den obgleich relativ hoch aufgelösten Regionalklimamodellen nicht erfasst und potenziell unterschätzt werden (Deutschländer & Dalelande, 2012). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (Da Silva & Haerter, 2025). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insb. langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.

4.4.3 WIND UND STURM

Ein Sturm wird als „Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 […], der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann“ definiert (DWD, o. J.). Folgende Sturmklassen werden dabei gemäß DWD anhand ihrer Windstärke eingeteilt:

Sturm:	Beaufort 9	(75 bis 88 km/h)
Schwerer Sturm:	Beaufort 10	(89 bis 102 km/h)
Orkanartiger Sturm:	Beaufort 11	(103 bis 117 km/h)
Orkan:	Beaufort 12	(> 117 km/h)

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, sodass sie nur bedingt statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich in einer wärmeren Atmosphäre aufgrund von mehr verfügbarer latenter Wärme, die beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Flüssigwasser frei wird, potenziell stärkere Stürme ausbilden können (Fink et al., 2012; Pinto et al., 2009; Pinto & Reyers, 2017). Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge, wobei noch nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die Häufigkeit der Sturmereignisse zunimmt oder ob bei gleichbleibender Häufigkeit die Intensität steigt, also die Stärke der auftretenden Windgeschwindigkeiten (Donat et al., 2010; McDonald, 2011; Pinto et al., 2009; Pinto & Reyers, 2017).

Die Analyse zur Häufigkeit von **Sturmereignissen** ergab für Limburg in beiden Klimaszenarien keinen eindeutigen Trend bis zum Jahr 2100 (weder Zu- noch Abnahmen; ohne Abbildung). Dementsprechend weist kaum ein Modell des Ensembles signifikante Trends auf, sodass sich keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableiten lassen.

5. Analysemethoden

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Gross, 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (Gross, 2002; Gross et al., 2002; Gross, 2012b, 2012a, 2017).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird. Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität[13] des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (Gross, 1989).

[13] Emissivität = Austausch von Wärmestrahlung mit der Umgebung

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgenden Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrom-Bilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie (VDI 3787, Blatt 7, 2024) definierten Standards für mesoskalige[14] Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist 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, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). 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 Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Größe des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Limburg und angrenzendes Umland ca. 10,5 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf

[14] Mesoskalig = von mittlerer Größe seiend

dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Tabelle 5: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m.

Landnutzungsklasse	Strukturhöhe
Gebäude	Individuell
Unbebaut versiegelt / Straße	0 m
Gewässer	0 m
Gleisflächen	0 m
Freiland / Rasen / niedrige Vegetation	0,5 m
Niedrige Vegetation auf naturfernem Boden[15]	0,5 m
Baum über Rasen	Individuell
Baum über naturfernem Boden	Individuell
Baum über Versiegelung	individuell

Zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses zeigt Abbildung 25 typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier die Tageslänge des 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 Uhr morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter einem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius über derjenigen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Grad unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich dies in der Realität über längere Zeiträume einstellt, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlich träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau demnach erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wo-

[15] Naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

chen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzwellige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 26 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 °C gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 °C) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 °C und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass dessen Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarien-Betrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll.

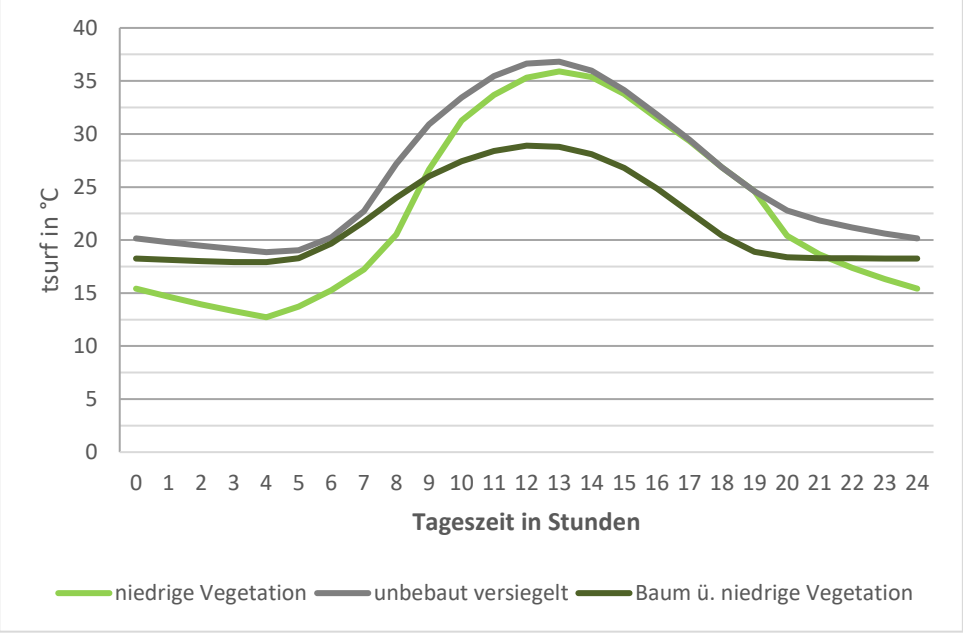


Abbildung 25: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

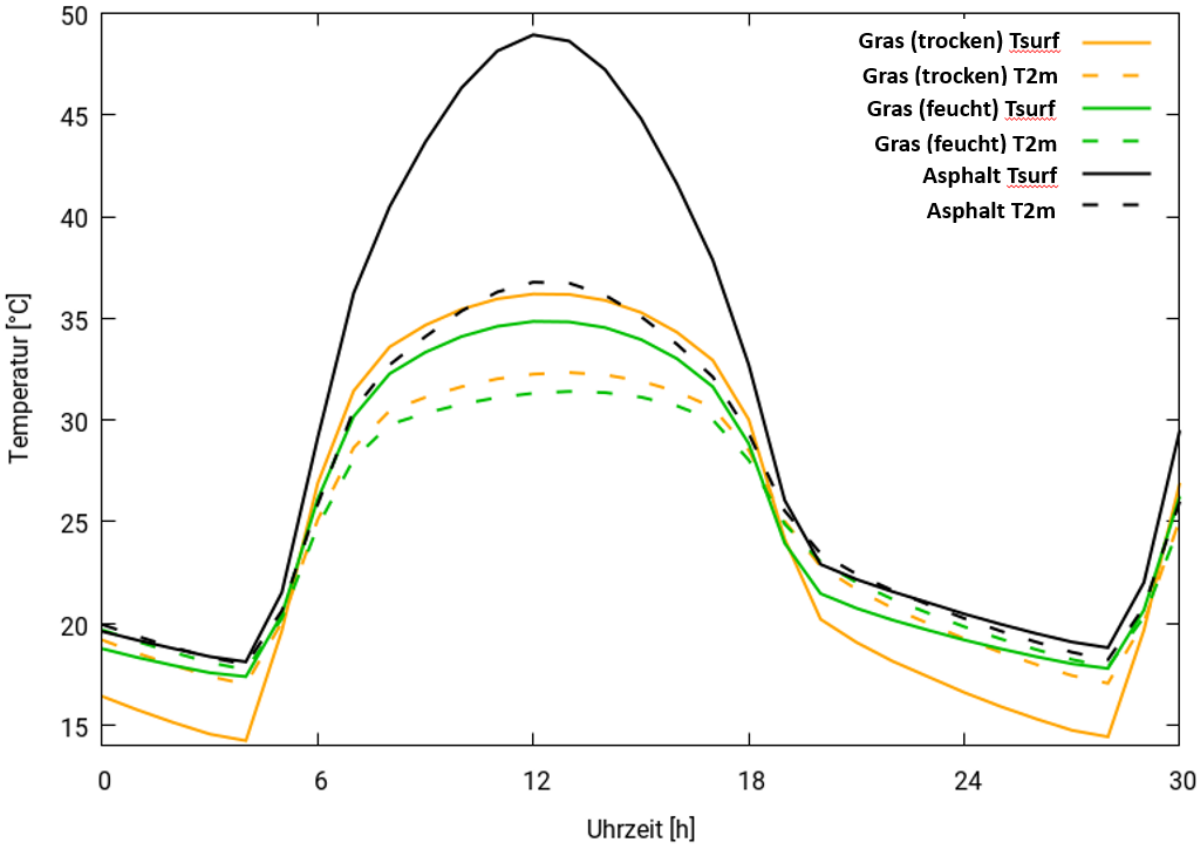


Abbildung 26: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (Tsurf) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages.

5.2 STATUS QUO UND SZENARIENENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit dem numerischen Modell FITNAH-3D. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge/ urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen - Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (Fürst & Scholles, 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschriebenen sind (VDI 3785, Blatt 1, 2008; VDI 3787, Blatt 1, 2015).

Gegenwärtig können mithilfe des Methodenpakets folgende für die urbane Hitzevorsorge zentrale Themenkomplexe ebenen-/maßstabsunabhängig modelltechnisch abgebildet werden:

- Modul 1: Auswirkungen des Klimawandels (allmähliche Temperaturzunahme sowie reduzierte Bodenfeuchten aufgrund zunehmender Trockenheit)
- Modul 2: Auswirkungen von Flächennutzungsänderungen (Stadtentwicklung, Stadtsanierung, Verkehrs-/Grünflächenplanung, Waldumbau)
- Modul 3: Auswirkungen von gebäude- und boden-/flächenbezogenen Anpassungsmaßnahmen

Die Module können je nach spezifischer Fragestellung und zur Verfügung stehender Grundlagen für die Modellierungen individuell zusammengestellt werden. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Ausgangspunkt der Deltamethode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder ferneren Zukunft zu prognostizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Gegenwart und Zukunft aufmerksam zu machen. Neben der Darstellung, wie eine hypothetische Situation in der Zukunft zustande kommen kann, werden Varianten und Alternativen dargestellt (Abbildung 27, **(Wilms, 2006)**).

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem gemeinsamen Szenariotrichter. In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern lediglich eine den Analysezielen entsprechende Auswahl zumeist besonders herausfordernder Szenarien.

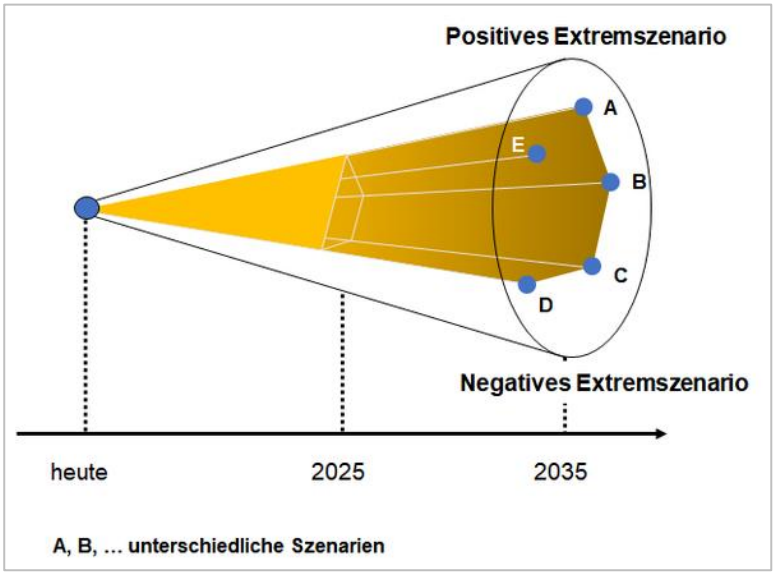


Abbildung 27: Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Status quo und Klimawandelszenarien der Limburger Stadtklimaanalyse

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Limburger Stadtklima im Jahr 2040 in zwei verschiedenen Szenarien simuliert (Tabelle 6).

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für Limburg Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt. Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Aus diesem Grund wird das zukünftige Stadtklima in Limburg 2040 in den zwei verschiedenen Szenarien „Schwacher Klimawandel“ und „Starker Klimawandel“ unterschieden. Die beiden Szenarien können als best case- bzw. worst case-Varianten verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass sich die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in Limburg innerhalb der beiden Szenarien bewegen.

Für die Modellierung des Stadtklimas wird dem Modell eine Starttemperatur für den Zeitpunkt um 21 Uhr vorgegeben, woraufhin das Modell die Temperaturen bis zum Folgetag um 14 Uhr berechnet. Diese orientiert sich idealerweise an den langjährigen Messdaten der 21-Uhr-Temperatur aus autochthonen Nächten einer nahegelegenen DWD-Station. Da eine solche Wetterlage in Limburg und Umgebung jedoch nur selten auftritt, war die vorhandene Datengrundlage hierfür nicht ausreichend.

Stattdessen wurde die mittlere Temperatur an Sommer- und heißen Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 25 °C von der DWD-Station Montabaur herangezogen. Diese Station verfügt einerseits über eine umfangreiche Messreihe und befindet sich andererseits in räumlicher Nähe sowie auf einer vergleichbaren Geländehöhe wie Limburg. Sie kann daher als repräsentativ für die klimatischen Ausgangsbedingungen in Limburg angesehen werden.

Die Auswertung der Mitteltemperaturen an Sommer- und Heißen Tagen ergab für die Station Montabaur um 21 Uhr einen Wert von 21 °C.

Im Szenario des „schwachen Klimawandels“ wird das RCP Szenario-2.6 herangezogen und hierbei der Wert des 50. Perzentils (Median) als Temperaturdelta verwendet. Die Lufttemperatur für 2040 beträgt zu Beginn der Modellrechnung damit +0,7 K im Vergleich zum Status quo.

Das Szenario des „starken Klimawandels“ ergibt sich aus dem RCP-Szenario 8.5 und dem 100. Perzentil (Maximum), woraus sich ein Temperaturdelta von +1,5 K ableitet.

Diese Aufprägung des Temperatursignals, bei der das jeweilige Temperaturdelta (+0,7 °C bzw. +1,5 °C) auf die Modell-Ausgangstemperatur (21 °C) aufaddiert wird, basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ (stellvertretende Szenarien zur Untersuchung des Klimawandels) beschriebenen Ansatz (Schär et al., 1996).

Tabelle 6: Zukunfts-Szenarien zur Abbildung des Limburger Stadtklimas 2040 und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in Limburg (Stand 2024) + 5 Bauvorhaben ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 21,0 °C (Modellstart 21 Uhr) ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 1 (RCP 2.6) Schwacher Klimawandel	■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (21 zukünftige Bauvorhaben) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 21,7 °C (Modellstart 21 Uhr) ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 2 (RCP 8.5) Starker Klimawandel	■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (analog Szenario 1) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,5 °C (Modellstart 21 Uhr) ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 % (Bodentrockenheit)

5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, um die Stadtstruktur und die Topografie im Umfeld abbilden zu können. Für das Stadtgebiet von Limburg wurden folgende Geodaten verwendet.

- Geländehöhe
  - Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2019)
- Landnutzung
  - ALKIS (Stand 2024)
  - Digitale Orthophotos[16] (Stand 2021)
  - RGBI-Luftbilder[17] (Stand 2023)
  - OSM (OpenStreetMap) Gleislinien (Stand 2024)
- Strukturhöhe
  - Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2019)

Zukünftiges Limburger Stadtbild

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation in Limburg wird aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Da die Eingangsdaten zudem mittels RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2023 hinsichtlich ihrer Plausibilität verglichen sowie aktuelle Baupläne berücksichtigt wurden, kann 2024 als Bezugsjahr für den Status quo der Klimaanalyse verstanden werden. Zusätzlich wurden fünf aktuell beplante Gebiete für die Modellierung des Status quo aufgenommen, welche von der Stadt Limburg übermittelt wurden.

Vorhaben für Status quo: Vorhabenbezogener Bebauungsplan „Gemini Plaza Dieselstraße“; Bebauungsplan „Auf der Heide“; Planung „Limburger Schlossgarten“; Planung „SonnenWeinGarten“; Planung „Linter Alte Straße“.

[16] Luftbildaufnahme, bei denen der (durch unterschiedliche Geländehöhen bedingte) zentralperspektivische Bildpunktversatz mithilfe eines digitalen Höhenmodells rückgerechnet wurde.

[17] 4-Kanal Multispektralbilder mit der Kanalbelegung RGBI (Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot)

Für die Modellierung des zukünftigen Stadtklimas wurde die Flächenkulisse an das zukünftige Stadtbild mit dem Zieljahr von 2045 angepasst. Hierfür wurden 20 **Entwicklungsflächen/ Vorhaben** in die Modelleingangsdaten integriert.

Zukünftige Vorhaben: Freiflächenplan „Elzer Straße“; Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße II Bauabschnitt (NördKap II)[18]“; Vorplanung „Naherholung LM-Offheim“; Konzept „Am Kirberger Weg“; Lageplan „Unterm Staffler Weg“; Rahmenplan „Blumenrod V und VI“; B-Plan „Hochregallager Staffel“; B-Plan „Auf dem Oberfeld“ (Feuerwehr); B-Plan „Seniorenzentrum Offheim“; „Solarpark Linter-Lindenholzhausen“; „Sportpark Limburg Süd“; „Quartiersentwicklung Zeppelinstraße“; „Ortsumgehung B8“; „Dienstleistungsbereich am ICE-Bahnhof Limburg-Süd, Teil A und Teil B“; B-Plan „Im Mergel“; „Gestaltung Dorfplatz Jahnstraße OT Linter“; „Betriebsgelände Bördner Lindenholzhausen“; „Kita St. Marien“; „Nachverdichtung Diezer Str. 14“.

Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet von Limburg erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 7 km in Ost-West- und 10 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von rund 45 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 168 km² auf (ca. 14 km x 12 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Stadtklima von Limburg berücksichtigt werden können.

Topografie

Das Stadtklima in Limburg wird von der Topografie beeinflusst. Das Gelände variiert im Stadtgebiet zwischen rund 100 und 240 m über NHN. Die Lahn durchfließt die Stadtteile Innenstadt, Staffel, Eschhofen und Dietkirchen, wo das Gelände die niedrigsten Höhenlagen aufweist. Höher gelegen sind hingegen das nördliche Stadtgebiet mit den Stadtteilen Offheim und Ahlbach sowie der südliche Bereich mit Linter und Lindenholzhausen.

Die Topografie im Stadtgebiet wirkt sich insbesondere auf die nächtliche Kaltluftströmung aus. In den Hangbereichen treten Kaltluftabflüsse auf, die das klimatische Geschehen in den Ortschaften von Limburg prägen.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, das von einer ursprünglichen 1-m-Auflösung in das für die Modellierung notwendige 5-m-Raster gemittelt wurde.

Landnutzung

Die Landnutzung wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 29). Ein erheblicher Teil der Fläche Limburgs wird landwirtschaftlich genutzt. Waldgebiete sind dagegen nur vereinzelt und in geringer Ausdehnung vorhanden, etwa am Linterbach, am Schafsberg, das Offenheimer Wäldchen sowie im östlichen Bereich von Lindenholzhausen.

Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen (vgl. Tabelle 5). Zur Erfassung der Bäume wurden die RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2023 in den Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) überführt. Über einen definierten NDVI-Schwellenwert konnten Bäume automatisiert von vegetationslosen Flächen getrennt und in Kombination mit der Strukturhöhe einzelne Baumstandorte identifiziert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass auch Bäume im privaten Bestand erfasst werden, die i.d.R. kein Bestandteil öffentlicher Baumkataster sind. Allerdings können bei der vorgegeben Modellauflösung von 5 x 5 m einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von 2,5 m und kleiner) nicht erfasst werden.

[18] Modellierter Planungsstand und Aufbau von NördKap II mittlerweile veraltet

Für die Integration der Entwicklungsflächen wurden die bestehenden Pläne in das Nutzungsraster übernommen. Lagen konkrete städtebauliche Entwürfe vor, flossen die darin dargestellten Elemente – wie geplante Gebäude, Straßen oder Bepflanzungen – direkt in das Raster ein. Waren hingegen nur Bebauungspläne ohne detaillierte Planskizzen vorhanden, wurde die künftige Flächennutzung anhand der vorgesehenen Nutzungsart (z. B. Wohnen, Gewerbe), der Baufenster mit ihrer Grundflächenzahl (GRZ) sowie gegebenenfalls der Geschosshöhen mithilfe des sogenannten Mischpixel-Ansatzes angenähert. Hierbei werden die vorgesehenen Nutzungsanteile prozentual bestimmt und anschließend durch eine zufällige Verteilung auf die Rasterzellen übertragen. Dadurch wird eine annähernd realistische, aber modellhafte Darstellung der geplanten Nutzungsstruktur erzielt (s. Abbildung 29).

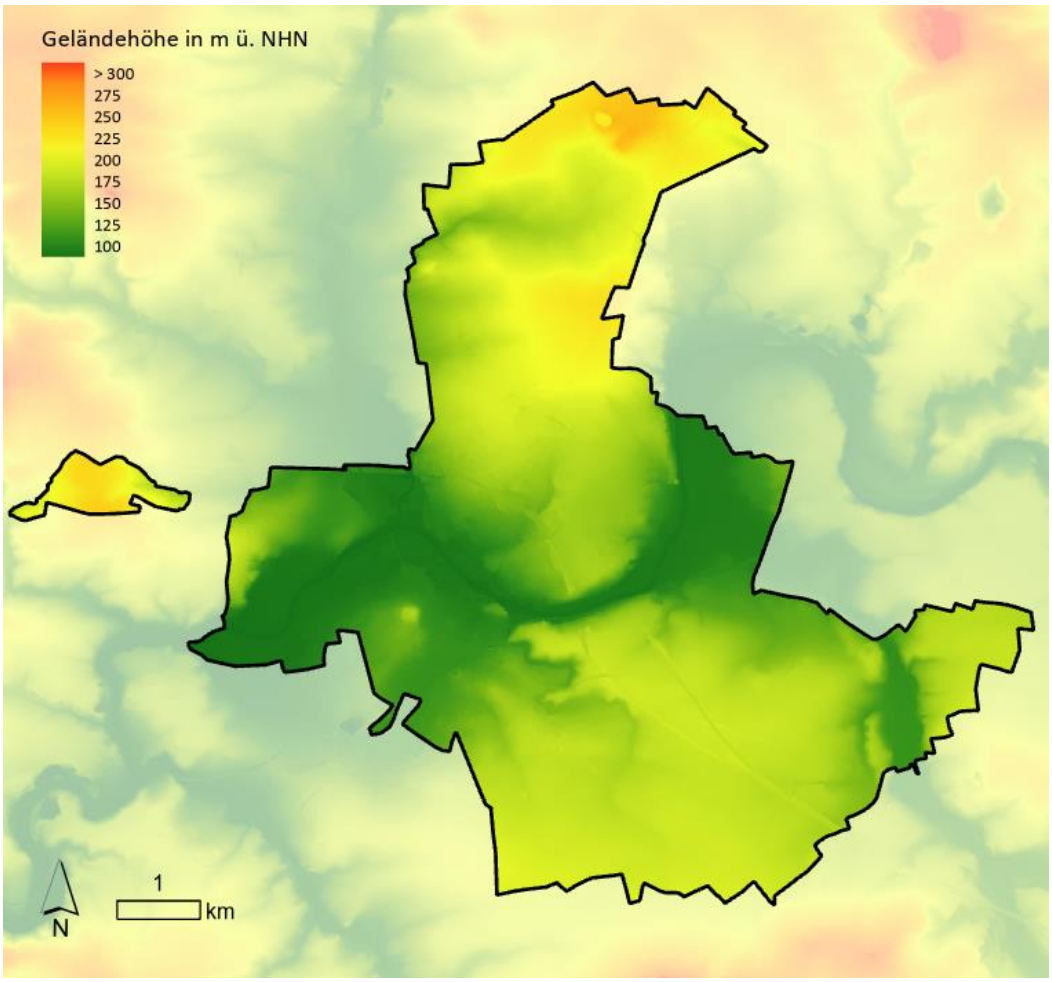


Abbildung 28: Geländemodell von Limburg a. d. Lahn.

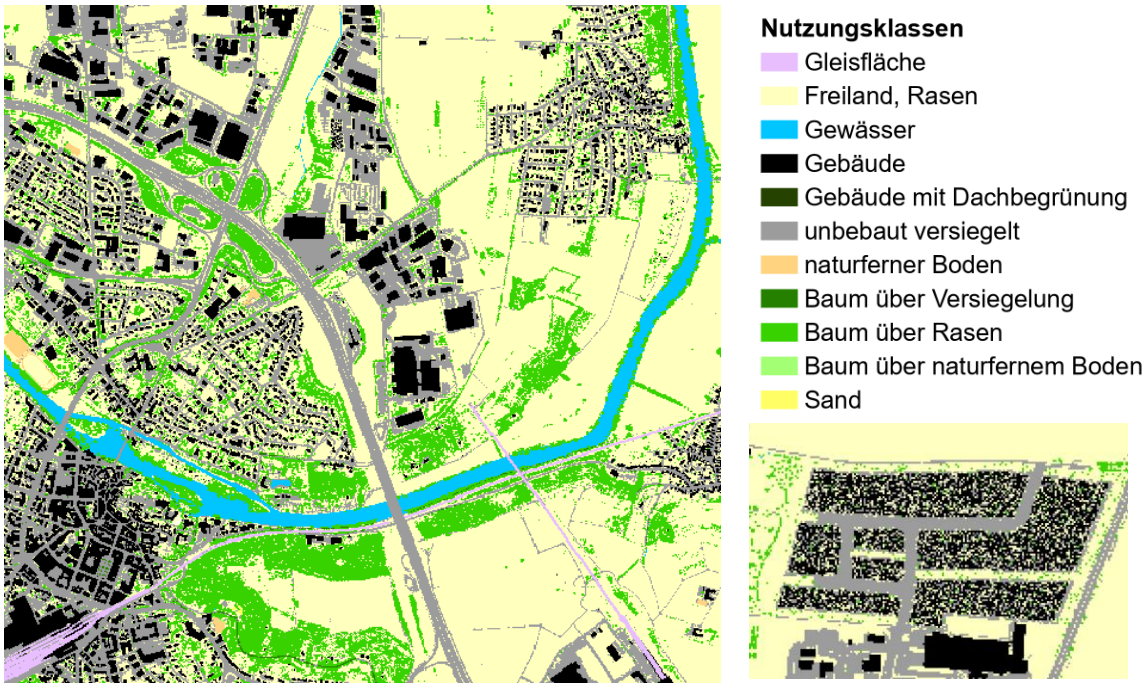


Abbildung 29: Modelleingangsdaten „Landnutzungsklassen“ für den Status quo in einem Ausschnitt von Limburg sowie eine „Mischpixelfläche“ im Zukunftsszenario.

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 30). Aus diesen punkthaften Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der 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 wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem; Stand 2024), die auf Basis von digitalen Luftbildern (Stand 2023) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 6), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte in Kapitel 8.4).

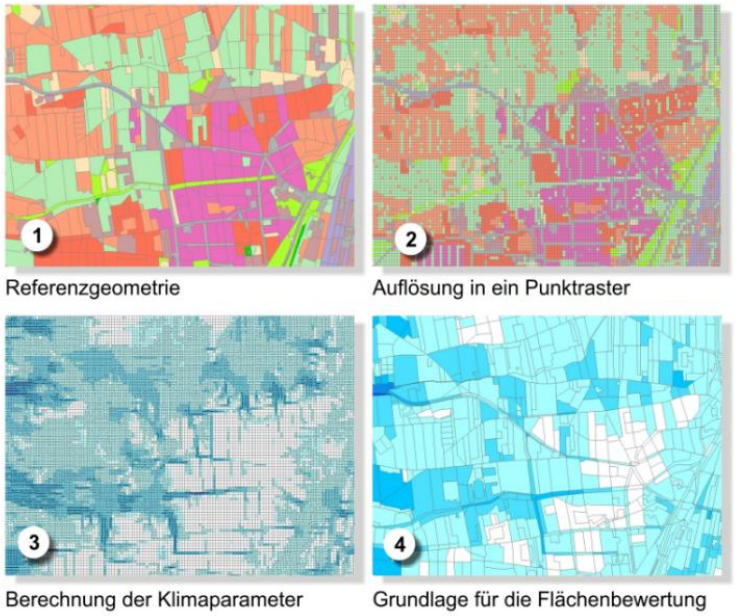


Abbildung 30: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN DER MODELLIERUNG

Mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21.06.) modelliert. Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-)Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

Für die Ausgangsbedingungen der Modellierung ergibt sich daraus:

- Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet
- Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab
- Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um allein auf dieser Basis in klassischen Stadtklimaanalysen entschärft werden zu können. Dennoch besitzen selbstverständlich alle im Handlungskonzept zur Klimaanpassung aufgeführten Maßnahmen das Potential, auch absolute Extremwetterlagen in ihrer gesundheitlichen Wirkung zu reduzieren.

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 7). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangpunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte (GB). Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 7: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes (Ost-West)	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes (Nord-Süd)	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s] (Vertikal)	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potentielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient Momentum	[m^2/s^2]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m^2/s^2]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s^2]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m^2]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrundeliegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den oben genannten Modellausgabe-Größen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von den Anwendenden in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden können. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH-Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus sechs abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteniveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 8).
Dabei handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, da sich diese nicht auf das bodennahe Niveau begrenzen lässt, sondern bis zu einer spezifischen Höhe im Modell berücksichtigt wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesverlaufs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

Tabelle 8: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt.

Parameter und Einheit	Einheit	Höhenniveau	Auswertezeit
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftproduktionsrate	m^3/m^2h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	$m^3/(s*m)$	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr

5.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, welches bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc-Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für den Auftraggeber zu bereinigen.

5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozessgeschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak, 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, die realen Gegebenheiten allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH-3D erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie (VDI 3787, Blatt 7, 2024) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend im

sogenannten RANS-Modus betrieben (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), der Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abbildet. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende LES-Modus (*Large Eddy Simulation*), der im Zusammenhang mit Stadtklima-Anwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus das sogenannte „Modellrauschen". Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungs- bzw. Maßnahmenszenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 °C pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Insgesamt zeigt sich, dass modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

Vor allem kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich ergeben aus:

- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um eine der höchsten Auflösungen, die gegenwärtig für Städte modelliert werden können. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrundeliegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchen-Modell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Da zum heutigen Stand keine gesamtstädtischen Geodaten in der benötigten Differenzierung vorliegen, wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegenden Zusatzinformationen aus dem Versiegelungskataster über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C führen kann, was wiederum kleinräumige Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen bedingen kann (Gross, 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und modelltechnisch abgebildet werden können.

Mit Blick auf das Zukunftsszenario in Verbindung mit den dort integrierten Entwicklungsflächen kommt die Unsicherheitsquelle der sog. „Mischpixel“ hinzu. Diese repräsentieren aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Planungen auf den entsprechenden Flächen notwendigerweise einen vereinfachten Ansatz, der zwar realistische Nutzungsanteile innerhalb der Fläche repräsentiert, diese aber zufällig auf der Fläche verteilt. Das in der Realität - also nach Vorhabenrealisierung – entstehende Nutzungsmosaik (Gebäude, ebenerdige Versiegelungen, ebenerdiges Grün, Bäume) wird damit nur (oder auch: immerhin) näherungsweise getroffen. Die Unsicherheiten nehmen dabei mit abnehmendem Verhältnis überbauter Grundstücksfläche zu unbebautem Freiraum zu. Das bedeutet, dass die Unsicherheiten bei Vorhaben wie beispielsweise bei einem einzelnstehenden Hochhaus auf einem großen Grundstück mit viel Freiraum am größten ausfallen (weil es innerhalb der Fläche eine vergleichsweise große Variationsmöglichkeit gibt), während sie bei Vorhaben wie beispielsweise einem Gewerbegebiet mit einer GRZ von 0,8 sehr gering ausfallen (weil es innerhalb der Fläche vergleichsweise geringe Variationsmöglichkeiten gibt). In aller Regel ähneln die Prüfflächen eher dem letzteren Typ mit eher kleinerem Variationspotential, sodass zwar kleinräumige Unsicherheiten bestehen, diese im gesamtstädtischen Kontext aber valide Ergebnisse liefern.

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und dem Zukunftsszenario differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation kann eine überwiegend aktuelle Datengrundlage aus den Jahren 2023 und folglich eine geringe Unsicherheit attestiert werden.

Für Limburg existiert keine groß- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Das Zukunftsszenario enthält zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten ca. 20 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen auch Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

6. Einzelparameterkarten

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo und die Zukunftsszenarien beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr (UTC+1) für die Tagsituation. Die Modellergebnisse wurden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (.tif)) an die Stadt Limburg übergeben.

6.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche zu identifizieren (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten **Absolutwerte** der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die **relativen Unterschiede** innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen. In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie der Lage und Höhe des Standorts kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So beträgt die bodennahe nächtliche Lufttemperatur unter 13,5 °C auf reliefierten Freiflächen bis 20 °C über Gewässerflächen. Die mittlere nächtliche Temperatur im Stadtgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 15,1 °C (s. Tabelle 9). In den beiden Zukunftsszenarien steigen die Temperaturen deutlich an, so liegt die Mitteltemperatur im starken Klimawandelszenario um 1,6 °C höher als im Status quo. Mit dem Klimawandel erwärmen sich die Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen ähnlich stark wie die Grün- und Freiflächen, wodurch Spannweite (Wärmeinseleffekt) im Status quo und für die beiden Zukunftsszenarien nahezu unverändert bestehen bleibt. Ungleichmäßiger zeigen sich die Temperaturänderungen im Bereich der Entwicklungsflächen.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der nächtlichen Temperaturkennwerte in den Modellrechnungen Status quo und Zukünfte.

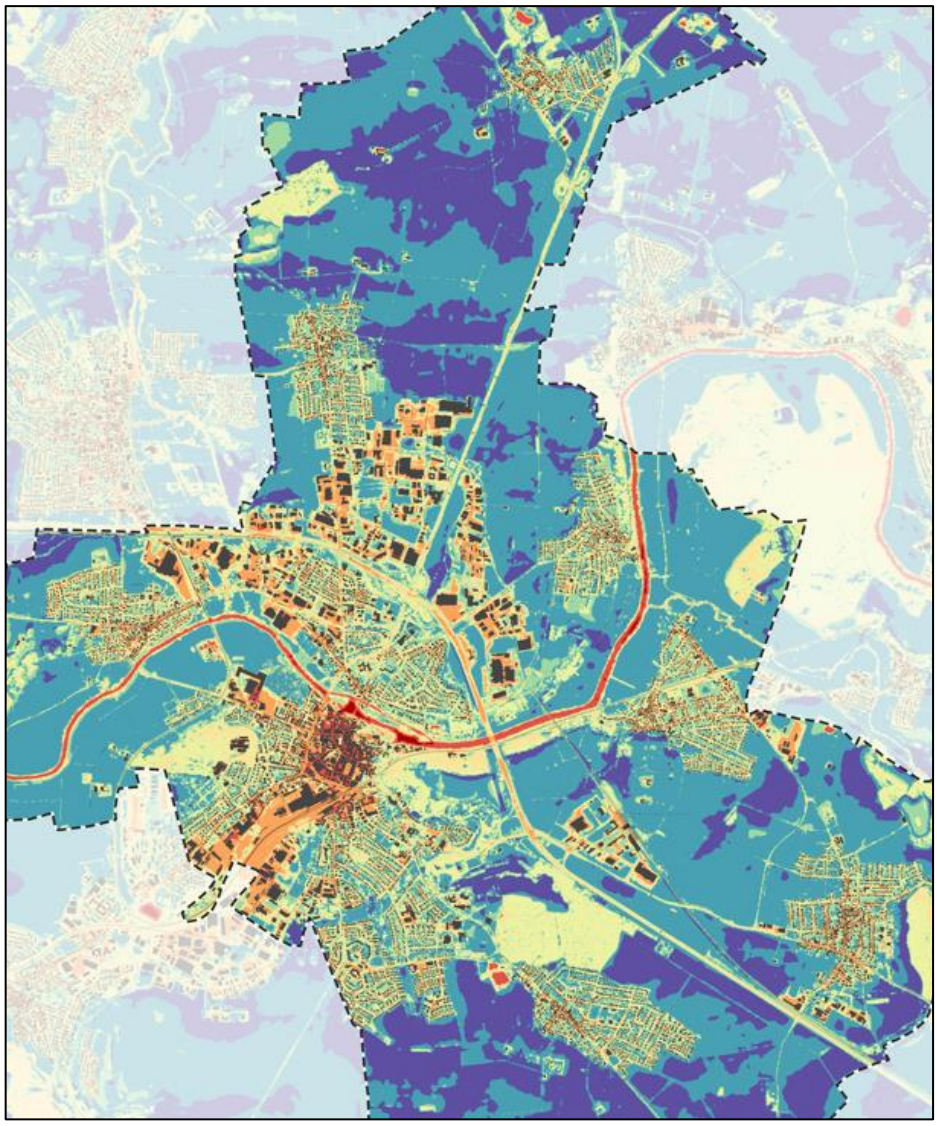
Modellrechnung	Nächtliche Minimumtemperatur im Ausgleichsraum	Nächtliche Maximumtemperatur im Siedlungsraum	Nächtliche Mitteltemperatur im Stadtgebiet	Spannweite
Ist-Zustand	11,4 °C	20,1 °C	15,1 °C	8,7 °C
Schwacher Klimawandel	12,1 °C	20,4 °C	15,9 °C	8,3 °C
Starker Klimawandel	12,9 °C	21,0 °C	16,7 °C	8,1 °C

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Limburger Altstadt bzw. Innenstadt sind die höchsten Bebauungsdichten und die stärkste Überwärmung (>19 bis 20 °C) vorzufinden. Auch die Industrie- und Gewerbegebiete weisen hohe Versiegelungsgrade auf, was sich in der großen nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (>18 bis 19 °C).

Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums sind in den aufgelockerten Randbereichen und in Stadtteilen wie Linter, Lindenholzhausen oder Dietkirchen vorzufinden (rd. 14 bis 18 °C).

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte von unter 14 bis 15 °C auf (z.B. landwirtschaftliche Flächen im Umland). Innerstädtische Grünflächen wie Parks, Sportplätze und Hausgärten kühlen sich in der Nacht auf 14,5 bis 17 °C ab. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche, sodass bodennah Temperaturen von etwa 16 bis 18 °C in der Nacht erreicht werden (bspw. Waldgebiete am Schafsberg, am Linterbach oder zwischen Blumenrod und Linter). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünten Siedlungsräumen zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesverlauf der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können. Dies trifft auch für die größeren Fließ- und Stillgewässer in Limburg zu (bspw. 20 °C über der Lahn).



