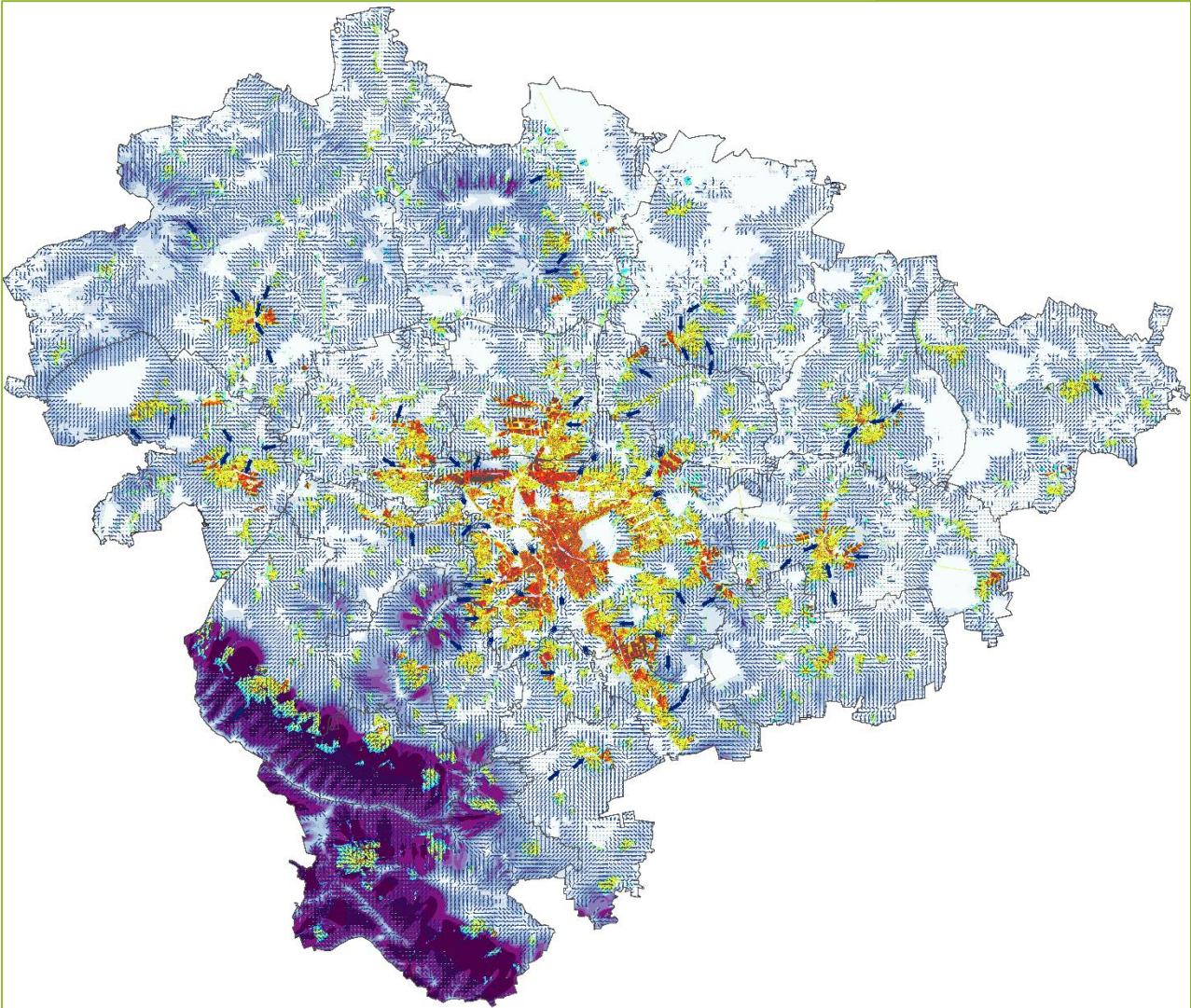


Klimaanalyse Region Hannover



Auftraggeber:

Region Hannover

Der Regionspräsident

Hildesheimer Straße 20

30161 Hannover



Region Hannover

Auftragnehmer:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel. (0511) 388 7200

www.geo-net.de



August 2023



Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
1. EINFÜHRUNG	1
2. KLIMATISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	2
2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE.....	6
2.3 STADTKLIMAAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK	8
3. KLIMA UND KLIMAWANDEL IN DER REGION HANNOVER	11
3.1 GEGENWÄRTIGES KLIMA	11
3.2 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN	11
3.3 BEOBACHTETER KLIMAWANDEL.....	12
3.4 ERWARTETER KLIMAWANDEL.....	14
3.5 ZUSAMMENFASSUNG KLIMA UND KLIMAWANDEL	27
4. METHODIK MODELLGESTÜTZTE STADTKLIMAAANALYSE	28
4.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D	28
4.2 SZENARIEN-ENTWICKLUNG.....	29
4.3 METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN.....	33
4.4 EINGANGSDATENAUFBEREITUNG.....	35
4.5 MODELLUNSICHERHEITEN UND AKTUELLE ENTWICKLUNGSTENDENZEN	39
5. MODELLERGEBNISSE	41
5.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD	41
5.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD	42
5.3 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE.....	46
6. KLIMAAANALYSEKARTE	48
7. BEWERTUNGSKARTEN	50
7.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)	50
7.2 BEWERTUNG VON SIEDLUNGS-, GEWERBE- UND STRAßENFLÄCHEN (WIRKRAUM).....	51
7.3 BEWERTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSPACE)	52
7.4 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN.....	55
8. ZUSAMMENFASSUNG	59
9. LITERATURVERZEICHNIS	61
10. ANHANG I	63



1. Einführung

Das Schutzgut Klima ist ein zentrales Themenfeld im Rahmen der Umweltplanung der Region Hannover. Im Zuge der Erkenntnisgewinne zum Thema Klimawandel (Bsp. im EURO-CORDEX-Verbund liegen neue und umfangreiche Modellläufe zu den Folgen des Klimawandels vor) erscheint es sinnvoll, auch die Kartenwerke zu den abiotischen Schutzgütern – hier Schutzgut Klima – an die heutige Landnutzungssituation anzupassen und methodische Neuerungen bei der Entwicklung der Klimaanalyse einfließen zu lassen.

Es soll daher eine aktualisierte, räumlich deutlich höher aufgelöste digitale Klimaanalysekarte für das Regionsgebiet erzeugt werden. Zentrales Element des Untersuchungskonzeptes ist die modellgestützte, detaillierte Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen für die Region Hannover und deren planungsrelevante Inwertsetzung, zum Beispiel im Rahmen der Landschaftsplanung.

Die wichtigsten Produkte des Projekts sind:

- Die Karte der klimaökologischen Funktionen („Klimaanalysekarte“) gemäß VDI 3787 Blatt 1 (2015), VDI 3782 Blatt 1 (2008)
- Die Planungshinweiskarte „Klima“. Hierbei werden die Erfordernisse der Umsetzung bei der Neuaufstellung des Landschaftsrahmenplans in den Vordergrund gerückt.
- Der Einbindung des Klimawandels: Die Auswirkungen des globalen Klimawandels werden bei entsprechender zeitlicher Skalierung über Simulationsrechnungen und in die planerische Umsetzung eingebunden. Auf Basis der aktuellen EURO-CORDEX-Daten wird ein räumlich hochauflösendes Klimaszenario „Zukunft“ für das Regionsgebiet modelliert. Dieses wird zu Flächennutzungsszenarien für das Verbandsgebiet in Beziehung gesetzt.
- Das GIS-Projekt mit allen relevanten Layern zu den Eingangsdaten, Klimaergebnissen und den Komplexgrößen Klimafunktion und Planungskarte.

Zur Analyse der stadt- und geländeklimatologischen Gegebenheiten, Prozesse und Zusammenhänge wird das von Prof. Dr. Groß entwickelte komplexe Klimamodell FITNAH-3D eingesetzt. Für die Erarbeitung einer detaillierten, flächendeckenden digitalen Stadtklimaanalyse bietet die komplexe numerische Simulation planungsrelevanter Klimaparameter beste Voraussetzungen. Sie liefert in Verbindung mit Messungen umfassende, räumlich hochauflösende und flächendeckende Ergebnisse.

Darüber hinaus wird eine möglichst frühzeitige Beteiligung der Städte und Gemeinden der Region Hannover angestrebt, damit lokalspezifische Parameter mit ihrer Planungsrelevanz angemessen berücksichtigt werden. Hierzu wurde ein frühzeitiger Dialogprozess angestoßen, um so die kommunale Interessenlage in die Ausgestaltung der Projektprodukte einfließen lassen zu können.



2. Klimatische 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) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 3) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. 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 (Abb. 1).

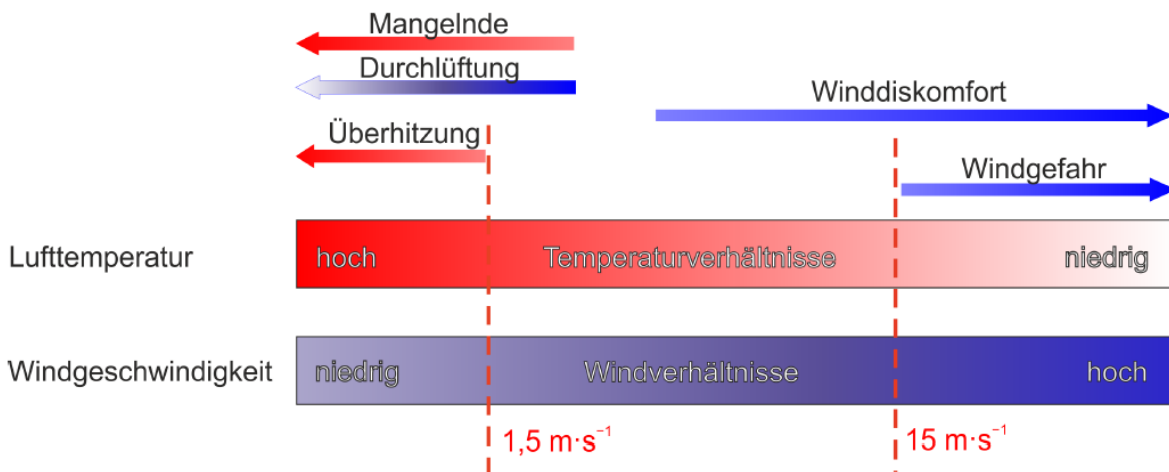


Abb. 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

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 (Höppe und Mayer 1987). International wird darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) verwendet (Jendritzky 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 (Abb. 2). Auf diese Weise können letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen.

Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerterroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). 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 in aller Regel 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 2008a, 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitgebers, 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.

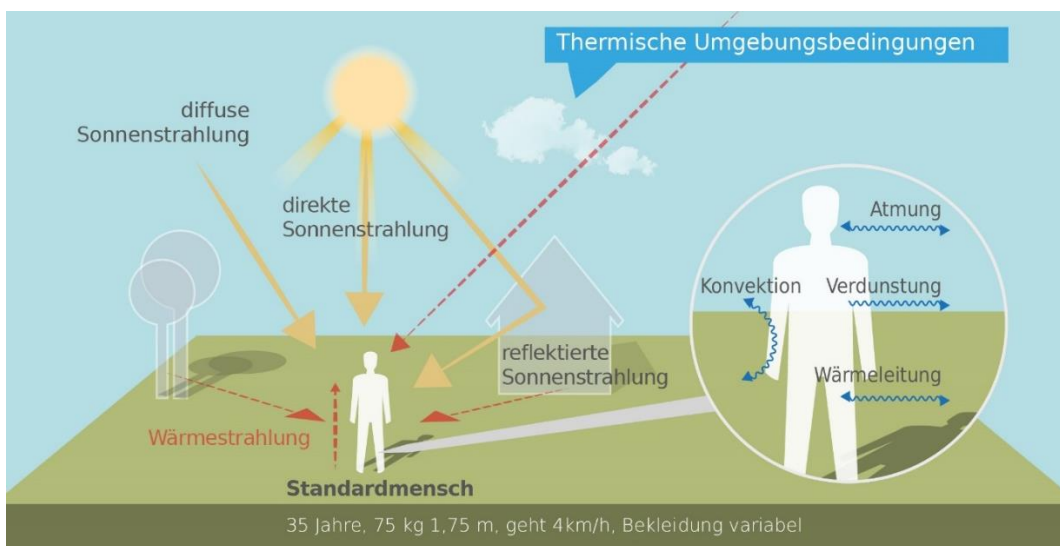


Abb. 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2022)

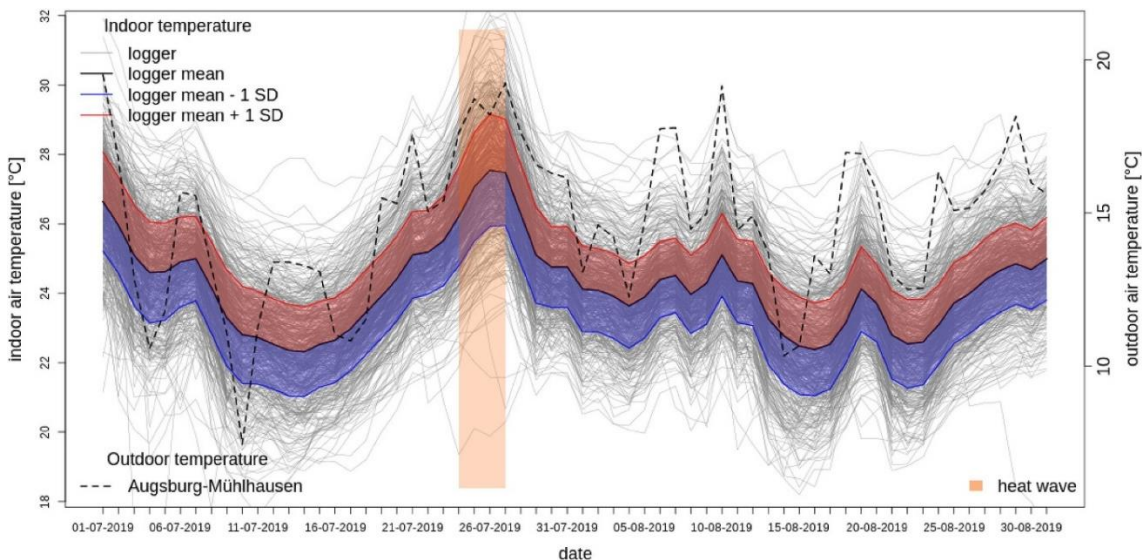


Abb. 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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 2008a, 23). 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 Bürger:innen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftlichen Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abb. 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, S., Hiete, M. und Beck, C. 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 bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 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 & Steining 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (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 Jah-



ren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abb. 4).

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75–84 und vor allem 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 (Abb. 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 – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

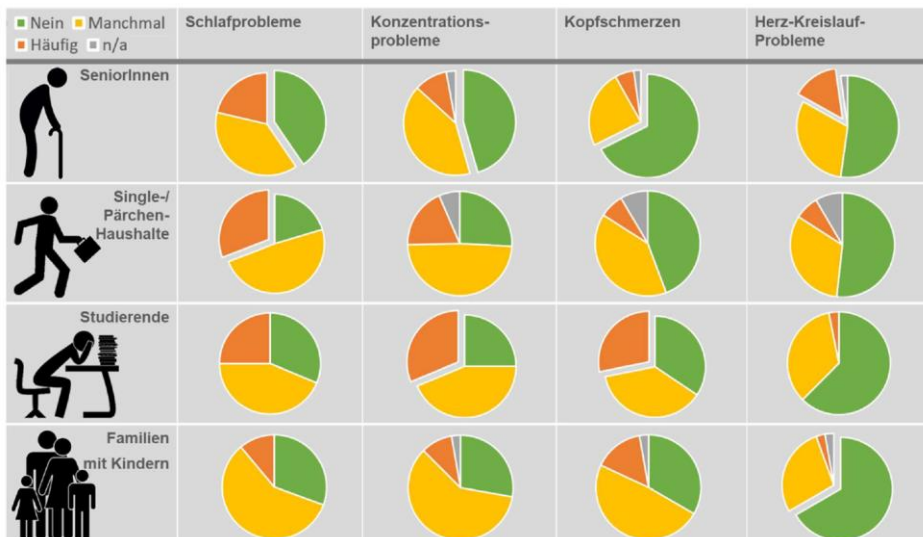


Abb. 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

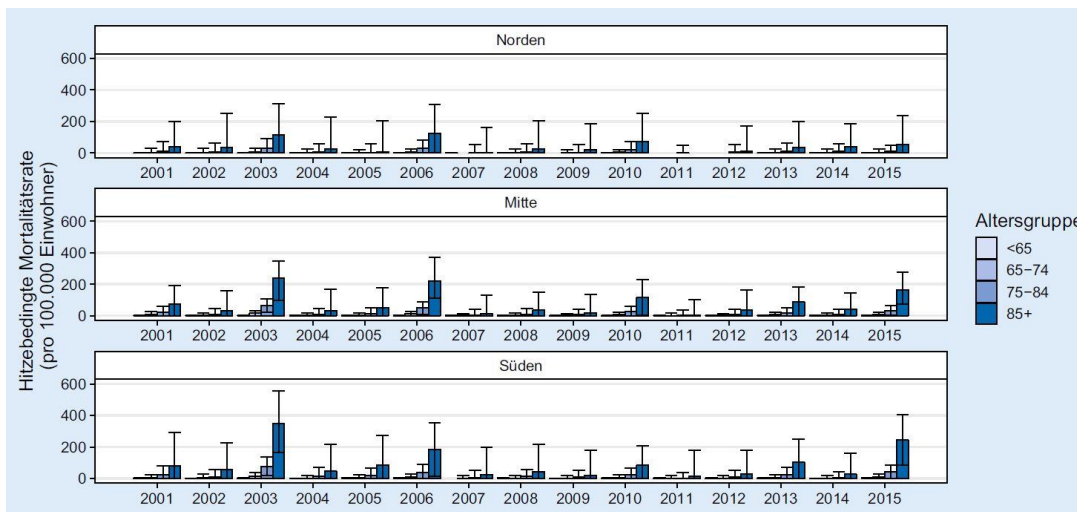


Abb. 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)



2.2 Wärmeineffekt 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 Heranführen 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 (vgl. Groß 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abb. 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeineffekt induzierte Flurwindssysteme 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 (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch großräumige Advektion 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 tief liegenden 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.

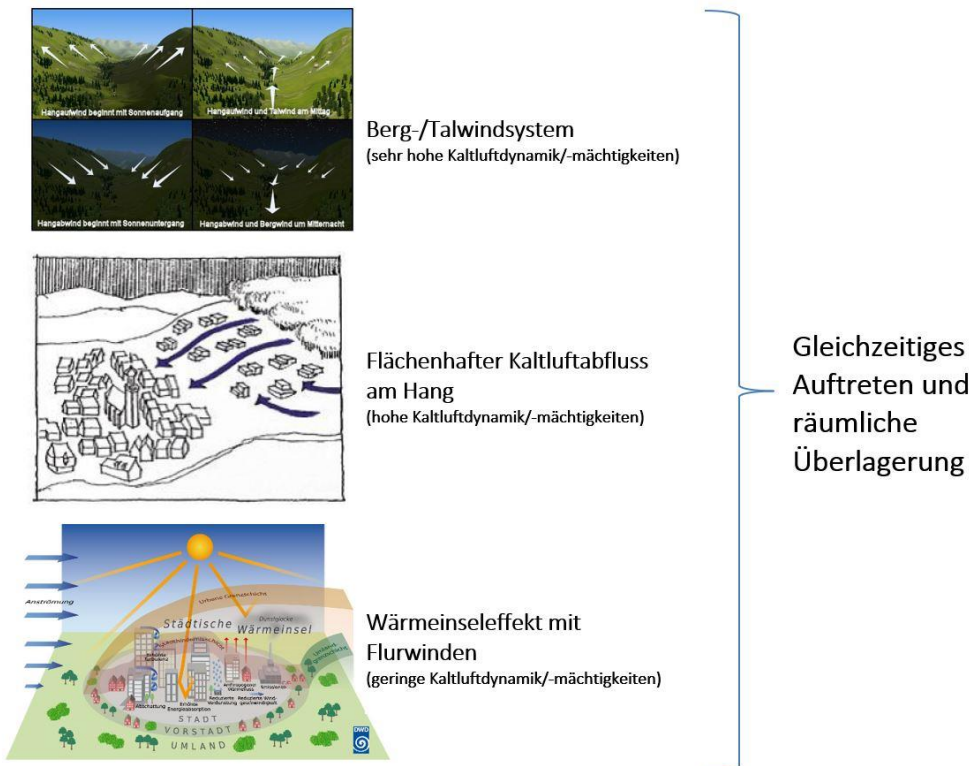


Abb. 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))



Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 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, un bebauten 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 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 dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-) Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/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 Abb. 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-/Talwindssystem 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 Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. 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 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 zugrunde liegenden 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, Stadt-sanierung, 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 Kapitel näher eingegangen.