Nächtliche Lufttemperatur in °C

Dargestellt wird die bodennahe Lufttemperatur in 2m Höhe zum Zeitpunkt der maximalen Abkühlung (4 Uhr nachts).

- bis 14
- > 14 bis 15
- > 15 bis 16
- > 16 bis 17
- > 17 bis 18
- > 18 bis 19
- > 19 bis 20
- > 20



Abbildung 31: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in Limburg im Status quo.

Aufgrund des Klimawandels ist im optimistischen Szenario in naher Zukunft (Zieljahr 2045) mit einer sommerlichen Temperaturzunahme von durchschnittlich 0,7 K gegenüber der Referenzperiode (1991-2020) zu rechnen (RCP-Szenario 2.6), wohingegen im RCP-Szenario 8.5 für selbiges Zieljahr von einer Temperaturzunahme um 1,5 K ausgegangen wird.

Im Limburger Stadtgebiet zeigt sich in den Szenarien ein deutlicher Anstieg der nächtlichen Lufttemperatur (s. Abbildung 32 und Abbildung 33). Die Altstadt weist bei einem starken Klimawandel fast flächendeckend Temperaturen von über 20 °C auf. Auch die Gewerbegebiete sind großflächig mit 19 bis über 20 °C besonders warm. Die locker bebauten Wohngebiete am Siedlungsrand kühlen sich nachts nicht mehr unter 16 °C ab (Status quo: 14 -15 °C) und weisen in einem Großteil des Straßenraums hohe Temperaturen von bis über 19 °C auf. Die im Vergleich zur Siedlung kältere Luft über landwirtschaftlichen Flächen kühlt sich im starken Klimawandel jedoch nur noch auf 15 - 16 °C ab und ist somit um etwa 1 - 2 °C wärmer als die Kaltluft im Status quo.

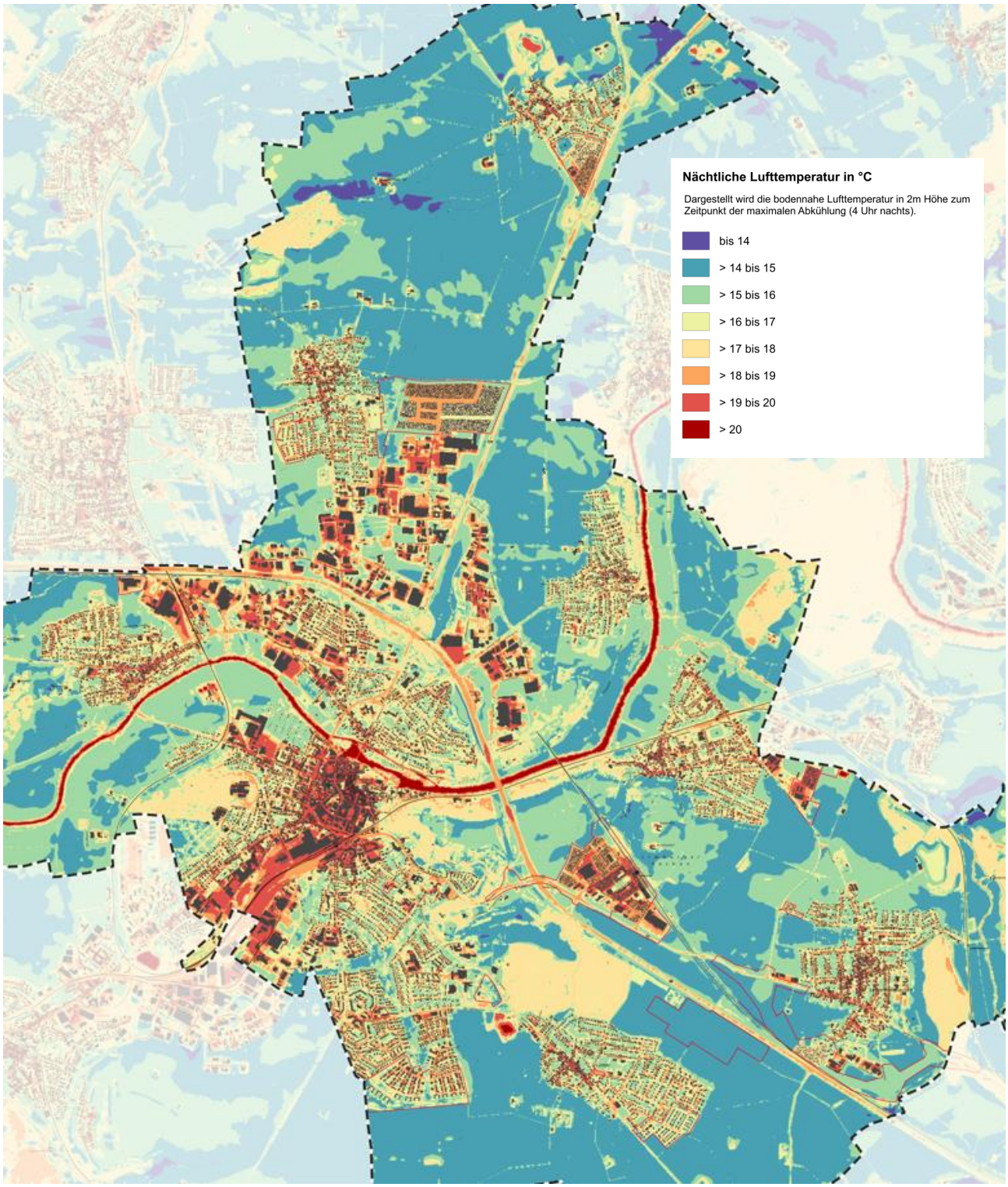


Abbildung 32: Bodennahe nächtliche Temperatur im schwachen Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet.

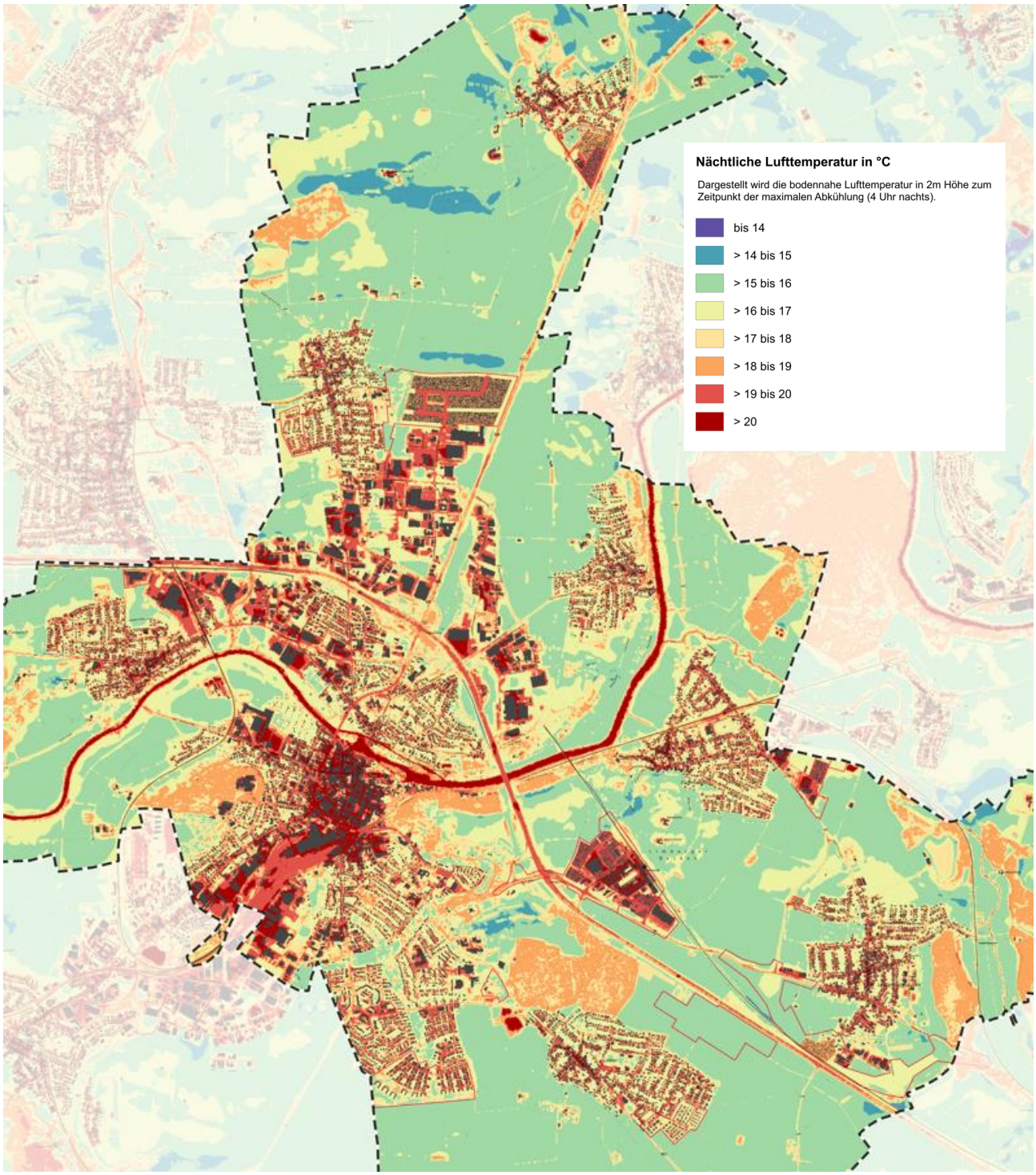


Abbildung 33: Bodennahe nächtliche Temperatur im starken Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet.

Wie beschrieben wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die Kaltluftproduktionsrate verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht (Abbildung 34). Entsprechend der genannten Ergebnisse findet über versiegelten Flächen und über Gewässern (nahezu) keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über Freiflächen produziert, doch auch mit Bäumen bestandene Grünflächen sowie Parks und Gärten im Wohnumfeld können als Kaltluftentstehungsgebiete dienen.



Abbildung 34: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate in Limburg im Status quo.

6.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief[19] bestimmt und zeigt im hügeligen Gebiet eine große Variabilität. Auf den Freiflächen des reliefierten Stadtumlands im Norden, Westen und Süden von Limburg werden Werte von über 30 m³/(s*m) erreicht, wodurch die Außenstadtteile Staffel, Ahlbach und Blumenrod reichlich von Kaltluft durchströmt werden. Im Umland östlich der Kernstadt ist die Kaltluftströmung allgemein schwächer ausgeprägt, dort beträgt der Volumenstrom weitestgehend unter 30 m³/(s*m), teils unter 15 m³/(s*m). Insbesondere die Innenstadt wird kaum mit Kaltluft versorgt (s. Abbildung 35).

Die für den Limburger Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von Kaltluftleitbahnen, hervorgehoben (Kap. 7).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Hangbereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 35 ist die Strömungsrichtung der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 100 m aggregiert wurden.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme (bspw. aus ausgehend von Friedhöfen, Rasensportflächen oder sogar begrünten Innenhöfen). So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in den Wäldern in Limburg sehr gering ausfällt (Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs). Auch der Kaltluftvolumenstrom

[19] Höhengestaltung der natürlichen Erdoberfläche mit ihren Höhen, Tiefen, Unregelmäßigkeiten und Formen.

ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern, wie bspw. östlich der Kernstadt.

Das bodennahe Strömungsfeld stellt die Geschwindigkeit und Richtung des Kaltluftabflusses dar und ist der Abbildung 36 zu entnehmen. Das räumliche Muster ähnelt dabei dem Kaltluftvolumenstrom. Die Windgeschwindigkeit der Kaltluft ist im geneigten Gelände und über Freiflächen am höchsten. Hindernisse wie Bäume oder Gebäude führen zu einem Abbremsen des Kaltluftstroms.

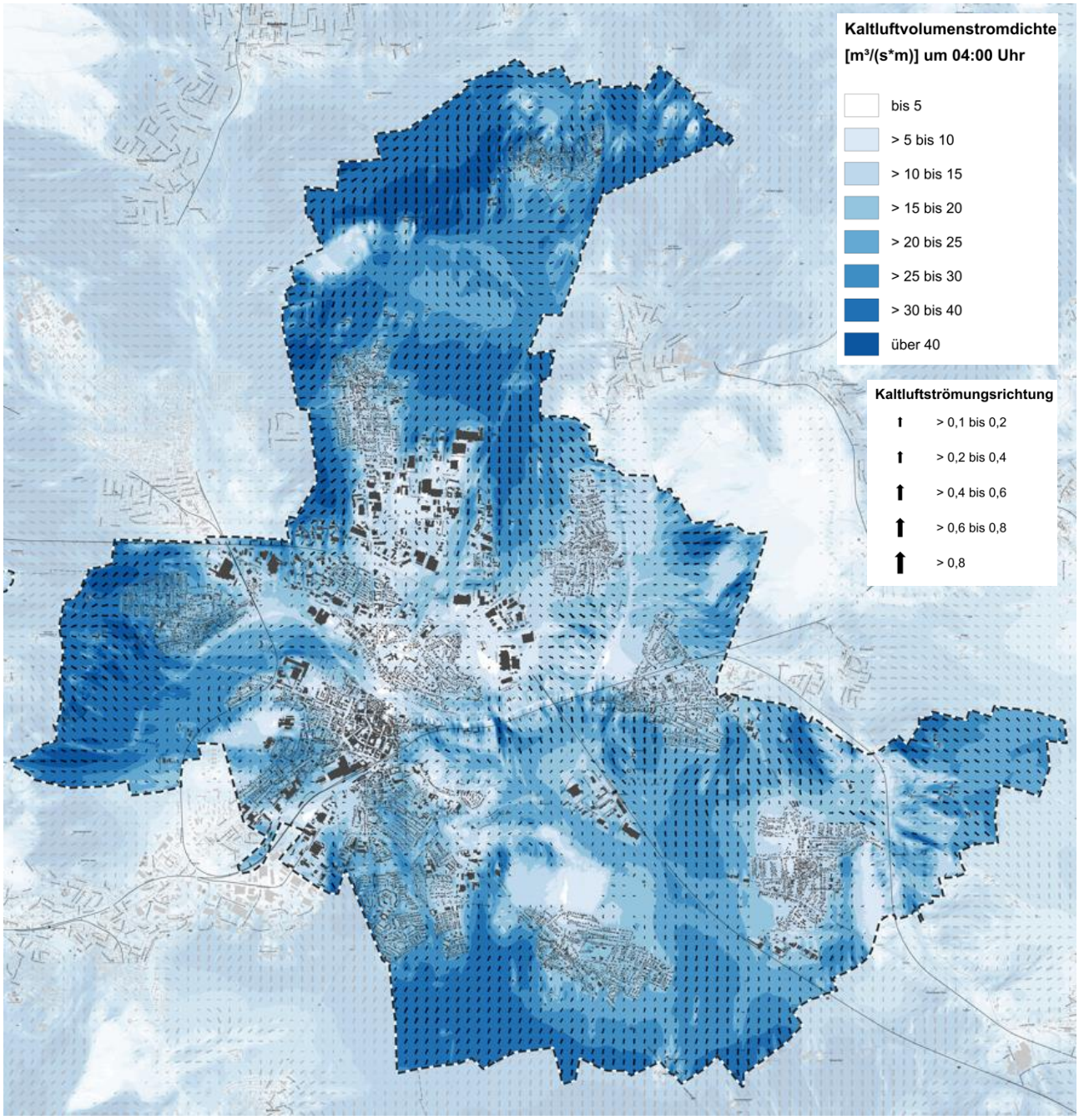


Abbildung 35: Kaltluftvolumenstromdichte im Limburger Stadtgebiet im Status quo.

In den Klimawandelszenarien verändert sich die Strömung bei gleichbleibender Landnutzung nur geringfügig, da die Temperaturdifferenzen zwischen Umland und Siedlungsbereich weitgehend konstant bleiben. Allerdings ist die Kaltluft in den Szenarien insgesamt wärmer als im aktuellen Zustand. Im Falle einer Siedlungsentwicklung verändern sich die kleinräumigen Luftströme, neue Gebäude führen zu einer Umlenkung der Kaltluft, welche durch die erhöhte Rauigkeit zudem insgesamt abgebremst wird (s. Kap. 6.4).

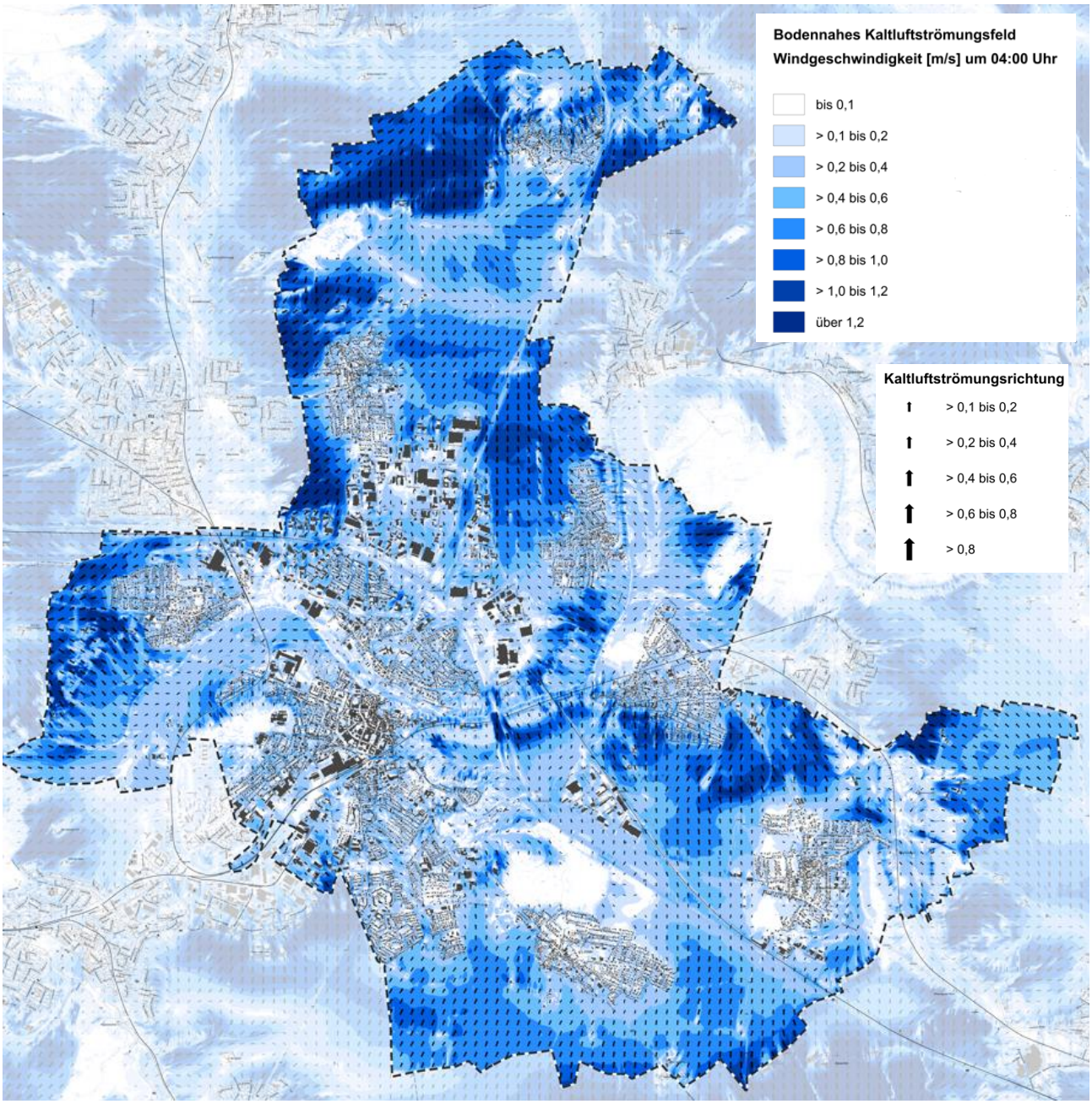


Abbildung 36: Bodennahes Kaltluftströmungsfeld im Limburger Stadtgebiet im Status quo.

6.3 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf (s. Abbildung 37). Das der PET zugeordnete thermischen Befinden und die physiologischen Belastungsstufen nach VDI 3787 (VDI 3787, Blatt 2, 2022) sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (z.B. Waldgebiete am Linterbach, am Schafsberg, in Lindenholzhausen). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass entlang der Lahn überwiegend nur eine schwache Wärmebelastung und damit eine gute Aufenthaltsqualität am Tage vorliegt.

Die unbeschatteten Freiflächen, zumeist Agrarflächen und Grünland, weisen mit über 38 °C bis zu 43 °C hingegen eine starke bis extreme Wärmebelastung auf.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine deutlich heterogene Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen mit PET-Werten zwischen 35 °C und 43 °C treten insbesondere auf versiegelten, unverschatteten Straßen und Plätzen auf. Solche Bereiche finden sich beispielsweise in der Altstadt und in den Gewerbegebieten. Eine hohe Hitzebelastung betrifft bspw. die Straßenzüge der Diezer Straße, der Schiede oder der Westerwaldstraße.

Neben dem unbeschatteten Straßenraum heizen sich auch zahlreiche Hausgärten tagsüber stark auf. Die Wohngebiete bieten zwar einen hohen Grünanteil und daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen, doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand an großkronigen und damit schattenspendenden Bäumen. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann, weil er „durch das 5 m-Raster fällt“, mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Öffentlich zugängliche, baumbestandene innerstädtische Grünflächen wie bspw. nahe des Spielplatzes am Löffelberg, im Weiterpark entlang des Großbachs oder der Limburger Friedhof stellen wichtige Erholungsräume dar, welche bei Hitzebelastung von der Bevölkerung aufgesucht werden können. Auch baumbestandene Innenhöfe, wie bspw. an der Parkstraße, reduzieren die Hitzebelastung im Stadtgebiet am Tage deutlich.

Eine moderate thermische Belastung (PET < 29 °C) findet sich auf beschatteten Straßen und Plätzen, etwa entlang der Straße Im Großen Rohr und der Weilburger Straße oder auf dem Park & Ride an der Wiesbadener Straße.

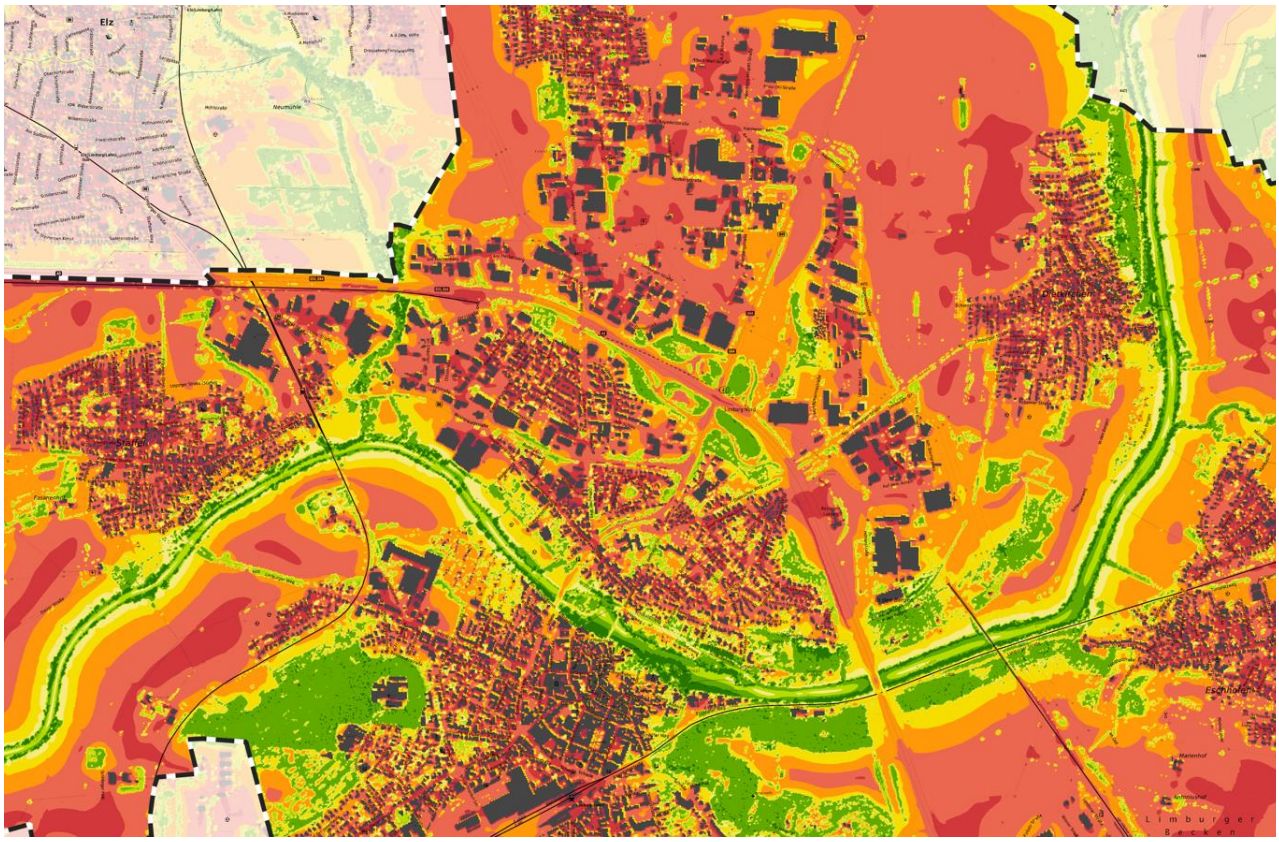
Tabelle 10: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET in den Tagesstunden (Auszug nach VDI 2022).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
> 18 °C bis ≤ 23 °C	Komfortabel (neutral)	Kein thermischer Stress
> 23 °C bis ≤ 29 °C	Leicht warm	Leichte Wärmebelastung
> 29 °C bis ≤ 35 °C	Warm	Moderate Wärmebelastung
> 35 °C bis ≤ 41 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung / Hitzestress
> 41 °C	Sehr heiß	Extrem starke Wärmebelastung / Hitzestress

In den Klimawandelszenarien nimmt die Hitzebelastung im gesamten Stadtgebiet deutlich zu (s. Abbildung 38 und Abbildung 39). Während beim moderaten Klimawandel mit einem vergleichsweise geringen Temperaturanstieg von rund +0,7 K zu rechnen ist, erhöht sich die Hitzebelastung im Szenario des starken Klimawandels um mindestens +1,5 K. Diese Entwicklung wird durch zusätzliche Bodentrockenheit weiter verstärkt. Die maximale PET-Temperatur liegt dabei fast 2 K über dem aktuellen Zustand (s. Tabelle 11). In diesem Szenario würde sich eine extreme Wärmebelastung mit Werten zwischen 41 und über 43 °C nahezu flächendeckend in den Siedlungsgebieten und auf den Agrarflächen ausbreiten. Auch in den Waldgebieten stiege die Temperatur von derzeit 23–26 °C auf 26–29 °C, was die Aufenthaltsqualität dort spürbar verringern würde.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Wärmebelastung (PET) in den Modellrechnungen Status quo und Zukünfte.

Modellrechnung	PET Minimumtemperatur im Ausgleichsraum	PET Maximumtemperatur im Siedlungsraum	PET Mitteltemperatur im Stadtgebiet	Spannweite
Ist-Zustand	17,3 °C	45,0 °C	36,7 °C	27,7 °C
Schwacher Klimawandel	17,8 °C	45,8 °C	37,3 °C	28,0 °C
Starker Klimawandel	18,9 °C	46,9 °C	39,8 °C	28,0 °C



Wärmebelastung am Tage
(PET: Physiologisch aquivalente Temperatur)
in °C in 1,1 m über Grund um 14:00 Uhr

- unter 23
- > 23 bis 26
- > 26 bis 29
- > 29 bis 32
- > 32 bis 35
- > 35 bis 38
- > 38 bis 41
- > 41 bis 43
- über 43

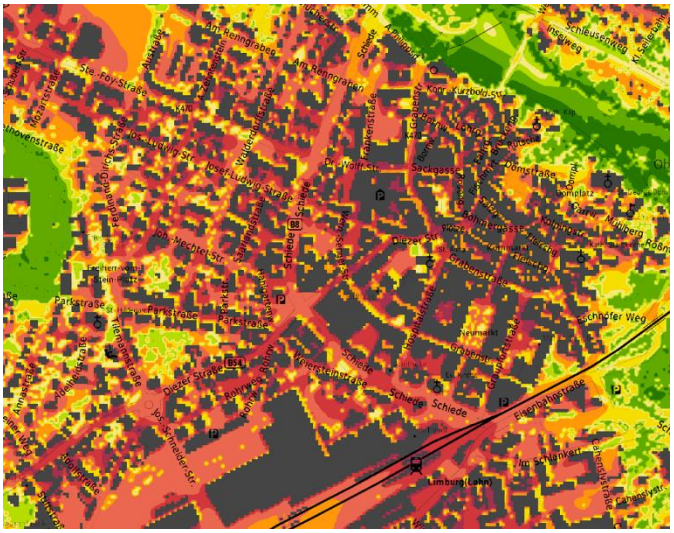


Abbildung 37: Wärmebelastung am Tage (PET) im Status quo - Kartenausschnitten des Limburger Stadtgebiets.

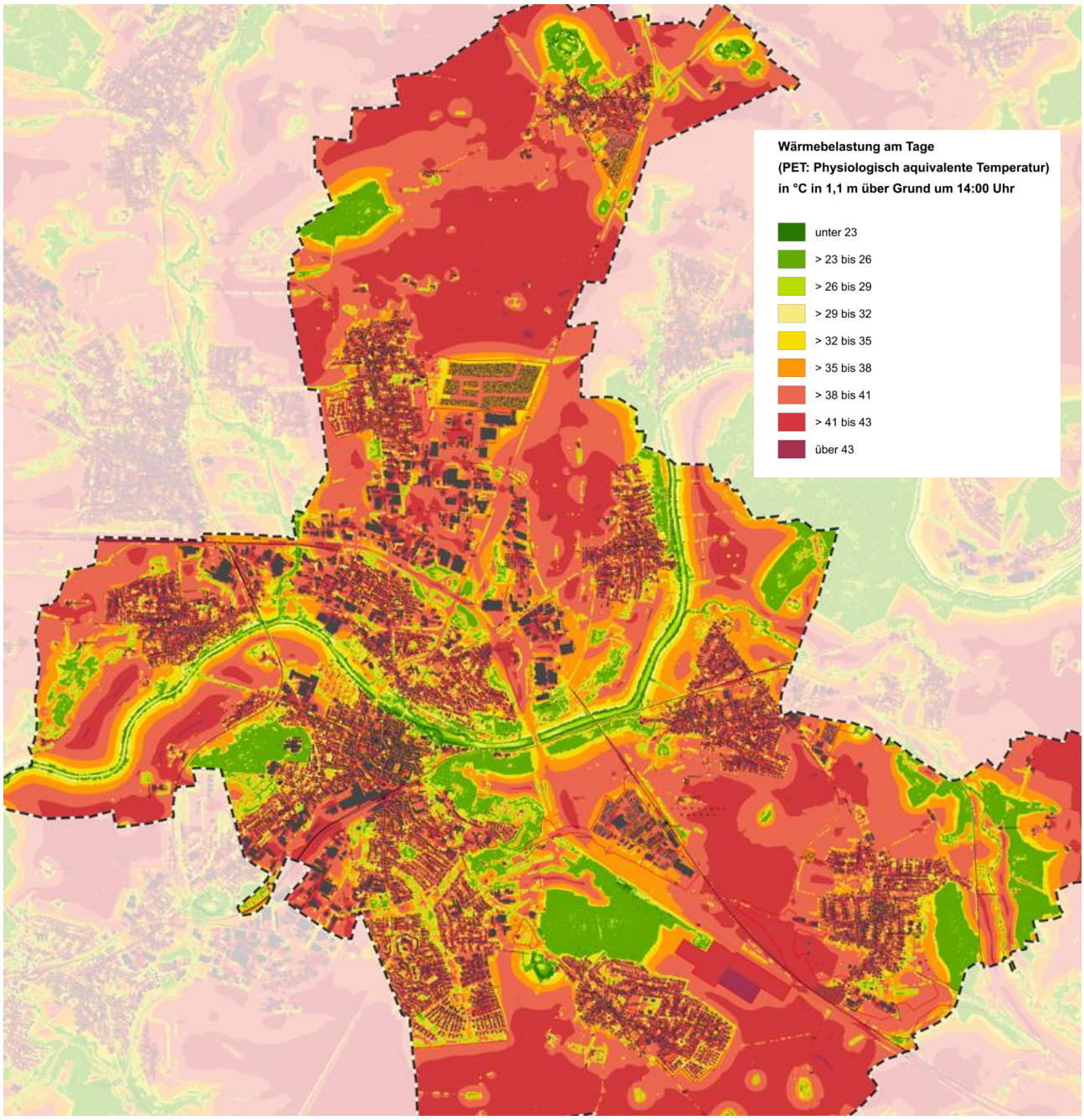


Abbildung 38: Wärmebelastung am Tage (PET) im schwachen Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet.

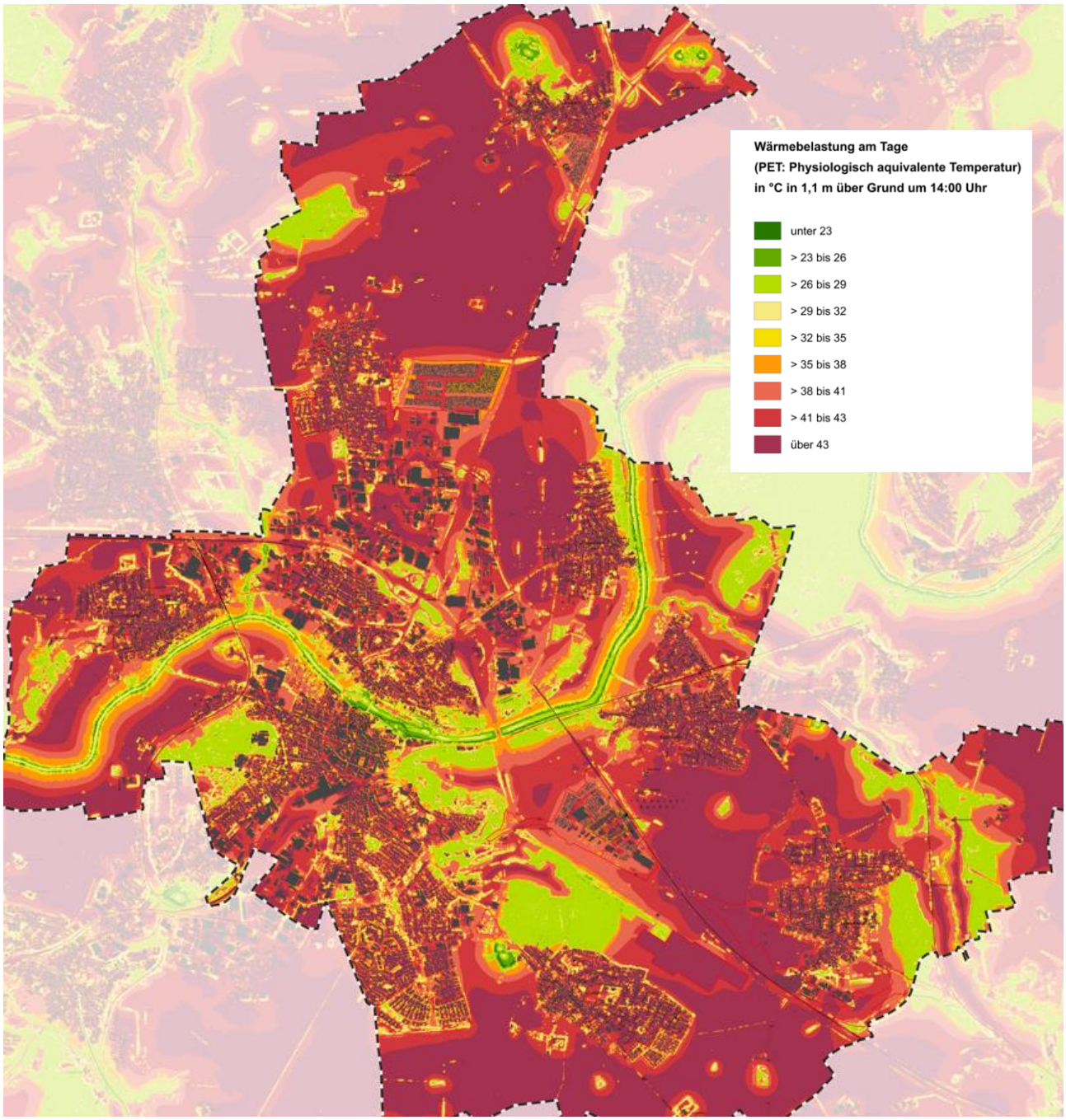


Abbildung 39: Wärmebelastung am Tage (PET) im starken Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet.

6.4 ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

In den Klimawandelszenarien wurde die gegenwärtige Stadtkulisse um zukünftige Bauprojekte erweitert. Aus den Ergebnissen der Modellierung kann demnach eine erste Einschätzung zu den klimatischen Auswirkungen der Entwicklungsflächen unter Berücksichtigung des jeweiligen Klimawandelszenarios abgegeben werden.

Die folgende Abbildung 40 zeigt die Lage und Nummerierung der Entwicklungsflächen. Im Anhang 1 sind die gemittelten Klimaparameter der Entwicklungsflächen dargestellt. Zusätzlich zum jeweiligen Flächenmittelwert werden dort auch die mittleren Veränderungen im schwachen und starken Klimawandelszenario im Vergleich zum Status quo ausgewiesen.

Für die Entwicklungsflächen „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“ und „Unterm Staffler Weg“ ist zudem eine genauere Betrachtung und weiterführende Bewertung im Kapitel 8.4.3 vorgenommen worden.

Zukünftige Vorhaben:

Nr. 5a: Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße II. BA (NördKap II)[20]	**Nr. 5b** Vorplanung „Naherholung LM-Offheim“ im Rahmen des Bebauungsplanes „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“	**Nr. 6:** Bebauungsplan „Am Kirberger Weg“	**Nr. 7:** Vorentwurf Lageplan „Unterm Staffler Weg“
Nr. 8: Rahmenplan „Blumenrod V und VI“	**Nr. 9:** Bebauungsplan „Hochregallager Staffel“	**Nr. 10:** Bebauungsplan „Auf dem Oberfeld“ (Feuerwehr)	**Nr. 11**: Bebauungsplan „Seniorenzentrum Offheim“
Nr. 12: „Solarpark Linter-Lindenholzhausen“	**Nr. 13:** „Sportpark Limburg Süd“	**Nr. 14:** „Quartiersentwicklung Zeppelinstraße“	**Nr. 15a - c:** „Ortsumgehung B8“
Nr. 16 a-b: „Dienstleistungsbereich am ICE-Bahnhof Limburg-Süd, Teil A und Teil B“	**Nr. 17a - e:** Bebauungsplan „Im Mergel“	**Nr. 18:** „Gestaltung Dorfplatz Jahnstraße OT Linter“	**Nr. 19:** „Betriebsgelände Bördner Lindenholzhausen“
Nr. 20: Freiflächenplan „Elzer Straße“	**Nr. 22:** „Kita St. Marien“	**Nr. 23:** „Nachverdichtung Diezer Str. 14“	

[20] modellierter Planungsstand und Aufbau von NördKap II mittlerweile veraltet

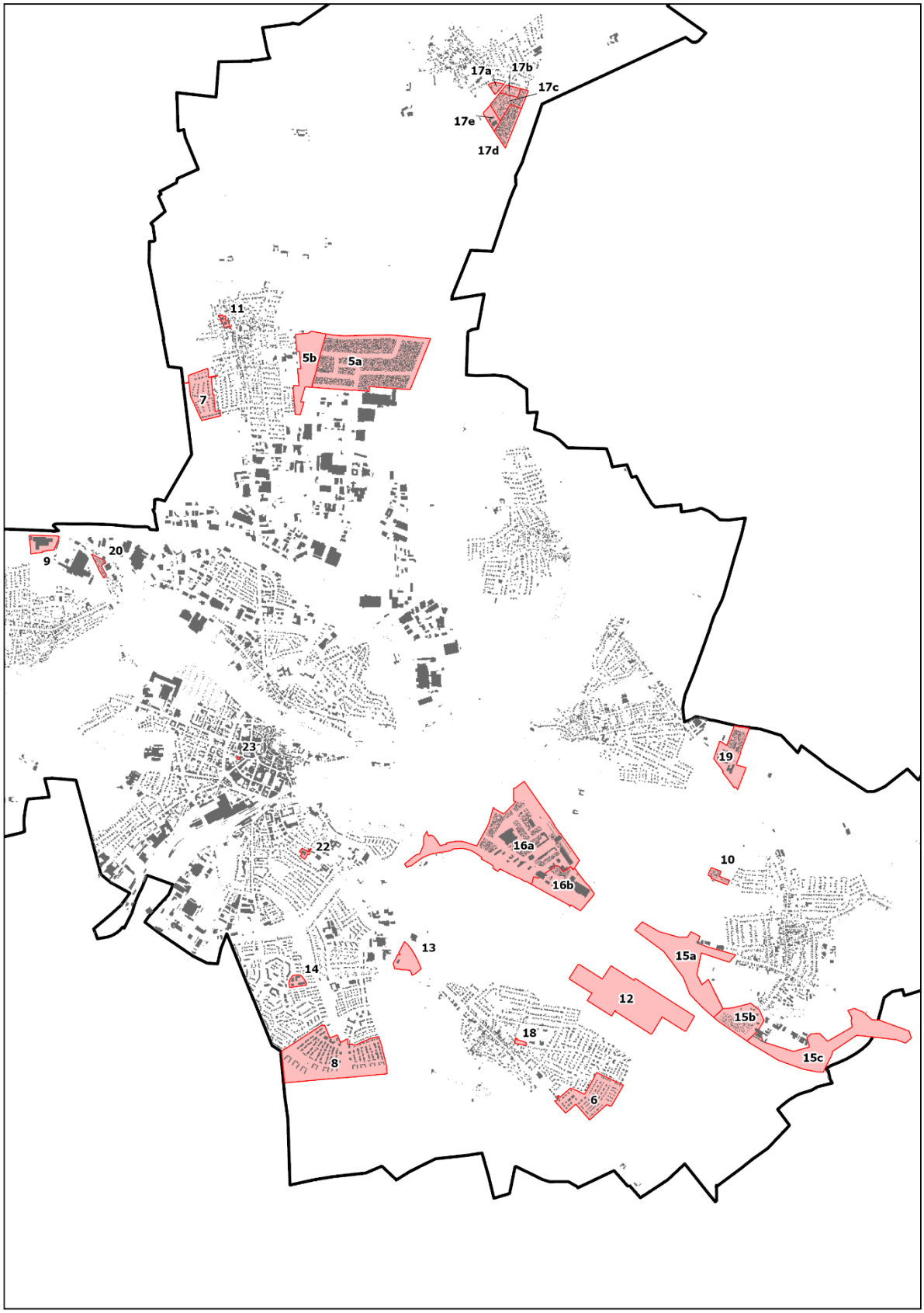


Abbildung 40: Position und Nummerierung der Entwicklungsflächen.

Für die Entwicklungsflächen Am **Kirberger Weg, Blumenrod V und VI, , Nördlich der Kapellenstraße II. BA sowie die Quartiersentwicklung Zeppelinstraße** sind Klimaanpassungsmaßnahmen vorgesehen, die die klimatische Situation in den jeweiligen Gebieten weiter verbessern können. Es handelt sich zum Teil um Projekte, die sich zum Zeitpunkt der Verfassung des vorliegenden Berichts (Stand März 2026) in Bearbeitung finden, sodass sich noch Änderungen bezüglich der Klimaanpassungsmaßnahmen ergeben können.

Zudem ist zu beachten, dass durch die vorgesehenen Klimaanpassungsmaßnahmen in den Gebieten die klimatische Analyse der Entwicklungsflächen in diesem Kapitel keinen abschließenden Stand darstellt.

Baugebiet „Am Kirberger Weg“

Verfahrensstand: Der Satzungsbeschluss vom 28.09.2024 liegt vor.

Klimaanpassungsmaßnahmen: Dachbegrünung, wasserdurchlässige Belege, Baumpflanzungen, Oberflächenentwässerung über Mulden-/Rigolensysteme, öffentliche und private Grünflächen.

Im Baugebiet „Am Kirberger Weg“ sind verschiedene Maßnahmen zur Begrünung und Regenwasserbewirtschaftung vorgesehen. Teilbereiche der Dächer sollen begrünt werden, wobei Regenwasserstau und Drainschicht integriert sind. Die befestigten Grundstücksflächen werden in wasserdurchlässiger Form ausgeführt, während Stellplatzanlagen ab jeweils vier Stellplätzen mit einem Laubbaum bepflanzt werden. Für alle Straßen sind Baumpflanzungen festgesetzt, wobei die Baumscheiben zugleich der Oberflächenentwässerung über Mulden- und Rigolensysteme dienen. Die Straßenentwässerung wird in öffentliche Grünflächen mit Mulden- und Rigolensystemen geleitet. Ergänzend bestehen generelle Festsetzungen zur Begrünung der privaten und öffentlichen Grünflächen sowie zur Ortsrandeingrünung.

Baugebiet „Blumenrod V und VI“

Verfahrensstand: Der Satzungsbeschluss ist für Ende des Jahres 2026 vorgesehen, die Realisierung ist ab 2029/2030 geplant und wird dem Bedarf angepasst bauabschnittsweise erfolgen.

Im Rahmen der bereits seit 2019 laufenden Planungen sind die zu der jeweiligen Zeit verfügbaren Daten bezüglich Klimaanpassung eingeflossen.

Klimaanpassungsmaßnahmen: Baumpflanzungen, Grünkorridor zur Kaltluftproduktion und -abfluss, Schwammstadt und ganzheitliches Regenwasserbewirtschaftungskonzept, Dachbegrünung, optionale Fassadenbegrünung.

Das Baugebiet „Blumenrod V und VI“ umfasst rund 25 ha, auf denen die derzeitige Nutzung überwiegend aus intensiver Landwirtschaft (ca. 90 %) und einem geringen Gehölzbestand (ca. 1 %) besteht, der im Rahmen der Planung erhalten bleiben soll. Geplant sind Wohnbauflächen für ca. 720 Wohneinheiten.

Das Baugebiet wird nach dem Prinzip der „Schwammstadt“ entwickelt, wobei der zentrale Grünzug „Paradies“ aus der Innenstadt ins Neubaugebiet fortgeführt wird. Dieser offene Korridor dient sowohl der Kaltluftproduktion als auch dem Kaltluftabfluss für das Plangebiet und die angrenzenden Bereiche.

Die Planung basiert auf einem ganzheitlichen Regenwasserbewirtschaftungskonzept zur Abflussreduktion, Rückhaltung, Versickerung und Verdunstung. Typisierte Retentionsanlagen bestehen aus Regenspeichern mit nachgeschalteten Mulden-Rigolen-Elementen und Drosselabfluss. Vier flache Retentionsflächen entlang der

zentralen Grünachse sowie eine weitere im Westen sind als Kaskade angelegt und an das Regenrückhaltebecken im Norden angeschlossen. Die initiale Pflanzung und sukzessive Vegetation fördern Versickerung, Wasserspeisung und Verdunstung, wodurch auch eine kleinklimatische Kühlung erreicht wird. Offene Gerinne haben eine Breite von ca. 2,5 m, maximale Fließtiefe 0,3 m und Böschungsneigungen von maximal 1:3.

Die Dachbegrünung im Baugebiet „Blumenrod V und VI“ ist integraler Bestandteil des Kleinklima- und Regenwasserkonzepts. Flachdächer der Gebäude sollen entweder intensiv mit einer Vegetationstragschicht von mindestens 30 cm oder extensiv mit mindestens 15 cm Substratschicht begrünt werden, jeweils inklusive Filter- und Drainschicht, teilweise werden die Begrünungen mit Photovoltaikelementen kombiniert. Für Nebenanlagen, Carports oder Gebäude mit flach geneigten Dächern bis 20° ist eine extensive Begrünung mit mindestens 8 cm Substrat vorgesehen, da auch diese Flächen zur Rückhaltung von Regenwasser beitragen und kleinklimatisch wirksam sind. In den Sondergebieten kann auf die intensive Begrünung verzichtet werden, sofern das oberste Parkdeck als offene Fläche ausgeführt wird; die entwässerungstechnische Wirksamkeit wird in diesem Fall über eine Drosselung des Abflusses auf 10 l/(s*ha) sichergestellt.

Eine Fassadenbegrünung ist optional zur zusätzlichen Verbesserung des Kleinklimas möglich.

Baugebiet „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“

Verfahrenstand: Derzeit wird der Entwurf des Bebauungsplanes entwickelt.

Für das Baugebiet NördKap II. BA wird ein klimaökologisches Detailgutachten zu den Auswirkungen des Bauvorhabens auf das Kleinklima des Plangebiets sowie der angrenzenden Nachbarschaft durchgeführt. Anhand dessen können spezifische Planungshinweise und Maßnahmen abgeleitet werden.

Baugebiet „Quartiersentwicklung Zeppelinstraße“

Verfahrensstand: Der Bebauungsplan liegt derzeit als Entwurf vor, ein Satzungsbeschluss wird für Ende des Jahres 2026 oder Anfang 2027 erwartet.

Klimaanpassungsmaßnahmen: Schutz bestehender Biotope, Baumersatzpflanzungen, Dachbegrünung, Photovoltaik- und Solardachanlagen, Anlage von Grünflächen, Regenwasserbewirtschaftung mit Regenrückhaltebecken, Stauraumkanälen und Mulden-Rigolen-Systemen.

Für die geplante Quartiersentwicklung an der Zeppelinstraße sind verschiedene Klimaanpassungsmaßnahmen vorgesehen, deren Umsetzung jedoch noch nicht politisch beschlossen ist. In der Planung wurden bereits die Ergebnisse der Starkregengefahrenkarten sowie der Entwurfsfassung des vorliegenden Berichts berücksichtigt. Das rund 20.000 m² große Gebiet wird derzeit als Bolzplatz und Wiese genutzt, an der Thüringer Straße befindet sich bereits eine Bebauung mit einer KiTa. Die Bebauung des Bolzplatzes mit dem Kinder- und Familienzentrum (KiFaz) ist ab Ende 2027/Anfang 2028 geplant, während die übrige Bebauung vorerst zurückgestellt ist, denn zunächst werden neben der KiFaz nur die angrenzenden Erschließungsbereiche wie die Treppenanlage umgesetzt.

Die bestehenden Alleebäume um den Bolzplatz sind Teil eines gesetzlich geschützten Biotops. Für die zu fällenden Bäume zur Herstellung von Zufahrten zur Tiefgarage ist ein gleichwertiger Ersatz vorgesehen. Die Dachflächen sollen extensiv begrünt werden, wobei mindestens 80 % der Fläche bepflanzt werden, und zu mindestens 50 % mit Anlagen zur Nutzung der einfallenden solaren Strahlungsenergie (PV-Anlagen oder Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung) ausgestattet werden. Die nicht bebaubaren Grundstücksflächen, errechnet

nach der GRZ, sind als Grünflächen zu gestalten und zu bepflanzen, wobei die festgesetzten Flächen für Anpflanzungen als Grünflächen oder Blühwiesen ausgeführt werden.

Darüber hinaus ist die hydrogeologische Situation für die Nutzung von Erdwärme günstig. Für die Regenwasserbewirtschaftung sind offene oder geschlossene Regenrückhaltebecken, Stauraumkanäle sowie Mulden-Rigolen-Systeme vorgesehen, um Abflussreduktion, Versickerung und Verdunstung zu gewährleisten.

Nächtliches Temperaturfeld

In der Nachtsituation erwärmen sich die Entwicklungsflächen teilweise über das Klimadelta hinaus. Insbesondere neuversiegelte Flächen (bspw. Planstraßen) sind im starken Klimawandel um bis zu +6 °C wärmer als im Status quo. Im Mittel erwärmen sich die Entwicklungsflächen um +0,4 °C bis +3,2 °C im schwachen und um +1,16 °C bis +3,9 °C im starken Klimawandel (s. Anhang 1 und Abbildung 41). Die Abbildung 42 zeigt für ausgewählte Entwicklungsflächen die detaillierte Veränderung der nächtlichen Lufttemperatur im starken Klimawandel im Vergleich zum Status quo. Hoch versiegelten und dicht bebauten Entwicklungsflächen erwärmen sich um über 5 K, wohingegen Flächen mit geringeren Versiegelungs- und Bebauungsraten auch eine geringere Erwärmung aufzeigen.

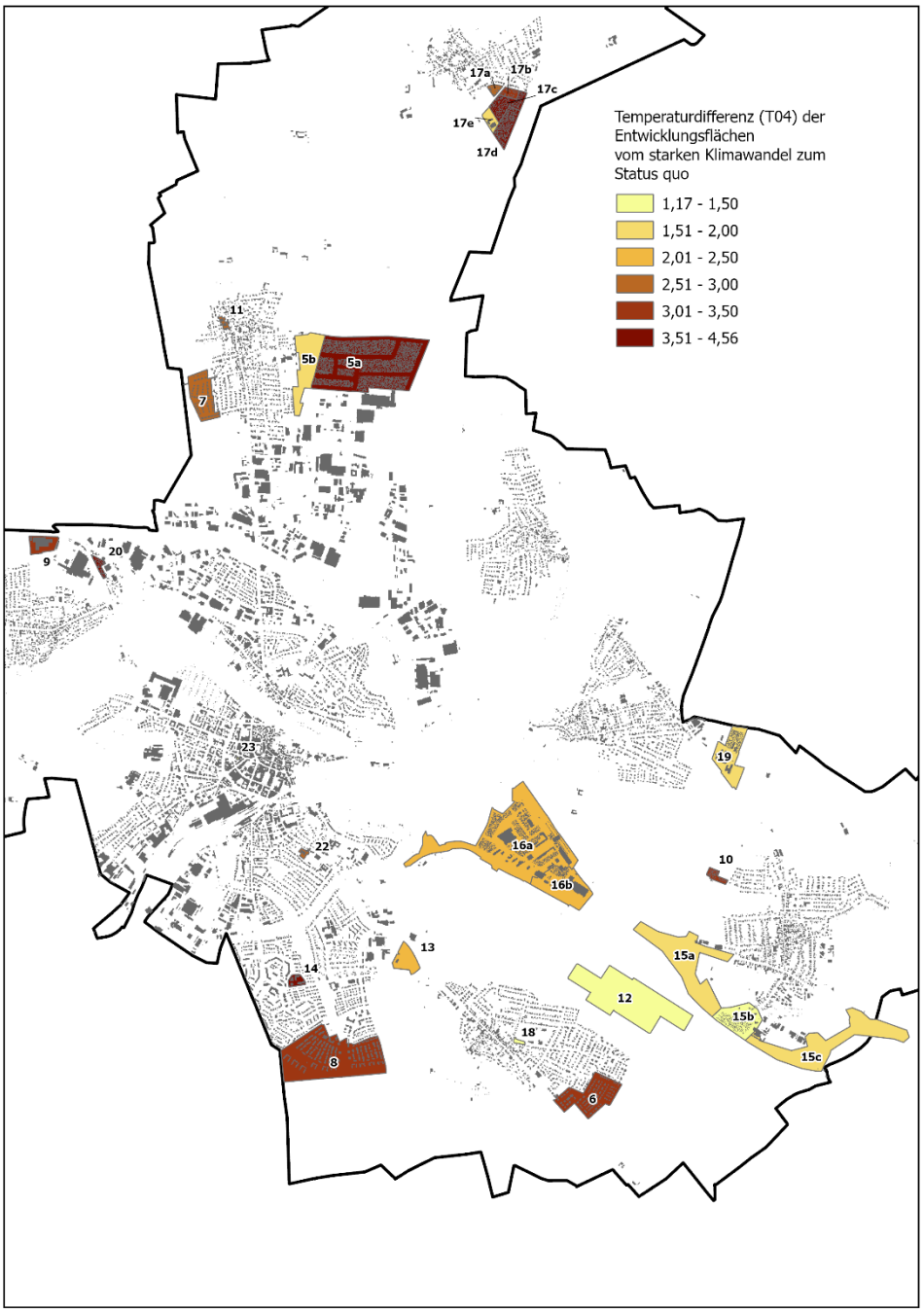
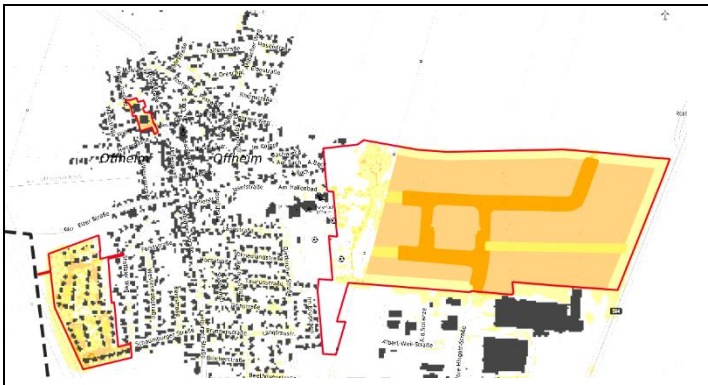


Abbildung 41: Differenz der mittleren Nachttemperatur in den Entwicklungsflächen vom starken Klimawandel zum Status quo.



„Unterm Staffler Weg“ (links); Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“ (rechts)



„Blumenrod V und VI“



„Am Kirberger Weg“

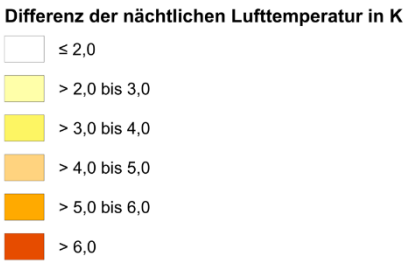


Abbildung 42: Änderung der nächtlichen Lufttemperatur im starken Klimawandel (Vergleich zum Status quo) für ausgewählten Entwicklungsflächen.

Kaltluftströmungsfeld

Während ein flächenhafter Temperaturanstieg keinen maßgeblichen Einfluss auf das Kaltluftströmungsfeld hat, führen bauliche Maßnahmen zu deutlichen Veränderungen des Kaltluftabflusses. Diese äußern sich in lokalen Strömungsbeschleunigungen oder -abbremsungen sowie in Veränderungen der Kaltluftmächtigkeit, die insbesondere durch die Hinderniswirkung neuer Gebäude hervorgerufen werden. Die Abbildung 43 zeigt exemplarisch die Änderung der Kaltluftvolumenstromdichte für einige ausgewählte Entwicklungsflächen. Die Abnahmen liegen in einer Spanne zwischen -2 und über -10 m³/(s*m) und finde vor allem im Windschatten geplanter Gebäude statt. Beim Umströmen des Hindernisses entstehen durch Umlenkungseffekte geringe Zunahmen des Kaltluftvolumenstroms bis zu rund 5 m³/(s*m).



Abbildung 43: Änderung der Kaltluftvolumenstromdichte im starken Klimawandel (Vergleich zum Status quo) für ausgewählte Entwicklungsflächen. Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße, II. BA“ (oben links), ICE-Gebiet A und B (oben rechts), Blumenrod V und VI (unten links), Am Kirberger Weg (unten rechts).

Physiologisch äquivalente Temperatur

In Bereichen mit geplanter Siedlungsentwicklung zeigt sich in den Klimawandelszenarien nicht ausschließlich ein Anstieg der Temperaturen. Durch den Schattenwurf geplanter Gebäude oder neu gepflanzter Bäume kann die Wärmebelastung teilweise sogar trotz eines starken Klimawandels verringert werden. So reduziert sich die PET beispielsweise auf den in Abbildung 45 dargestellten Entwicklungsflächen in den beschatteten Bereichen um -2 bis über -3 K. Die auf die Entwicklungsflächen gemittelte Änderung der physiologisch äquivalenten Temperatur ist in der Abbildung 44 dargestellt. In den Flächen Nördlich der Kapellenstraße, II. BA[21], Blumenrod V und VI und Am Kirberger Weg steigt die durchschnittliche Wärmebelastung (PET) im starkem Klimawandel aufgrund die kühlende Schattenwirkung von Gebäuden und Bäume nicht an. Auf den übrigen Flächen steigt die mittlere PET im betrachteten Klimawandelszenario um bis zu +5,8 °C an.

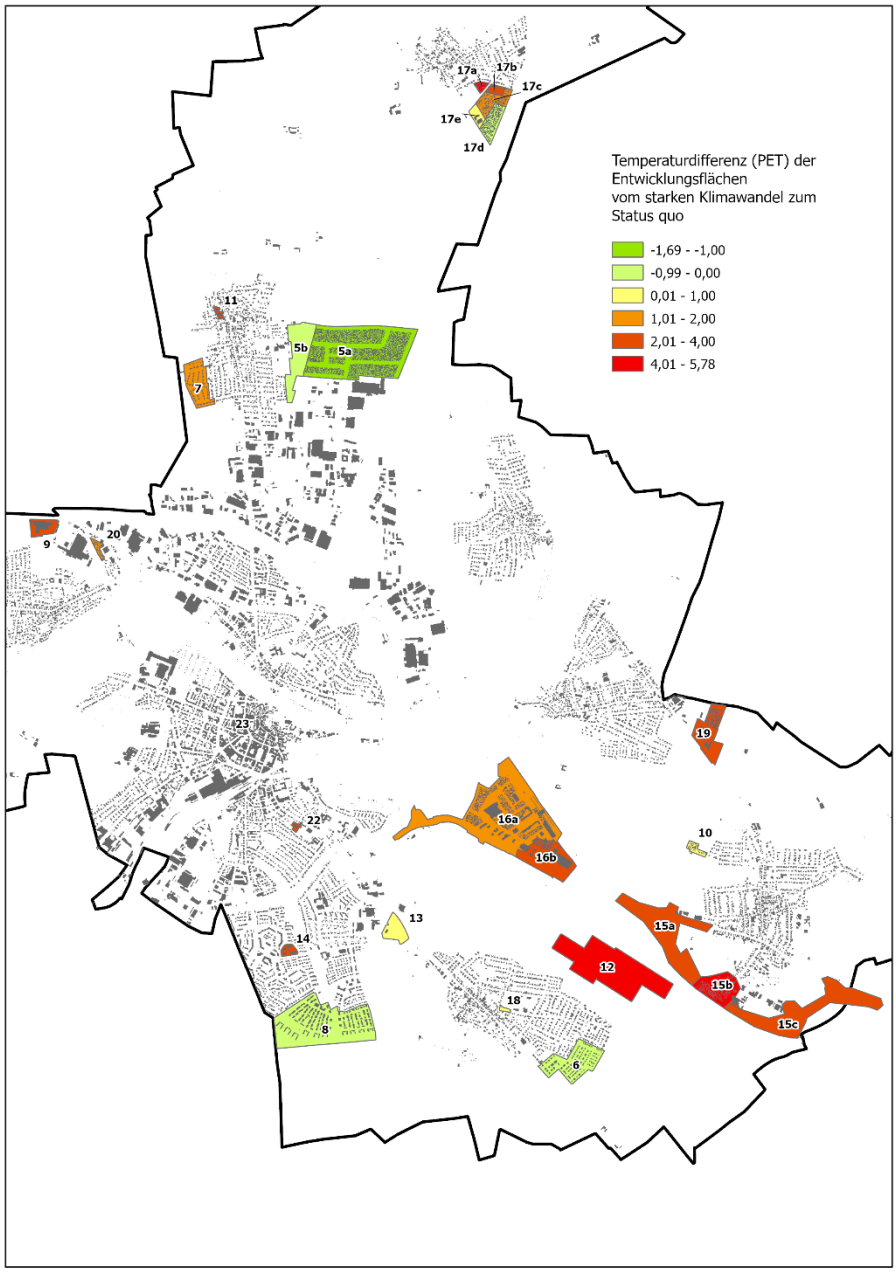
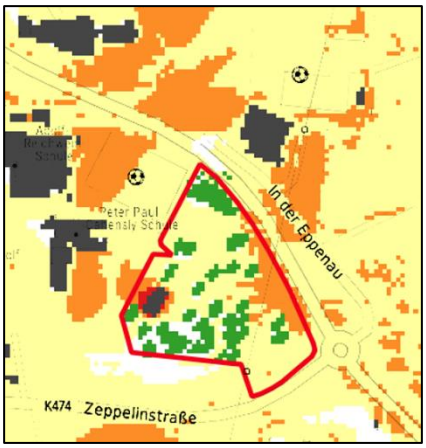


Abbildung 44: Differenz der mittleren physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) in den Entwicklungsflächen vom starken Klimawandel zum Status quo.

[21] modellierter Planungsstand und Aufbau von NördKap II mittlerweile veraltet



Blumenrod



Sportpark Limburg Süd



Nördlich der Kapellenstraße, II. BA[22]

Differenz der PET
(Physiologisch äquivalente Temperatur)

- <= -3,0
- > -3,0 bis -2,0
- > -2,0 bis 2,0
- > 2,0 bis 4,0
- > 4,0 bis 6,0
- > 6,0



Am Kirberger Weg

Abbildung 45: Änderung der PET auf Entwicklungsflächen im starken Klimawandelszenario im Vergleich zum Status quo.

[22] modellierter Planungsstand und Aufbau von NördKap II mittlerweile veraltet

7. Klimaanalysekarten

Gemäß VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, *„…die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“* (VDI 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Kaltluftentstehung und Kaltluftströmung.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: *„Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“* (VDI, 2015,13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt *„[…] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“* (Gaede & Härtling, 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ zu tappen (Moore, 1903). Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt im Projekt über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurde im vorliegenden Projekt eine Klimaanalysekarte erstellt, die den gegenwärtigen Zustand (Bestand) aufzeigt sowie je eine Analysekarte für den schwachen und starken Klimawandel.

Die entwickelte Legende der Klimaanalysekarte (Abbildung 46) gliedert sich in die Elemente **Wirkraum, Ausgleichsraum** und **Kaltluftprozessgeschehen**. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: Je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich flächenhaft dargestellt, wobei gilt: Je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

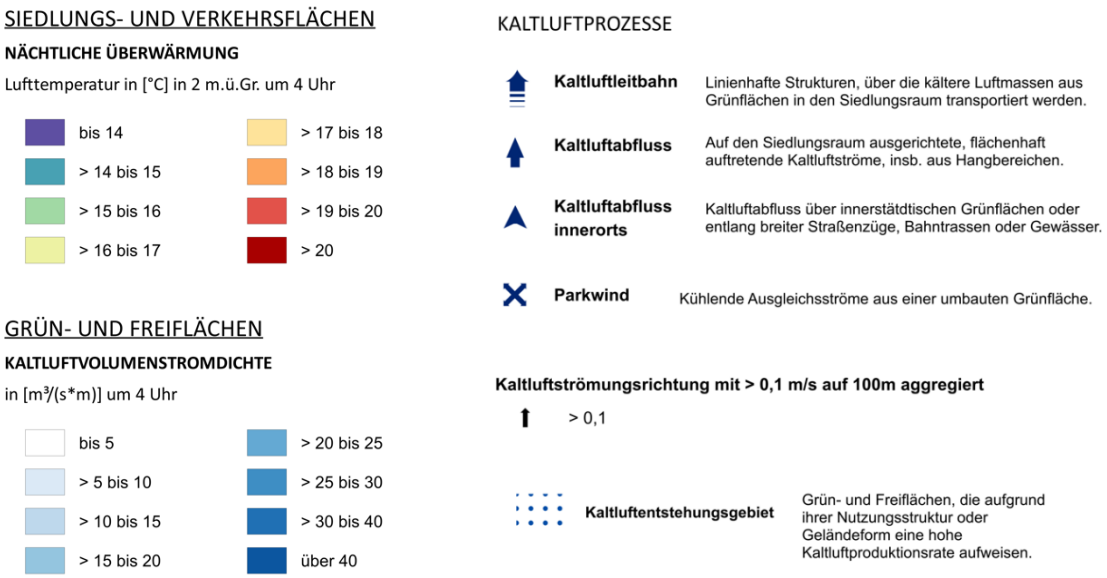


Abbildung 46: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten (verkürzte Darstellung)

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch zentrale Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (s. Tabelle 12). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate ≥ 31,45 $m^3/(m^2h)$.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Limburg von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen linienhafte Kaltluftleitbahnen, die kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander verbinden und mit ihren vergleichsweise hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens sind.

Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können (nach Mayer et al. (1994) sollte eine Kaltluftleitbahn mindestens 50 m breit sein). Flächenhafte Kaltluftaustauschbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse, wie sie in Limburg mehrfach auftreten, reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) möglich und zu vermeiden.

In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Kaltluftabfluss und linearer Kaltluftleitbahn nicht immer eindeutig und/ oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist. In Limburg setzen sich die Kaltluftabflüsse stellenweise innerhalb des Siedlungsraums fort, insbesondere in den Hangbereichen und im Falle einer aufgelockerten Bebauung. Bei Kaltluftströmungen im Siedlungsbereich werden radial fließende Parkwinde und lineare, innerörtliche Kaltluftabflüsse unterschieden.

Die Ausweisung der Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse, etc. erfolgte fachgutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen. Die besonderen Kaltluftprozesse sind immer auf den Wirkraum ausgerichtet, wobei dabei unerheblich ist, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkbereich der Kaltluft liegen – dies erklärt die auf die kleineren, außerhalb der Kernstadt liegenden Stadtteile ausgerichteten Kaltluftabflüsse wie bspw. auf Linter und Eschhofen. Oder es können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein – wie bspw. die Limburger Alt- und Innenstadt (s. Abbildung 47).

Tabelle 12: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Kaltluft-Strömungsrichtung	Auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiet	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 28,97 $m^3/(m^2h)$
Kaltluftleitbahn (linear)	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt
Parkwind	Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche.
Kaltluftabfluss innerorts	Innerhalb des geschlossenen Siedlungsraumes auftretende Kaltluftströme.

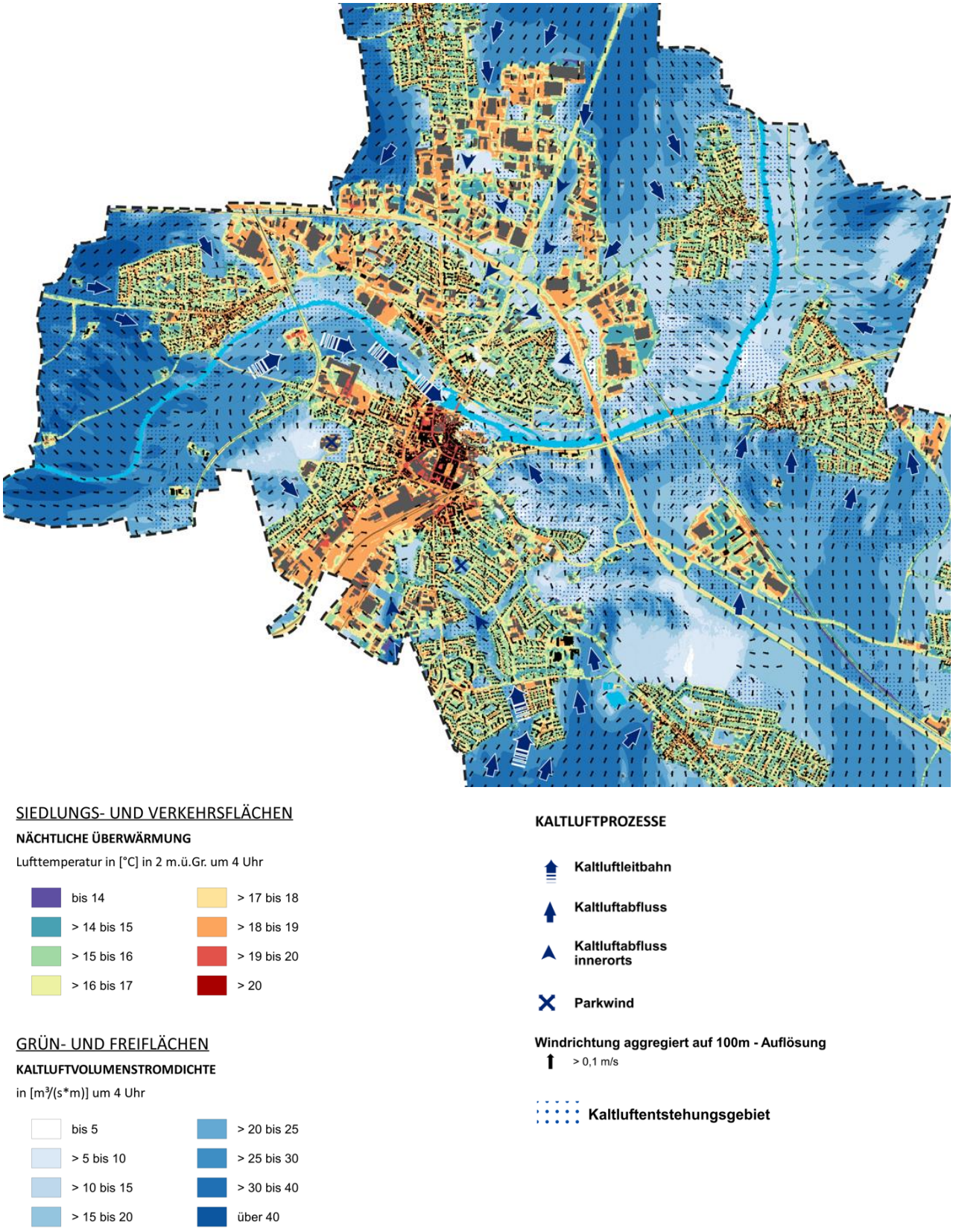
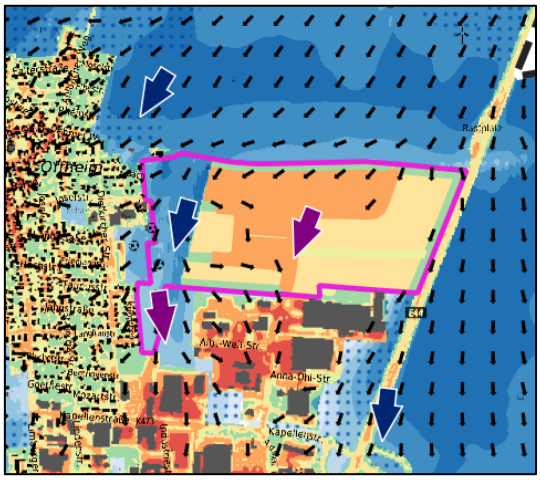
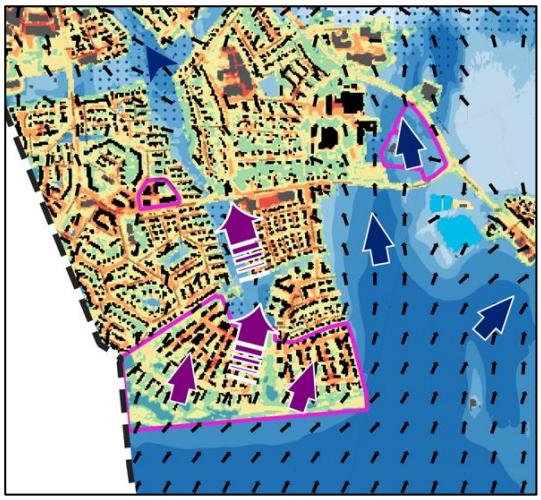


Abbildung 47: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte des Status quo im Limburger Stadtgebiet.

Zukünftig könnte durch die Siedlungsentwicklung am Nördlich der Kapellenstraße, II. BA und in Blumenrod V und VI die Kaltluftversorgung dort aus dem Umland eingeschränkt werden (s. Abbildung 48). Somit wäre die Kaltluftzufuhr im Bestand reduziert, was möglicherweise auch zu einer höheren thermischen Belastung führen könnte.



Gebiet Nördlich der Kapellenstraße



Gebiet Blumenrod

KALTLUFTPROZESSE

Kaltluftleitbahn Linienhafte Strukturen, über die kältere Luftmassen aus Grünflächen in den Siedlungsraum transportiert werden.

Kaltluftabfluss Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme, insb. aus Hangbereichen.

Kaltluftabfluss innerorts Kaltluftabfluss über innerstädtischen Grünflächen oder entlang breiter Straßenzüge, Bahntrassen oder Gewässer.

Parkwind Kühlende Ausgleichsströme aus einer umbauten Grünfläche.

Leitbahn ggf. eingeschränkt

Kaltluftabfluss gg. eingeschränkt

Kaltluftströmungsrichtung mit > 0,1 m/s auf 100m aggregiert

> 0,1

Abbildung 48: Auswirkung der Siedlungsentwicklung auf die Kaltluftprozesse in Limburg (Ausschnitt Klimaanalysekarte – schwacher Klimawandel).