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; Veröffentlichung für 02/2024 angekündigt) 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 (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), 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.



Untersuchungsansätze von Stadtklimaanalysen

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“ (Abb. 7). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellierungen 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 im sogenannten 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 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 Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaeigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/ Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimatope • Klimaanalysekarte 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten

Abb. 7: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)



Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tab. 1). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den 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. „Subgrid-Skala“ 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.

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 aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

Tab. 1: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder

3. Klima und Klimawandel in der Region Hannover

3.1 Gegenwärtiges Klima

Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) ist die Region Hannover durch eine langjährige Mitteltemperatur von 10,0 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von ca. 627 mm/Jahr gekennzeichnet. Damit weist die Region eine etwas über dem deutschlandweiten Durchschnitt liegende Mitteltemperatur auf (9,3 °C; UBA 2022a) und eine geringere jährliche Niederschlagsmenge auf (gesamtd deutscher Mittelwert 790 mm/Jahr; UBA 2022b).

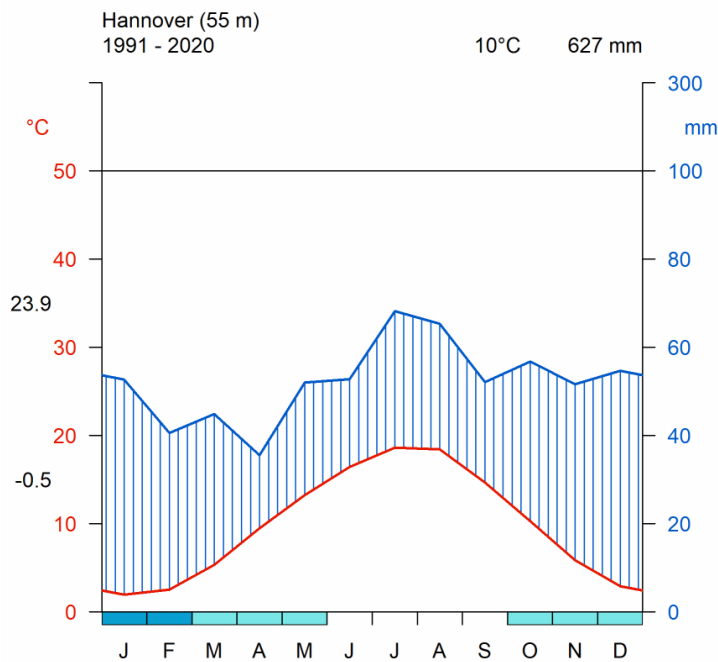


Abb. 8: Klimadiagramm von Hannover nach Walter und Lieth
(Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2020)

3.2 Autochthone Wetterlagen

Die Klimaanalyse Region Hannover legt 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.

In der Region Hannover traten im langjährigen Mittel der letzten 30 Jahre rund 50 windschwache Strahlungsnächte auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abb. A 3 im Anhang).



3.3 Beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung der klimatischen Entwicklung in der Region Hannover basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; Kaspar et al. 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Grenze der Region Hannover wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km- Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden ausgewertet. Zudem wurden hieraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können.

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

Das Klima eines Ortes wird bestimmt durch seine geographische Breite, die Höhenlage, die Art des Untergrundes, die Orographie sowie anthropogene Veränderungen der Landschaft.

Niedersachsen liegt in einem überwiegend maritim geprägten Bereich mit allgemein kühleren Sommern und milderem Winter und zählt damit zum warm- gemäßigtem Regenklimate (Cf-Klima nach Köppen; Klimareport NDS DWD 2018). Unter kontinentalem Einfluss kann es im Sommer zu höheren Temperaturen und trockenen Phasen, im Winter zu Kälteperioden kommen.

Das warm-gemäßigte Klima in der Region Hannover spiegelt sich in einer **Jahresmitteltemperatur** von 9,3 °C in der Referenzperiode 1971 - 2000 wider. Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in der Region Hannover – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,6 °C gestiegen (Mittelwert 1990 – 2021 im Vergleich zu 1881 - 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in den letzten drei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 3 Jahreswerte allein in den letzten sechs Jahren (Abb. 9).

Die beobachtete Erwärmung geht mit einer deutlichen Veränderung der Anzahl meteorologischer Kenn-tage einher. So ist die Anzahl der Sommertage in der Region Hannover um 12 Tage auf durchschnittlich 38 Tage pro Jahr im Vergleich der Perioden 1961 – 1990 zu 1991 – 2020 gestiegen. Ebenso hat sich die Auftretshäufigkeit der, als besonders belastend geltenden, Heißen Tage mehr als verdoppelt (Tab. 2). Eine entgegengesetzte Entwicklung zeigen Frost- bzw. Eistage, deren Anzahl im selben Zeitraum um 14 bzw. 7 Tage pro Jahr zurückgegangen ist. Tropennächte treten gegenwärtig relativ selten auf, sodass die beobachteten Änderungen statistisch nicht ausreichend belastbar sind.

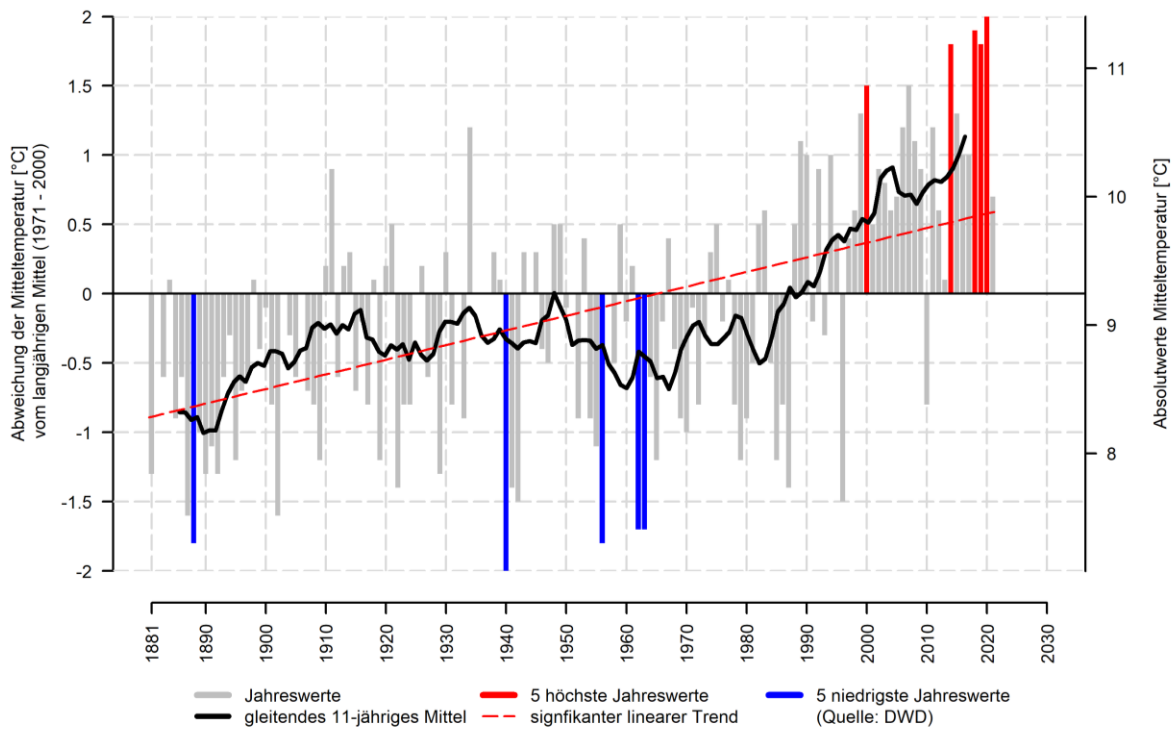


Abb. 9: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in der Region Hannover im Zeitraum 1881 bis 2021 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2020)

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.

Tab. 2: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kenntagen in der Region Hannover in der Vergangenheit (nach DWD 2020c bzw. für die Tropennächte DWD-Station Hannover (DWD 2020b)).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
tägliches Maximum der Lufttemperatur [°C]	12,9	13,3	14,2
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,9	9,2	10
tägliches Minimum der Lufttemperatur [°C]	4,9	5,4	6
Sommertage ($T_{max} \geq 25^{\circ}C$) [n/Jahr]	26	29	38
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}C$) [n/Jahr]	4	5	9
Tropennächte ($T_{min} \geq 20^{\circ}C$) [n/Jahr]	keine Angabe	0	0,4
Frosttage ($T_{min} < 0^{\circ}C$) [n/Jahr]	75	68	61
Eistage ($T_{max} < 0^{\circ}C$) [n/Jahr]	20	15	13
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	679	667	674
Tage mit Niederschlag > 10 mm [n/Jahr]	16	16	16
Tage mit Niederschlag > 20 mm [n/Jahr]	3	3	3
Tage mit Niederschlag > 30 mm [n/Jahr]	1	1	1

In Bezug auf den **Niederschlag** sind in der Vergangenheit geringfügige Auswirkungen durch den Klimawandel festzustellen. Zwar zeigt sich ein Trend steigender Jahresniederschläge seit Beginn der systematischen Messungen Ende des 19. Jahrhunderts (Abb. A 2 im Anhang). Über die letzten ca. 60 Jahre sind jedoch keine relevanten Veränderungen auszumachen und die mittlere jährliche Niederschlagsmenge schwankte um 670 mm (Tab. 2).

Mit der zunehmenden Erwärmung steigt das Potenzial für **Starkniederschläge**, 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 möglich¹. 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.