8. Bewertungs- und Planungshinweiskarten

8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine *„informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält"* (VDI 2015, 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als *„Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen […] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben"* (VDI 2015, 5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Lastraum (mit potentiellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum" genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise" zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben" definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern sie nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke übernommen werden (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan). Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Die Erstellung der Planungshinweiskarte erfolgte schrittweise und in enger Abstimmung mit den städtischen Ämtern und Abteilungen. Zunächst wurden für den Status quo und die beiden Zukunftsszenarien je zwei „Bewertungskarten" erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation eine stadtklimatische Bewertung vorgenommen wurde. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse aller Bewertungskarten zusammen, sodass daraus ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo daher in Limburg Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet (vgl. Kap. 6). Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum abgrenzbare, räumliche und stadtklimatische Funktions- bzw. Nutzungseinheiten beziehen. Diese sogenannte „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyse-Ansatz sein (also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen)

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten besteht jedoch eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum).

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen), der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Die Basisgeometrie von Limburg umfasst über 3.500 Teilflächen, welche jeweils einen größeren Flächeninhalt als die Fläche einer einzelnen Rasterzelle des Modells (25m²) aufweisen. Aus diesem Grund treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 49). Auch für die Straßengeometrien wird in den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte eine Bewertung hinsichtlich der bioklimatischen Situation vorgenommen. Verkehrsräume ohne Bewertung (Gleise) sind entsprechend grau dargestellt.

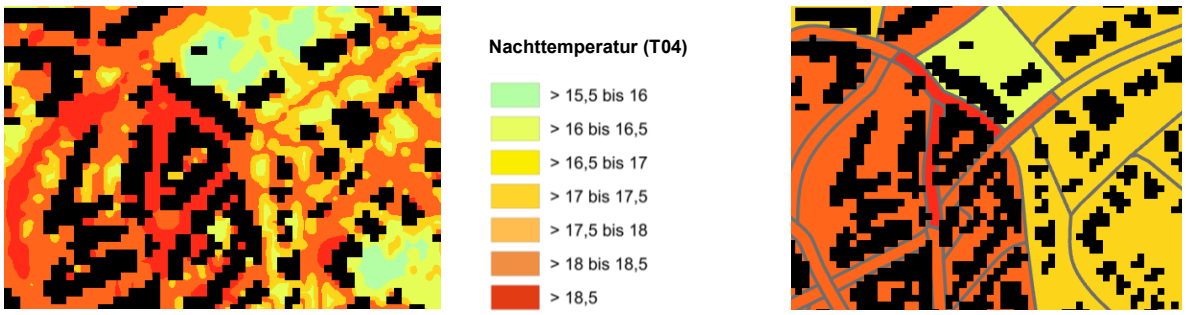


Abbildung 49: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ausgangsraster (links) und als Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (rechts).

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

8.3.1 WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation dargestellt. Wertgebend dabei ist in der Nacht die bodennahe Lufttemperatur als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden sowie am Tag die Wärmebelastung im Außenraum (PET; vgl. Kap. 6.3). Bei der Nachttemperatur und der PET, die wie in Kap. 8.2 beschrieben auf die Basisgeometrie gemittelt werden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Modellantrieb: „sommerliche autochthone Wetterlage“ (wolkenfreie Wetterlage ohne überregionalen Wind) gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten Werte definiert. Bei dieser sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierenden z-Werte werden in Anlehnung an die statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S1-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 50).

$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma}$$

Dabei ist

- z standardisierter Wert der Variablen x
- χ Ausgangwert der Variablen x
- μ arithmetisches Mittel
- σ Standardabweichung

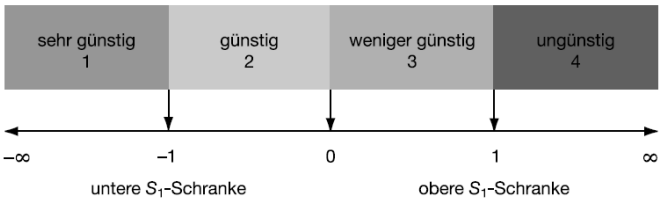


Abbildung 50: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein. Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt. Für diesen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation[23], wofür Mittelwerte aus dem Status quo und dem starken Klimawandelszenario berechnet wurden:

[23] Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.

Für Wohn- und Gewerbegebiete

- Nächtliche Temperatur: Mittelwert = 17,25 °C Standardabweichung = 1,52 °C
- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 39,07 °C PET Standardabweichung = 4,78 °C PET

Für Straßen und Plätze

- Nächtliche Temperatur: Mittelwert = 17,5 °C Standardabweichung = 1,46 °C
- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 38,53 °C PET Standardabweichung = 4,91 °C PET

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 50) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeren Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr günstige (1) – günstige (2) – mittlere (3) – ungünstige (4) – sehr ungünstige (5)* bioklimatische Situation eingeteilt (Tabelle 13). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

In der Nacht steht die bioklimatische Situation in den Limburger Wohngebieten im Fokus (Ziel: gesunde Schlafbedingungen). Im Abstimmungsprozess hat sich ergeben, dass auch innerhalb von Gewerbegebieten eine Bewertung in der Nacht vorgenommen werden soll, auch der Straßenraum sowie Plätze bekamen eine Bewertung zugeschrieben. Aufgeheizte Plätze und Straßen geben nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit die Situation in der umliegenden Bebauung, was in den Modellergebnissen bereits enthalten ist (ein Grundstück im Umfeld hoher Versiegelung ist stärker überwärmt als ein Grundstück neben einer Freifläche). Die Tabelle 13 zeigt die Klassengrenzen der z-Transformation sowie die zugehörigen PET-Werte für das Siedlungsgebiet (Wirkraum), Tabelle 14 zeigt äquivalent dazu die Grenzwerte für die Nachtsituation.

Die Festlegung unterschiedlicher Temperaturgrenzwerte für Straßenräume und Wohn-/Gewerbeblockflächen ist methodisch begründet, da die Klassifikation auf z-standardisierten Abweichungen vom jeweiligen Gebietsmittelwert basiert. Straßen und Wohnblöcke stellen aufgrund ihrer baulichen Struktur, Nutzung und thermischen Eigenschaften unterschiedliche statistische Grundgesamtheiten dar. Die differenzierten Grenzwerte erlauben somit eine raumtypbezogene und funktional angemessene Bewertung der Hitzebelastung.

Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Klasse	Bioklimatische Situation am Tag	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C] Wirkraum	Straßenraum
1	Sehr günstig	z ≤ -1,0	PET ≤ 34,29	PET ≤ 33,62
2	Günstig	-1,0 < z ≤ -0,4	34,29 < PET ≤ 37,16	33,62 < PET ≤ 36,57
3	Mittel	-0,4 < z ≤ 0,0	37,16 < PET ≤ 39,07	36,57 < PET ≤ 38,53
4	Ungünstig	0,0 < z ≤ 0,4	39,07 < PET ≤ 40,98	38,53 < PET ≤ 40,49
5	Sehr ungünstig	z > 0,4	PET > 40,98	PET > 40,49

Tabelle 14: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht.

Klasse	Bioklimatische Situation in der Nacht	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige Lufttemperaturen [°C] Wirkraum	Straßenraum
1	Sehr günstig	z ≤ -0,9	T04 ≤ 15,88	T04 ≤ 16,19
2	Günstig	-0,9 < z ≤ -0,6	15,88 < T04 ≤ 16,34	16,19 < T04 ≤ 16,62
3	Mittel	-0,6 < z ≤ 0,0	16,34 < T04 ≤ 17,25	16,62 < T04 ≤ 17,5
4	Ungünstig	0,0 < z ≤ 0,6	17,25 < T04 ≤ 18,16	17,5 < T04 ≤ 18,38
5	Sehr ungünstig	z > 0,6	T04 > 18,16	T04 > 18,38

8.3.2 AUSGLEICHSRAUM

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet, die vornehmlich in der Nacht durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen dazu in der Lage sind, lufthygienische oder humanbioklimatische Belastungen in Wirkräumen zu vermindern oder abzubauen oder durch ihre Schattenwirkung am Tage als wertvolle Naherholungsräume dienen können. Durch diese unterschiedlichen Kerneigenschaften der Ausgleichsräume zu unterschiedlichen Tageszeiten war es notwendig, die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt zu bewerten und wie bereits beim Wirkraum geschehen, in fünf Stufen von „sehr geringe“ (Klasse 1) bis „sehr hohe“ (Klasse 5) bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen.

Folgende statistische Werte wurden für die z-Transformation ermittelt:

- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 38,02 °C PET Standardabweichung = 6,08 °C PET

Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Klasse	Aufenthaltsqualität an Sommertagen	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
5	Sehr hoch	z ≤ -1,2	PET ≤ 30,73
4	Hoch	-1,2 < z ≤ -0,4	30,73 < PET ≤ 35,59
3	Mittel	-0,4 < z ≤ 0,0	35,59 < PET ≤ 38,02
2	Gering	0,0 < z ≤ 0,3	38,02 < PET ≤ 39,84
1	Sehr gering	z > 0,3	PET > 39,84

Analog zur Wirkraumbewertung am Tage ist auch für die Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung der Flächen im Ausgleichsraum die modellierte Wärmebelastung (PET) bzw. deren z-Transformation maßgeblich. Neben einer möglichst hohen Aufenthaltsqualität von Grünflächen im bewohnten Siedlungsraum ist zusätzlich jene im Umfeld von Industrie- und Gewerbeflächen von übergeordneter Relevanz, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. Während in der Klimaanalysekarte die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder vornehmlich auf Grundlage ihres siedlungsunabhängigen, auf das Prozessgeschehen fokussierten Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in der Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im

Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika des Ausgleichsraumes im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Bewertung der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Grünflächen und Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann.

So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen bzw. Parkwinden und innerstädtischen Kaltluftabflüssen stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung (Klasse 5), wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung (Klasse 4), wenn sich in deren direktem Luv[24] befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung (Klasse 3), wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet). Auch bei den weiteren Grünflächen spielen der Siedlungsbezug und die Funktion des Kaltlufthaushalts eine wichtige Rolle. So bekommt eine Grünfläche, die eine angrenzende Siedlungsfläche mit hoher thermischer Belastung mit Kaltluft versorgt, beispielsweise die höchste bioklimatische Bedeutung zugewiesen. Die übrigen Grünflächen werden in Abhängigkeit zur Landnutzung (Wald / kein Wald) bzw. Lage zum Siedlungsraum in die Klasse 2 (geringe bioklimatische Bedeutung) oder Klasse 1 (sehr geringe bioklimatische Bedeutung) eingeteilt.

Die folgende Abbildung 51 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten, hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Kaltluftfunktion:
  - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom ≥ 24,65 m³/(s*m) *oder*
  - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von 0,54 m/s *oder*
  - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate ≥ 30,58 m³/m²*h
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung bis 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Siedlungsagglomerationen (zusammenhängende Ortsteile ohne Einzelflächen im Außenraum)

Als Lesehilfe des Bewertungsschlüssels kann folgendes Beispiel dienen: Für eine Grünfläche, die nicht Teil einer Kaltluftleitbahn bzw. eines Kaltluftabflusses ist und an Wohngebiete mit (sehr) ungünstiger humanbioklimatischer Situation angrenzt, gilt folgende Zuordnung:

- Die Fläche weist eine Kaltluftfunktion (hohe Kaltluftströmung /-entstehung) auf
  → Sie besitzt eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung (Klasse 5).
- Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf
  → Sie besitzt eine hohe bioklimatische Bedeutung (Klasse 4).

[24] Luv = dem Wind zugewandte Seite

Die im vereinfachten Verfahren nach Abbildung 51 ermittelte bioklimatische Bedeutung der Grünflächen basiert einerseits auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d. h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. So kann eine Ausgleichsfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Luftaustauschbereichen im direkten Umfeld von Wirkräumen mit besonders ungünstigen humanbioklimatischen Verhältnissen generell eine höhere Bedeutung zugesprochen. Da bei Luftleitbahnen die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Fokus der Bewertung stehen sollte, wurde bei ihnen vorsorgeorientiert keine Unterscheidung bezüglich der bioklimatischen Situation des angrenzenden Wirkraums getroffen.

Zusammenfassend (s. Tabelle 16) wirkt eine in ihrer humanbioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ (Klasse 5) eingestufte Ausgleichsfläche als Kaltluft- oder Frischluftleitbahn. Eine als „Hoch“ (Klasse 4) eingestufte Ausgleichsfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch hoch belasteten Wirkungsraum oder ist als direktes Einzugsgebiet einer Kaltluft- oder Frischluftleitbahn einzustufen. Ist der Wirkraum weniger belastet oder der Ausgleichsraum als Quelle für Luftaustauschbereiche anzusehen, wird den Flächen eine erhöhte Bedeutung (Klasse 3) zugesprochen. Flächen mit geringerer Bedeutung für die wirkraumbezogene Kaltluftproduktion und den Kaltlufttransport werden in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Gering“ (Klasse 2) oder „Sehr gering“ (Klasse 1) eingestuft.

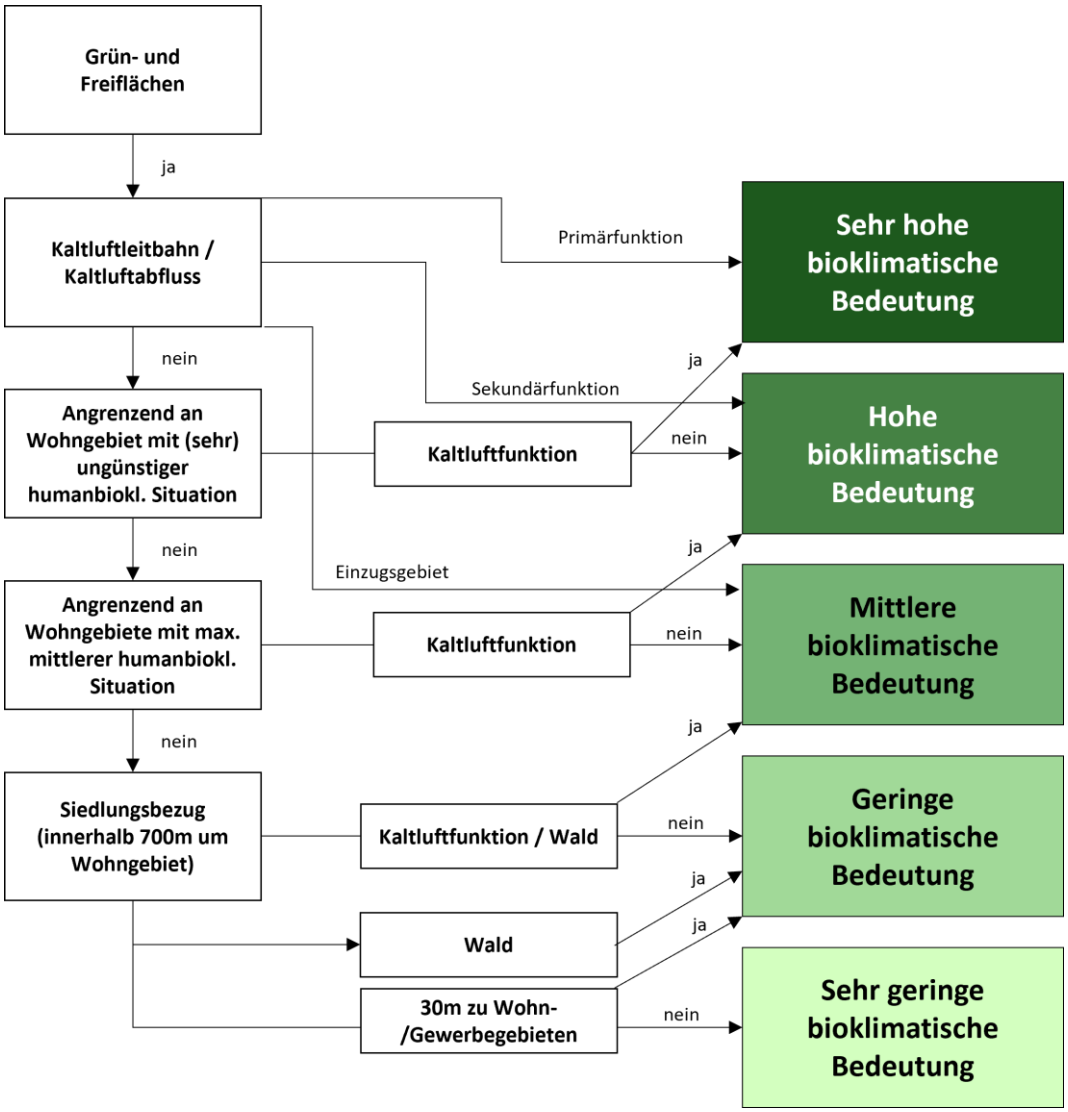


Abbildung 51: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

Tabelle 16: Ableitungsvorschrift zur Bewertung der Ausgleichsraumbedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

Klasse	Bioklimatische Bedeutung	Ableitung der Bedeutung
5	Sehr hoch	Zentrale Leitbahn in direkter Lage zum Siedlungsgebiet (Primärfunktion) oder Leitbahnbereich mit Sekundärfunktion und mit Kaltluftfunktion
4	Hoch	Direktes Einzugsgebiet einer Leitbahn (Sekundärfunktion) oder Grünfläche angrenzend an eine Wohnsiedlung mit (sehr) ungünstiger bioklimatischer Situation.
3	Erhöht	Indirekten Einzugsgebiet einer Kaltluftleitbahn (Tertiärfunktion) oder Grünfläche mit Kaltluftfunktion und Siedlungsbezug.
2	Gering	Die übrigen Grünflächen mit Landnutzung „Wald“; mit Siedlungsbezug; oder angrenzend an Wohn- und Gewerbegebiete
1	Sehr gering	Restliche Grünflächen im Ausgleichsraum

8.3.3 ZUSÄTZLICHER KARTENINHALT ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in der Klimaanalysekarte ist auch in der nächtlichen Bewertungskarte das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen und -abflüsse aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine blaue Punktraster-Signatur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarte gleicht.

Neben diesen die Ausgleichflächen betreffenden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum eine weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Es wird der Kaltlufteinwirkbereich in blauer, rasterbasierter Schraffur dargestellt, der anzeigt, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (s. Abbildung 52). Kaltlufteinwirkbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von 15,67 m³/(s*m) oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von 0,25 m/s erreichen oder überschreiten.



Kaltlufteinwirkbereich (im Siedlungsraum)

Abbildung 52: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum

8.3.4 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

NACHTSITUATION

Abbildung 54 zeigt die Bewertungskarte der Nachsituation für Limburg im Status Quo, in welcher u.a. die ***Wirkräume*** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. So sind 23,3 % des Wirkraums der Stadt durch eine **sehr günstige thermische Situation** gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören sehr locker mit Einzel- oder Reihenhäusern bestandene Blockflächen wie u.a. in Linter, Dietkirchen und Ahlbach sowie am Siedlungsrand von Offheim und Lindenholzhausen dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung und damit die Abkühlung begünstigt. Der Schlafkomfort bezieht sich hierbei ausschließlich auf thermische Bedingungen und andere Faktoren wie Lärm oder Lichtemission werden nicht berücksichtigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und hohe Grünanteil dafür, dass sich die Luft nachts schneller und stärker abkühlt als im innerstädtischen Bereich.

Viele Flächen der äußeren Stadtteile, darunter auch Blumenrod und die Brückenvorstadt aber auch locker bebaute Flächen am Rande der Limburger Innenstadt zählen mit einem Viertel (25,6 %) zu den Wirkungsräumen mit einer **günstigen thermischen Situation**. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauhigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die zudem über einen hohen Grünanteil verfügen.

Viele Wohn- und Gewerbeflächen (31,7 %) weisen **mittlere thermische Bedingungen** auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad in dem Bereich der Brückenvorstadt und im Stadtteil Offheim sowie in den Ortzentren von Eschhofen und Lindenholzhausen. Auch Teile der Gewerbegebiete Offheim, Nördlich der Kapellenstraße und Dietkircher Höhe fallen in diese Klasse.

14 % der Siedlungsflächen Limburgs gehören der Klasse der **ungünstigen thermischen Situation** an. Darunter fallen Wohnblöcke in der Innenstadt sowie Gewerbeflächen in der Brückenvorstadt und Offheim. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Oftmals stehen in unmittelbarer Umgebung darüber hinaus nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

5,4 % des Wirkraums sind durch eine **sehr ungünstige thermische Situation** charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Bewertungskarte der Nacht zeigt, dass nicht allein die Innenstadtbereiche oder die Altstadt von einer ungünstigen thermischen Situation betroffen sind. Neben dem bewohnten gilt dies auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen. Vor allem Industrie- und Gewerbestandorte im Bereich des Limburger Bahnhofs sind mit sehr ungünstigen thermischen Bedingungen verbunden.

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im ***Ausgleichsraum*** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 9,2 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit **„sehr hoher" humanbioklimatischer Bedeutung** statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen und der Kaltluftabflüsse, z.B. südlich von Blumenrod, Linter und Eschhofen, nördlich von Offheim und Dietkirchen sowie westlich der Kernstadt und entlang der Lahn.

Ausgleichsflächen von noch immer **„hoher" humanbioklimatischer Bedeutung** finden sich zu 13,5 % innerhalb der Limburger Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Umgebung oben genannter Kaltluftprozesse. Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Friedhöfe und Sportplätze sowie an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen.

Mit 35,1 % entfällt ein großer Teil der Ausgleichflächen auf die **„mittlere" Bewertungskategorie**. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen im Stadtgebiet in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit **geringer human-bioklimatischer Bedeutung** nimmt 17,7 % aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Ackerflächen und Waldbereiche, die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen. 24,5 % bilden all jene Grün- und Freiflächen, die auf den Siedlungsraum bezogen, **keinen nennenswerten Beitrag** zum Kaltluftprozessgeschehen leisten. Hierzu zählen siedlungsferne, nicht baumbestandene Flächen.

Flächenbewertung in den Klimawandelszenarien

Die Bewertungskarten sind für die Klimawandelszenarien in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Diese zeigen insbesondere im Wirkraum (Siedlungsraum) eine Verschiebung hin zu schlechteren Bewertungen.

In Abbildung 53 sind die prozentualen Flächenanteile aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation dargestellt. Während im Status quo nur 5,4 % der Wirkraumflächen in die ungünstigste Kategorie fallen, steigt dieser Anteil im schwachen Klimawandelszenario auf 16,0 % und im starken Szenario sogar auf 42,0 %. Zusammen mit der Kategorie „ungünstig" liegen im starken Klimawandel 83,7 % der Flächen in den beiden schlechtesten Klassen. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der (sehr) günstigen Flächen von 48,9 % im Status quo auf 10,6 % im schwachen Klimawandel und 0,5 % im starken Klimawandel.

Die klimatische Bedeutung im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) verändert sich hingegen nur geringfügig. Der Anteil an Flächen mit sehr hoher Bedeutung steigt in den Klimawandelszenarien leicht von 9,2 % im Status quo auf 14,8 % im starken Klimawandel. Grund dafür ist, dass sich die Bewertung der Flächen im Wirkraum verschlechtert, wodurch die Bedeutung der Grünflächen und deren Ausgleichsfunktion zur Heranführung von Kaltluft steigt.

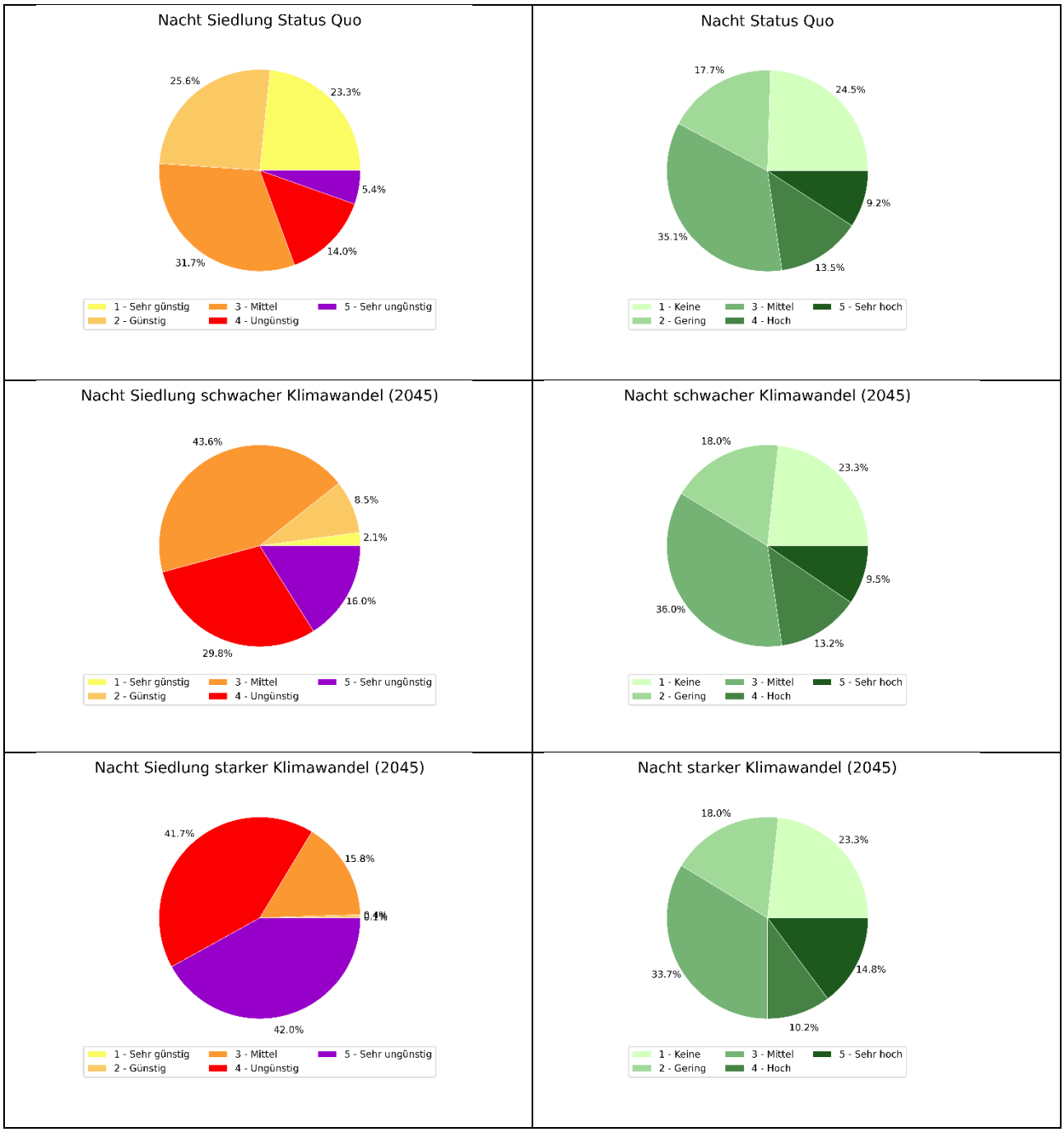


Abbildung 53: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungskarten für die Nachtsituation im Wirk- und Ausgleichsraum unter verschiedenen Klimawandelszenarien.

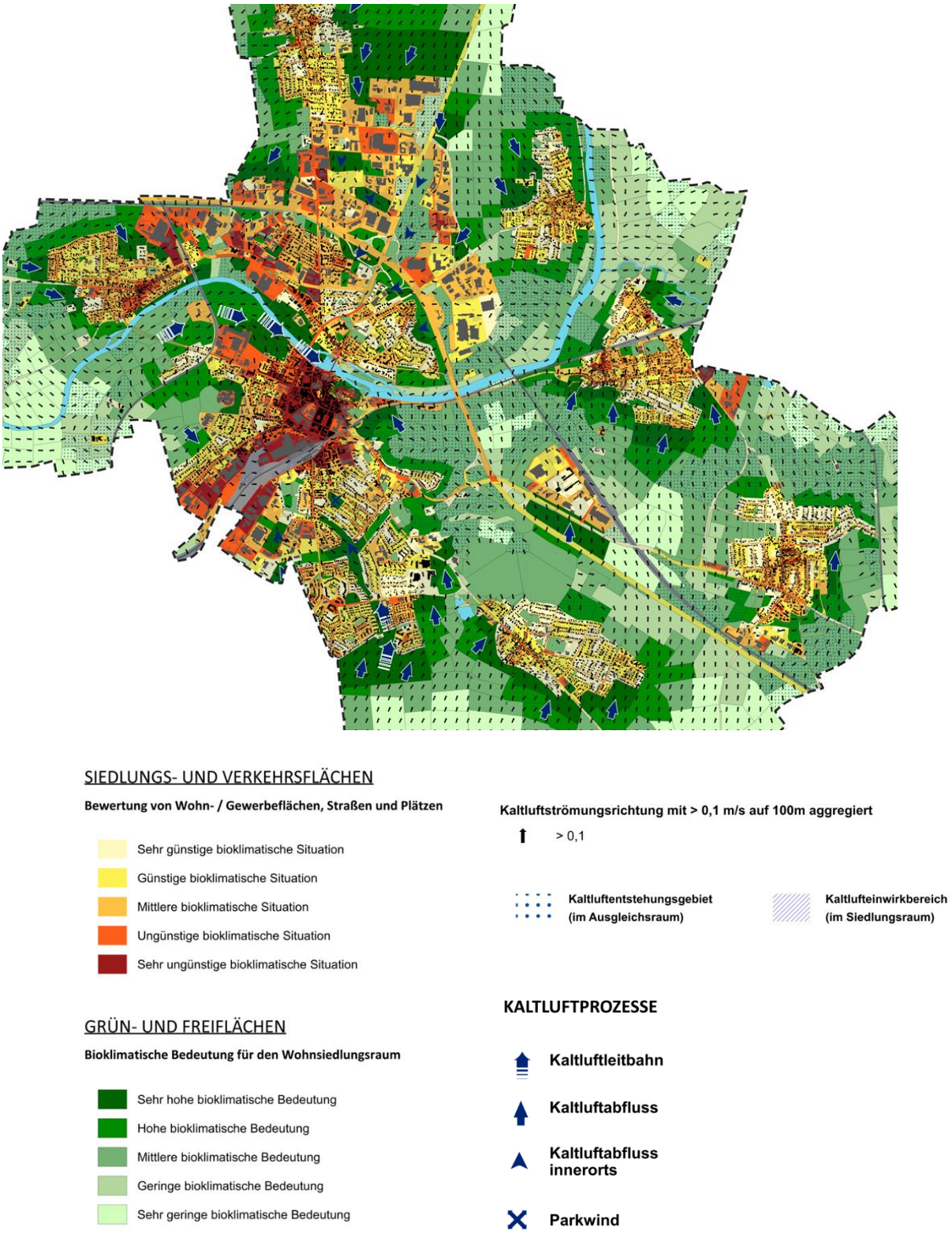


Abbildung 54: Bewertungskarte Nachtsituation (Status quo). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum.

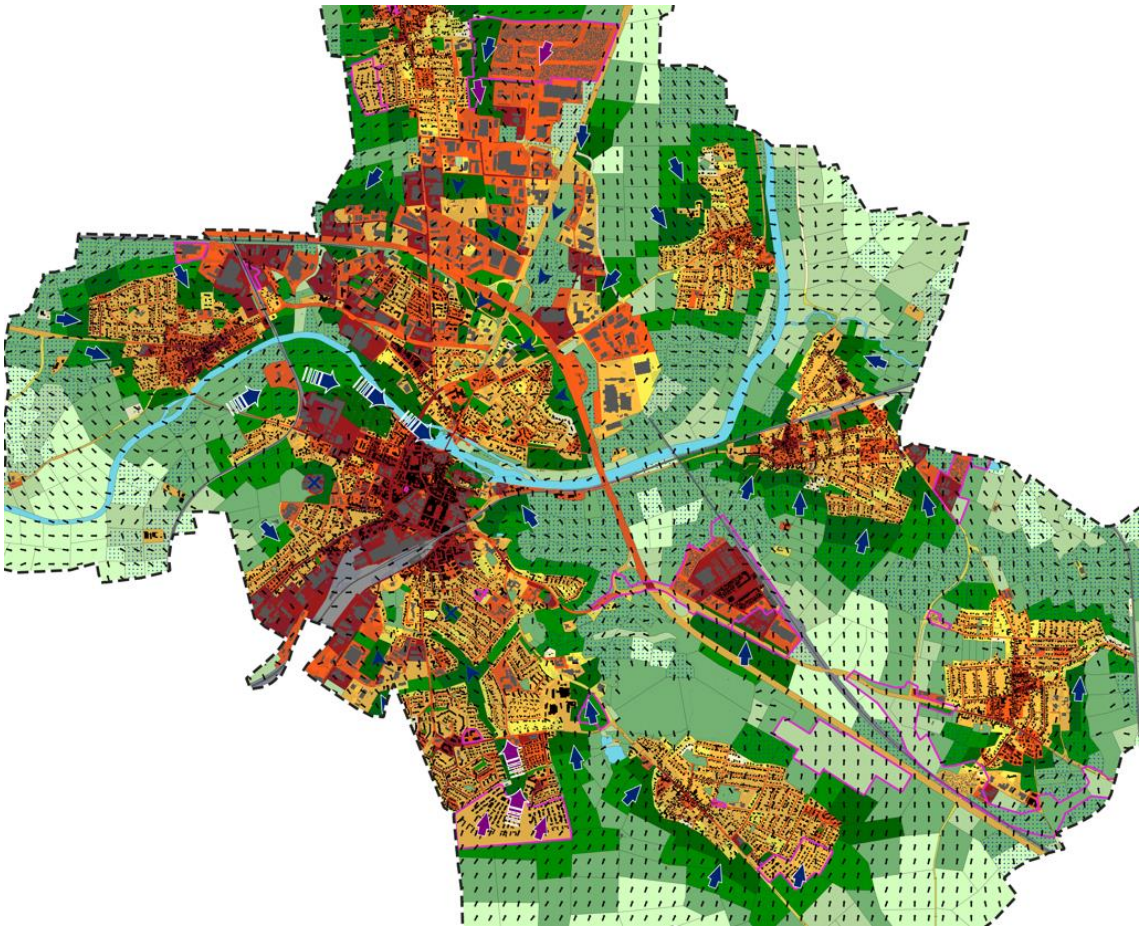
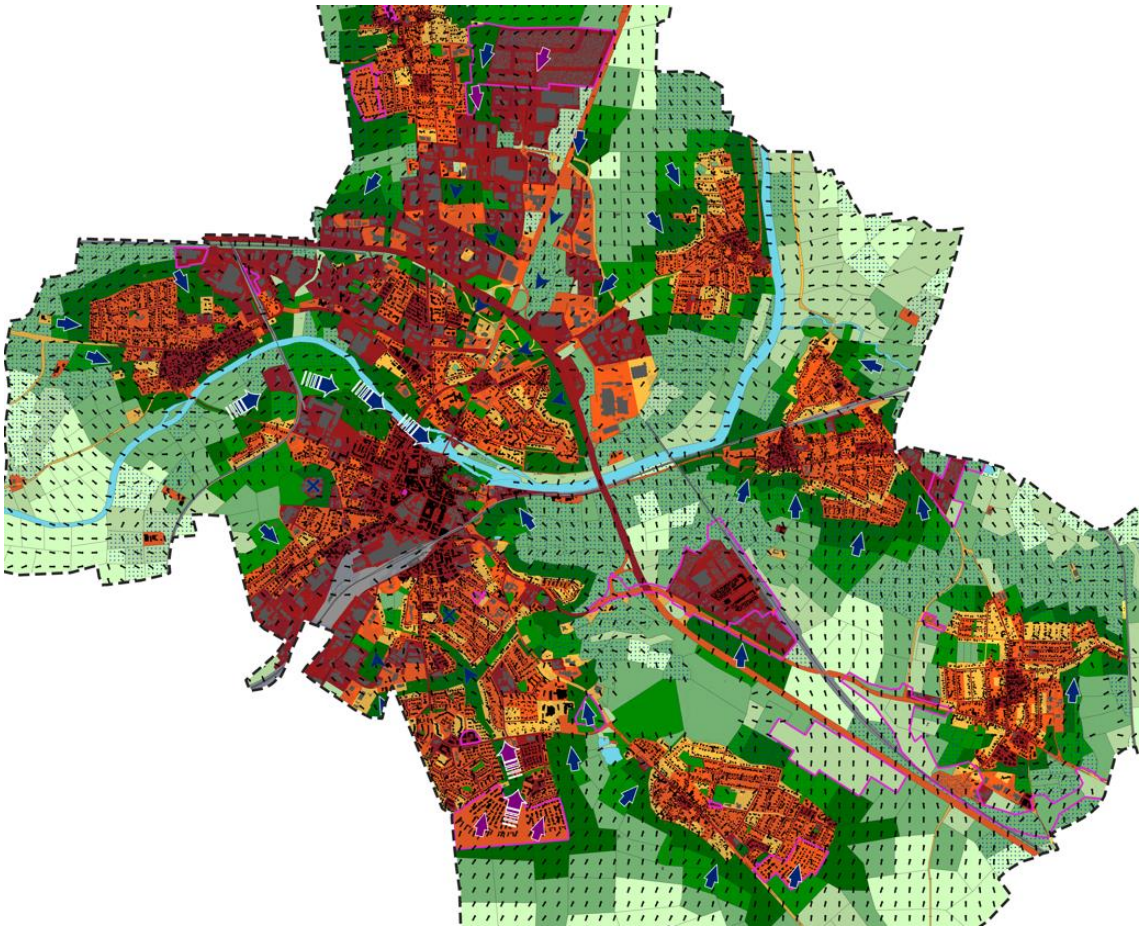


Abbildung 55: Bewertungskarte Nachtsituation (Schwacher Klimawandel). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum.



SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN

Bewertung von Wohn- / Gewerbeflächen, Straßen und Plätzen

- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Bioklimatische Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
- Hohe bioklimatische Bedeutung
- Mittlere bioklimatische Bedeutung
- Geringe bioklimatische Bedeutung
- Sehr geringe bioklimatische Bedeutung

Entwicklungsflächen

Kaltluftströmungsrichtung mit > 0,1 m/s auf 100m aggregiert

> 0,1

Kaltluftentstehungsgebiet (im Ausgleichsraum)

Kaltlufteinwirkbereich (im Siedlungsraum)

KALTLUFTPROZESSE

- **Kaltluftleitbahn**
- **Kaltluftabfluss**
- **Kaltluftabfluss innerorts**
- **Parkwind**
- **Leitbahn ggf. eingeschränkt**
- **Kaltluftabfluss gg. eingeschränkt**

Abbildung 56: Bewertungskarte Nachtsituation (Starker Klimawandel). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum.