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

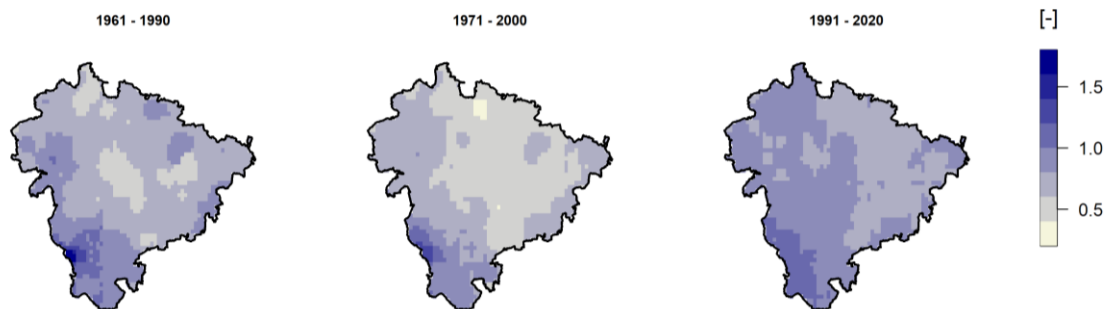


Abb. 10: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in der Region Hannover (nach DWD 2020c)

3.4 Erwarteter Klimawandel

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. 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 IPCC² Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt³.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind Klimamodelle vereinfachende Abbilder

¹ Radar-Online-Aneignung; siehe www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html

² Intergovernmental Panel on Climate Change ("Weltklimarat"; IPCC 2014)

³ Homepage: www.euro-cordex.net



der Wirklichkeit. 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 der Region Hannover ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d. h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tab. A 1 im Anhang). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den Modellergebnissen permanent aktualisiert werden, können nach der Veröffentlichung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Modellrechnungen (Mitglieder des Ensembles) werden als gleich wahrscheinlich eingeschätzt und damit in der Bildung der Mittelwerte alle gleichberechtigt berücksichtigt. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodell-daten“ (Linke et al. 2016) durchgeführt.

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. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt der Region Hannover am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (1 Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2020a).

RCP-Szenarien

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abb. 11):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario 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.
- 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 Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf dem Pfad des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2012). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, kurzfristig keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 finden sich jeweils im Anhang.

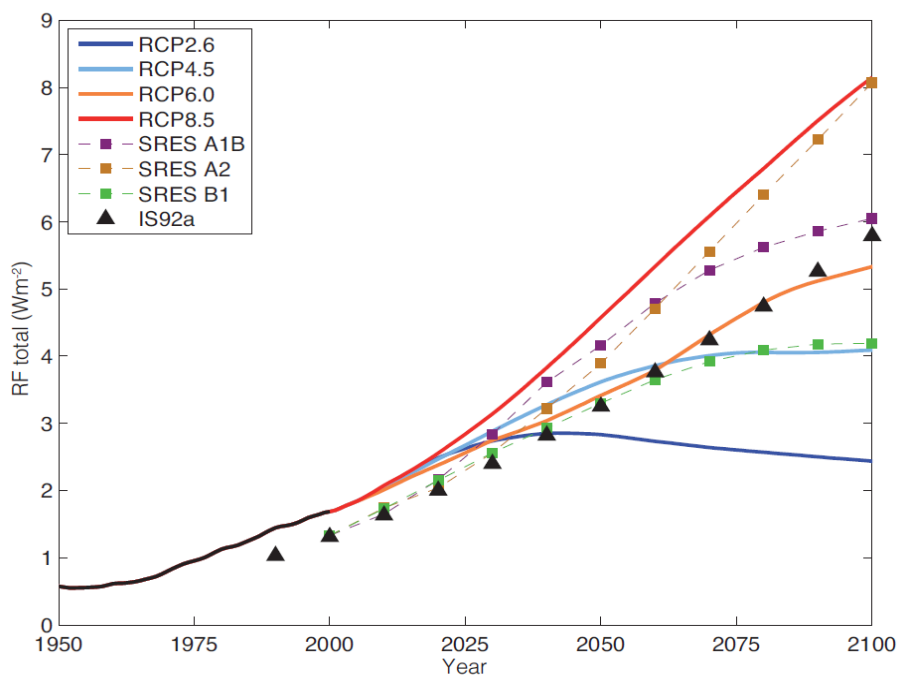


Abb. 11: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)

Meteorologische Kenntage

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z. B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; siehe ReKliEs-De 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in der Region Hannover wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, daher keinen Einfluss auf die Aussage.

Bei der schwellenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten



Werten führen. „Ist ein Modell z. B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise auch besonders viele warme und/oder besonders wenige kalte Kenntage identifiziert“ (ReKliEs-De 2017). Aus diesem Grund wurden für jede Modellsimulation die Schwellenwerte mit der Methode des Quantile-Mappings adjustiert (Piani et al. 2010, Themeßl et al. 2011). Für jeden Kenntag wurde dementsprechend aus den Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt (vgl. Abb. A 1 im Anhang). Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.

Statistische Auswertung

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (vgl. Tab. A 2 im Anhang).

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 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 – 1990. 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. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2011 – 2060
- 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen 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 einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. Linke et al. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Zeitskalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

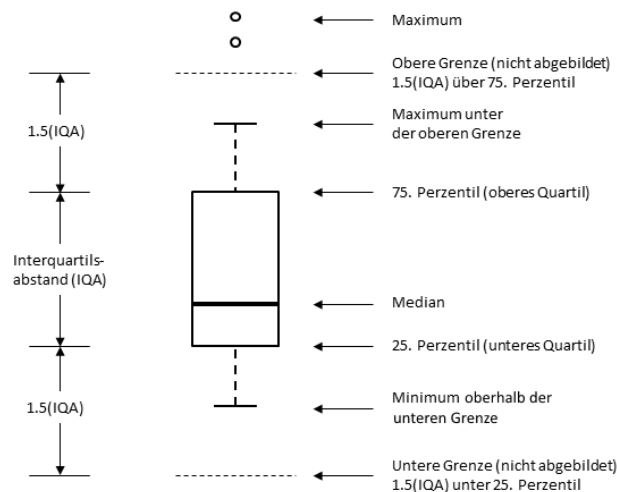


Abb. 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (siehe Abb. 12 zur Erläuterung der Plots).

TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in der Region Hannover bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abb. 13 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst belastbar einzuschätzen ist. Noch deutlicher als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁴ (Tab. 3).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die markantesten Zunahmen am Ende des 21. Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 2.6 wird eine Stagnation und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts ein moderater Temperaturrückgang erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichenbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abb. 13 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

⁴ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder den 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

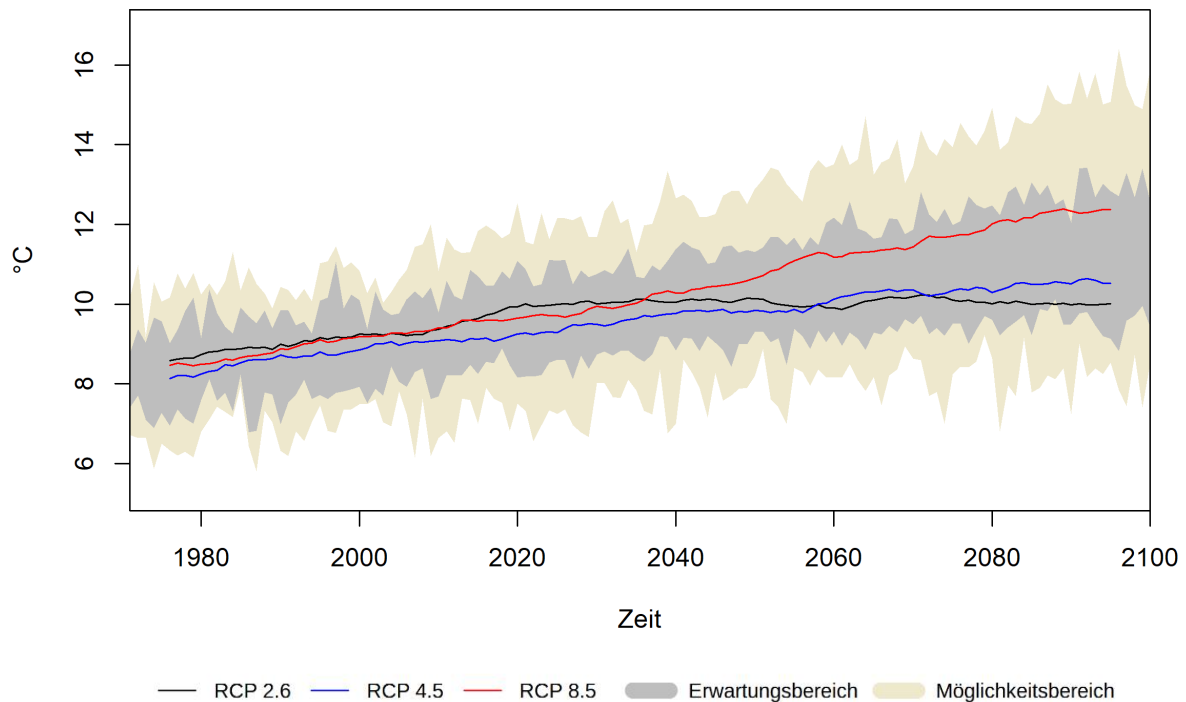


Abb. 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in der Region Hannover (alle RCP-Szenarien)

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst (Abb. 14). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien (Abb. A 4 im Anhang), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen in Abb. 14).

Tab. 3: Langjährige Änderung der Temperatur in der Region Hannover (P 15 = 15. Perzentil, P 50 = Median, P 85 = 85. Perzentil)

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,9	1,1	1,5	0,9	1,3	1,5	0,9	1,1	1,5
	RCP 4.5	0,8	1,4	1,8	0,9	1,6	2,3	1,4	2,0	2,6
	RCP 8.5	1,4	2	2,4	1,6	2,3	2,9	2,8	3,6	4,7
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,5	2,4	3,9	1,9	2,4	3,3	2,3	3,1	3,9
	RCP 4.5	2,3	4,2	5,2	2,3	4,6	6,1	3,5	4,2	6,2
	RCP 8.5	2,5	4	6,0	3	5,2	6,9	6,4	8,4	9,5
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,9	1,2	2,5	0,9	1,4	2,9	0,9	1,6	2,8
	RCP 4.5	1,1	1,6	2,5	1,2	1,9	3	1,5	2,4	3,6
	RCP 8.5	1,1	2,3	3,4	1,9	3,2	3,9	3,2	4,8	7,1