TAGSITUATION

In der Bewertungskarte der Tagsituation, die für den Status quo in Abbildung 58 aufgetragen ist (Zukünfte in Abbildung 59 und Abbildung 60), werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und die Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die physiologisch äquivalente Temperatur (PET), die stark durch lokale Verschattungsbedingungen beeinflusst wird.

In Limburg sind 8,0 % der Wirkrumflächen durch eine **sehr günstige thermische Situation** gekennzeichnet, darunter befinden sich vereinzelte Wohnblöcke, welche einen großen Baumbestand aufweisen wie bspw. im Umfeld des Linterbachs oder am Schafsberg.

24,7 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Limburg wurden der Kategorie der **günstigen human-bioklimatischen Situation** zugeordnet. Diese vergleichsweise locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil und befinden sich häufig am durchgrünten Siedlungsrand.

Mit 32,3 % ist der größte Anteil der Wirkraumflächen heutzutage mit **mittleren thermischen Bedingungen** assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Viele Flächen der Limburger Kernstadt sowie in Blumenrod, Linter und Lindenholzhausen sind mit dieser Klassifizierung belegt. In diesen Ortsteilen befinden sich viele Wirkraumflächen mittlerer Belastung aufgrund niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil. Durch auf der Wirkraumfläche befindliche Bäume kann sogar auf Gewerbearealen eine mittlere Klassifizierung erfolgen wie bspw. in Offheim.

Mit 30,3 % sind am Tage ebenfalls viele Teile des Wirkraums durch eine **ungünstige thermische Situation** charakterisiert. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die mit flacher Einzelhausbebauung und niedrigerer Vegetation bestandenen peripher gelegenen Stadtteile (z.B. Staffel, Eschhofen, Offheim), aber auch Bereiche der Kernstadt gehören dazu. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils ist vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rasters von 5 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den großen Industrie- und Gewerbearealen im Offheim sowie am ICE-Bahnhof Limburg-Süd ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Klimatisch ungünstige Straßenzüge sind zahlreich in der Limburger Altstadt oder Linter und Blumenrod vorzufinden, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr (Fußgänger, Radfahrer) mit sich bringen.

Der restliche Teil der Wirkraumflächen (4,6 %) fällt in die Klasse der **sehr ungünstigen thermischen Situation**. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. In Limburg weisen vereinzelt Wohnquartiere mit mangelnder Verschattung in Eschhofen, Linter oder Staffel eine sehr ungünstige thermische Situation auf. Oftmals ist der an hoch belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende, unverschattete Straßenraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert – u.a. fallen einige Straßen in der Altstadt, Staffel, Eschhofen oder Dietkirchen in diese Kategorie.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den ***Ausgleichsraum*** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit **sehr hoher Aufenthaltsqualität** (16,1 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese höchste Bewertungsklasse fallen Wälder oder baumbestandene Grünflächen wie der bewaldete Schafsberg, Waldflächen entlang des Linterbachs oder zwischen Linter und Blumenrod.

13,4 % der Ausgleichsflächen sind einer **hohen Aufenthaltsqualität** am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den bewaldeten Bereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichteren Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Innerhalb des Siedlungsraums sind solche Flächen ebenfalls zu finden (z.B. Kleingartenanalage am Renngraben und Grünflächen am Lahn-Ufer) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume **mittlerer Aufenthaltsqualität** (15,3 % der Grünflächen) sind über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichräume mit **geringer** (20,6 %) oder **sehr geringer** (34,6 %) **Aufenthaltsqualität**, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Freiflächen ausmachen.

Flächenbewertung in den Klimawandelszenarien

Die Bewertungskarten sind für die Klimawandelszenarien in Abbildung 59 und Abbildung 60 dargestellt. Diese zeigen im Wirkraum (Siedlungsraum) eine Verschiebung hin zu schlechteren Bewertungen und für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) eine starke Zunahme an Flächen mit sehr geringer Aufenthaltsqualität.

In Abbildung 57 sind die prozentualen Flächenanteile aus den Bewertungskarten für die Tagsituation dargestellt. Während im Status quo nur 4,6 % der Wirkraumflächen in die ungünstigste Kategorie fallen, steigt dieser Anteil im schwachen Klimawandelszenario auf 12,8 % und im starken Szenario auf 47,4 %. Zusammen mit der Kategorie „ungünstig“ liegen im starken Klimawandel 78,7% der Flächen in den beiden schlechtesten Bewertungsklassen. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der beiden günstigsten Bewertungsklassen von 32,7 % im Status quo auf 25,5 % im schwachen Klimawandel und 6,3 % im starken Klimawandel.

Bei der Bewertung der klimatischen Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) bleibt der Anteil von Flächen mit einer (sehr) hohen Aufenthaltsqualität (hierzu zählen vor allem Waldgebiete und Flächen mit einem dichten Baumbestand) im Status quo und dem schwachen Klimawandel noch ähnlich hoch, im starken Klimawandel ist der Anteil dagegen deutlich geringer (Status quo: 29,5 % | schwacher Klimawandel: 26,4 % | starker Klimawandel: 18,3 %). Auch Flächen mit einer mittleren und geringen Aufenthaltsqualität nehmen vor allem im starken Klimawandelszenario deutlich ab, von insgesamt 35,9 % im Status quo, über 29,7 % im schwachen Klimawandel bis zu 15,6 % im starken Klimawandel. Die Flächen mit einer sehr geringen Aufenthaltsqualität nehmen dafür in den Szenarien zu (Status quo: 34,6 % | schwacher Klimawandel: 43,9 % | starker Klimawandel: 66,2 %). Im starken Klimawandelszenario erhöht die angenommene Bodentrockenheit zusätzlich zur Erhöhung der Lufttemperatur die Wärmebelastung und somit verringert sich die Aufenthaltsqualität auf den wenig oder unbeschatteten Grün- und Freiflächen.

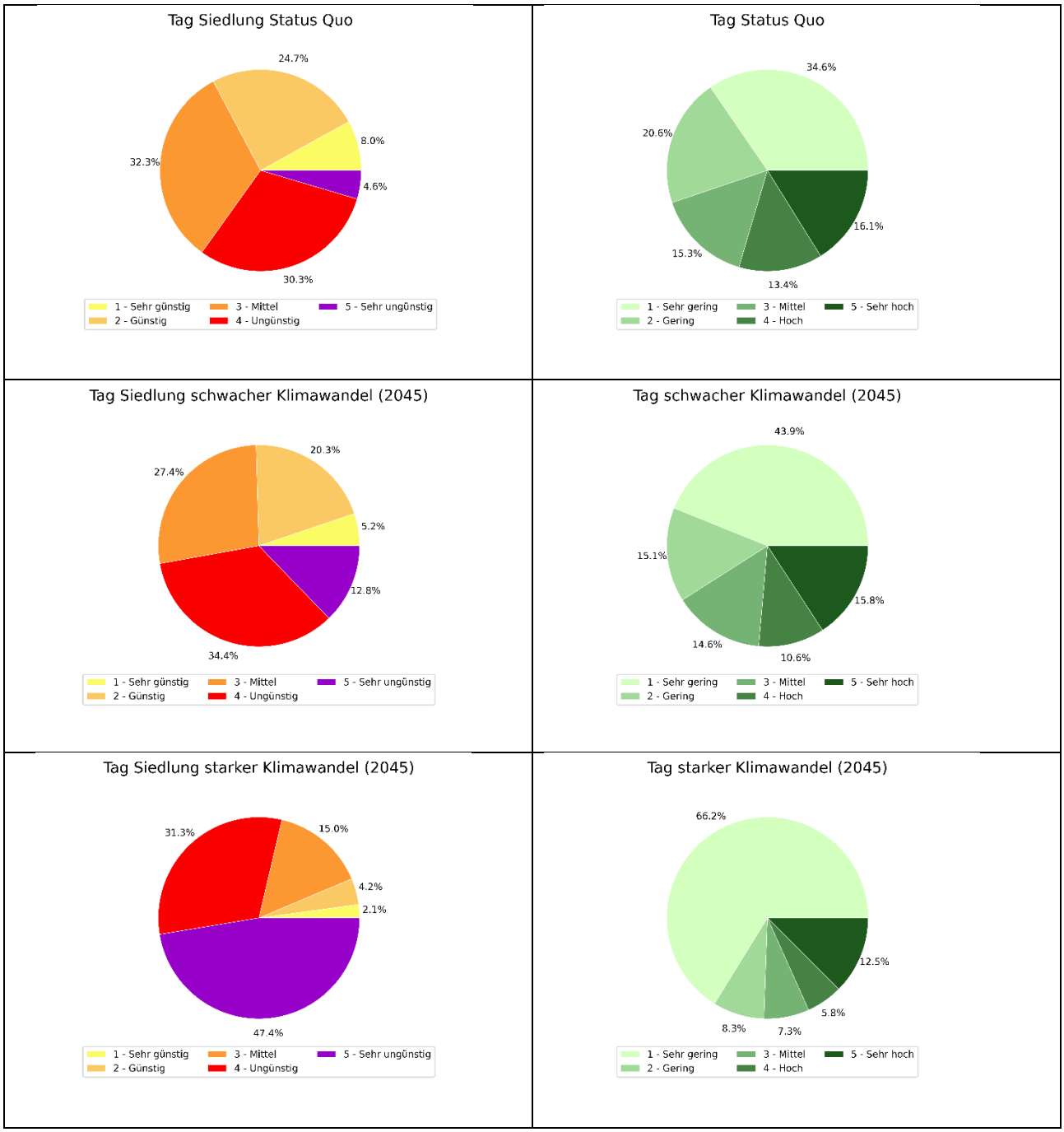


Abbildung 57: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungskarten für die Tagsituation im Wirk- und Ausgleichsraum unter verschiedenen Klimawandelszenarien.

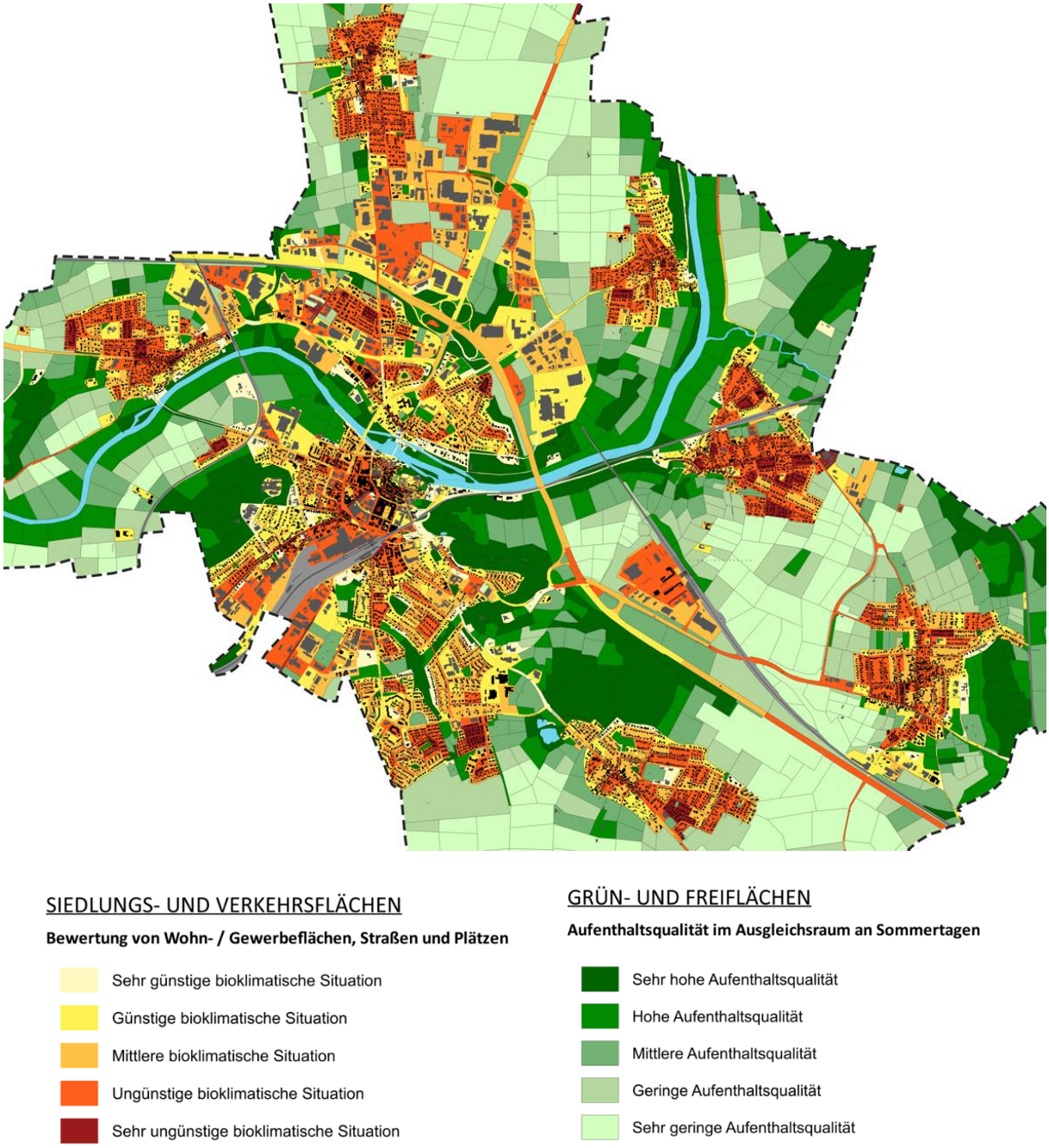


Abbildung 58: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im Status quo.

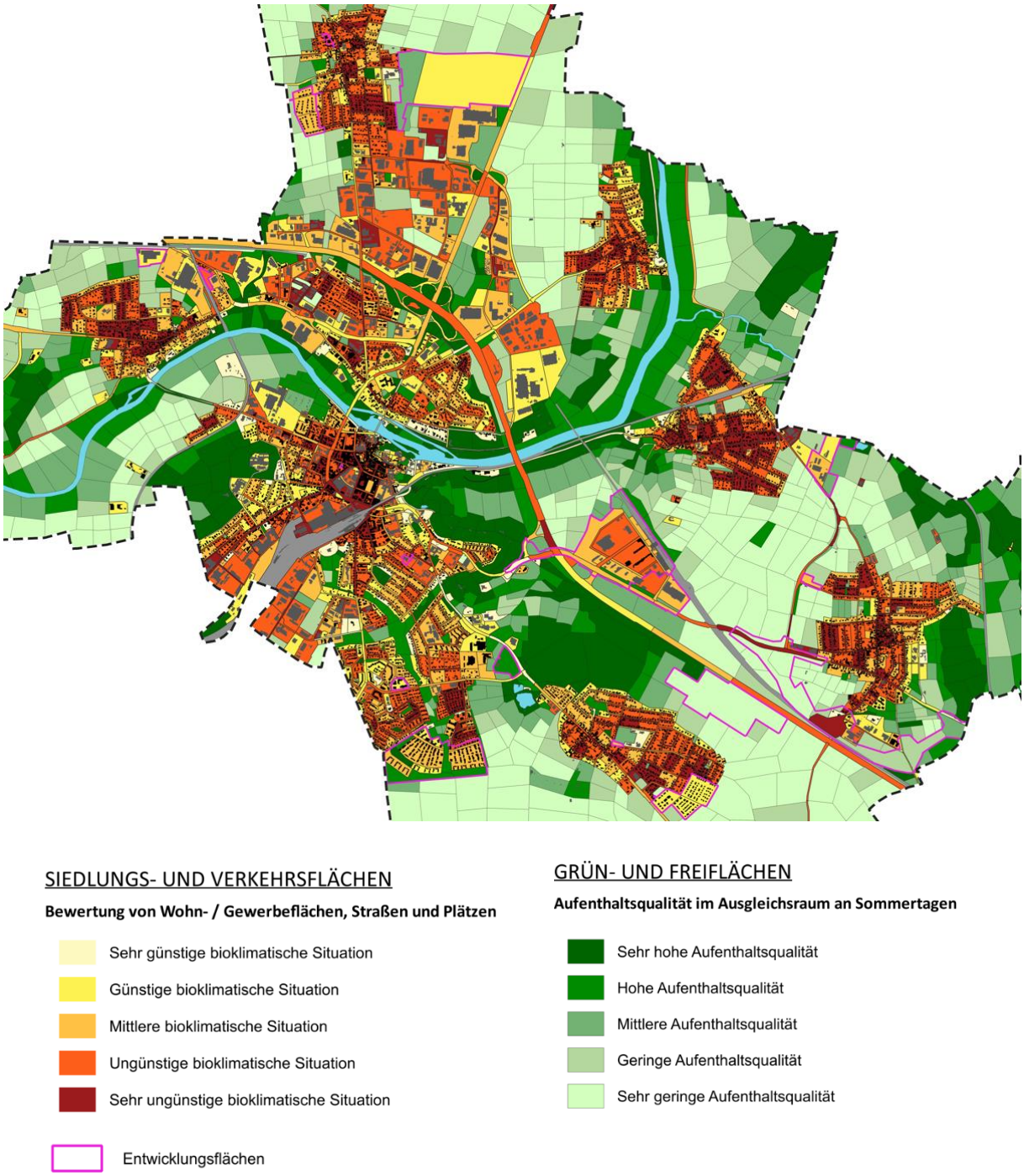


Abbildung 59: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im schwachen Klimawandelszenario.

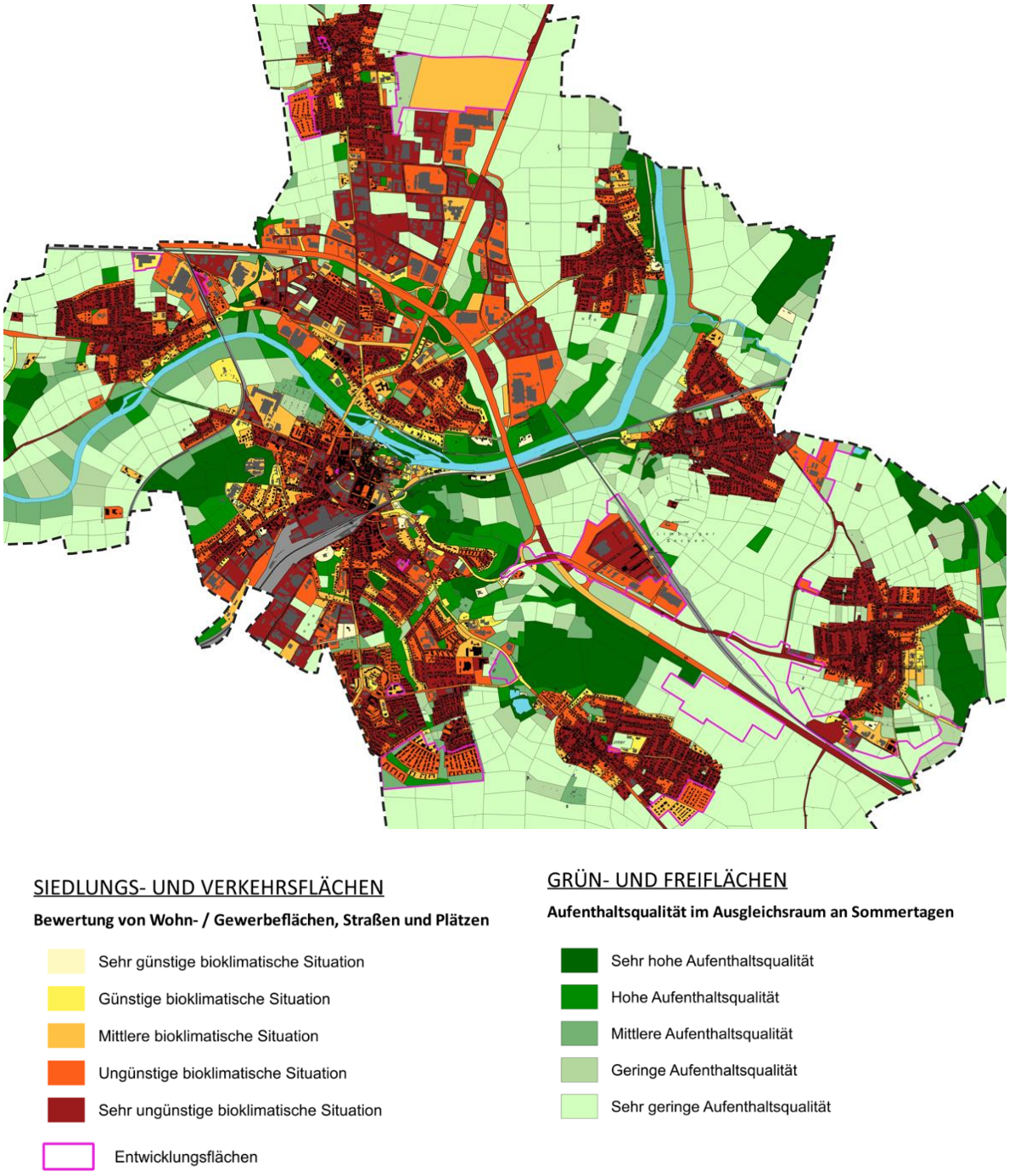


Abbildung 60: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im starken Klimawandelszenario.

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten „Nacht“ und „Tag“ in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen einen hohen ***Schutzbedarf*** innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine ***Handlungspriorität*** besteht.

8.4.1 METHODIK

WIRKRAUM

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Diese Bewertungsunterschiede wurden aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht extrahiert (s. Kapitel 8.3.1 und 8.3.2) und jeweils im Rahmen zweier Bewertungsmatrizen für den Wohn- und den Gewerberaum (Straßenraum identisch zu Gewerbe) gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue **gesamthafte** Tag-Nacht-Wirkraumbewertung für den Status quo und beide Zukünfte mit den Klassenstufen 1 (geringste bioklimatische Belastung) bis 5 (höchste bioklimatische Belastung) (s. Tabelle 17). Als Beispiel für eine **Wohnsiedlungsfläche** mit einer mittleren bioklimatischen Situation am Tage (Klasse 3) und einer günstigen Situation in der Nacht (Klasse 2) ergibt sich in der Gesamtbewertung die Klasse 2 (geringe Belastung). Im Unterschied dazu würde die gleiche Tag-/Nachtbewertung für eine **Gewerbefläche** (oder den Straßenraum) zur Gesamtbewertungsklasse 3 (mittlere Belastung) führen. Der Grund: Für Flächen, die überwiegend tagsüber genutzt werden, liegt der Schwerpunkt auf der Tagbewertung, die in diesem Beispiel ungünstiger ausfällt als die Nachtbewertung. In Wohngebieten dagegen wird die Nachtsituation stärker gewichtet, da dort vor allem gesunde Schlafbedingungen im Vordergrund stehen.

Tabelle 17: Bewertungsmatrizen für eine Gesamtbewertung von Tag und Nacht im Wohn-/ Gewerbe- und Straßenraum.

Wohnsiedlung

Wohnsiedlungen		Bewertung Nacht				
		1 sehr günstig	2 günstig	3 mittel	4 ungünstig	5 sehr ungünstig
Bioklima Tag	1 sehr günstig	1	2	3	3	4
	2 günstig	1	2	3	4	4
	3 mittel	2	2	3	4	5
	4 ungünstig	2	3	3	4	5
	5 sehr ungünstig	3	3	4	5	5

Gewerbe / Straße

		Bewertung Nacht				
		1 sehr günstig	2 günstig	3 mittel	4 ungünstig	5 sehr ungünstig
Bioklima Tag	1 sehr günstig	1	1	1	1	2
	2 günstig	2	2	2	2	3
	3 mittel	3	3	3	3	4
	4 ungünstig	4	4	4	4	5
	5 sehr ungünstig	4	4	5	5	5

Aus der Gesamtbewertung für Tag und Nacht leitet sich nun in Abhängigkeit vom betrachteten Klimawandelszenario die Handlungsprioritäten für den Wirkraum ab (s. Tabelle 18). Für Siedlungsflächen, die bereits im Status quo die höchste bioklimatische Belastung (Klasse 5) aufweisen, wird die Handlungspriorität 1 vergeben. Siedlungsflächen, die im schwachen Klimawandelszenario die höchste Belastung aufweisen, bekommen die

Handlungspriorität 2 zugewiesen. Flächen, die wiederum erst im starken Klimawandelszenario die höchste Belastungsklasse aufweisen, bekommen die Handlungspriorität 3. Für alle übrigen Wirkraumflächen, die im Status quo oder in den Klimawandelszenarien die zweithöchste bioklimatische Belastung (Klasse 4) aufweisen, wird die Handlungspriorität 4 vergeben. Flächen, auf die keines dieser Kriterien zutrifft, kommen in Handlungspriorität 5.

Tabelle 18: Aus der Gesamtbewertung für Tag und Nacht abgeleitete Handlungsprioritäten für den Wirkraum.

Gesamtbewertung Tag und Nacht (bioklimatische Belastung)	wird zu	Handlungspriorität
sehr hoch (Klasse 5) im Status quo	→	1
sehr hoch (Klasse 5) im schwachen Klimawandelszenario	→	2
sehr hoch (Klasse 5) im starken Klimawandelszenario	→	3
hoch (Klasse 4) im Status quo oder Klimawandelszenarien	→	4
mittel bis gering (Klassen 3 bis 1) im Status quo oder Klimawandelszenarien	→	5

Sind mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkbereiche ausgewiesen, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet (Symbol s. Abbildung 61). Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als „Trittsteine“[25] für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.

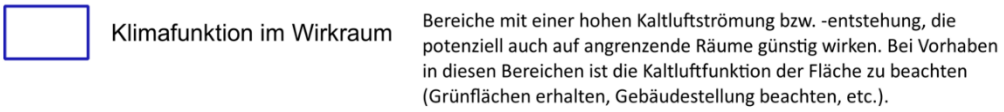


Abbildung 61: PHK-Symbol für Siedlungsräume mit Klimafunktion.

Weiterhin sind **Orte sensibler Nutzung** als Punktsymbol eingezeichnet. Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. In Limburg wurden Kinderspielplätze, Kindergärten, Schulen, Jugendeinrichtungen, Kliniken und Krankenhäuser sowie Alten- und Pflegeheime und Wohnheime für Schutz- und Hilfesuchende erfasst. Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zuteilwerden, um den Aufenthalt von hitzesensibler Bevölkerung im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend zu gestalten.



Abbildung 62: PHK-Symbol mit Informationen zu Orten mit sensibler Nutzung.

[25] „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herantransportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beträgt.

AUSGLEICHSRAUM

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den ***stadtklimatischen Schutzbedarf*** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt und diese zu einer Gesamtbewertung zusammenfügt (s. Tabelle 19).

Tabelle 19: Bewertungsmatrizen für eine Gesamtbewertung von Tag und Nacht im Ausgleichsraum.

		Bewertung Nacht				
		1 sehr gering	2 gering	3 mittel	4 hoch	5 sehr hoch
Aufenthalts-qualität Tag	1 sehr gering	1	2	3	4	5
	2 gering	1	2	3	4	5
	3 mittel	2	2	3	4	5
	4 hoch	3	3	4	4	5
	5 sehr hoch	4	4	5	5	5

Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Bewertung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen am Tage und der bioklimatischen Bedeutung in der Nacht. Für die Ausgleichsflächen ist die nächtliche Abkühlung mit der Produktion von Kaltluft ausschlaggebend dafür, dass hierbei die Nachtsituation stärker gewertet wird als die Tagsituation. Die daraus resultierenden Schutzbedarfe sind in Tabelle 20 aufgeführt. Weist eine Ausgleichsfläche im Status quo oder in einem der Klimawandelszenarien die höchste Gesamtbewertung auf, so unterliegt sie dem höchsten Schutzbedarf (Kategorie 1). Fortführend werden Flächen mit hoher und mittlerer Gesamtbewertung die Schutzkategorie 2 beziehungsweise 3 zugewiesen. Alle übrigen Flächen mit einer geringen oder sehr geringen Gesamtbewertung unterliegen keinem besonderen Schutzbedarf. In Abhängigkeit der zugewiesenen Schutzbedarfskategorie ist die stadtklimatische Funktion der Grün- und Freifläche bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.

Tabelle 20: Aus der Gesamtbewertung für Tag und Nacht abgeleitete Schutzbedarfe für den Ausgleichsraum.

Gesamtbewertung Tag und Nacht	wird zu	Schutzbedarf
sehr hoch (Klasse 5) im Status quo oder in Klimawandelszenarien	→	Kategorie 1
hoch (Klasse 4) im Status quo oder in Klimawandelszenarien	→	Kategorie 2
mittel (Klasse 3) im Status quo oder in Klimawandelszenarien	→	Kategorie 3
gering und sehr gering (Klassen 2 u. 1) im Status quo oder in Klimawandelszenarien	→	kein besonderer Schutzbedarf

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen, -abflüssen und Parkwinden sowie die Limburger Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden und Gleisflächen.

Ferner erfolgt eine gutachterliche Einschätzung über etwaige Einschränkungen des Kaltluftprozessgeschehens durch die Entwicklungsflächen sowie eine lufthygienische Betrachtung, bei der potenziell belastete Kaltluftabflüsse herausgestellt werden (s. hierzu Kapitel 8.4.3).

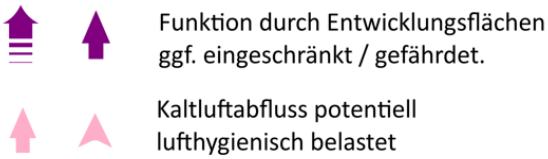


Abbildung 63: PHK-Symbol zu potenziell beeinträchtigten Kaltluftabflüssen durch Entwicklungsflächen oder Luftschadstoffe.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse von Limburg, die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK), ist in Abbildung 64 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Schutzbedarfen und Handlungsprioritäten aus.

WIRKRAUM

Die ***Handlungsprioritäten des Wirkraums*** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Flächenanteile der Handlungsprioritäten im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
1	6,2 %	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation[26] sind bei allen baulichen Entwicklungen[27], Nachverdichtungen und Sanierungen umzusetzen. Dies gilt auch für Neubau und Sanierungen von Straßen, Plätzen und Wegen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen (z.B. klimagerechte Gebäudekühlung[28]) zu prüfen.
2	9,9 %	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind bei allen baulichen Entwicklungen, Nachverdichtungen und Sanierungen umzusetzen. Dies gilt auch für Neubau und Sanierung von Straßen, Plätzen und Wegen.
3	39,2 %	
4	29,2 %	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind bei allen baulichen Entwicklungen, Nachverdichtungen und Sanierungen zu prüfen. Dies gilt auch für Neubau und Sanierung von Straßen, Plätzen und Wegen.
5	15,5 %	

[26] Bioklimatische Situation: Einstufung der Wärmebelastung für den Menschen (von sehr günstig bis sehr ungünstig).

[27] Bauliche Entwicklungen: Umbau/ Modernisierung, Sanierung/ Instandsetzung, Erweiterung/ Nachverdichtung, Nutzungsänderung, Quartiersentwicklung.

[28] Klimagerechte Gebäudekühlung: Verschattung der Fassade durch Bäume, Fassadenbegrünung, techn. Verschattung; (automatisierte) Nachtlüftung; aktive Kühlung mit erneuerbaren Energien

Die Tabelle 21 zeigt zudem die Flächenanteile der verschiedenen Handlungsprioritäten auf. Mit 6,2 % ist die höchste Handlungspriorität im hoch versiegelten und bereits im Status quo sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungsraum (bspw. die Limburger Altstadt) und Gewerberaum (bspw. am Limburger Bahnhof) zu finden.

9,9 % der Flächen entfallen auf die zweithöchste Handlungspriorität, darunter befinden sich vor allem Wohngebiete mit hohen Versiegelungsanteilen und geringem Baumbestand in den Ortszentren von Staffel, Lindenholzhausen, Eschhofen und in Blumenrod südlich der Heinrich-von-Kleist-Straße. Auch das Gewerbe- und Mischgebiet am ICE-Bahnhof Limburg-Süd und das Gewerbegebiet am LIMPARK sind der zweithöchste Handlungspriorität zugewiesen. Diese Flächen wären bereits im schwachen Klimawandel von einer starken Wärmebelastung betroffen.

Der größte Anteil des Wirkraums entfällt auf die 3. Handlungspriorität (39,2 %), hier liegt ebenfalls meist eine geringe Beschattung am Tage bzw. schlechte Durchlüftung in der Nacht vor, wodurch bei einem starken Klimawandel von einer erheblichen Überwärmung dieser Flächen auszugehen ist. Betroffen sind viele Wohngebiete der umliegenden Stadtteile Staffel, Blumenrod, Linter, Lindenholzhausen, Eschhofen, Dietkirchen und Offheim sowie viele Gewerbeflächen (bspw. in Offheim und Limburg Ost).

Die geringere Handlungsprioritäten 4 macht 29,2 % der Wirkraumflächen aus. Für diese Flächen liegt entweder bereits im Status quo oder in den Klimawandelszenarien eine erhöhte Wärmebelastung vor, jedoch tritt in der gesamthaften Betrachtung von Tag- und Nachtsituation hier nicht die stärkste Belastungsklasse ein. Durch einen größeren Baumbestand und eine stärkere Durchgrünung fällt die bioklimatische Situation in den häufig am Siedlungsrand gelegenen Wohngebieten sowohl tagsüber als auch nachts besser aus.

15,5 % der Siedlungsflächen sind der letzte Handlungspriorität (5) zugeteilt und weisen in allen betrachteten Szenarien maximal mittlere Gesamtbelastungen auf. Ein Großteil dieser Flächen ist gut verschattet und/ oder kühlt sich durch einen hohen Anteil an unversiegelten Flächen nachts vergleichsweise stark ab.

In der VDI 3787, Blatt 08 (2020) werden Begrünungs- und Entsiegelungsmaßnahmen als klassische Möglichkeiten zur Verbesserung des Stadtklimas aufgeführt (hier benannt als „klimaökologische Standards“). Darüberhinausgehenden Maßnahmen beinhalten neue technische und planerische Möglichkeiten - je nach Vorhaben bspw. das Freihalten von Durchlüftungsachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Bäume, Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen und damit die Schaffung zugänglicher kühler Orte (hier benannt als „optimierende Maßnahmen“). Weitere Maßnahmen sind im Maßnahmenkatalog zur Stadtklimaanalyse (s. Kapitel 8.5) zu finden.

AUSGLEICHSRAUM

Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/ oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an heißen Tagen darstellen, sind in der PHK durch entsprechende ***Schutzbedarfe im Ausgleichsraum*** ausgewiesen. Tabelle 22 stellt den Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Schutzbedarfsklasse.

Tabelle 22: Flächenanteile der Schutzbedarfe im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Schutzbedarf in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
Kategorie 1	23,7 %	Bei Eingriffen in die Fläche ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten[29]. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens ist dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung sicherzustellen.
Kategorie 2	18,9 %	Bei Eingriffen in die Fläche ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung[30] erforderlich. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann hierfür eine klimafachliche Begleitung mit ggf. modellhafter Untersuchung erforderlich sein.
Kategorie 3	29,3 %	Bei Eingriffen in die Fläche ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
Kein besonderer Schutzbedarf	28,2 %	Keine besondere stadtklimatische Funktion für den derzeitigen Siedlungsraum.

Zu einem Anteil von 23,7 % liegt der Limburger Ausgleichsraum in der Kategorie 1 und ist somit besonders schutzwürdig. Dazu gehören neben Wald- und Forstflächen, die insbesondere tagsüber als wichtige Ausgleichsräume dienen, vor allem auch Leitbahn- bzw. Abflussbereiche, die vorwiegend nachts durch ihre Kühlwirkung den Siedlungsraum entlasten. Daher fallen in diese Kategorie alle Grünflächen, die Teil einer Kaltluftleitbahn oder eines flächenhaften Hangabflusses sind und direkten Bezug zum Siedlungsraum aufweisen. Unabhängig von der Tageszeit, an der die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Fortbestand in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen modellhaft nachzuweisen oder mindestens durch eine fachliche Stellungnahme einzuschätzen.

Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Schutzkategorie 2 mit einem hohen Schutzbedarf, der für 18,9 % der Ausgleichsflächen zutrifft, ist zu achten. In diese Kategorie fallen Grünflächen, die eine mittlere Aufenthaltsqualität am Tage bieten oder Teil eines Kaltluftabflussprozesses sind. Um die Klimaoptimierung eines Planvorhabens zu erreichen ist hier eine klimafachliche Begleitung in Form einer verbalargumentativen fachlichen Stellungnahme oder bei größeren Vorhaben eine modellhafte Untersuchung durchzuführen.

Ein Anteil von 29,3 % der Grün- und Freiflächen weist die Schutzkategorie 3 auf. In diese Kategorie fallen Flächen, die aufgrund ihrer siedlungsfernen Lage nur eine geringe Menge an Kaltluft zum Siedlungsraum befördern oder eine geringe Aufenthaltsqualität am Tage aufweisen. Deren Klimafunktionen, insb. die Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Bei größeren Entwicklungsvorhaben sollte hier eine klimafachliche Begleitung zum Erhalt der klimatischen Funktionen erfolgen.

Rund 28,2 % der Flächen (meist siedlungsferne Agrarflächen) weisen aktuell keine besondere stadtklimatische Funktion auf, allerdings wäre langfristig zu prüfen, ob sich deren Schutzbedarf mit der Siedlungsentwicklung verändert.

[29] Klimafachliche Begleitung: Bestandsanalyse, Analyse des Planvorhabens, Maßnahmenempfehlung zur Klimaanpassung

[30] Klimafachliche Einschätzung: Erste Einschätzung klimarelevanter Auswirkungen, grobe Empfehlung oder Hinweise

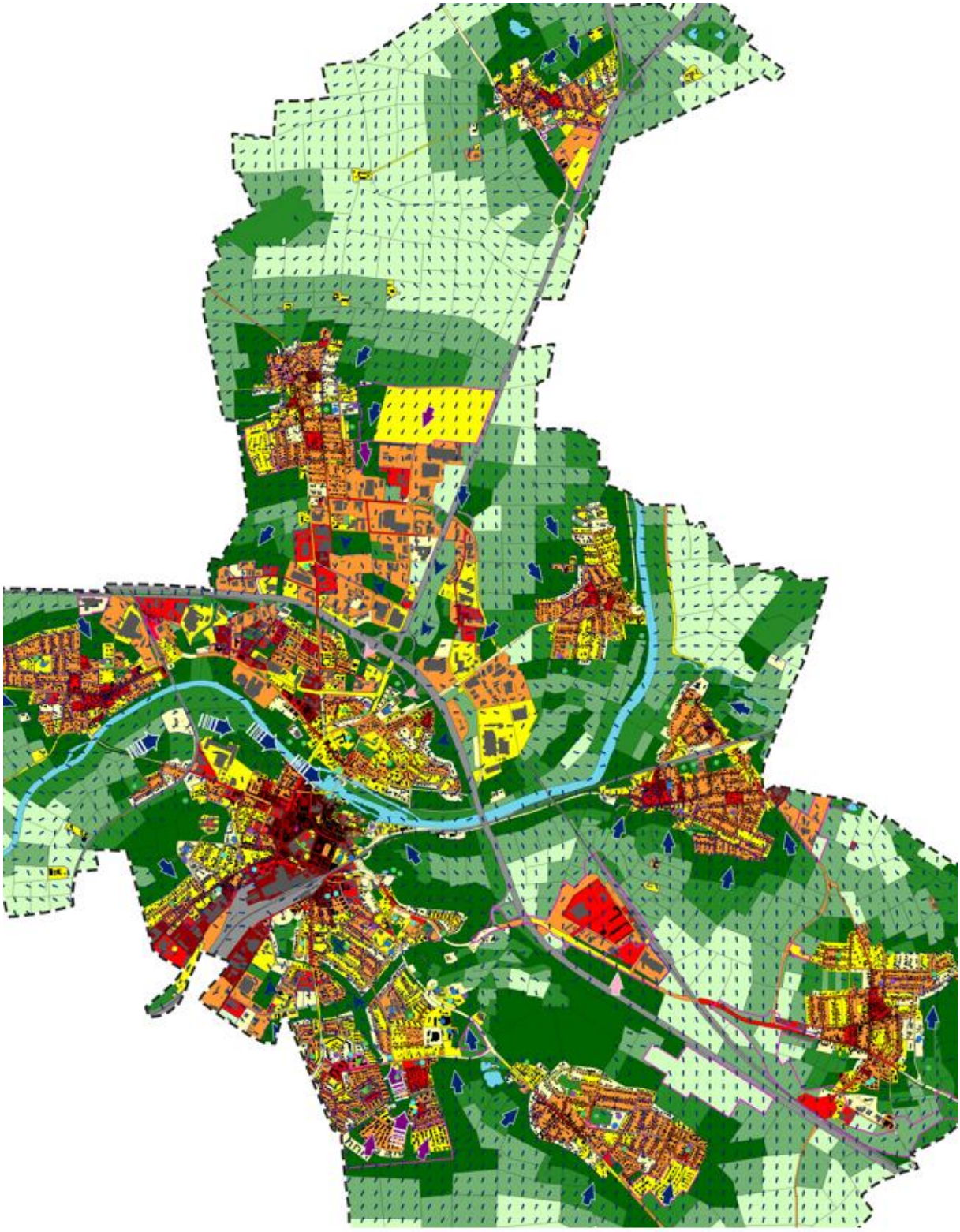


Abbildung 64: Planungshinweiskarte der Stadt Limburg an der Lahn.

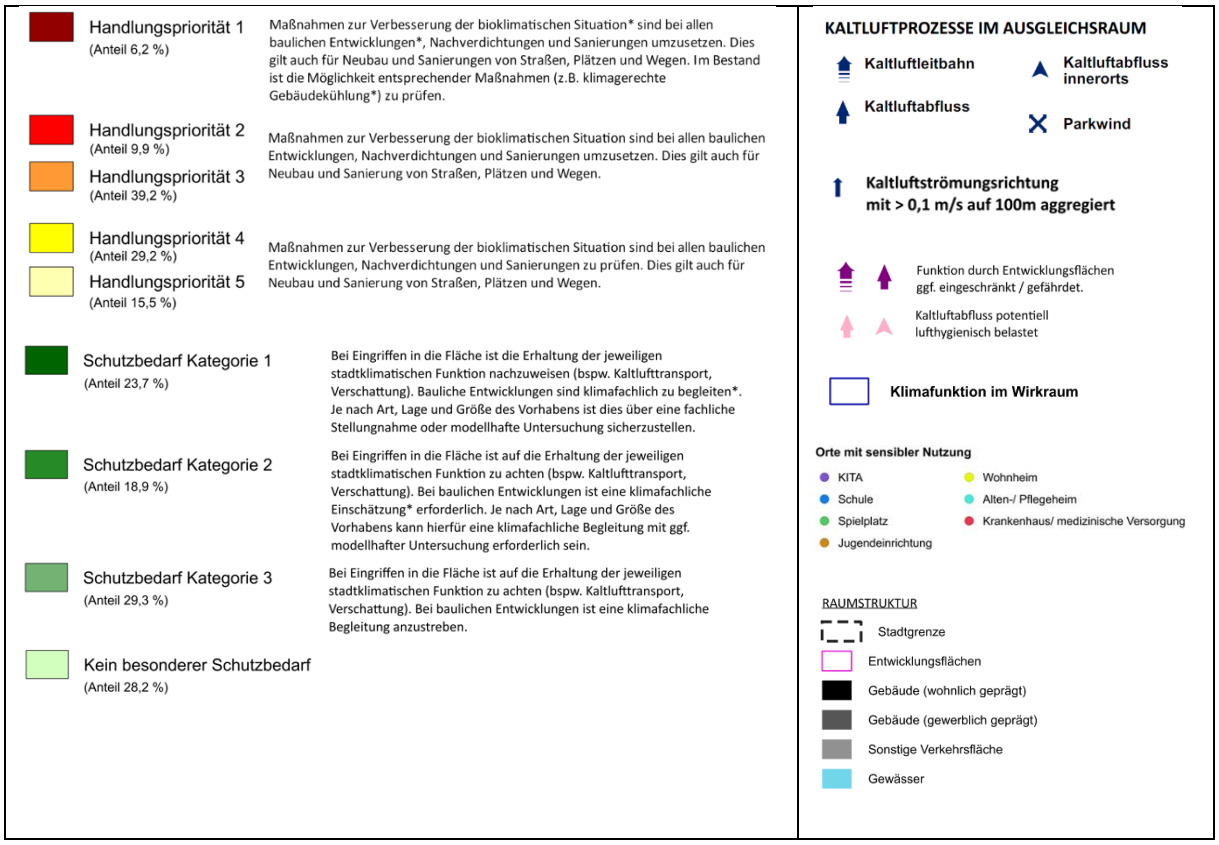


Abbildung 65: Legende zur Planungshinweiskarte Stadtklima.

8.4.3 BEWERTUNG AUSGEWÄHLTER ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Für die beiden Entwicklungsflächen „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“ und „Unterm Staffler Weg“ wird eine detaillierte Analyse der Flächenentwicklung in Bezug auf klimatische Parameter und Flächenbewertungen durchgeführt. Diese beiden Flächen wurden ausgewählt, da es sich um städtische Planungen handelt, deren Bearbeitungsstand die Integration der Ergebnisse des vorliegenden Berichts ermöglicht.

Dabei werden die Veränderungen des lokalen Kleinklimas vom Status quo zu den Zukunftsszenarien untersucht, um eine fundierte Einschätzung des Bedarfs an Klimaanpassungsmaßnahmen zu ermöglichen.

Entwicklungsfläche „Nördlich der Kapellenstraße II. BA“

Der in der Stadtklimaanalyse modellierte Planungsstand der Entwicklungsfläche „Nördlich der Kaapellenstraße II. BA“ ist inzwischen überholt. Die klimaökologischen Auswirkungen des Bauvorhabens sollen im Rahmen eines detaillierten klimaökologischen Gutachtens gesondert untersucht werden. Die nachfolgende Einschätzung bezieht sich zunächst auf den in der Stadtklimaanalyse zugrunde gelegten Planungsstand und ist daher als vorläufig zu verstehen.

Für die Klimaanalyse wurde die Entwicklungsfläche Nördlich der Kapellenstraße, II. BA zwei Teilbereiche gegliedert. Für die Fläche Nr. 5a wird eine gewerbliche Nutzung angenommen, während die Fläche Nr. 5b als Grünfläche erhalten und durch zusätzliche Baumpflanzungen weiter aufgewertet werden soll (s. Abbildung 40).

Die Fläche Nr. 5a ist in der Planungshinweiskarte der Handlungspriorität 4 zugeordnet. In der Modellierung des Status quo wurde sie als Freifläche berücksichtigt, welche aufgrund der fehlenden Verschattung am Tage nur eine sehr geringe Aufenthaltsqualität aufweist, sich in der Nacht jedoch stark abkühlt und somit eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung innehat (s. Abbildung 66).

Im Zuge der angenommenen Umnutzung zu einer Gewerbefläche zeigt sich im schwachen Klimawandelszenario trotz insgesamt steigender Temperaturen eine mittlere Verringerung der Wärmebelastung (PET – Physiologisch äquivalente Temperatur) um -3,45 K, im starken Klimawandelszenario beträgt die Reduktion -1,69 K. Die vergleichsweise starke Hitzereduktion ist jedoch teilweise auf den verwendeten Mischpixelansatz zurückgeführt, sodass die tatsächliche Wärmebelastung insbesondere in unbeschatteten Bereichen auch hoch ausfallen kann. In den Bewertungskarten wird die bioklimatische Situation tagsüber als günstig (schwaches Klimawandelszenario) beziehungsweise als mittel (starkes Klimawandelszenario) eingestuft.

In der Nachtsituation weist die Freifläche im Status quo eine hohe Kaltluftproduktion auf, wodurch ein flächenhafter Kaltluftabfluss in das südlich angrenzende Gewerbegebiet erfolgt. Durch die geplante Entwicklung würden sowohl die Kaltluftproduktion als auch die Kaltluftleitfunktion deutlich eingeschränkt (mittlere KVS-Reduktion um -16,64 m³/(s*m)). Infolgedessen würde dem benachbarten Gewerbegebiet weniger Kaltluft zugeführt.

Die nächtlichen Temperaturen würden im Vergleich zur unbebauten Ausgangssituation im Mittel um +3,67 K im schwachen sowie um +4,44 K im starken Klimawandelszenario ansteigen. Damit verändert sich die Fläche in der Nachtsituation von einer Grünfläche mit höchster bioklimatischer Bedeutung zu einer Siedlungsfläche mit bioklimatisch ungünstiger Situation im schwachen bzw. sehr ungünstiger Situation im starken Klimawandelszenario.

Für die grüngeprägte Teilfläche Nr. 5b ist in der Zukunftsentwicklung eine zusätzliche Baumpflanzung vorgesehen. Durch die damit verbundene Verschattung verbessert sich die Aufenthaltsqualität am Tag im Szenario eines schwachen Klimawandels gegenüber dem Status quo von gering auf mittel, da die Wärmebelastung (PET) durchschnittlich um -3,83 K abnimmt. Im Szenario eines starken Klimawandels bleibt die Aufenthaltsqualität hingegen gering, da die PET sich hier bezogen auf den Status quo mit -0,69 K nur geringfügig reduziert.
In der Nacht weist die Teilfläche in allen betrachteten Szenarien eine hohe Kaltluftproduktion auf und trägt zur Weiterleitung der entstehenden Kaltluft in das angrenzende Siedlungsgebiet bei.

Für die Beurteilung der Entwicklungsfläche im Hinblick auf die Erforderlichkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen ist bei Gewerbeflächen, die überwiegend tagsüber genutzt werden, insbesondere die Tagsituation maßgeblich. Aus der günstigen bzw. mittleren bioklimatischen Situation am Tage und der zugeordneten Handlungspriorität 4 ist zunächst kein erhöhter Bedarf an Maßnahmen abzuleiten, jedoch kann insbesondere auf lokal unverschatteten Bereichen eine erhöhte Wärmebelastung auftreten, die gezielte Maßnahmen zur Hitzeminderung sinnvoll machen würde. **Somit besteht bei der städtebaulichen Entwicklung ein Bedarf an verschattenden Maßnahmen, die gezielt darauf ausgerichtet sind, die Wärmebelastung in Aufenthaltsbereichen sowie auf Straßen und Parkplätzen zu reduzieren.** Zur gezielten Identifikation solcher Bereiche kann die Detailkarte zur PET herangezogen werden.

Da auf der zukünftig gewerblich genutzten Teilfläche 5a nur wenige begrünte Aufenthaltsmöglichkeiten im Freien vorgesehen sind, können diese gegebenenfalls auf der grüngeprägten Teilfläche 5b ermöglicht werden. Durch die Schaffung eines vielfältigen Mikroklimas mit der Kombination aus Bäumen und Rasenflächen dient die Grünfläche tagsüber als potenzielles Erholungsgebiet und nachts als Kaltluftentstehungsgebiet.

Zusammenfassung der klimatischen Bedingungen für die Entwicklungsfläche Nr. 5a „NördKap II“
für P0 = Status quo, P1 = schwacher Klimawandel und P2 = starker Klimawandel

Planungshinweiskarte: Handlungspriorität 4

Klimaparameter (gemittelt)

- Nächtliche Erwärmung um +3,67 K (P1); +4,44 K (P2)
- Reduktion Wärmebelastung Tag (PET) um -3,45 K (P1); -1,69 K (P2)
- Reduktion KVSD um -16,64 m³/(s*m), Windgeschwindigkeit um -0,55 m/s

Bewertungskarte Tag

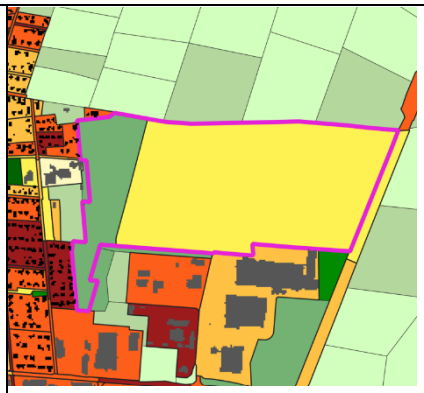
- P0: sehr geringe Aufenthaltsqualität
- P1: günstige bioklimatische Situation
- P2: mittlere bioklimatische Situation

Bewertungskarte Nacht

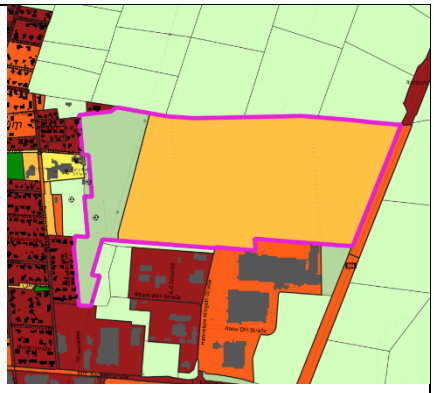
- P0: sehr hohe bioklimatische Bedeutung
- P1: ungünstige bioklimatische Situation
- P2: sehr ungünstige bioklimatische Situation



P0: Bewertungskarte Tag



P1: Bewertungskarte Tag



P2: Bewertungskarte Tag

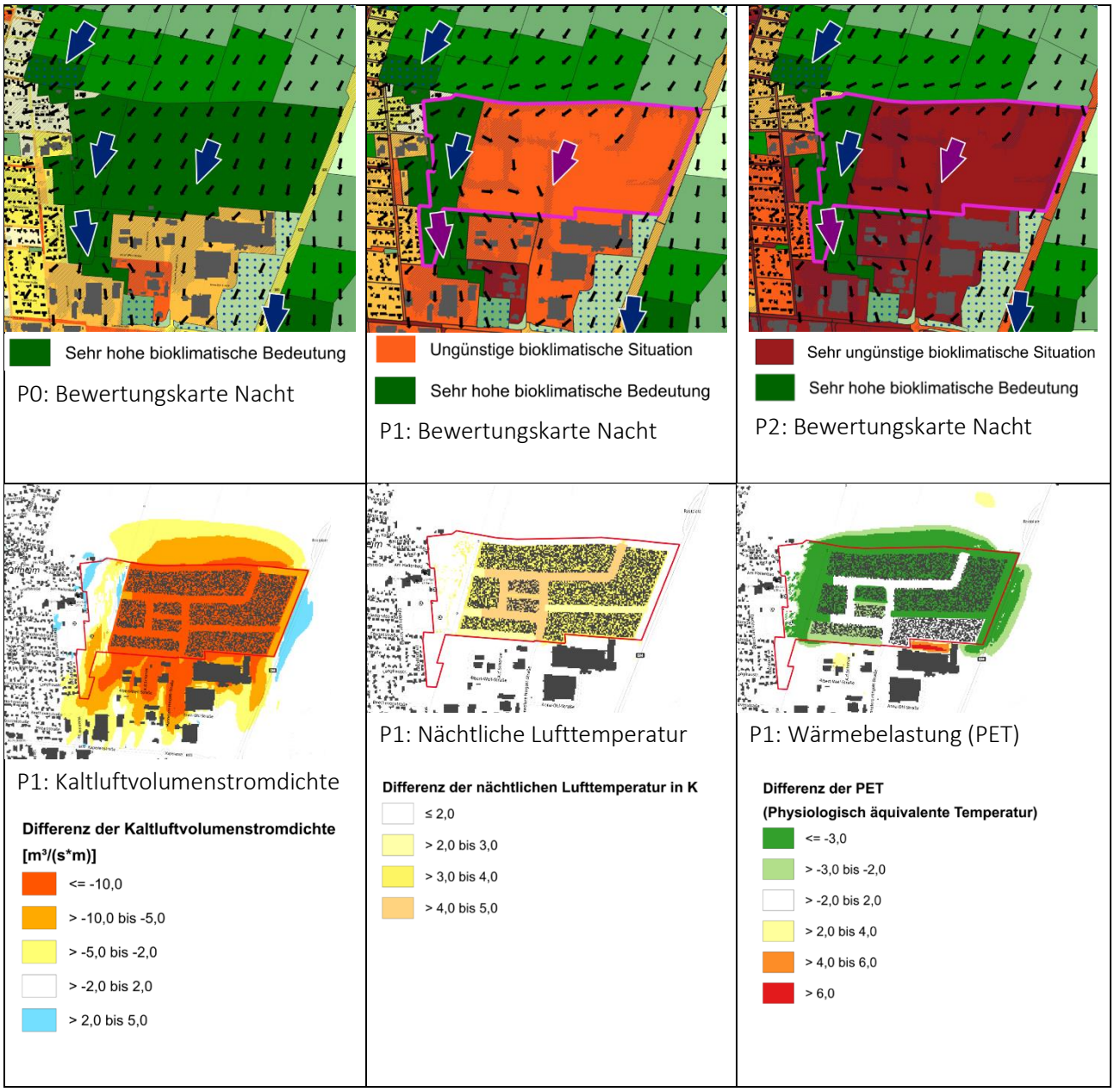


Abbildung 66: Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße, II. BA“- Kartenausschnitte zur Flächenbeurteilung. P0 = Status quo; P1 = schwacher Klimawandel; P2 = starker Klimawandel.

Entwicklungsfläche „Unterm Staffler Weg“

Die Entwicklungsfläche „Unterm Staffler Weg“ (Nr. 7 in Abbildung 40) weist in der Planungshinweiskarte die Handlungspriorität 4 auf. In der Modellierung des Status quo wurde sie als Freifläche berücksichtigt, welche aufgrund der fehlenden Verschattung am Tage nur eine geringe Aufenthaltsqualität aufweist, sich in der Nacht jedoch stark abkühlt und somit eine hohe bioklimatische Bedeutung innehat (s. Abbildung 67).

Im Zuge der angenommenen Umnutzung zu einem Wohngebiet zeigt sich im schwachen Klimawandelszenario trotz insgesamt steigender Temperaturen eine durchschnittliche Verringerung der Wärmebelastung (PET – Physiologisch äquivalente Temperatur) um -1,23 K, im starken Klimawandelszenario erfolgt jedoch eine Erhöhung der PET um +1,08 K. In der Bewertungskarte Tag wird die bioklimatische Situation als mittel (schwacher Klimawandel) bzw. ungünstig (starker Klimawandel) eingestuft.

In der Nachtsituation weist die Freifläche im Status quo eine hohe Kaltluftproduktion auf, der entstehende Kaltluftabfluss ist jedoch vom Siedlungsraum weg gerichtet. Durch die geplante Entwicklung würden die Kaltluftproduktion und der Volumenstrom abgeschwächt werden (mittlere KVS-Reduktion um -8,09 m³/(s*m)), auf die Bestandssiedlung hätte dies nur geringe und sehr kleinräumige Auswirkungen. Im Status quo liegt für die Grünfläche eine hohe nächtliche bioklimatische Bedeutung vor.

Die nächtlichen Temperaturen würden im Vergleich zur unbebauten Ausgangssituation durchschnittlich um +2,26 K im schwachen sowie um +2,96 K im starken Klimawandelszenario ansteigen. Damit verändert sich die Fläche von einer Grünfläche mit hoher bioklimatischer Bedeutung in der Nacht zu einer Siedlungsfläche mit mittlerer bioklimatischer Situation im schwachen beziehungsweise ungünstiger Situation im starken Klimawandelszenario.

Für die Bewertung der Entwicklungsfläche hinsichtlich des Bedarfs an Klimaanpassungsmaßnahmen sind bei Siedlungsbereichen sowohl die Tages- als auch die Nachtsituation relevant. Die in der Planungshinweiskarte vergleichsweise niedrige Zuordnung zur Handlungspriorität 4 ergibt sich daraus, dass die Fläche in den zugrunde gelegten Klimawandelszenarien keine „sehr ungünstige“ bioklimatische Situation aufzeigt.

Während im Szenario eines schwachen Klimawandels für die Tag- und Nachtsituation jeweils eine mittlere bioklimatische Situation ausgewiesen wird, läge bei einem starken Klimawandel eine ungünstige Situation vor. **Eine bauliche Entwicklung ist daher grundsätzlich möglich, sofern klassische Maßnahmen wie Begrünung und Entsiegelung berücksichtigt werden.** Entsprechende Ansätze, etwa in Form von Baumstandorten und Rasenflächen, sind bereits Bestandteil der Planung und bilden für die Bewertung eine wichtige Grundlage. Ergänzend können lokal weitere Verschattungs- und Entsiegelungsmaßnahmen umgesetzt werden, darüber hinaus bieten sich Fassaden- und Dachbegrünungen sowie Wasserelemente an, um zukünftige Hitzebelastungen zusätzlich zu mindern. Zur Identifizierung besonders hitzegefährdeter Bereiche kann die detaillierte Einzelparameterkarte der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) herangezogen werden. In der Nacht überwärmte Bereiche lassen sich aus der Detailkarte zur Nachttemperatur erkennen.

Zusammenfassung der klimatischen Bedingungen für die Entwicklungsfläche „Unterm Staffler Weg“
für P0 = Status quo, P1 = schwacher Klimawandel und P2 = starker Klimawandel

Planungshinweiskarte: Handlungspriorität 4

Klimaparameter (gemittelt)

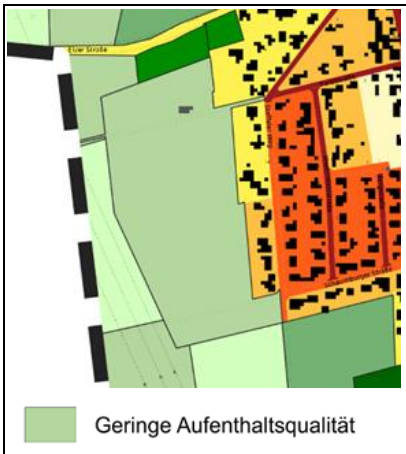
- Nächtliche Erwärmung um +2,26 K (P1); +2,96 K (P2)
- Änderung Wärmebelastung Tag (PET) um -1,23 K (P1); +1,08 K (P2)
- Reduktion KVSD um -8,09 m³/(s*m), Windgeschwindigkeit um -0,38 m/s

Bewertungskarte Tag

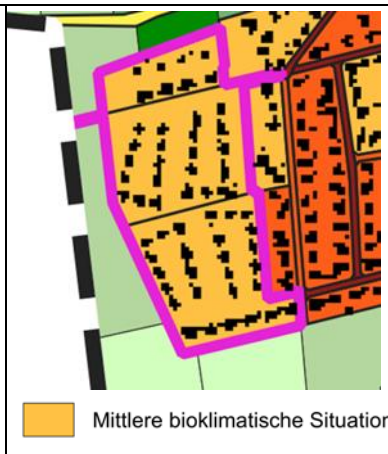
- P0: geringe Aufenthaltsqualität
- P1: mittlere bioklimatische Situation
- P2: ungünstige bioklimatische Situation

Bewertungskarte Nacht

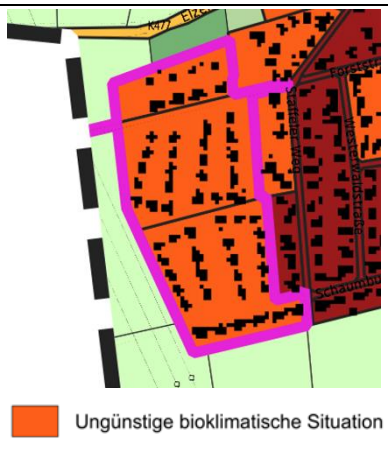
- P0: hohe bioklimatische Bedeutung
- P1: mittlere bioklimatische Situation
- P2: ungünstige bioklimatische Situation



P0: Bewertungskarte Tag



P1: Bewertungskarte Tag

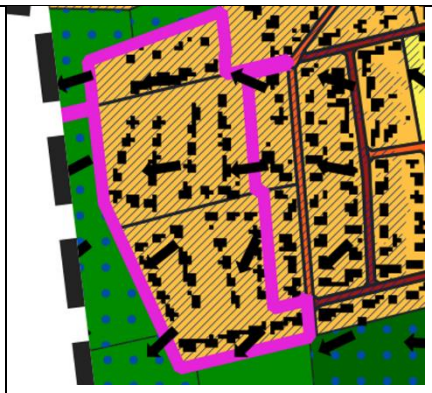


P2: Bewertungskarte Tag



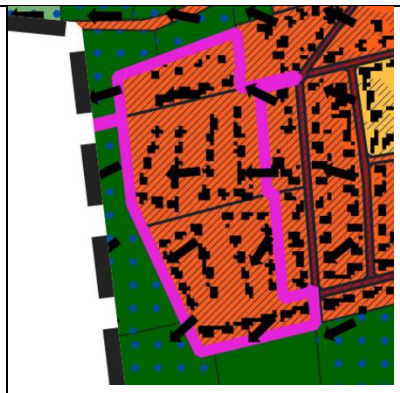
Hohe bioklimatische Bedeutung

P0: Bewertungskarte Nacht



Mittlere bioklimatische Situation

P1: Bewertungskarte Nacht



Ungünstige bioklimatische Situation

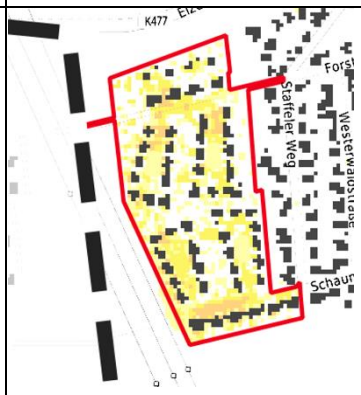
P2: Bewertungskarte Nacht



Differenz der Kaltluftvolumenstromdichte [m³/(s*m)]

- <= -10,0
- > -10,0 bis -5,0
- > -5,0 bis -2,0
- > -2,0 bis 2,0
- > 2,0 bis 5,0

P1: Kaltluftvolumenstromdichte



Differenz der nächtlichen Lufttemperatur in K

- ≤ 2,0
- > 2,0 bis 3,0
- > 3,0 bis 4,0
- > 4,0 bis 5,0

P1: Nächtliche Lufttemperatur



Differenz der PET (Physiologisch äquivalente Temperatur)

- <= -3,0
- > -3,0 bis -2,0
- > -2,0 bis 2,0
- > 2,0 bis 4,0
- > 4,0 bis 6,0

P1: Wärmebelastung (PET)

Abbildung 67: Entwicklungsfläche "Unterm Staffler Weg" - Kartenausschnitte zur Flächenbeurteilung. P0 = Status quo; P1 = schwacher Klimawandel; P2 = starker Klimawandel.

8.4.4 BEISPIELE ZUR ANWENDUNG DER KARTENERGEBNISSE

Anhand konkreter Flächenbeispiele wird nachfolgend erklärt, wie die Planungshinweiskarte in Verbindung mit den weiteren Ergebniskarten der Stadtklimaanalyse Limburg genutzt werden kann. Hierbei ist eine hierarchische Herangehensweise analog zur in Kapitel 3 aufgeführten Produktpyramide ratsam. Durch diese gelingt es, die konzentrierte Information der Planungshinweiskarte über die Klimaanalysekarte bis hin zu den Einzelkarten zentraler Stadtklimakenngrößen und dem Nutzungsraster zu entflechten und auf diese Weise eine vereinfachte Entscheidungsfindung über geeignete Maßnahmen herbeizuführen. Das nachfolgende Interpretationsbeispiel für die Karten wird für konkrete Flächenbeispiele im Fokusraum „Limburger Altstadt " durchgeführt:

- Diezer Straße mit Handlungspriorität 1
- Wohngebiete an der Diezer Straße mit Handlungspriorität 1
- Kornmarkt und Plötze mit Handlungspriorität 1

Der Fokusraum „Limburger Altstadt" weist überwiegend Wirkraumflächen und Straßenräume der Handlungspriorität 1 und 2 auf (s. Abbildung 68). Die Einzelbewertungen für die Tag- und Nachtsituation sind jeweils aus den Bewertungskarten Nacht (s. Abbildung 69) und Tag (s. Abbildung 70) abzulesen.

Die methodische Grundlage der PHK fußt für die Tagsituation auf der rasterbasierten Information der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET), die hierfür auf Gebietsumrisse der Basisgeometrie gemittelt wurde. Im hierarchisch nächstfolgenden Schritt wird daher die Karte der PET hinzugezogen (s. Abbildung 73), wodurch lokale Minima und Maxima dieser „gefühlten" Temperatur in Erscheinung treten, die nachfolgend die Zuweisung ortsbezogener Maßnahmen für die Tagsituation zulassen. Die Nachtsituation zeigt sich u.a. anhand der Klimaanalysekarte (s. Abbildung 71), welche die nächtliche Lufttemperatur und den Kaltluftvolumenstrom darstellt. Zur Veranschaulichung der örtlichen Begebenheiten sind zudem das Nutzungsraster (s. Abbildung 74) sowie ein Luftbild (s. Abbildung 75) des Fokusraums „Limburger Altstadt" abgebildet.

Fokusraum Limburger Altstadt

Das Wohnmischgebiet zwischen Diezer Straße, Schiede und Josef-Ludwig-Straße weist in der PHK die höchste Handlungspriorität auf (s. Abbildung 68), welche sich maßgeblich aus der sehr ungünstigen bioklimatischen Situation in der Bewertung der Nachtsituation ergibt (s. Abbildung 69). Die Diezer Straße weist sowohl am Tage als auch in der Nacht eine sehr ungünstige bioklimatische Situation auf, gleiches gilt auch für Kornmarkt und Plötze.

In der rasterbasierten und hochaufgelösten Klimaanalysekarte werden die bodennahe nächtliche Lufttemperatur für den Wirkraum (Wohn-, Gewerbegebiete, Straßen, Plätze) und die Kaltluftprozesse für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) dargestellt. Im betrachteten Wohngebiet beträgt die nächtliche Lufttemperatur flächendeckend über 18 °C bis teils über 19 °C. Die Diezer Straße, Kornmarkt und Plötze sind mit 19 bis 20 °C nachts besonders warm.

Im Nutzungsraster (s. Abbildung 74) und Luftbild (s. Abbildung 75) wird deutlich, dass dies auf eine nahezu vollständige Bodenversiegelung zurückzuführen ist, wodurch die tagsüber aufgenommene Wärme nachts wieder abgegeben und die Abkühlung reduziert wird.

Anhand des hochaufgelösten Windfeldes, welches als Geodatensatz vorliegt, wird deutlich, dass Kaltluft aus westlicher Richtung in das beschriebene Wohnmischgebiet einströmt. Durch die bestehende Bebauung sowie die geringe Breite der Diezer Straße wird dieser Zustrom jedoch erheblich abgeschwächt und teilweise blockiert (s. Abbildung 72). Der Kaltluftvolumenstrom beträgt im Fokusraum lediglich rund 8 $m^3/(s*m)$ und ist damit als sehr gering einzustufen. Am nordwestlichen Rand des betrachteten Wohnblocks kann über die

Schiede Kaltluft in begrenztem Umfang einströmen, ihre Strömungsintensität ist jedoch aufgrund vorgelagerter Bebauung bereits deutlich reduziert. Entlang der Diezer Straße und im Bereich von Plötze und Kornmarkt ist die Kaltluftströmung kaum merklich ausgeprägt.

Die Tagsituation ist im betrachteten Wohnmischgebiet mit einer ungünstigen bis mittleren bioklimatischen Situation bewertet, die Diezer Straße, Kornmarkt und Plötze weisen eine sehr ungünstige Situation auf (s. Abbildung 70).

In der Karte der physiologisch äquivalenten Temperatur lässt sich mit einer räumlichen Auflösung von 5 Metern erkennen, welche Bereiche einer besonders hohen Hitzebelastung ausgesetzt sind und welche durch Verschattung kühlere Bedingungen aufweisen (s. Abbildung 73). Die PET wird in der VDI 3787 Blatt 2 (2022) in verschiedene Belastungsstufen klassifiziert (s. auch Tabelle 10). Danach werden PET-Werte von > 23 °C als leicht warm, > 29 °C als warm und > 35 °C und > 41 °C als heiß bzw. sehr heiß mit daraus folgendem Hitzestress empfunden.

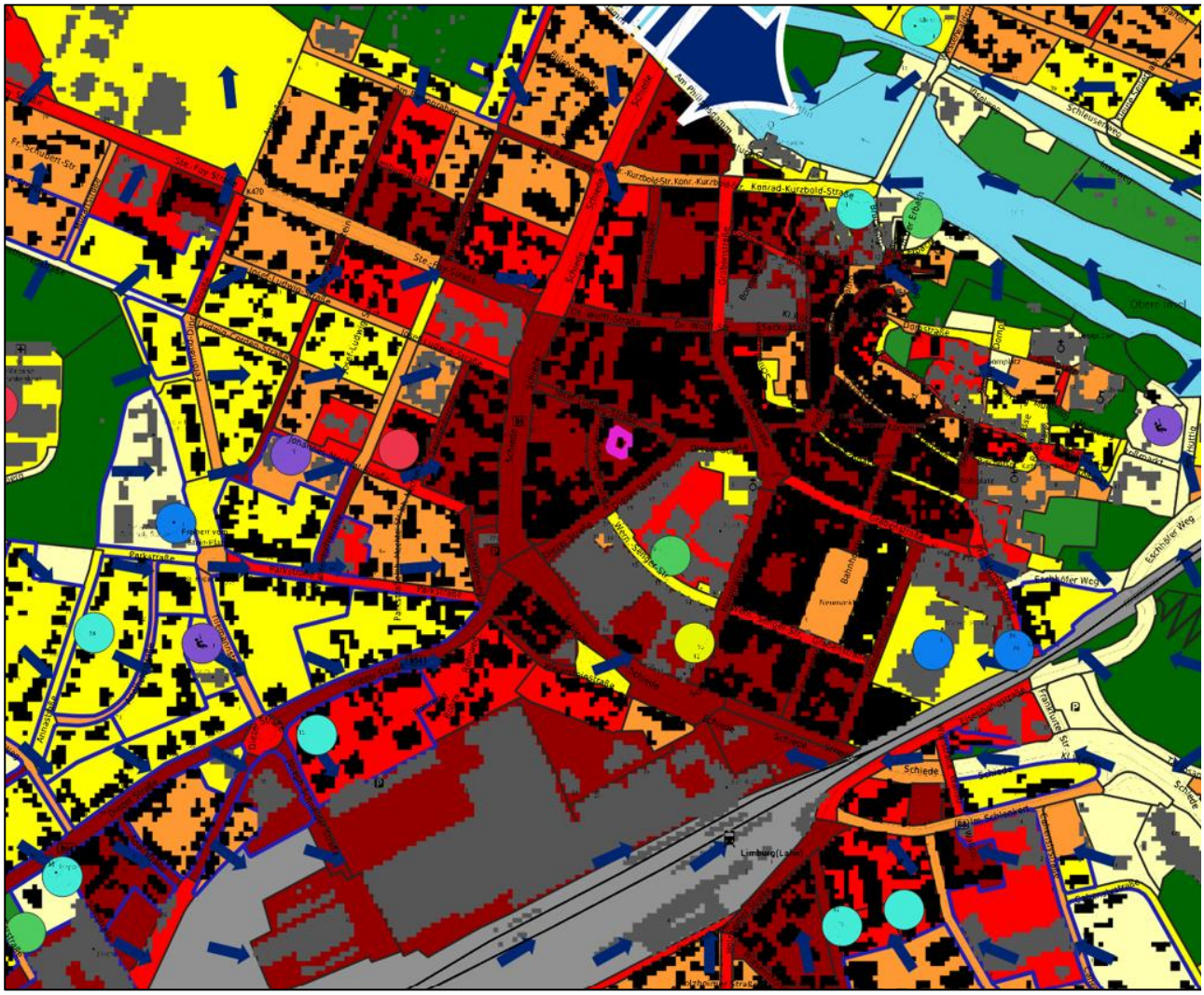
Durch den Gebäudeschatten zeigen sich vor Ost- und Nordfassaden geringere PET-Werte von 32–35 °C (moderate Wärmebelastung) als auf sonnenbeschienenen Flächen, wie bspw. in versiegelten Innenhöfen oder im Straßenraum der Diezer Straße, der mit 41°C bis über 43 °C extrem stark wärmebelastet ist. Am Kornmarkt steigt die PET auf über 41 °C und an der Plötze auf über 43 °C an.

In Tabelle 23 sind einige Maßnahmen aus dem Maßnahmenkatalog (s. Kap. 8.5) aufgeführt, die zur Reduzierung der Wärmebelastung im Fokusraum „Limburger Altstadt“ beitragen können. Dabei wird differenziert, ob die Maßnahmen primär tagsüber oder nachts wirken und in welchem Raumtyp (Straße, Platz, Wohnblock) sie im Innen- bzw. Außenraum ansetzen.

Tabelle 23: Potenzielle Maßnahmen zur Reduktion der Wärmelast im Fokusraum "Limburger Altstadt".