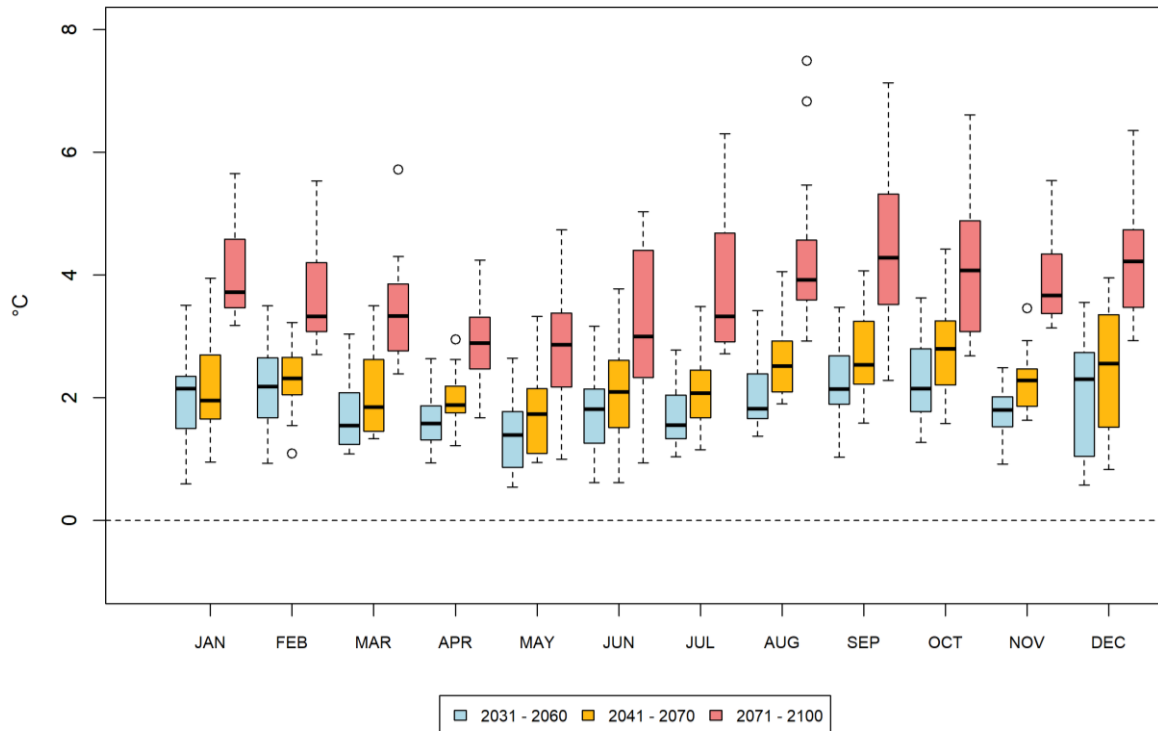


Abb. 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in der Region Hannover (RCP 8.5, zu Box-Whisker-Plots s. Abb. 12)

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 (Tab. 4). Beispielsweise ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit 20 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode nur 5-mal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte treten in der Region Hannover derzeit unregelmäßig auf. In der nahen Zukunft (2021 – 2050) wird keine Zunahme an Tropennächten pro Jahr erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 und RCP 4.5 stagniert, prognostiziert das RCP 8.5 eine leichte Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode im Mittel 1 bis 8 Tropennächte pro Jahr in der Region Hannover möglich (Tab. 4). Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d. h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

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 der Region Hannover zukünftig länger andauern (Abb. A 5 im Anhang). Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts im Mittel um 1 bis 4 Tage.



Tab. 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in der Region Hannover (P 15 = 15. Perzentil, P 50 = Median, P 85 = 85. Perzentil)

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage ($T_{max} \geq 25^{\circ}C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	7	11	17	7	11	19	8	11	15
	RCP 4.5	5	11	16	6	17	23	13	17	24
	RCP 8.5	12	15	25	14	21	34	31	39	59
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	3	7	2	3	8	3	4	8
	RCP 4.5	2	4	7	3	5	10	5	6	10
	RCP 8.5	4	7	8	6	9	13	13	15	26
Tropennächte ($T_{min} \geq 20^{\circ}C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	1	0	0	1	0	1	1
	RCP 4.5	0	1	1	1	1	2	1	2	3
	RCP 8.5	1	2	2	1	2	3	4	8	12
Frosttage ($T_{min} < 0^{\circ}C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-21	-19	-13	-24	-18	-15	-21	-18	-14
	RCP 4.5	-30	-24	-15	-36	-26	-12	-37	-35	-24
	RCP 8.5	-36	-31	-24	-41	-35	-28	-56	-52	-47
Eistage ($T_{max} < 0^{\circ}C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-7	-5	-5	-7	-6	-5	-8	-6	-5
	RCP 4.5	-10	-8	-4	-12	-9	-3	-12	-10	-6
	RCP 8.5	-12	-10	-6	-13	-11	-8	-16	-14	-14

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an **Frost- und Eistagen**. In der Region Hannover werden im langjährigen Mittel 74 Frosttage bzw. 15 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 22 Frosttage bzw. 1 Eistag auftreten.

Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an **Tagen mit Frost- und Tauwechslern** und eine verlängerte **Vegetationsperiode** nach sich ziehen.

NIEDERSCHLAG UND TROCKENHEIT

Niederschlagsverschiebung

In Bezug auf die **Jahresniederschlagssumme** sind in der Region Hannover keine eindeutigen Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 leicht steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert, während infolge des RCP 2.6 langfristig keine relevanten Änderungen zu erwarten sind (Tab. 5, auch Abb. A 6 im Anhang). Mit Blick auf den Erwartungsbereich⁵ zeigt sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen

⁵ In der Bandbreite vom 15. bis 85. Perzentil liegende Modellergebnisse



lassen – bis auf wenige Ausnahmen weicht der zukünftige mittlere Jahresniederschlag um weniger als 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab.

Insgesamt kann für die Region Hannover eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden, die aufgrund der relativ geringen Änderungen jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet entscheidend u. a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Der Blick auf den Jahresgang 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, das gerade für den Juli und August deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abb. 15). Die RCP-Szenarien 2.6 und RCP 4.5 weisen, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf (Abb. 7 im Anhang). Die in den Abbildungen wahrnehmbare **Niederschlagsverschiebung** mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, ist jedoch als auffallende Tendenz zu erwähnen.

Tab. 5: Langjährige Änderung der mittl. Niederschlagssumme in der Region Hannover (P 15 = 15. Perzentil, P 50 = Median, P 85 = 85. Perzentil).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-33	24	41	-45	1	32	-14	4	21
	RCP 4.5	16	39	70	2	26	56	16	27	75
	RCP 8.5	12	41	70	9	31	75	19	67	132

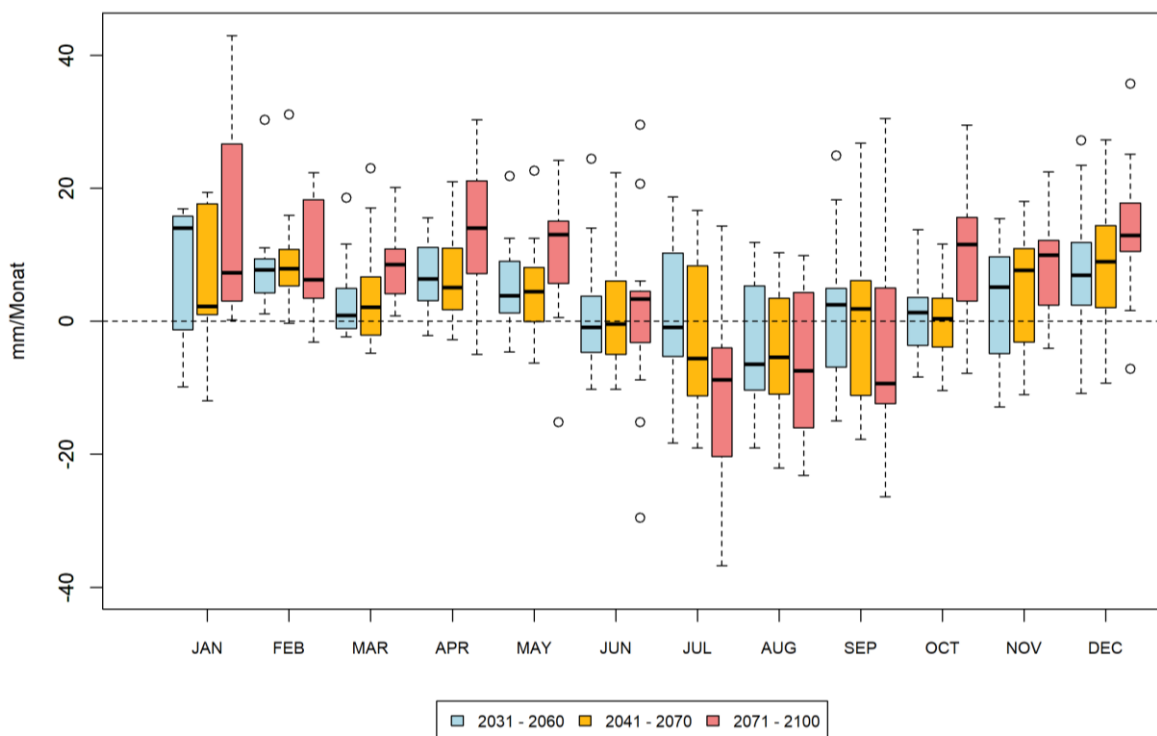


Abb. 15: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in der Region Hannover (RCP 8.5)

Trockenheit

Begriffe wie Trockenheit oder Dürre sind nicht eindeutig definiert und die Bewertung dieser Ereignisse hängt oftmals von der jeweiligen fachlichen oder individuellen Sichtweise ab. Im allgemeinen Verständnis sind Trockenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, der aus einem Niederschlagsdefizit resultiert und über einen längeren Zeitraum zu Wasserknappheit führen kann. Ein Indikator für Trockenheit ist die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust).

In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in der Region Hannover feststellbar. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend (leicht) positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, sind im RCP 8.5 in den Monaten Juni bis September Abnahmen erkennbar (Abb. 16). Diese **saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz** gilt für alle drei Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus, doch kann diese Tendenz die zukünftige Situation gerade in heute bereits von Wasserknappheit betroffenen Gebieten verschärfen. Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 vergleichbare Muster (Abb. A 8 im Anhang), doch muss berücksichtigt werden, dass die genannten Ergebnisse wiederum mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Variabilität des Niederschlags mitentscheidend für die klimatische Wasserbilanz wirkt.