Maßnahme	Primäre tageszeitliche Wirkung	Raumtyp	Wirkungsbereich
01. Innen-/Hinterhofbegrünung	**Nacht:** Kühleffekt durch Entsiegelung **Tag:** Verschattung durch Bäume reduziert direkte Sonneneinstrahlung	Wohnblock	Außenraum
03. Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	**Nacht:** Reduzierte Wärmeabgabe durch helle Bodenflächen **Tag:** geringere Oberflächentemperatur, aber stärkere Rückstrahlung kann ggf. PET lokal erhöhen	Wohnblock, Straße, Platz	Außenraum
04. Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	**Nacht:** Kaltluftbildung durch bessere Bodenabkühlung	Wohnblock, Straße, Platz	Außenraum
05. Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben	**Tag:** Verschattung durch Bäume; Verdunstungskühle durch Wasserflächen **Nacht:** Kaltluftbildung durch bessere Bodenabkühlung bei Entsiegelung	Straße, Platz	Außenraum
06. Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	**Tag:** Direkte Sonnenreduktion durch Bäume oder bauliche Elemente, senkt Luft- und Oberflächentemperatur sowie PET **Nacht:** Geringere Innenraumtemperatur durch Verschattung am Tage	Wohnblock, Straße, Platz	Außenraum / Innenraum
09. Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	**Tag:** Verdunstungskühlung senkt Lufttemperatur und PET	Straße, Platz	Außenraum
10. Regenwasserversickerung, -speicherung und Bewässerungssysteme	**Tag:** Verdunstungskühlung senkt Lufttemperatur und PET **Nacht:** Entsiegelung erhöht Kaltluftbildung, fördert Kaltluftabfluss	Straße, Platz	Außenraum

11. (Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume	**Tag:** Beschattung oder Wasserflächen reduziert Hitze **Nacht:** Entsiegelung fördert Kaltluftbildung	Straße, Platz	Außenraum
14. Entdichtung (Rückbau)	**Nacht:** Förderung von Kaltluftabfluss und Kaltluftentstehung bei Entsiegelung	Wohnblock	Außenraum
16. Dachbegrünung	**Tag:** Verschattung und Verdunstung kühlt Dachflächen **Nacht:** Verstärkt Kaltluftbildung bei intensiver Begrünung	Wohnblock	Innenraum
17. Fassadenbegrünung	**Tag:** Reduktion direkter Sonneneinstrahlung auf Gebäudeflächen, Verdunstungskühle, Einfluss auf angrenzenden Außenraum	Wohnblock	Innenraum, lokal Außenraum
18. Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	**Tag:** Direkte Reduktion der Sonneneinstrahlung, senkt Innentemperaturen	Wohnblock	Innenraum
19. Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	**Tag:** Reduzierte Aufheizung und aktive Kühlung	Wohnblock	Innenraum
20. Technische Gebäudekühlung	**Tag:** Aktive Kühlung bei Hitze **Nacht:** ggf. Nachtauskühlung zur Effizienzsteigerung	Wohnblock	Innenraum
21. Anpassung des Raumnutzungs-konzeptes	**Tag:** Nutzung nach Norden ausgerichteter Zimmer als Büroräume **Nacht:** Nutzung nach Norden ausgerichtete Zimmer als Schlafräume	Wohnblock	Innenraum



SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN

- Handlungspriorität 1
- Handlungspriorität 2
- Handlungspriorität 3
- Handlungspriorität 4
- Handlungspriorität 5

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

- Sehr hoher Schutzbedarf
- Hoher Schutzbedarf
- Erhöhter Schutzbedarf
- Kein besonderer Schutzbedarf

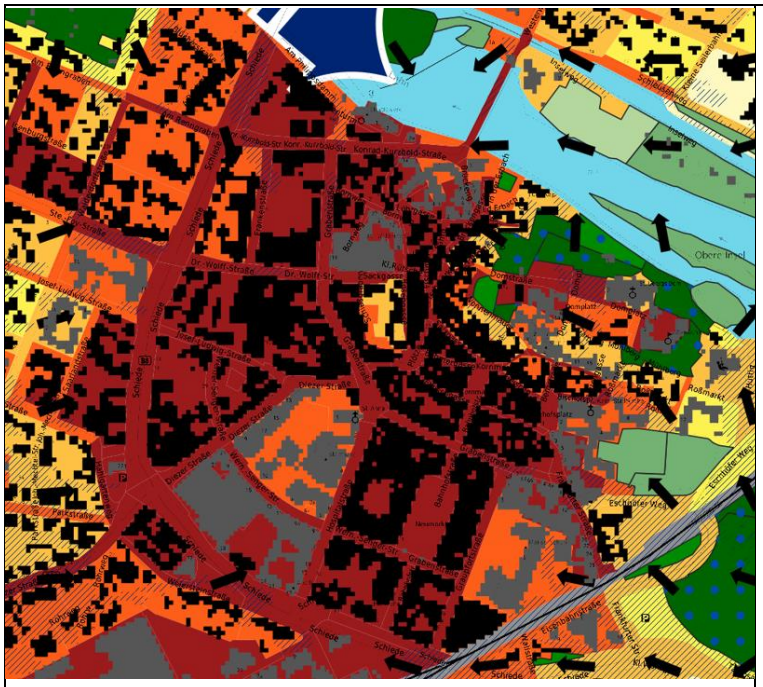
KALTLUFTPROZESSE

- Kaltluftströmungsrichtung mit > 0,1 m/s auf 100m aggregiert
- Klimafunktion im Wirkraum

Orte mit sensibler Nutzung

- KITA
- Schule
- Spielplatz
- Jugendeinrichtung
- Wohnheim
- Alten-/ Pflegeheim
- Krankenhaus/ medizinische Versorgung

Abbildung 68: Planungshinweiskarte im Fokusraum Limburger Altstadt.



SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN

Bewertung von Wohn- / Gewerbeflächen, Straßen und Plätzen

- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Bioklimatische Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
- Hohe bioklimatische Bedeutung
- Mittlere bioklimatische Bedeutung
- Geringe bioklimatische Bedeutung
- Sehr geringe bioklimatische Bedeutung

Kaltlufteinwirkbereich (im Siedlungsraum)

Kaltluftströmungsrichtung

Abbildung 69: Bewertungskarte Nacht im Fokusraum "Limburger Altstadt".



SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN

Bewertung von Wohn- / Gewerbeflächen, Straßen und Plätzen

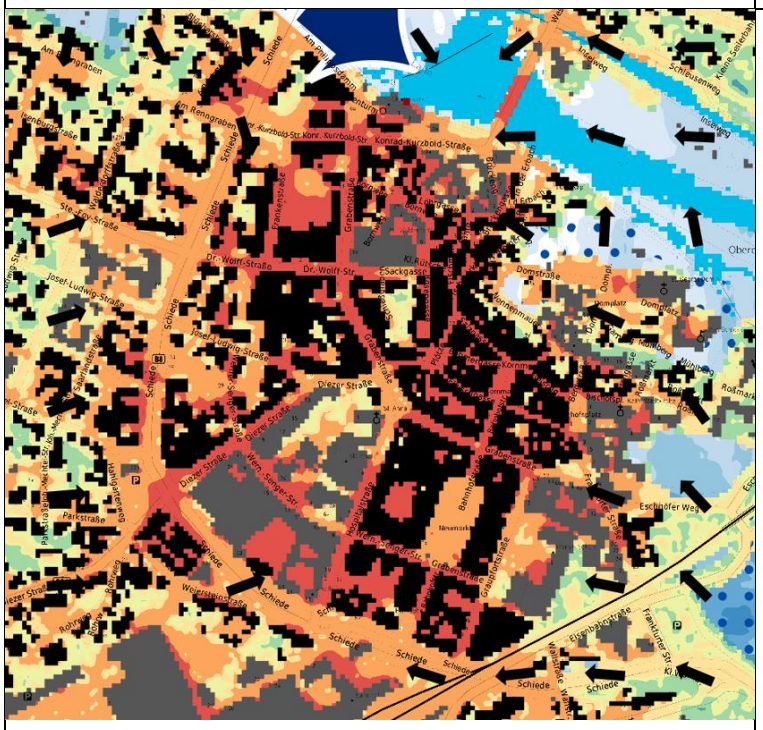
- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum an Sommertagen

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität
- Hohe Aufenthaltsqualität
- Mittlere Aufenthaltsqualität
- Geringe Aufenthaltsqualität
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität

Abbildung 70: Bewertungskarte Tag im Fokusraum "Limburger Altstadt".



SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN

NÄCHTLICHE ÜBERWÄRMUNG

Lufttemperatur in [°C] in 2 m.ü.Gr. um 4 Uhr

- bis 14
- > 14 bis 15
- > 15 bis 16
- > 16 bis 17
- > 17 bis 18
- > 18 bis 19
- > 19 bis 20
- > 20

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTE

in [m³/(s*m)] um 4 Uhr

- bis 5
- > 5 bis 10
- > 10 bis 15
- > 15 bis 20
- > 20 bis 25
- > 25 bis 30
- > 30 bis 40
- über 40

Kaltluftströmungsrichtung

Abbildung 71: Klimaanalysekarte im Fokusraum "Limburger Altstadt".

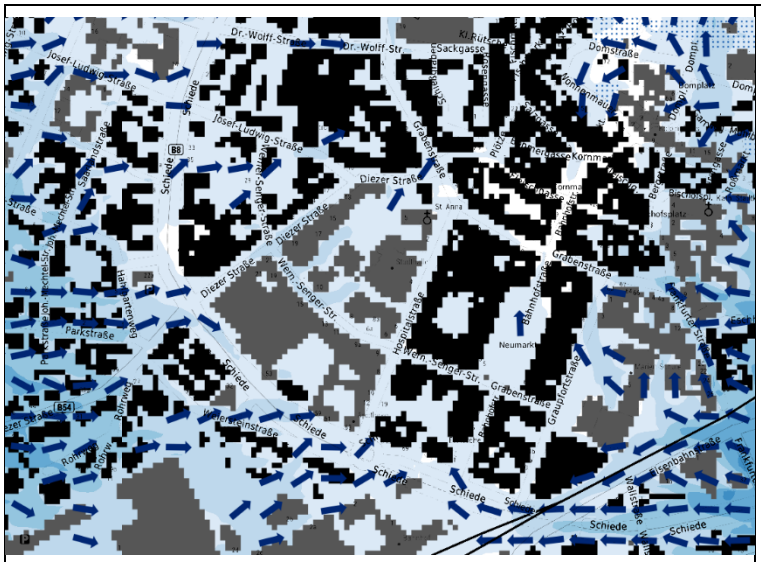


Abbildung 72: Nächtliches Kaltluftströmungsfeld im Fokusraum „Limburger Altstadt“.

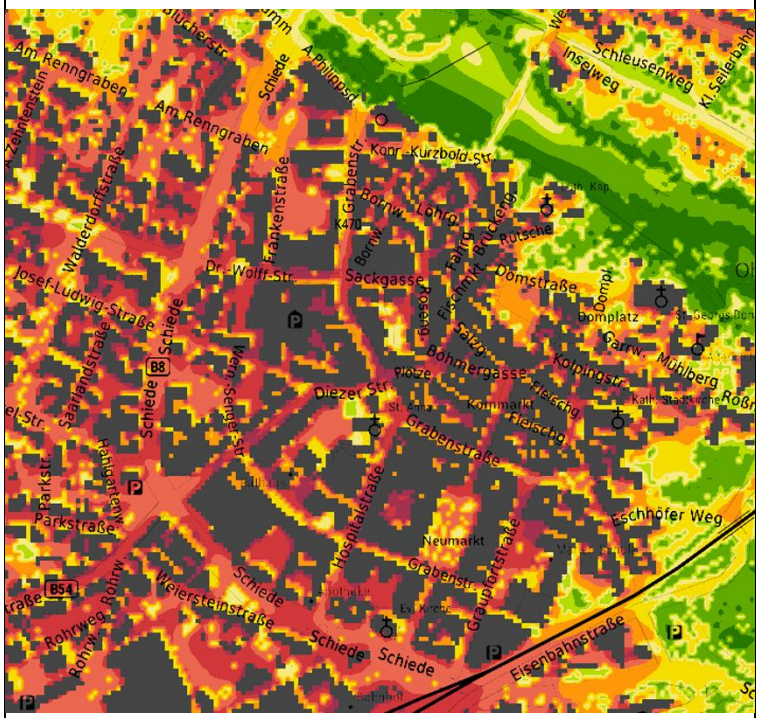


Abbildung 73: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET) im Fokusraum "Limburger Altstadt".



Abbildung 74: Nutzungsraster im Fokusraum "Limburger Altstadt“.

Nutzungsklassen

- Gleisfläche
- Freiland, Rasen
- Gewässer
- Gebäude
- Gebäude mit Dachbegrünung
- unbebaut versiegelt
- naturferner Boden
- Baum über Versiegelung
- Baum über Rasen
- Baum über naturfernem Boden
- Sand



Abbildung 75: Luftbild im Fokusraum "Limburger Altstadt".

8.4.5 LUFTHYGIENE

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse wurde ergänzend die lufthygienische Situation betrachtet. Dabei wurde geprüft, ob Leitbahnen und Kaltluftabflüsse potenziell durch Luftschadstoffe belastet sind. Als Datengrundlage dienten die Karten des Luftreinhalteplans für Mittel- und Nordhessen, in denen die NO_2-Konzentrationen entlang ausgewählter Straßenzüge im Stadtgebiet Limburg dargestellt sind (HMUKLV, 2021). Der Abgleich dieser Informationen mit den Ergebnissen der Stadtklimaanalyse zeigte, dass keine der identifizierten Leitbahnen oder Kaltluftabflussbereiche über die in den Karten ausgewiesenen belasteten Straßenzüge verlaufen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Luftreinhalteplan ausschließlich ausgewählte innerstädtische Straßen hinsichtlich ihrer NO_2-Belastung untersucht wurden. Autobahnen und Bundesstraßen sind darin nicht enthalten, können jedoch ebenfalls erhöhte Schadstoffkonzentrationen aufweisen. Vor diesem Hintergrund wurde festgestellt, dass zwei innerörtliche Kaltluftabflüsse potenziell lufthygienisch belastet sind, da die Kaltluft über die Autobahn A3 in angrenzende Wohngebiete geführt wird. Betroffen sind die Wohngebiete östlich des Offheimer Weg zwischen A3 und B8 sowie nördlich des Dietkircher Weg und südöstlich der A3. Der dritte innerstädtische Kaltluftabfluss an der A3 auf Höhe der Raststätte Limburg-Ost in Richtung des Wohngebiets an der Krüsmannstraße ist voraussichtlich nicht oder nur deutlich geringer lufthygienisch belastet. Grund dafür ist, dass die Kaltluftzufuhr primär aus der südwestlich der Autobahn gelegenen Grünfläche erfolgt, denn eine etwa 4 m hohe Lärmschutzwand entlang dieses Autobahnabschnitts schirmt die Kaltluftzufuhr zusätzlich ab und verhindert damit bodennah den Eintrag potenziell belasteter Kaltluft aus dem Verkehrsraum.

Als potenziell lufthygienisch belastet ist des Weiteren ein flächenhafter Kaltluftabfluss einzustufen, der aus südlicher Richtung über die A3 und die Bundesstraße B8 verläuft und das Mischgebiet am ICE-Bahnhof Limburg-Süd erreicht (s. Abbildung 76).

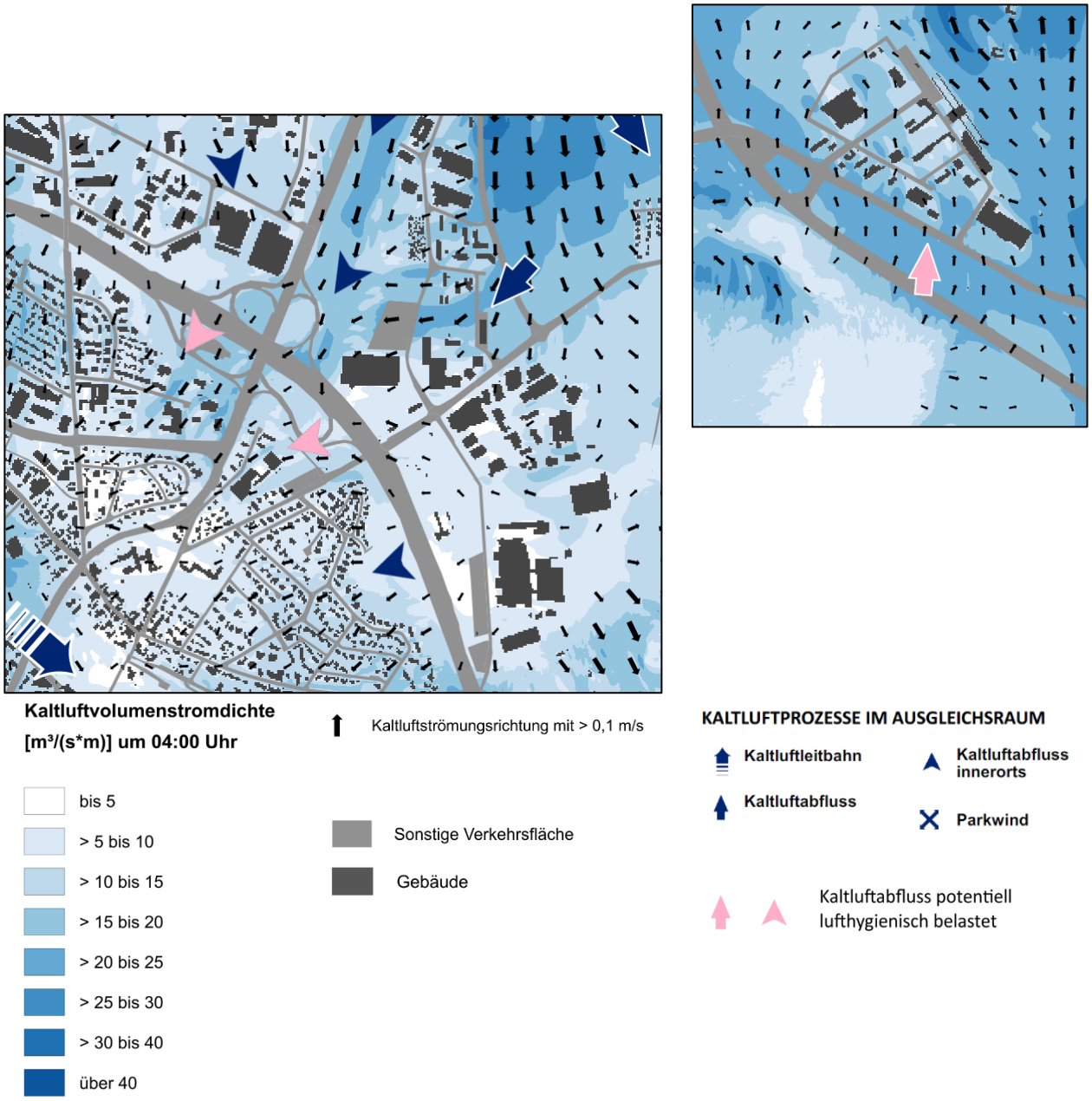


Abbildung 76: Potenziell lufthygienisch belastete Kaltluftabflüsse.

8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN

Maßnahmenkatalog Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt 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 Limburg an der Lahn wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

Die Auswahl bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert im Maßnahmenkatalog beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

Maßnahmencluster I	Thermisches Wohlbefinden im Außenraum
Maßnahmencluster II	Verbesserung der Durchlüftung
Maßnahmencluster III	Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab.

So hängt beispielsweise …

… die Beschattungsintensität von Stadtbäumen von der Pflanzdichte und dem Kronendurchmesser ab.

… der konkrete Nutzen einer Maßnahme von ihrer Verortung in thermisch belasteten und bewohnten Gebieten ab.

… die kühlende Wirkung eines Gründaches auf die bodennahe Atmosphäre von der Gebäudehöhe (vertikale Entfernung) ab.

… die lokal spürbare, kühlende Wirkung von Springbrunnen oder Bäumen von deren horizontalen Entfernung zum Aufenthaltsbereich des Menschen ab.

Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Limburger Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Der Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden *(→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versieglungsanteil minimieren*). 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 versiegelten Flächen kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig er-

füllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition[31] von Luftschadstoffen). Insbesondere siedlungsnahe Waldgebiete oder Grünflächen entlang der Lahn stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar *(→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen*). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen und innerstädtische Grünflächen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage, nachts auch als „Trittsteine“[32] für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen *(→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen*).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht über Schattenwurf und Verdunstung 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 motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ *M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben*). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden *(→ M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung*). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume den 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. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz[33] geachtet werden.

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen *(→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien*). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden. Allerdings kann sich Wärme unter dichten Baumkronen in der Nacht länger halten, sodass die geringere nächtliche Wärmeabgabe der Flächen diesem Effekt teilweise entgegenwirkt. *(→ M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen*).

Die in der Stadt Limburg an der Lahn vorhandenen Gewässer wie die Lahn oder einige Stehgewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Wasser einen stärkeren Kühleffekt als stehendes Gewässer, da durch Tropfenbildung die ver-

[31] Schadstoffeintrag aus der Luft

[32] „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herantransportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beträgt.

[33] Straßenbaumliste mit Standortangaben zur Hitze- und Trockenheitsverträglichkeit: https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste

dunstungsfähige Oberfläche vergrößert und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen[34] Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ *M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen*). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ *M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme*), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

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 (→ *M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes*). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch 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; → *M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch*). 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[35] kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien bzw. die Oberflächenfarbe beeinflusst werden, so ist die Reflexion 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[36], energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Einspareffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ *M16: Dachbegrünung,* → *M17: Fassadenbegrünung,* → *M19: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen,* → *M20: Technische Gebäudekühlung*).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens ebenfalls berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung (Bauen in die Höhe, Aufstockung) dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar. Vertikale Nachverdichtung schont unbebaute Flächen und reduziert Neuversiegelung, wodurch die Aufheizung der Stadt und die Ausbildung von Wärmeinseln im Vergleich zum horizontalen Bauen abgeschwächt

[34] "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)

[35] Albedo bezeichnet das Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung)

[36] Begrünte Dächer und Fassaden wirken temperaturregulierend durch Verschattung, Verdunstungskühlung und zusätzliche Wärmedämmung.

werden. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (Böhm et al., 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.

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen „Entdichtung" im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben *(→ M14 Entdichtung/ Rückbau*). Neue Versiegelung von Flächen für weiteren Parkraum ist zukünftig insbesondere zu vermeiden. Alternativ sollte intensiv geprüft werden, ob unterirdische Parkräume erschlossen oder mehrfach belegt werden können (bspw. tagsüber Geschäftsverkehr, nachts Wohnverkehr auf Parkplätzen von Supermärkten). Unterirdische Parkräume (Tiefgaragen) und überdachte Parkhäuser sind mit einer Dachbegrünung und/oder Photovoltaik-Anlage auszustatten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die erst perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung[37] während der Sommermonate an. Schattenspendende, mobile „grüne Wände"[38], Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima" ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der Planungshinweiskarte weiter zu priorisieren.

In dicht bebauten Siedlungsgebieten lassen sich Erholungsräume über sogenannte „Pocket Parks" auch auf kleinem Raum einrichten. Schattenspendende Bäume, Sitzgelegenheiten und ansprechende Pflanzungen schaffen einen Raum zum Verweilen und Entspannen, insbesondere für Menschen, die keinen eigenen Garten oder Balkon besitzen. Beispiele finden sich mittlerweile in zahlreichen Städten, wie Bochum[39], Nürnberg[40] Bonn[41] oder Düsseldorf[42]. In die Gestaltung sollten weitere Belange wie z.B. die Biodiversität einfließen.

[37] https://www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/328664/index.php

[38] https://www.stadt-muenster.de/aktuelles/newsdetail/mobiles-gruenes-zimmer-in-der-innenstadt

[39] https://www.bochum.de/Pressemeldungen/30-Mai-2023/Eine-kleine-grosse-Erfolgsgeschichte-3.-Pocket-Park-eroeffnet

[40] https://www.nuernberg.de/internet/soer_nbg/pocketpark_pestadel.html

[41] https://www.bonn.de/pressemitteilungen/mai-2022/klimaanpassung-im-kleinformat-pocket-park-in-duisdorf-neugestaltet.php

[42] https://www.duesseldorf.de/aktuelles/news/detailansicht/newsdetail/pocketpark-stadt-macht-aus-schotter-parkplatz-ein-quartierswaeldchen

Tabelle 24: Maßnahmenkatalog zur Stadtklimaanalyse Limburg an der Lahn.

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

01. Innen-/Hinterhofbegrünung

Kurzerläuterung

- Erhöhung des Vegetationsanteils und der Versickerungsfähigkeit des Bodens

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts
- Erhöhung der Aufenthaltsqualität
- Regenwasserversickerung und Schaffung von Lebensräumen für Flora und Fauna. (Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Biodiversität)

Räumliche Umsetzung

- Innen- und Hinterhöfe



Bild: Grüner Innenhof Berlin Pankow (Quelle: © Dominika Leßmann / GEO-NET)

02. Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen

Kurzerläuterung

- Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts
- Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz
- Regenwasserversickerung (Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Biodiversität)

Räumliche Umsetzung

- Baulücken, größere Hinterhöfe
  (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)



Bild: Nachbarschaftstreff Röntgenstraße (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

03. Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten

Kurzerläuterung

- Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern
- Helle Materialien oder reflektierende Beläge
- Ggf. ergänzende Beschattung oder Vegetation, insbesondere auf größeren Platzbereichen.

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts
- Aber: Eine erhöhte Rückstrahlung kann trotz kühlerer Oberfläche zu einer höheren thermischen Belastung (PET) führen.

Räumliche Umsetzung

- Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand)
- ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze (großflächige helle Beläge wegen Blendung und erhöhter Wärmelast vermeiden)



Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)

04. Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren

Kurzerläuterung

- Rasen- oder Pflanzflächen oder Teilentsiegelung (Rasengittersteine etc.)
- niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts
- Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement

Räumliche Umsetzung

- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe



Bild: Bepflanzte Verkehrsinsel (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

05. Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben

Kurzerläuterung

- Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum
- Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.)
- Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen)
- Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen reduzieren
- siehe auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Regenwasserversickerung und –rückhaltung. Dadurch Synergien zu dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Überflutungsvorsorge (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität

Räumliche Umsetzung

- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Blau-grüne Infrastruktur vor dem Limburger Bahnhof (Quelle: © one more picture/ Thorsten Wagner)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

06. Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien

Kurzerläuterung

- Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)
- Möblierungsangebote im Schatten schaffen

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts	▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld



Bild: Beschatteter Bahnhofsplatz (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

07. Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren

Kurzerläuterung

- Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Regenwasserversickerung und Schaffung von Lebensräumen für Flora und Fauna. Dadurch Synergien zur Biodiversität	▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Öffentliche Grünfläche (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

08. Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen

Kurzerläuterung

- Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)

Wirkung

- Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird.
- Regenwasserversickerung und –rückhalt. Synergien zu dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, Überflutungsvorsorge, Erholung und Biodiversität.

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen
  (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)



Bild: Schafsberg (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

09. Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen

Kurzerläuterung

- Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen
- Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird

Wirkung

- Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität
- Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken

Räumliche Umsetzung

- Gewässer
- Grün- und Freiflächen



Bild: Springbrunnen „Pusteblume“ in Limburg (Quelle: © one more picture/ Thorsten Wagner)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

10. Regenwasserversickerung, -speicherung und Bewässerungssysteme

Kurzerläuterung

- Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-) Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung
- Regenwasserversickerung und -rückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün sowie zur Überflutungsvorsorge bei Starkregen

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen
- Straßen, Wege, Plätze



Bild: Teilentsiegelte Fläche auf einem Parkplatz in Lüneburg
(Quelle: © GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

11. (Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume

Kurzerläuterung

- Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen
- Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebbarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern

Räumliche Umsetzung

- Plätze, Brachflächen
  (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)

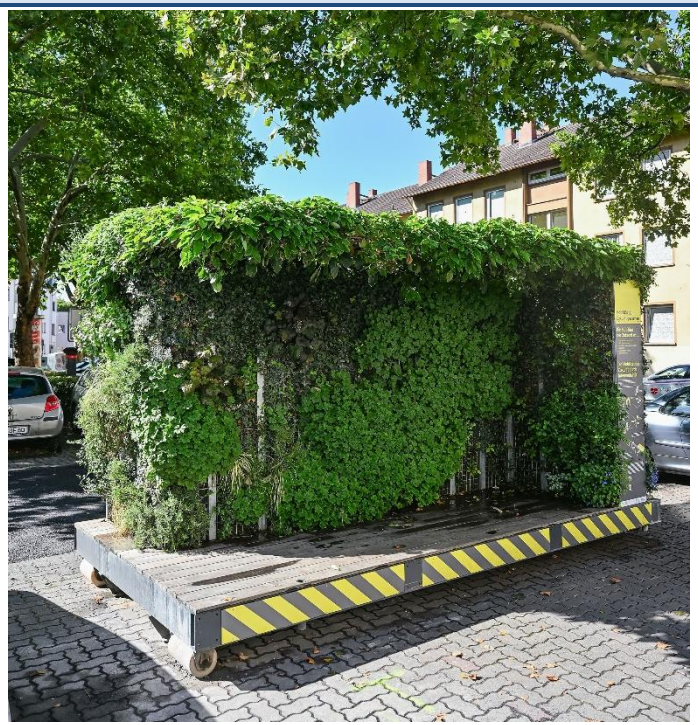


Bild: Mobiles „Grünes Zimmer“ (Quelle: © Stadt Hanau)

MAßNAHMENCLUSTER II: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

12. Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung

Kurzerläuterung

- Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)
- 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

Wirkung

- Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung
- Reduktion des Wärmestaus

Räumliche Umsetzung

- Neubau, Gebäudekomplexe
- Grün- und Freiflächen
- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

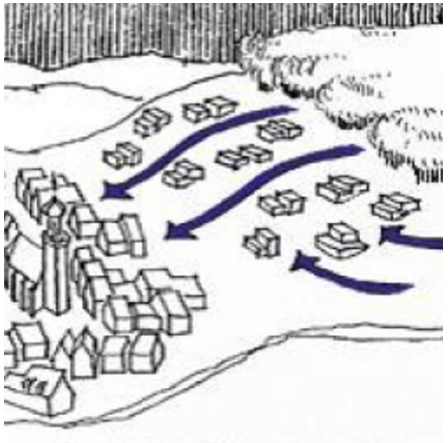


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER II: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

13. Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für einen kleinskaligen Luftaustausch

Kurzerläuterung

- Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen.
- Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht

Wirkung

- Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme
- Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung

Räumliche Umsetzung

- Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks



Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof in Zürich. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)

14. Entdichtung (Rückbau)

Kurzerläuterung

- Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen

Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts
- Verbesserung der Durchlüftung
- Synergien zur wassersensiblen Siedlungsentwicklung

Räumliche Umsetzung

- Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen
- Nebengebäude
- Garagen
- Lagerhallen
- ggf. Industrie- und Gewerbebrachen
- Bahnanlagen



Bild: Symbolbild Rückbau in Hannover (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER II: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

15. Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen

Kurzerläuterung

- 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

Wirkung

- Schutz vor stärkerer Überwärmung
- Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung
- Synergien zur Biodiversität und zur Aufenthaltsqualität am Tage

Räumliche Umsetzung

- Grün- und Freiflächen



Bild: Schafsberg Limburg (Quelle: © Stadt Limburg a. d. Lahn)

MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

16. Dachbegrünung

Kurzerläuterung

- Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)

Wirkung

- Verdunstungskühlung
- Verbesserung des Innenraumklimas: Thermische Regulierung durch Gründächer (wärmedämmend im Winter, geringere Aufheizung im Sommer)
- Synergien zum Klimaschutz, da Gründachaufbau isolierend, ähnlich einer Dämmung, wirkt, somit Einsparung technischer Gebäudekühlung /-heizung
- Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich
- Schaffung von Ersatzlebensraum und damit Synergien zur Biodiversität
- Regenwasserrückhalt und damit Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung

Räumliche Umsetzung

- Flachdächer
- ggf. flach geneigte Dächer
- Gebäude
  (Neubau und Bestand; sofern die rechtlichen Rahmenbedingungen eine Umsetzung erlauben)

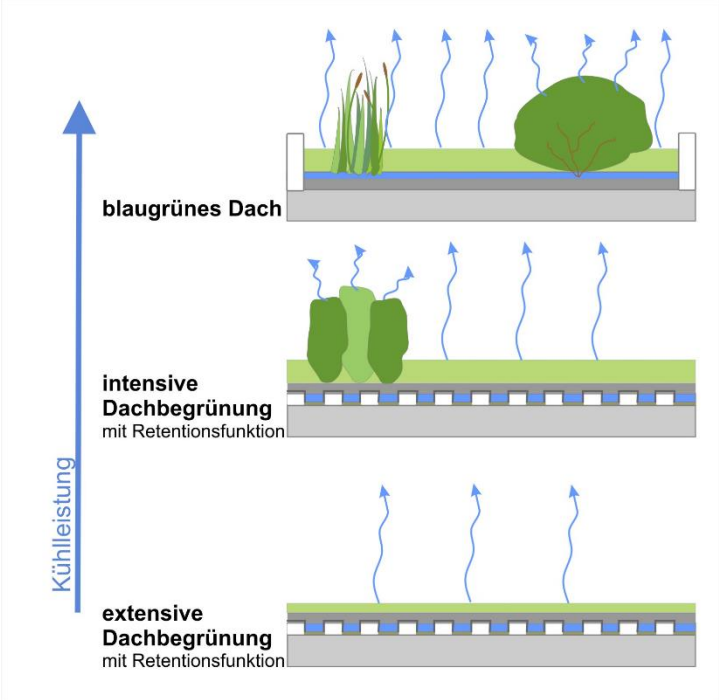


Bild: Arten der Dachbegrünung
(Quelle: © GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17. Fassadenbegrünung

Kurzerläuterung

- Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)
- Weiterführende Informationen unter https://www.zukunftbau.de/

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz	▪ Gebäude (Neubau und Bestand; sofern die rechtlichen Rahmenbedingungen eine Umsetzung erlauben)

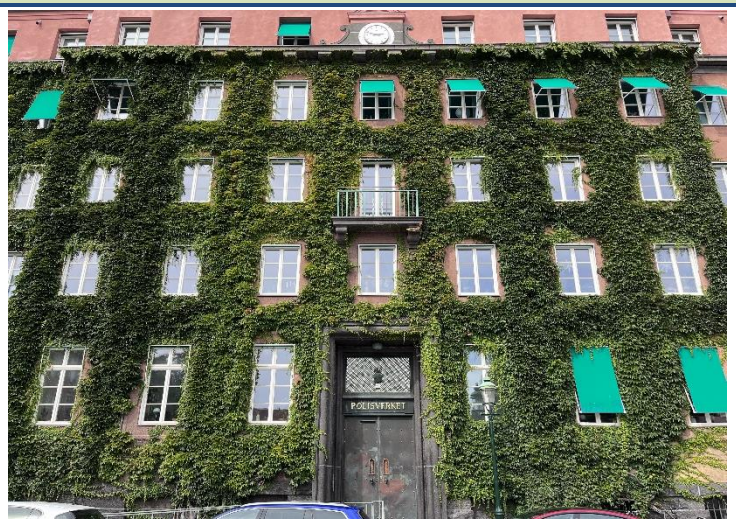


Bild: Fassadenbegrünung Kopenhagen (Quelle: © Valerie Tschirpig / GEO-NET)

18. Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen

Kurzerläuterung

- Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas	▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen (Quelle: © Janko Löbig / GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19. Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Kurzerläuterung

- Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas	▪ Gebäude (Bestand)

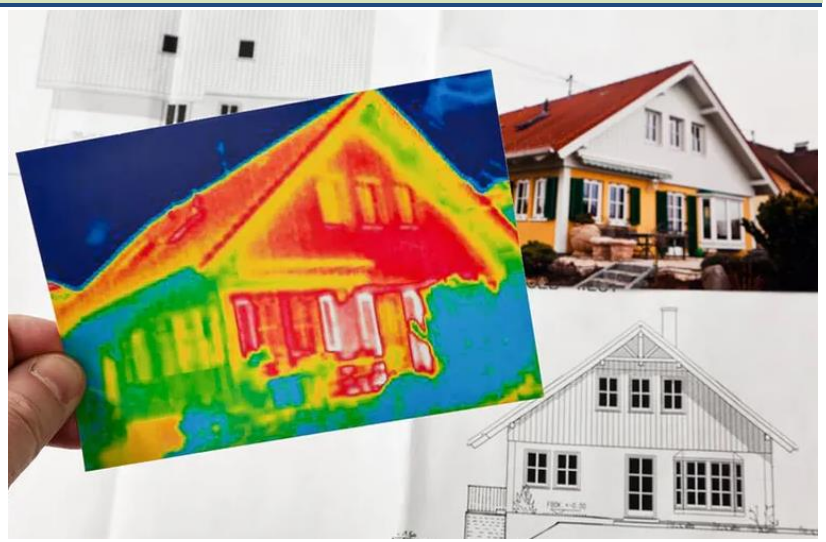


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)

20. Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

- Möglichst ressourcenschonende Lösung
- Adiabate Abluftkühlung (Kühlung der Abluft durch Verdunstung), bei der Regenwasser genutzt wird
- Erdkältenutzung
- Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden

Wirkung	Räumliche Umsetzung
▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung	▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen zur Klimatisierung nicht ausreichend angewendet werden können (siehe Maßnahmencluster Nr. 21)

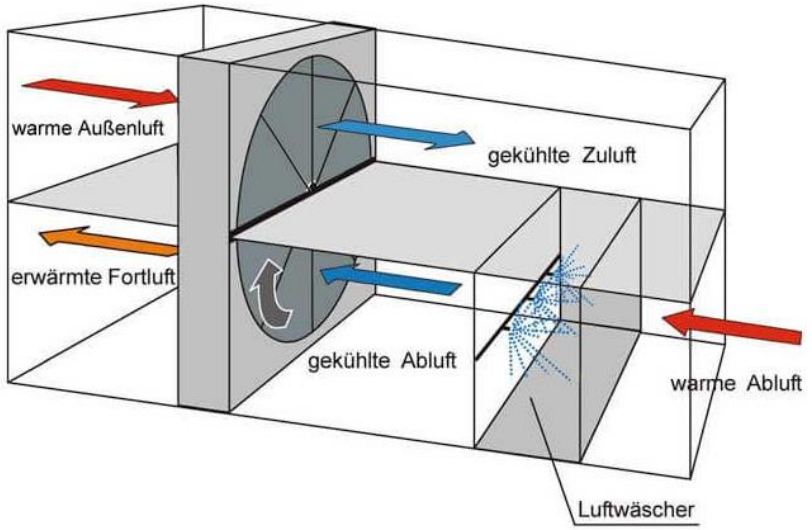


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/)

MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

21. Anpassung des Raumnutzungskonzeptes

Kurzerläuterung

- Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum)

Wirkung

- Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)

Räumliche Umsetzung

- Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege)
- vorwiegend im Neubau umsetzbar



Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums.
(Quelle: © Gregor Meusel / GEO-NET)

9. Fazit

Die Klimaanalyse von Limburg zeigt ein detailliertes Bild der stadtklimatischen Situation während einer sommerlichen Strahlungswetterlage. So kann mit der hohen räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m u. a. der Einfluss einzelner Gebäude auf den nächtlichen Kaltlufthaushalt realistisch dargestellt werden. Auch findet der Schattenwurf einzelner Bäume und somit ihrer klimatischen Wirkung auf die Situation am Tage Berücksichtigung. Dies stellt eine wichtige Information für die Beurteilung der Aufenthaltsqualität im Freien und der Verortung des Bedarfes an Maßnahmen zur Hitzeminderung dar. Darüber hinaus können die folgenden Punkte zusammenfassend festgehalten werden:

- Um die während sommerlicher Hitzeperioden in den Siedlungsflächen auftretende nächtliche Überwärmung auszugleichen, kommt dem nächtlichen Luftaustausch eine besondere Rolle zu. Über das Einwirken bodennaher Kaltluft können die überwärmten Wohnräume abgekühlt werden und somit einen erholsamen Schlaf begünstigen. Die ist vor allem für empfindliche Bevölkerungsgruppen (alte bzw. sehr junge Einwohner) von gesundheitlicher Relevanz.
- Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind als Kaltluftleitbahnen das zentrale Bindeglied zwischen Kaltluftentstehungsflächen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Durchlüftungsbereiche sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf die Wirkungsräume ausgerichtet sein. Dahingehend wurden Tal- und Niederungsbereiche (Lahntal), größere Freiräume wie Parks und Gärten (z.B. Schafsberg, Kleingärten am Renngraben, Weiterpark) aber auch Freiflächen mit Geländeneigung am Siedlungsrand der Limburger Stadtteile als geeignete Strukturen identifiziert. Die vorhandenen Kaltluftleitbahnen sollten in ihrer Funktion gesichert werden. Als wichtige Maßnahmen gelten die Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen sowie die Vernetzung mit benachbarten Freiflächen.
- Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkbereich vergrößern. Eine hohe Bedeutung kommt dabei auch den kleineren siedlungsnahen Park-, Ruderal- und Brachflächen zu, da sie eine Entlastungswirkung für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Für den Aufenthalt am Tage ist das Vorhandensein ausreichend verschatteter Flächenanteile wichtig. Dahingehend sind Areale am Linterbach oder am Schafsberg mit einem hohen Baumanteil als Bereiche mit geringer Wärmebelastung und hoher Aufenthaltsqualität bedeutsam.
- Die landwirtschaftlichen Nutzflächen stellen bedeutende Kaltluftentstehungsgebiete dar, da sie sich nachts stark abkühlen und dadurch großflächig bodennahe Kaltluft bilden. Auch in Waldflächen entsteht Kaltluft, dieser Prozess verläuft jedoch aufgrund der Kronenüberdeckung langsamer als auf offenen Flächen. In geneigtem Gelände, wie den Freiflächen südlich von Linter und Eschhofen oder nördlich von Offheim, kann die gebildete Kaltluft hangabwärts abströmen und so in angrenzende Siedlungsbereiche transportiert werden, wo sie zur nächtlichen Durchlüftung beiträgt.
- Die Zahl der Heißen Tage wird in Zukunft deutlich steigen, was insbesondere für gesundheitlich empfindliche Gruppen wie ältere Menschen und kleine Kinder eine erhebliche Belastung darstellt. Die Bewahrung und Verbesserung des Bioklimas, das maßgeblich die Lebensqualität in städtischen Gebieten beeinflusst, gewinnen daher an Bedeutung. Da sich voraussichtlich die Anzahl der Tage mit Hitzestress erhöhen wird, kommt der zukunftsorientierten räumlichen Planung zur Erhaltung biokli-

matisch unbedenklicher Lebensbedingungen eine wichtige Rolle zu. Denn auch die weitere städtebauliche Entwicklung - selbst unter der Prämisse, dass hierbei klimaangepasste Bauweisen zum Einsatz kommen - trägt ihrerseits zu einer weiteren Erwärmung der Siedlungsgebiete bei, die sich durch die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Dekaden noch verschärfen wird.