Die abnehmende klimatische Wasserbilanz im Sommer lässt häufigere bzw. länger anhaltende Trockenperioden vermuten. Jedoch fallen die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering aus, um valide Aussagen treffen zu können (vgl. exemplarisch die Häufigkeit extremer Trockenperioden in Abb. A 9 im Anhang)

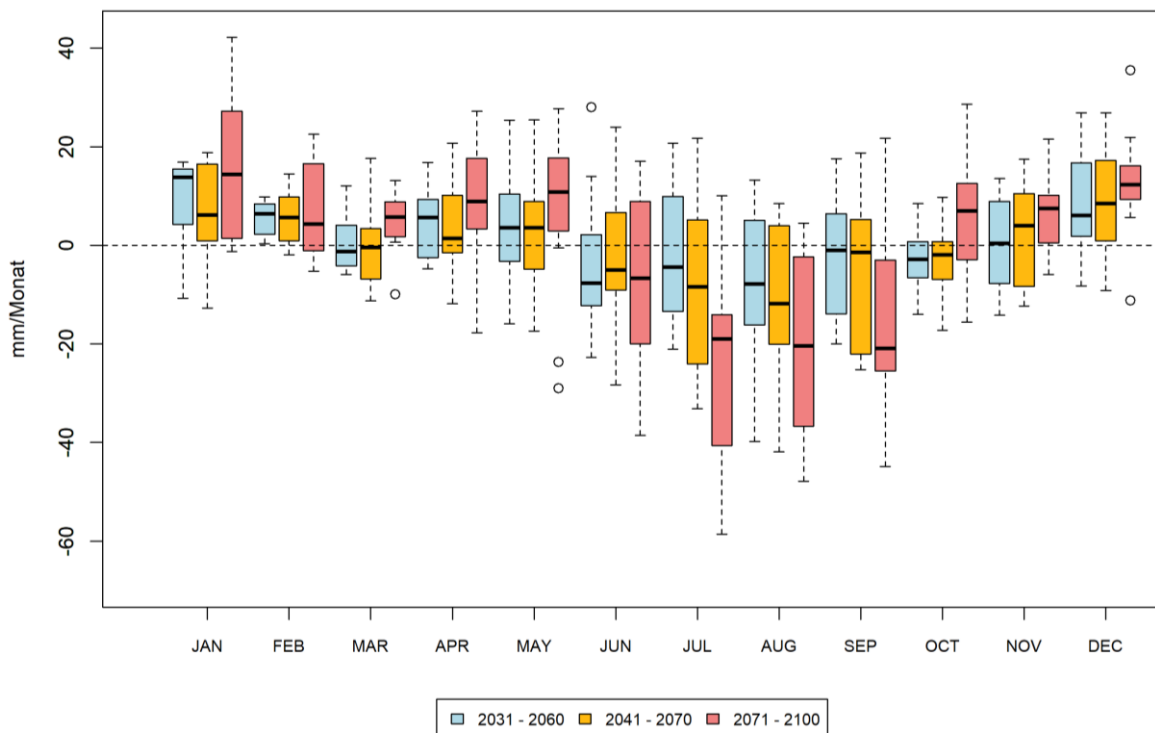


Abb. 16: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in der Region Hannover (RCP 8.5)



STARKNIEDERSCHLAG

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

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.

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h (Unwetterwarnung; DWD 2020d). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Dabei werden Schwellenwerte festgelegt (z. B. $N \geq 20$ mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zu deren Bestimmung existieren. In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

1. Starker Niederschlag: $N \geq 10$ mm/d
2. Stärkerer Niederschlag: $N \geq 20$ mm/d
3. Starkniederschlag: $N \geq 30$ mm/d

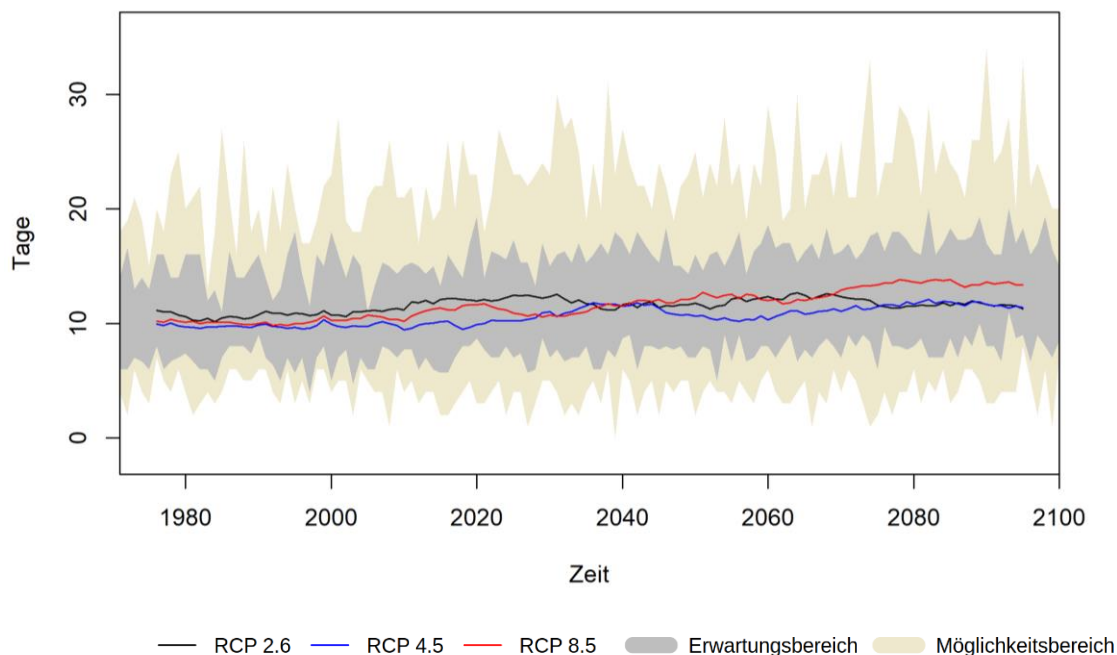


Abb. 17: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) in der Region Hannover (alle Szenarien)

Starkregenereignisse 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 beispielsweise bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge (≥ 20 mm/a) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Tab. 6). Aufgrund des enormen Schadenspo-



tenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die Regionalen Klimamodells für die Ereignisse $N \geq 10 \text{ mm/d}$ und $N \geq 20 \text{ mm/d}$ überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tab. 6). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen.

Starkniederschläge $\geq 30 \text{ mm/d}$ treten momentan sehr selten auf (im Mittel ein Ereignis pro Jahr) und haben eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sodass valide Prognosen derzeit kaum möglich sind. Gerade langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit einem zusätzlichen Starkniederschlagsereignis pro Jahr gerechnet (Tab. 6).

Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist verbunden mit einer Abnahme von Tagen mit Niederschlägen $< 10 \text{ mm/d}$. Angesichts kaum veränderter oder gar zunehmender Jahresniederschlagssummen bedeutet dies, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die **Niederschlagsintensität** jedoch zunimmt. Mit einfachen Worten: Es regnet weniger, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insbesondere 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 (DWD 2020a). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (vgl. ZAMG 2020). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insbesondere langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.

Tab. 6: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in der Region Hannover (P 15 = 15. Perzentil, P 50 = Median, P 85 = 85. Perzentil).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Starker Niederschlag ($N \geq 10\text{mm/d}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-3	2	3	-4	1	3	-1	0	2
	RCP 4.5	1	3	4	1	3	5	1	3	5
	RCP 8.5	0	4	6	0	4	6	3	5	8
Stärkerer Niederschlag ($N \geq 20\text{mm/d}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	1	2	0	1	3	0	0	2
	RCP 4.5	1	1	2	0	1	2	1	2	3
	RCP 8.5	1	2	3	1	2	4	2	3	5
Starkniederschlag ($N \geq 20\text{mm/d}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	RCP 4.5	0	1	1	0	0	1	0	1	1
	RCP 8.5	0	1	1	1	1	2	1	1	3
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-3	3	9	-3	4	9	-2	3	11
	RCP 4.5	1	4	12	0	4	8	1	6	9
	RCP 8.5	3	6	10	3	6	11	6	11	19

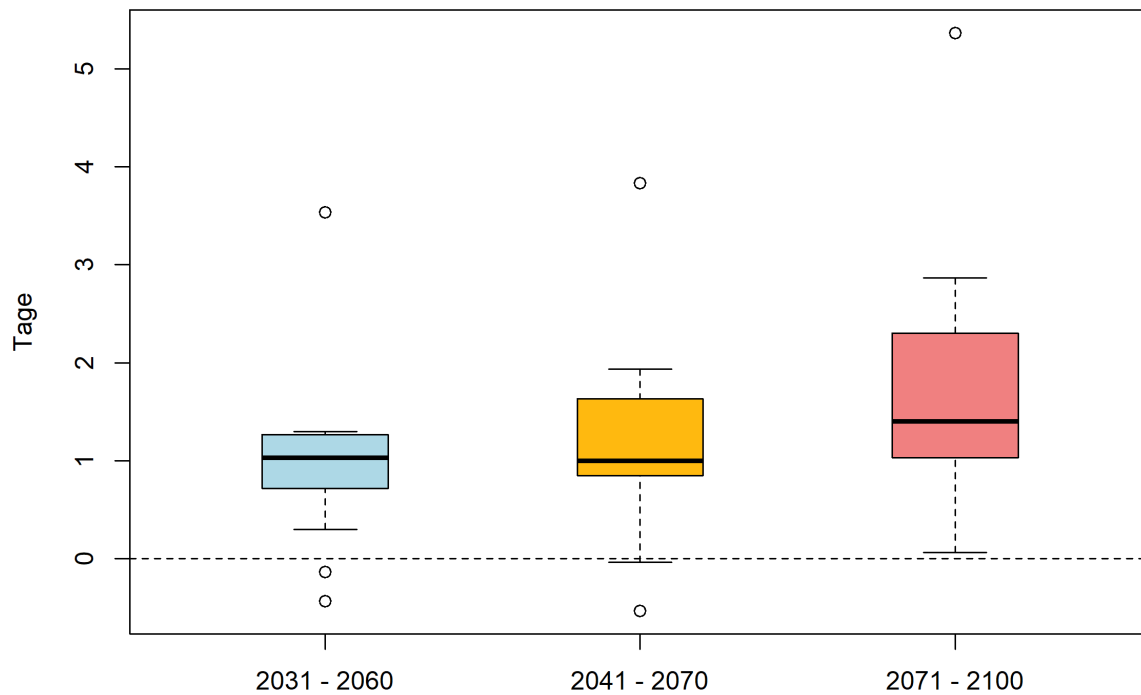


Abb. 18: Änderung der jährlichen Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in der Region Hannover (RCP 8.5)

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 2020d). 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 (Pinto et al. 2009, Fink et al. 2012, Pinto und Ryers 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 (Pinto et al. 2009, Donat et al. 2010, McDonald 2011, Pinto und Ryers 2017).