- Die höchsten bioklimatischen Belastungen treten dort auf, wo sich der Effekt der „Städtischen Wärmeinsel“ besonders stark ausprägen kann. Betroffen sind vor allem Siedlungsflächen mit dichter Bebauung, hohem Versiegelungsgrad und nur wenigen Grünflächen, wie etwa die Innenstadt, Altstadt oder Gewerbeflächen. Gerade in diesen Bereichen kommt der Vermeidung von Gesundheitsbelastungen, die insbesondere durch erhöhte Tages- und Nachttemperaturen entstehen und sich im Zuge des Klimawandels weiter verstärken, eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz dazu begünstigt die in Limburg abseits des Siedlungskerns eher lockere Bebauungsstruktur mit niedriggeschossigen Gebäuden und zahlreichen Hausgärten eine deutlich bessere nächtliche Abkühlung, sodass dort die nächtliche bioklimatische Belastung insgesamt geringer ausfällt.
- Bereits heute lassen sich Maßnahmen ergreifen, um der Entwicklung einer zunehmenden städtischen Überwärmung entgegenzuwirken. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Grünflächen in Limburg. Die planerischen Maßnahmen zielen darauf ab, die thermische Belastung auch während des Tages zu reduzieren. In besonders betroffenen Bereichen wird empfohlen, die Aufenthaltsqualität im Freien durch den Erhalt bestehender Vegetation sowie durch zusätzliche Verschattungsmaßnahmen zu verbessern. Gleichzeitig soll der Gebäudebestand an höhere Temperaturen angepasst werden. Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der Hitzeentwicklung bietet der Einsatz heller Baumaterialien, die durch eine höhere Albedo mehr Sonnenlicht reflektieren. Besonders wirksam zur Reduzierung der Gebäudeerwärmung sind zudem begrünte Dächer und Fassaden.
- Die Planungshinweiskarte Stadtklima zeigt auf, welche Siedlungsräume bereits heutzutage sowie in naher Zukunft stark wärmebelastet sind und daher prioritär mit Maßnahmen zur Hitzeminderung bedacht werden sollten. Dahingehend sind das Stadtzentrum von Limburg sowie Gewerbe- bzw. Mischgebiete am Bahnhof Limburg-Süd oder in Offheim einzuordnen. Aber auch viele Straßenabschnitte außerhalb der Kernstadt können eine hohe Wärmebelastung aufweisen. Im öffentlichen Raum kann dies mittelfristig vor allem über den Ausbau des Baumbestands kompensiert werden. Kurzfristig ist die Verschattung von Aufenthaltsflächen/ Quartiersplätzen z.B. über entsprechende Elemente wie Pergolen denkbar.
- Die erarbeiteten Karten stellen ein Abwägungsmaterial aus klimatischer Sicht für die weitere Stadtentwicklung dar. Aus ihnen kann die klimatische Funktion bzw. Bedeutung des städtischen Grüns einerseits und die Empfindlichkeit des Siedlungsraums andererseits abgelesen werden. Für die Beurteilung der planbedingten Auswirkungen der zukünftigen Stadtentwicklung liefern diese Hinweise Anhaltspunkte dafür, ob weitere kleinräumige Gutachten erforderlich sind. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn klimatisch bedeutsame Grünflächen im Umfeld stark wärmebelasteter Siedlungsflächen überplant werden oder eine Funktion als Kaltluftabflussgebiet haben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach (VDI 3787, Blatt 4, 2020)). *8*
Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD, 2022). *9*
Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann et al., 2021). *10*
Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019). *11*
Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 – 2015 (An Der Heiden et al., 2019). *12*
Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten)) *13*
Abbildung 7: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (verändert nach HLNUG 2022, 18) *18*
Abbildung 8: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse. *19*
Abbildung 9: Räumliche Ausdehnung der für die Auswertung verwendeten Modell-Gitterpunkte (Hintergrundkarte: OpenStreetMap). *23*
Abbildung 12: Klimadiagramm der Stadt Limburg für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Rasterdatenprodukten des Deutschen Wetterdienstes (nach DWD 2024b) *26*
Abbildung 13: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30$ °C) in verschiedenen Perioden in Limburg. [Legendeneinheit = Anzahl heißer Tage] (eigene Berechnung nach DWD, 2024b). *28*
Abbildung 14: Entwicklung der Mitteltemperatur in Limburg im Zeitraum von 1881 bis 2024 (eigene Berechnung nach (DWD, 2024c)). *28*
Abbildung 15: Jahreswerte des Trockenheitsindex (de Martonne) in Limburg für den Zeitraum 1970 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b). *29*
Abbildung 16: Saisonmittelwerte der Bodenfeuchte (in % nFK) in Limburg im Zeitraum 1991 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b). *29*
Abbildung 17: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Limburg für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf der DWD-Station Bad Marienberg (DWD, 2024a). *30*
Abbildung 18: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit Starkregen (Niederschlag > 30 mm) in Limburg [Legendeneinheit = Tage mit Starkregen pro Jahr] (nach DWD 2024b). *31*
Abbildung 19: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Limburg (23,4 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der DWD-Station 4371 – Bad Marienberg (DWD, 2024a). *32*
Abbildung 20: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Limburg (alle untersuchten RCP-Szenarien). *33*
Abbildung 21: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Limburg (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. *34*
Abbildung 22: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Limburg (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. *37*
Abbildung 24: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit N ≥ 30 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Limburg (RCP 8.5). *39*
Abbildung 25: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D *43*
Abbildung 26: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (Tsurf) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages. *44*
Abbildung 27: Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de) *45*
Abbildung 28: Geländemodell von Limburg a. d. Lahn. *49*
Abbildung 29: Modelleingangsdaten „Landnutzungsklassen“ für den Status quo in einem Ausschnitt von Limburg sowie eine „Mischpixelfläche“ im Zukunftsszenario. *50*
Abbildung 30: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation *51*
Abbildung 31: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in Limburg im Status quo. *58*

Abbildung 32: Bodennahe nächtliche Temperatur im schwachen Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet. 60
Abbildung 33: Bodennahe nächtliche Temperatur im starken Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet. 61
Abbildung 34: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate in Limburg im Status quo. 62
Abbildung 35: Kaltluftvolumenstromdichte im Limburger Stadtgebiet im Status quo. 63
Abbildung 36: Bodennahes Kaltluftströmungsfeld im Limburger Stadtgebiet im Status quo. 64
Abbildung 37: Wärmebelastung am Tage (PET) im Status quo - Kartenausschnitten des Limburger Stadtgebiets. 67
Abbildung 38: Wärmebelastung am Tage (PET) im schwachen Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet. 68
Abbildung 39: Wärmebelastung am Tage (PET) im starken Klimawandelszenario im Limburger Stadtgebiet. 69
Abbildung 40: Position und Nummerierung der Entwicklungsflächen. 71
Abbildung 41: Differenz der mittleren Nachttemperatur in den Entwicklungsflächen vom starken Klimawandel zum Status quo. 75
Abbildung 42: Änderung der nächtlichen Lufttemperatur im starken Klimawandel (Vergleich zum Status quo) für ausgewählten Entwicklungsflächen. 76
Abbildung 43: Änderung der Kaltluftvolumenstromdichte im starken Klimawandel (Vergleich zum Status quo) für ausgewählte Entwicklungsflächen. Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße, II. BA“ (oben links), ICE-Gebiet A und B (oben rechts), ... 77
Blumenrod V und VI (unten links), Am Kirberger Weg (unten rechts). 77
Abbildung 44: Differenz der mittleren physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) in den Entwicklungsflächen vom starken Klimawandel zum Status quo. 78
Abbildung 45: Änderung der PET auf Entwicklungsflächen im starken Klimawandelszenario im Vergleich zum Status quo. 79
Abbildung 46: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten (verkürzte Darstellung) 80
Abbildung 47: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte des Status quo im Limburger Stadtgebiet. 83
Abbildung 48: Auswirkung der Siedlungsentwicklung auf die Kaltluftprozesse in Limburg (Ausschnitt Klimaanalysekarte – schwacher Klimawandel). 84
Abbildung 49: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ausgangsraster (links) und als Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (rechts). 86
Abbildung 50: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008) 87
Abbildung 51: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation 92
Abbildung 52: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum 93
Abbildung 53: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungskarten für die Nachtsituation im Wirk- und Ausgleichsraum unter verschiedenen Klimawandelszenarien. 95
Abbildung 54: Bewertungskarte Nachtsituation (Status quo). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum. 96
Abbildung 55: Bewertungskarte Nachtsituation (Schwacher Klimawandel). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum. 97
Abbildung 56: Bewertungskarte Nachtsituation (Starker Klimawandel). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum. 98
Abbildung 57: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungskarten für die Tagsituation im Wirk- und Ausgleichsraum unter verschiedenen Klimawandelszenarien. 101
Abbildung 58: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im Status quo. 102
Abbildung 59: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im schwachen Klimawandelszenario. ... 103
Abbildung 60: Bewertungskarte Tagsituation. Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage im starken Klimawandelszenario. 104
Abbildung 61: PHK-Symbol für Siedlungsräume mit Klimafunktion. 106
Abbildung 62: PHK-Symbol mit Informationen zu Orten mit sensibler Nutzung. 106
Abbildung 63: PHK-Symbol zu potenziell beeinträchtigten Kaltluftabflüssen durch Entwicklungsflächen oder Luftschadstoffe. 108

Abbildung 64: Planungshinweiskarte der Stadt Limburg an der Lahn. 111
Abbildung 65: Legende zur Planungshinweiskarte Stadtklima. 112
Abbildung 66: Vorentwurf „Nördlich der Kapellenstraße, II. BA“- Kartenausschnitte zur Flächenbeurteilung. P0 = Status quo; P1 = schwacher Klimawandel; P2 = starker Klimawandel. 115
Abbildung 67: Entwicklungsfläche "Unterm Staffler Weg" - Kartenausschnitte zur Flächenbeurteilung. P0 = Status quo; P1 = schwacher Klimawandel; P2 = starker Klimawandel. 118
Abbildung 68: Planungshinweiskarte im Fokusraum Limburger Altstadt. 122
Abbildung 69: Bewertungskarte Nacht im Fokusraum "Limburger Altstadt". 123
Abbildung 70: Bewertungskarte Tag im Fokusraum "Limburger Altstadt". 124
Abbildung 71: Klimaanalysekarte im Fokusraum "Limburger Altstadt". 124
Abbildung 72: Nächtliches Kaltluftströmungsfeld im Fokusraum „Limburger Altstadt“. 125
Abbildung 73: Physiologisch äquivalente Temperatur (PET) im Fokusraum "Limburger Altstadt". 125
Abbildung 74: Nutzungsraster im Fokusraum "Limburger Altstadt“. 126
Abbildung 75: Luftbild im Fokusraum "Limburger Altstadt". 126
Abbildung 76: Potenziell lufthygienisch belastete Kaltluftabflüsse. 128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Langjährige Änderung der Temperatur in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. 34
Tabelle 2: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. 35
Tabelle 3: Langjährige Änderung der mittleren Niederschlagssumme in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. 36
Tabelle 4: Langjährige Änderung der Trockentage in Limburg (P 0 = Minimum, P 50 = Median, P 100 = Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten. 37
Tabelle 5: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m. 42
Tabelle 6: Zukunfts-Szenarien zur Abbildung des Limburger Stadtklimas 2040 und ihre zentralen Merkmale. 47
Tabelle 7: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter. 52
Tabelle 8: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt. . 53
Tabelle 9: Gegenüberstellung der nächtlichen Temperaturkennwerte in den Modellrechnungen Status quo und Zukünfte. 56
Tabelle 10: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET in den Tagesstunden (Auszug nach VDI 2022). 65
Tabelle 11: Gegenüberstellung der Wärmebelastung (PET) in den Modellrechnungen Status quo und Zukünfte. 66
Tabelle 12: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten 82
Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag. 88
Tabelle 14: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht. 89
Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag. 89
Tabelle 16: Ableitungsvorschrift zur Bewertung der Ausgleichsraumbedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation 92
Tabelle 17: Bewertungsmatrizen für eine Gesamtbewertung von Tag und Nacht im Wohn-/ Gewerbe- und Straßenraum. 105
Tabelle 18: Aus der Gesamtbewertung für Tag und Nacht abgeleitete Handlungsprioritäten für den Wirkraum. 106
Tabelle 19: Bewertungsmatrizen für eine Gesamtbewertung von Tag und Nacht im Ausgleichsraum. 107
Tabelle 20: Aus der Gesamtbewertung für Tag und Nacht abgeleitete Schutzbedarfe für den Ausgleichsraum. 107
Tabelle 21: Flächenanteile der Handlungsprioritäten im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise. 108
Tabelle 22: Flächenanteile der Schutzbedarfe im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise. 110
Tabelle 23: Potenzielle Maßnahmen zur Reduktion der Wärmelast im Fokusraum "Limburger Altstadt". 120
Tabelle 24: Maßnahmenkatalog zur Stadtklimaanalyse Limburg an der Lahn. 133

Quellenverzeichnis

An Der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L., & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *62*(5), 571–579. https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y

Augter, G. (1997). *Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte*. Deutscher Wetterdienst.

Beckmann, S. K., Hiete, M., & Beck, C. (2021). Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments—Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. *Climate Risk Management*, *32*. https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286

Böhm, J., Böhme, C., Bunzel, A., Kühnau, C., Landua, D., & Reinke, M. (2016). *Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung: Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben „Entwicklung von naturschutzfachlichen Zielen und Orientierungswerten für die planerische Umsetzung der doppelten Innenentwicklung sowie als Grundlage für ein entsprechendes Flächenmanagement“ (FKZ 3513 82 0500)*. Bundesamt für Naturschutz.

Cedeño Laurent, J. G., Williams, A., Oulhote, Y., Zanobetti, A., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (2018). Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. *PLoS Medicine*, *15*(7), e1002605. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002605

Da Silva, N. A., & Haerter, J. O. (2025). Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme precipitation explained by shift from stratiform to convective rain type. *Nature Geoscience*, *18*(5), 382–388. https://doi.org/10.1038/s41561-025-01686-4

Deutschländer, T., & Dalelande, C. (2012). *Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit* (S. 153) [Abschlussbericht]. Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Technisches Hilfswerk, Umweltbundesamt. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/extremereignisse/abschlussbericht-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1

DGNB (Hrsg.). (2020). *DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen.

DKRZ. (2024). *Die SSP-Szenarien*. https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien

Donat, M., Leckebusch, G., Pinto, J., & Ulbrich, U. (2010). European storminess and associated circulation weather types: Future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research*, *42*(1), 27–43. https://doi.org/10.3354/cr00853

DWD. (o. J.). *Wetter- und Klimalexikon.Sturm*. Deutscher Wetterdienst. Wetter und Klima aus einer Hand. Abgerufen 10. Februar 2025, von https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=102646

DWD. (2022). *Nationaler Klimareport* (6. überarbeitete Auflage). Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download_report.pdf;jsessionid=B0A90BE96E70B4EB4F9FD6717A50D3C6.live21063?__blob=publicationFile&v=15

DWD. (2024a). *Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/

DWD. (2024b). *Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/

DWD. (2024c). *Liste der Klimaprojektionen (DWD-Referenz-Ensembles v2018)*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html;jsessionid=D4387517088804B6642FDE40968118F7.live21071?nn=541460

DWD. (2025a). *Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien*. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html

DWD. (2025b). Inversion. In *Wetterlexikon*. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/I/Inversion.html

DWD. (2026a). *Warnkriterien—Starkregen*. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html

DWD. (2026b). *Wetter- und Klimalexikon—Klima*. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101462

Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill. https://books.google.de/books?id=S0FSAAAAMAAJ

Fink, A. H., Pohle, S., Pinto, J. G., & Knippertz, P. (2012). Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, *39*(7), 2012GL051025. https://doi.org/10.1029/2012GL051025

Fürst, D., & Scholles, F. (Hrsg.). (2008). *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung* (3., vollst. überarb. Aufl.). Rohn.

Gaede, M., & Härtling, J. W. (2010). *Umweltbewertung und Umweltprüfung* (Dr. A 1). Westermann.

Gavrilov, M. B., An, W., Xu, C., Radaković, M. G., Hao, Q., Yang, F., Guo, Z., Perić, Z., Gavrilov, G., & Marković, S. B. (2019). Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia. *Atmosphere*, *10*(10), 586. https://doi.org/10.3390/atmos10100586

Gilfillan, D., Marland, G., Boden, T., & Andres, R. (2020). *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions: 1751-2017* [Dataset]. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; CDIAC-FF, Research Institute for Environment, Energy, and Economics, Appalachian State University. https://doi.org/10.15485/1712447

Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. (2009). *Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework*. https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/cordex_giorgi_wmo-1.pdf

Gross, G. (1989). Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.*, (62), 57–72.

Gross, G. (1992). Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research*, *10*(4–6), 483–498. (K:_GRUNDLAGENLiteraturFITNAH_DOKUResultsOfSupercomputerSimulationsOfMeteorologicalMesoscalePhenomena_Gross_1992.pdf). https://doi.org/10.1016/0169-5983(92)90035-U

Gross, G. (2002). The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. *Meteorologische Zeitschrift*, *11*(4), 295–302. (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross

2002_Exploration of boundary layer phenomena mesoscale model.pdf). https://doi.org/10.1127/0941-2948/2002/0011-0295

Gross, G. (2012a). Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift*, *21*(4), 399–412. (K:_GRUNDLAGENLiteraturModelleAsmusGross_2012_effects_of_different_vegetation_on_temperature_in_an_urban_building_enviroment_ggross.pdf). https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0363

Gross, G. (2012b). Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. *Meteorologische Zeitschrift*, *21*(2), 173–181. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0291

Gross, G. (2014). On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology*, *150*(2), 319–326. https://doi.org/10.1007/s10546-013-9863-5

Gross, G. (2017). Some effects of water bodies on the n environment–numerical experiments. *Journal of Heat Island Institute International*. (k:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2017_Some effect of water bodies on the urban environment.pdf). https://www.heat-island.jp/web_journal/JGM8SpecialIssue/2-1_gross.pdf

Gross, G. (2021). A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorologische Zeitschrift*, *30*(3), 227–236. https://doi.org/10.1127/metz/2021/1066

Gross, G., Frey, T., & Trute, P. (2002). On the applicability of numerical models for calculating local winds in complex terrain; Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhaeltnisse in komplexem Gelaende. *DEWI-Magazin*, (20). (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2001_On the applicability of a numerical model system for calculating new European air pollution measures.pdf).

HLNUG. (2022). *Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse* (S. 54). Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf

HMUKLV. (2021, November). *Luftreinhalteplan für das Gebiet Mittel- und Nordhessen. 2. Fortschreibung Teilplan Limburg.* Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2022-02/2._fortschreibung_luftreinhalteplan_limburg_bf.pdf

Hübener, H., Spekat, A., Bülow, K., Früh, B., Keuler, K., Menz, C., Radtke, K., Ramthun, H., Rathmann, T., Steger, C., Toussaint, F., & Warrach-Sagi, K. (2017). *ReKliEs-De Nutzerhandbuch*. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Hrsg.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Hrsg.). https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E., & DeDear, R. (2007). *The Universal Thermal Climate Index UTCI. Goal and state of COST Action 730*.

Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, *10*(1), 99–106. https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013

Linke et al., C. (2024, März). *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten"*.

maribus. (2024). *Die Szenarien des Weltklimarats*. World Ocean Review. https://worldoceanreview.com/de/wor-5/bedrohung-durch-klimawandel-und-naturgefahren/der-klimawandel-und-die-kuesten/die-szenarien-des-weltklimarats/

Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, *38*(1), 43–49. https://doi.org/10.1007/BF00866252

McDonald, R. E. (2011). Understanding the impact of climate change on Northern Hemisphere extra-tropical cyclones. *Climate Dynamics*, *37*(7–8), 1399–1425. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0916-x

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & Van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, *109*(1–2), 213–241. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z

Moore, G. E. (1903). *Principia Ethica*. Cambridge University Press.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*, 747–756. (K:_GRUNDLAGENLiteraturMossetal.2010.pdf). https://doi.org/10.1038/nature08823

MWVLW RLP. (2025). *Wetterdaten Rheinland-Pfalz. Bodenfeuchte Hilfe*. https://www.wetter.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/b81d6f06b181d7e7c1256e920051ac19/6449e62b480fcb10c1257d5f0034e7b5?OpenDocument

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1. Aufl.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., & Wilson, C. (2013). The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, *3*(1), 4–6. https://doi.org/10.1038/nclimate1783

Pinto, J. G., & Reyers, M. (2017). Winde und Zyklonen. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 67–75). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_8

Pinto, J. G., Zacharias, S., Fink, A. H., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2009). Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics*, *32*(5), 711–737. https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4

Rauthe, M., Malitz, G., Gratzki, A., & Becker, A. (2014). Starkniederschlag. In A. Becker & R. F. Hüttl (Hrsg.), *Forschungsfeld Naturgefahren*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/naturgefahrenforschung/downloads/forschungsfeld_naturgefahrens_starkniederschlag.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Sandholz, S., & Sett, D. (2019). *Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress: Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn* (No. 2; Zures Working Paper, S. 11). United Nations University – Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS). http://collections.unu.edu/view/UNU:7510

Schär, C., Frei, C., Lüthi, D., & Davies, H. C. (1996). Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters*, *23*(6), 669–672. https://doi.org/10.1029/96GL00265

Schlünzen, K. H., Riecke, W., Bechtel, B., Boettcher, M., Buchholz, S., Grawe, D., Hoffmann, P., Petrik, R., Schoetter, R., Trusilova, K., & Wiesner, S. (2018). Stadtklima in Hamburg. In H. Von Storch, I. Meinke, & M. Claußen (Hrsg.), *Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland* (S. 37–53). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55379-4_3

Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Verlag.

UBA (Hrsg.). (2005). *Gesünder Wohnen—Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gesuender-wohnen-aber-wie

UBA (Hrsg.). (2021). *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland—Kurzfassung*. *Climate Change*, (26), 117. (k:_GRUNDLAGENLiteraturUBA_Veröffentlichungenkwra2021_teilbericht_zusammenfassung_bf_211027_0.pdf).

Urban, H., & Steininger, K. W. (2015). Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In K. Steininger, M. König, B. Bednar-Friedl, L. Kranzl, W. Loibl, & F. Prettenthaler (Hrsg.), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts* (S. 301–322). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12457-5_16

VDI 3785, Blatt 1. (2008, Dezember). *Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3785-blatt-1-umweltmeteorologie-methodik-und-ergebnisdarstellung-von-untersuchungen-zum-planungsrelevanten-stadtklima

VDI 3787, Blatt 1. (2015, September). *Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-1-umweltmeteorologie-klima-und-lufthygienekarten-fuer-staedte-und-regionen

VDI 3787, Blatt 2. (2022). *Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-2-umweltmeteorologie-methoden-zur-human-biometeorologischen-bewertung-der-thermischen-komponente-des-klimas

VDI 3787, Blatt 4. (2020). *Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-4-umweltmeteorologie-methoden-zur-beschreibung-von-stark-und-schwachwinden-in-bebauten-gebieten-und-deren-bewertung

VDI 3787, Blatt 5. (2003). *Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft

VDI 3787, Blatt 7. (2024). *Umweltmeteorologie. Klimaindikatoren*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-7-umweltmeteorologie-klimaindikatoren

VDI 3787, Blatt 9. (2004). *Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-9-umweltmeteorologie-beruecksichtigung-von-klima-und-lufthygiene-in-raeumlichen-planungen

Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung) (2004). https://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/BJNR217910004.html

Wilms, F. E. P. (2006). *Szenarien sind Systeme*. *Working Paper des Forschungszentrums für Prozess-und Produkt-Engineering*(2006/13). https://www.academia.edu/20427866/Szenarien_sind_Systeme_Working_Paper_des_Forschungszentrums_f%C3%BCr_Prozess_und_Produkt_Engineering_2006_13_Dornbirn_2006

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.

Anthropogener Strahlungsantrieb: Durch Aktivitäten des Menschen erwärmende Einflüsse auf das Klima, wie z.B. die Emission von Treibhausgasen, die Vermehrung von Aerosolen oder die Veränderung der Erdoberfläche.

Aridität: Bezeichnet den Grad der Trockenheit und ergibt sich aus dem Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung. Aridität liegt vor, wenn der gefallene Niederschlag vollständig verdunstet. Semiaridität bezeichnet den Wechsel von ariden und humiden (feuchten) Verhältnissen.

Ausgleichsraum: Grüngeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *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: → *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 Forste 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).

Kaltluftabflüsse: Kaltluftabflüsse treten flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf und spielen im hügeligen Stadtgebiet eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweisen höheren Dichten von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese Beschleunigung weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als → *Flurwinde*, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen.

Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* oder einer überdurchschnittlich hohen bodennahen Windgeschwindigkeit durchflossen werden.

Kaltluftleitbahnen: Vorwiegend lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander verbinden und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, sollten als Faustregel jedoch mindestens 50 m breit sein (Mayer et al. 1994).

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m³/(s*m)). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *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 sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

Siedlungsagglomeration: Zusammenhängende Ortsteile des Wohnsiedlungsraums (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

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.

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

RCP-Szenarien: Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats" der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozioökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario"), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario") gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m² bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an (*Representative Concentration Pathway*).

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 → *Flurwinde* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

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

z-Transformation: Die z-Transformation ist ein mathematisches Verfahren zur Standardisierung. Über die z-Transformation werden (vereinfacht gesagt) Werten mit verschiedenen Einheiten eine neue gemeinsame „Standardabweichungs-Einheit" zugewiesen. Das Ergebnis der z-Transformation sind sogenannte "z-Werte", die die Standardabweichungen vom Mittelwert darstellen. Ein z-Wert von 0 entspricht genau dem Mittelwert, ein z-Wert von 1 bedeutet, dass dieser Wert eine Standardabweichung oberhalb des Mittelwerts liegt. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, sodass beispielsweise die relativen Unterschiede der thermischen Belastung in einem Stadtgebiet miteinander verglichen werden können.

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

Bearbeitet von:	Modellierung durch:	Geprüft von:
Lara Wichmann	Nadja Krause	Katja Mendzigall
M. Sc. Landschaftswissenschaften	M.Sc. Geoinformationstechnologien	M. Sc. Meteorologie
Team Klimaökologie	Team Geodatenmanagement	Teamleitung Klimaökologie

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Hannover, den 12.05.2026

Anhang

Anhang 1: Klimaparameter der Entwicklungsflächen - Mittelwerte und Differenzen „Zukunft minus Status quo“ für P1 (schwaches Klimawandelszenario) und P2 (starkes Klimawandelszenario) der Windgeschwindigkeit „WG“, der Kaltluftvolumenstromdichte „KVSD“, der Kaltluftproduktionsrate „KPR“, der nächtlichen Temperatur „T04“ und der physiologisch äquivalenten Temperatur am Tage „PET“.

ID[43]	MP[44]	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
5a	Ja	-0,55	0,12	-0,55	0,12	-16,64	13,03	-16,13	13,54	-16,64	11,35	-16,63	11,36	3,67	17,66	4,44	18,43	-3,45	37,17	-1,69	38,93
5b	Nein	-0,12	0,40	-0,12	0,39	-1,88	24,71	-1,94	24,66	-1,09	28,90	-1,04	28,95	1,19	15,29	1,96	16,06	-3,83	35,97	-0,69	39,11
6	Nein	-0,19	0,15	-0,19	0,15	-6,80	15,27	-5,27	16,80	-11,82	16,42	-11,82	16,42	2,41	16,47	3,28	17,34	-2,77	36,85	-0,63	39,00
7	Nein	-0,38	0,21	-0,38	0,22	-8,09	23,05	-7,75	23,40	-13,94	23,73	-13,96	23,70	2,26	17,12	2,96	17,83	-1,23	37,71	1,08	40,02
8	Nein	-0,26	0,24	-0,26	0,24	-6,62	23,02	-5,78	23,85	-11,91	15,99	-11,90	15,99	2,57	16,59	3,36	17,37	-2,76	35,46	-0,33	37,88
9	Nein	-0,21	0,17	-0,21	0,17	-7,00	12,18	-7,04	12,14	-15,46	7,96	-15,45	7,96	2,27	17,65	3,08	18,46	0,62	34,31	2,89	36,59
10	Ja	-0,27	0,16	-0,28	0,15	-5,06	13,55	-4,39	14,22	-12,82	13,85	-12,79	13,89	2,40	16,92	3,17	17,69	-1,02	39,17	0,99	41,18
11	Nein	-0,13	0,17	-0,13	0,17	-0,53	20,21	0,41	21,15	-18,21	15,73	-18,20	15,73	2,25	17,79	2,94	18,48	1,73	40,28	3,32	41,87
12	Ja	-0,01	0,33	-0,01	0,33	0,00	22,70	-0,01	22,69	-20,37	8,92	-20,37	8,93	0,37	14,29	1,17	15,09	2,31	42,62	4,46	44,77
13	Nein	-0,12	0,25	-0,12	0,25	-2,44	23,56	-2,45	23,54	-7,45	21,42	-7,45	21,42	1,64	15,86	2,41	16,63	-1,71	33,99	0,88	36,58
14	Nein	-0,11	0,10	-0,12	0,10	-2,38	17,81	-1,73	18,46	-22,88	13,05	-22,88	13,05	2,80	17,91	3,53	18,64	2,24	37,03	3,99	38,78
15a	Ja	0,00	0,36	0,00	0,36	-0,24	23,27	-0,08	23,43	-2,29	25,78	-2,30	25,76	0,93	15,33	1,75	16,15	0,68	41,33	3,34	43,99
15b	Ja	-0,04	0,13	-0,05	0,12	-0,25	15,84	0,09	16,18	2,36	20,66	2,42	20,71	0,77	16,71	1,49	17,43	1,83	39,20	4,13	41,44
15c	Ja	-0,02	0,37	-0,02	0,37	-0,12	21,38	-0,18	21,32	-2,27	29,74	-2,26	29,74	0,92	15,71	1,70	16,50	1,12	36,30	3,73	38,91
16a	Ja	-0,04	0,17	-0,05	0,16	-0,69	16,85	0,02	17,56	-3,49	10,86	-3,47	10,88	1,21	17,40	2,05	18,25	0,18	38,06	2,47	40,35
16b	Ja	-0,07	0,17	-0,07	0,16	-1,87	14,46	-1,57	14,76	-5,91	15,05	-5,88	15,08	1,44	17,56	2,22	18,34	-0,27	38,06	1,83	40,16
17a	Ja	-0,05	0,12	-0,05	0,11	-2,80	18,47	-1,87	19,40	-8,27	17,50	-8,26	17,51	1,71	16,74	2,66	17,69	3,76	36,66	5,78	38,69
17b	Ja	-0,23	0,15	-0,24	0,15	-5,92	18,28	-5,26	18,93	-10,52	16,99	-10,49	17,02	2,29	17,35	3,19	18,25	1,44	39,50	3,05	41,11
17c	Ja	-0,35	0,09	-0,36	0,09	-8,49	16,44	-7,78	17,15	-15,75	14,13	-15,73	14,15	3,19	17,68	4,06	18,54	-0,42	38,85	1,11	40,37

[43] ID = Identifikationsnummer der Entwicklungsfläche
[44] MP = Mischpixelansatz

ID[43]	MP[44]	WG [m/s]				KVSD [m³/(s*m)]				KPR [m³/(m²*h)]				T04 [K]				PET14 [K]			
		p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean	p1-ist	p1 mean	p2-ist	p2 mean
17d	Ja	-0,45	0,10	-0,46	0,09	-15,69	12,58	-15,07	13,20	-20,95	9,80	-20,90	9,84	3,77	18,03	4,56	18,83	-2,63	36,71	-1,00	38,35
17e	Nein	-0,11	0,19	-0,12	0,19	-3,16	18,40	-2,31	19,24	0,21	13,11	0,21	13,12	1,08	17,44	1,97	18,33	-1,58	36,70	0,77	39,05
18	Nein	0,00	0,06	0,01	0,07	0,72	17,18	1,33	17,80	2,61	7,46	2,59	7,43	0,49	18,34	1,38	19,22	-0,87	38,02	0,82	39,71
19	Ja	-0,12	0,28	-0,12	0,28	-2,09	15,94	-2,21	15,82	0,77	12,82	0,78	12,83	0,76	17,45	1,55	18,24	-0,12	37,63	2,11	39,85
20	Ja	-0,16	0,06	-0,16	0,06	-3,81	12,24	-3,78	12,28	-21,79	10,63	-21,79	10,63	3,10	18,51	3,85	19,26	0,46	40,22	1,43	41,20
22	Nein	-0,11	0,14	-0,11	0,14	-1,48	18,17	-1,44	18,21	-13,69	14,85	-13,70	14,84	2,07	17,24	2,87	18,04	2,23	39,16	3,90	40,83
23	Nein	-0,03	0,12	-0,03	0,12	-0,38	8,42	-0,54	8,26	0,03	5,00	0,03	5,01	0,77	19,62	1,47	20,32	0,32	42,25	1,23	43,16

Empfehlungen zur Reduzierung von negativen klimatischen Auswirkungen

	Maßnahmencluster „Verbesserung der Durchlüftung“, mit u.a. Beachtung der Baukörperstellung zur Besseren Durchströmbarkeit, Entdichtung / Rückbau, Entsiegelung / Versieglungsanteil minimieren Flächen-ID 5a und 8: Bebauung bewirkt ggf. eine eingeschränkte oder gefährdete benachbarte Kaltluftleitbahn.	**Maßnahmencluster „Thermisches Wohlbefinden im Ausgleichsraum“**, mit u.a.: Innen- / Hinterhofbegrünung, Entsiegelung / Versieglungsanteil minimieren, Begrünter Verkehrsraum, Verschattung (positive Wirkung am Tage), Regenwasserspeicherung (positive Wirkung am Tage)