Die Analyse zur Häufigkeit von **Sturmereignissen** ergab für die Region Hannover in allen drei 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.



3.5 Zusammenfassung Klima und Klimawandel

Die Aussagen zum erwarteten Klimawandel in der Region Hannover gelten für die nahe (2031 – 2060), mittlere (2041 – 2070) sowie ferne Zukunft (2071 – 2100) und stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt.

Die Projektionen verdeutlichen, dass sich der bereits heute beobachtete Trend einer Erwärmung in der Region Hannover zukünftig fortsetzt. So werden weiterhin steigende Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung bedingt eine Zunahme an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten, zudem gibt es Hinweise, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt. Frost- und Eistage treten dagegen zukünftig seltener auf und sorgen für mildere Winter, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechsell und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Für den Jahresniederschlag ist eine langfristig leicht steigende, wenn auch nicht signifikante, Tendenz in der Region Hannover zu erkennen. Entscheidender sind saisonale Verschiebungen des Niederschlags mit einem Trend zu geringeren Niederschlagsmengen im Sommer und höheren Werten im Winter und Frühjahr. Die Niederschlagsverschiebung beeinflusst maßgeblich die klimatische Wasserbilanz, die über das Jahr gesehen annähernd konstant bleibt, in der saisonalen Betrachtung jedoch deutliche Veränderungen zeigt. So ist in den Winter- und Frühjahrsmonaten mit einem Anstieg der klimatischen Wasserbilanz zu rechnen. Aufgrund geringerer Niederschläge bei steigenden Verdunstungsraten ist dagegen im Sommer von einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz und einem Rückgang des natürlichen Wasserdargebots auszugehen. Die Projektionen der Klimamodelle legen folglich, obgleich statistisch schwer erfassbar, den Schluss nahe, dass in Zukunft mit einer vermehrten sommerlichen Trockenheit gerechnet werden muss. Besonders betroffen dürften dabei Gebiete sein, die heute bereits Trockenheitstendenzen aufweisen.

Starkniederschläge zählen zu den seltenen Ereignissen, sodass statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Aufgrund ihres enormen Schadenspotenzials sollten jedoch selbst geringe Änderungen beachtet werden. Die regionalen Klimamodelle projizieren für Niederschlagsereignisse $N \geq 10$ mm/d sowie $N \geq 20$ mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind. Für Starkniederschläge ≥ 30 mm/d sind valide Aussagen derzeit kaum möglich, doch deutet sich langfristig eine Tendenz leicht steigender Auftretshäufigkeiten an. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist verbunden mit einer rückläufigen Anzahl von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d, woraus gefolgert werden kann, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt.

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, die 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. Daher sind in der Region Hannover keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftretshäufigkeit von Stürmen ableitbar. Eine durch die zunehmende Erwärmung aufgeheizte Atmosphäre besitzt jedoch mehr latente Wärme, woraus sich ein Potenzial für heftigere Sturmereignisse – und auch Starkregenereignisse – ergibt. Daher sollten Stürme, obwohl mit den derzeitigen Modellen keine zunehmende Häufigkeit nachweisbar ist, bei Klimaanpassungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden – nicht zuletzt angesichts des Ausmaßes und der Häufung jüngster Ereignisse (unter anderem Orkan „Kyrill“ im Januar 2007, Orkantief „Xynthia“ im Februar 2010, Orkantief „Frederike“ im Januar 2018, Orkantief „Sabine“ im Februar 2020).



4. Methodik modellgestützte Stadtklimaanalyse

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

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen solch lokalklimatischer Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Zwar kann die Verteilung meteorologischer Größen wie Wind und Temperatur durch Messungen ermittelt werden, aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung (insbesondere in komplexen Umgebungen) in benachbarte Räume nur selten möglich. Entsprechend schwierig ist es, aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende (also flächenhafte) stadtklimatologische Bewertung vornehmen zu können.

4.1 Das Stadtklimamodell Fitnah-3D

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

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH-3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 25 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 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. Für tiefergehende Informationen zu FITNAH-3D wird u.a. auf Groß (1992) verwiesen.



4.2 Szenarien-Entwicklung

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen. Der Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung in den Handlungsfelder urbane Hitzevorsorge und urbanem Kaltlufthaushalt auf Landes- und Regionalebene sowie bei gesamt- und teilstädtischer Betrachtung.

Im Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt- bzw. regional-klimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichs-Szenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (vgl. Stadt Karlsruhe 2015, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen – Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie bereits etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (vgl. Fürst und Scholles 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (z.B. VDI 2008, VDI 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. Das Modul 1 entspricht dabei einer Änderung der Rahmenbedingungen des Modells (bestimmte Antriebsgrößen zum Start der Modellierung (bspw. die Lufttemperatur) können variiert werden). Durch die Module 2 und 3 ändern sich dagegen die Eingangsdaten der Modellierung. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarien-Entwicklung, deren Ziel es ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Szenarien beschreiben dabei hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um gegensteuern zu können. Es gibt unterschiedliche Ansätze der Szenarien-Entwicklung, von denen im Projekt die vorausschauende (forecasting) Szenario-Methodik zum Tragen kommt.

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 Szenario-Trichter mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (Abb. 19). In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sogenannten Wirkmodellen – hat sich die Fokussierung auf die Analyse von Extrem-Szenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

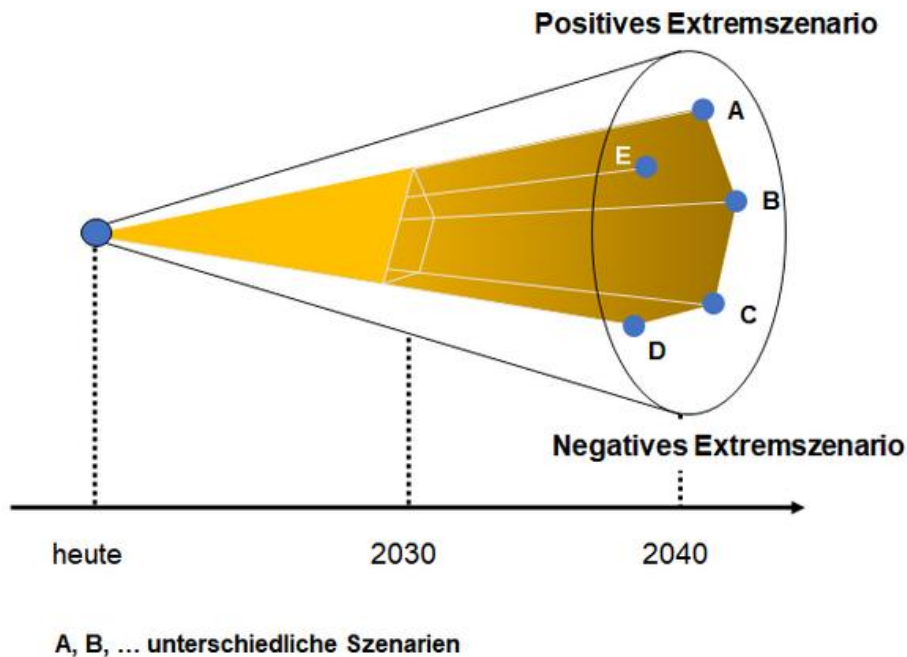


Abb. 19: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Neben dem aktuellen Regionalklima wurde auch das **zukünftige Klima der Region Hannover im Jahr 2035** mittels Modellrechnungen simuliert (Tab. 7). Als Stellschrauben zur Bestimmung der zukünftigen regionalen Klimaausprägungen wurden die klimatischen Änderungen infolge des Klimawandels in Kombination mit den erwarteten Landnutzungsänderungen verwendet.

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für die Region Hannover Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt (vgl. Kapitel 3.4). Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Für das zukünftige Regionalklima 2035 (2021 – 2050) wurde das **Szenario „Starker Klimawandel“** gewählt. Dieses kann als *worst-case*-Variante verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in der Region dieses Szenario nicht überschreiten werden. Die Lufttemperatur dieses Szenarios wird zu Beginn der Modellrechnung um 1,9 °C erhöht⁶. Diese Aufprägung

⁶ Die Ergebnisse zum erwarteten Klimawandel stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das die RCP-Szenarien des Weltklimarates (IPCC) als verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt.

Das für die Modellierung verwendete Klimaänderungssignal der Temperatur ergibt sich als Differenz der sommerlichen Temperaturen zwischen der Zukunftsperiode 2021-2050 (Bezugsjahr 2035) und der Referenzperiode 1971-2000. Für den „starken Klimawandel“ beruht das Änderungssignal auf dem 85. Perzentil des RCP 8.5.



des Temperatursignals basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatz (Schär et al. 1996).

Tab. 7: Zukunfts-Szenarien zur Abbildung des Regionsklimas 2035 und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in der Region (Stand 2021) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung⁷: 21,0 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario nahe Zukunft Starker Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,9 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 %

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,53 bzw. 1,27 °C). Zum anderen wird dem Modell eine geringere Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Trockenheit vorgegeben: In beiden Szenarien sinkt die Bodenfeuchte von 60 % (Status quo) auf 30 %. Die Bodenfeuchte zählt zu den Antriebsgrößen des Modells, wird durch das Modell aber nicht verändert, d.h. das Modell gibt keine Ergebnisse zur zukünftigen Bodenfeuchte in der Region Hannover aus. Eine geringere Bodenfeuchte beeinflusst aber die stadtklimatischen Modellergebnisse und sorgt insbesondere der Tagsituation für eine höhere bodennahe Lufttemperatur. Diese ist auf die wegfallende Verdunstung von Landnutzungsklassen mit niedriger Vegetation zurückzuführen, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (vgl. IPCC 2013). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 1/2 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,4 bzw. 0,95 °C). Berechnet wurde das 85. Perz. von RCP8.5 bezogen auf die Referenzperiode 1991-2020 und das Zukunftsszenario 2021-2050 mit einem DeltaT von 1.9 K.

Der Landnutzung für die Zukunftssituation liegt an erster Stelle diejenige der Referenzsituation zugrunde. Für das angenommene Zukunftsszenario mit dem Zieljahr 2035 wird in der Region Hannover mit einer erheblichen städtebaulichen Entwicklung gerechnet. Die Gemeinden der Region Hannover haben hierfür eine Maximalkulisse mit insgesamt 421 Siedlungsentwicklungsflächen zur Verfügung gestellt. Aus diesen Informationen wurden potenzielle Wohn- und Gewerbeflächen des Zukunftsszenarios in die Eingangsdaten eingearbeitet. Für die Art der zukünftigen Nutzung sind den Flächen Attribute mit den Werten „Gewerbe“, „Sondernutzung“, „Wohnen“ oder „Wohnen/Gewerbe“ zugeordnet worden.

Diese mussten in die modellinternen urbanen FITNAH-Nutzungsklassen „Zentrumsbebauung“, „Block- und Blockrandbebauung“, „Industrie und Gewerbeflächen“, „Zeilen- und Reihenhausbebauung“ und „Einzel- und Reihenhausbebauung“ überführt werden. Da diese Klassen nicht direkt aus den Attributen abgeleitet werden können, wurde beschlossen, eine Nachbarschaftsanalyse mit einzubeziehen. Die Siedlungsentwicklungsflächen wurden hierfür mit 100 m gepuffert, um benachbarte Flächen abzudecken. Über eine zonale

⁷ Lufttemperatur und Bodenfeuchte zum Start der Modellierung entsprechen den Standard-Werten, die bei stadtklimatischen Modellierungen mit FITNAH-3D angenommen werden.



Statistik konnte nun für jede Fläche ermittelt werden, wie hoch der Anteil an benachbarten urbanen FITNAH-Klassen aus dem Ist-Nutzungsraster ist. Mit diesen Angaben und dem Attribut der zukünftigen Nutzung wurde anschließend die Fitnah-Klasse für jede Entwicklungsfläche bestimmt:

wenn Nutzung = „Wohnen“ dann FITNAH → Mehrheit der Zonenstatistik ohne Gewerbe

wenn Nutzung = „Gewerbe“ dann FITNAH → Klasse „3 – Industrie und Gewerbeflächen“

wenn Nutzung = „Sondernutzung“ dann FITNAH → Mehrheit der Zonenstatistik

wenn Nutzung = „Wohnen/Gewerbe“ dann FITNAH → Mehrheit der Zonenstatistik

Um bereits bebaute Areale innerhalb der Siedlungsentwicklungsflächen nicht mit der neuen Nutzungsklassen zu überschreiben, wurden nur unbebaute Rasterpixel (FITNAH-Klassen 7 – 14) mit der neuen Nutzung der Siedlungsentwicklungsflächen überschrieben. Ein paar wenige Siedlungsentwicklungsflächen wurden händisch auf die korrekte FITNAH-Nutzungsklasse gesetzt, da der Puffer nicht immer ausreichend war, um benachbarte urbane Klassen aus dem Referenz-Nutzungsraster zu überdecken. Für drei Flächen gab es gesonderte Informationen zur Bebauung („Solarpark“), diese wurden auf die Klasse „8 – baulich beeinflusste Grünfläche“ gesetzt. Abb. 20 zeigt beispielhaft die eingearbeiteten Siedlungsentwicklungsflächen bei Burgdorf, Abb. 21 bietet einen Überblick auf die Gesamtheit der eingearbeiteten Entwicklungsflächen.

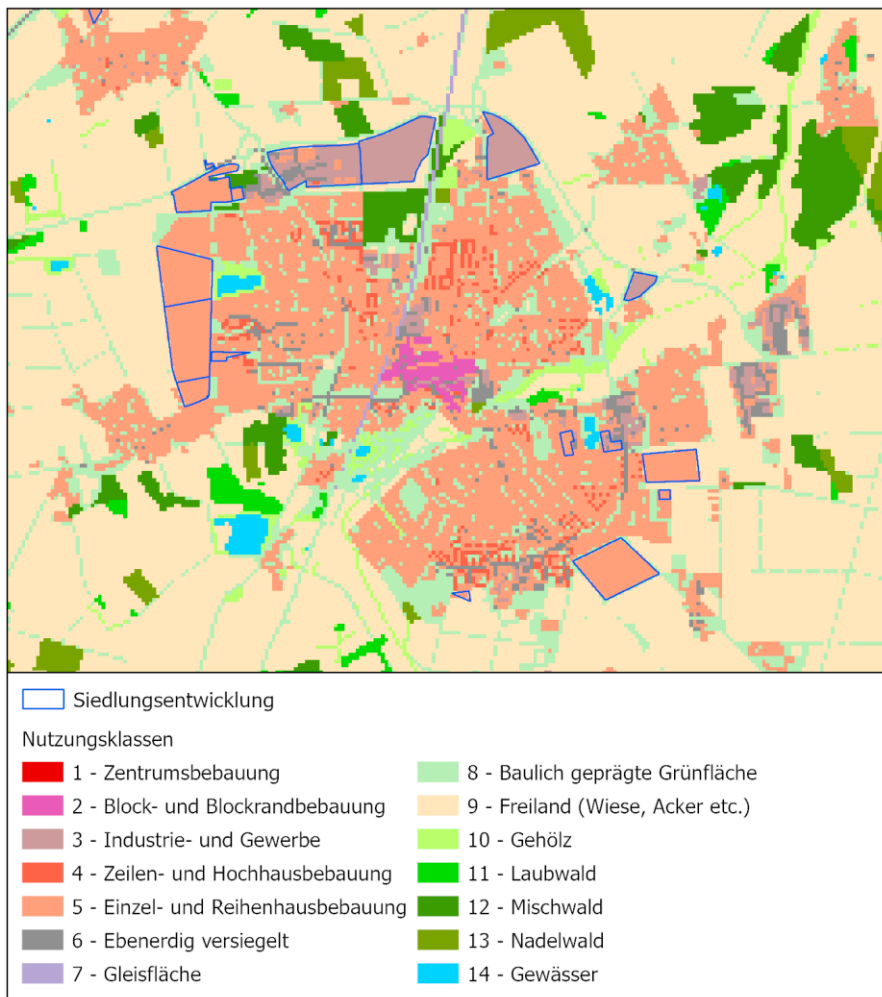


Abb. 20: Übernahme der städtebaulichen Entwicklung ins Modell (Beispiel Burgdorf)

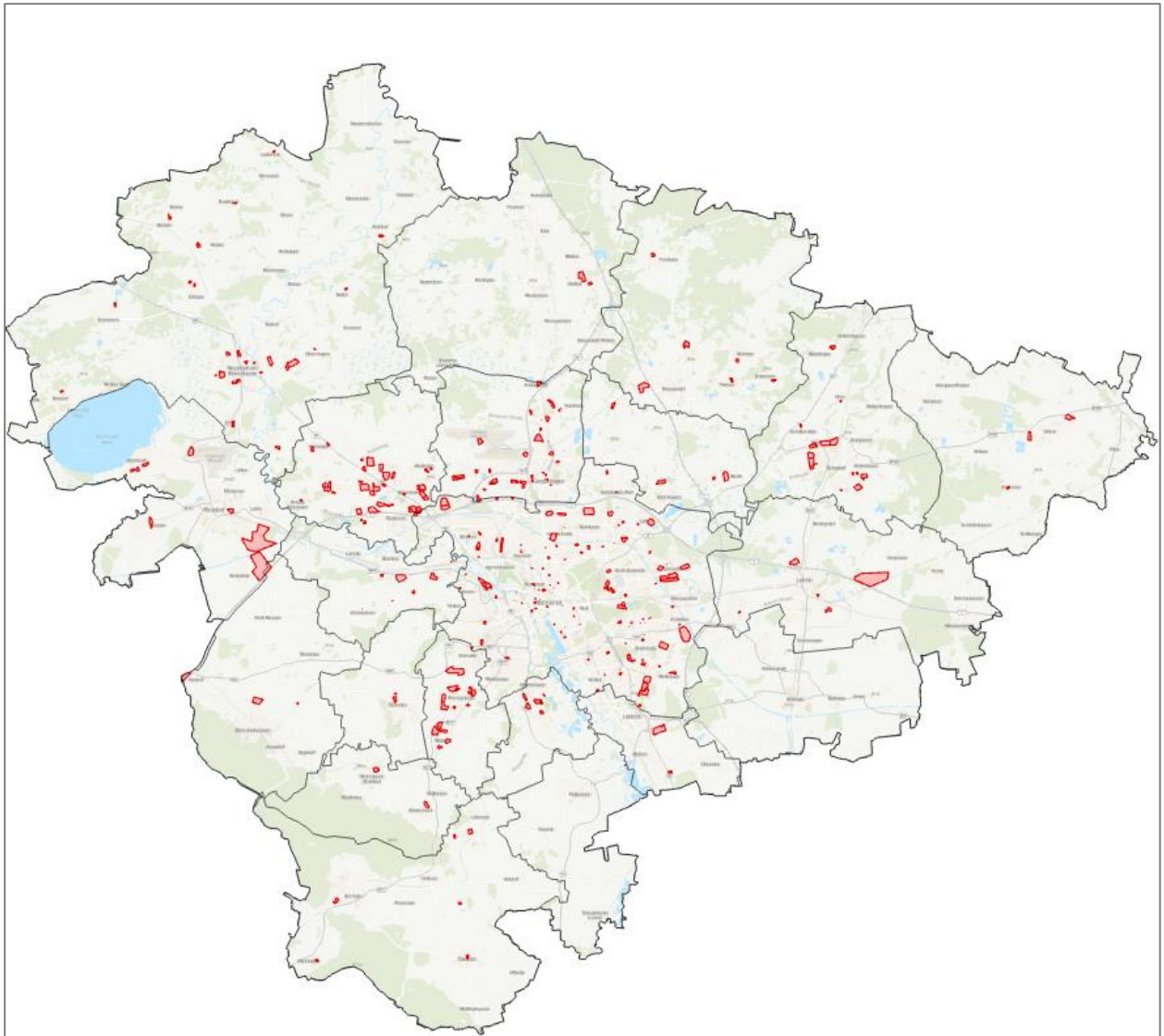


Abb. 21: Übersicht der potenziellen städtebaulichen Entwicklungsflächen für das Szenario „Nahe Zukunft“ in der Region Hannover (rot gekennzeichnet)

4.3 Meteorologische Randbedingungen

Die Klimaanalyse der **Bestandssituation** legt eine sommerliche, autochthone Wetterlage als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde (vgl. Kap. 3.2). Diese autochthone Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt bzw. Region besonders gut ausprägen.

Die Bodenfeuchte wird mit 60 % angenommen, sodass der Vegetation Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Folglich liegt der Modellrechnung zwar eine hochsommerliche Situation mit thermischem Belastungspotential, aber dem Stand der Technik entsprechend keine absolute Extremsituation zugrunde.

Charakteristisch für solch eine (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung von Flurwinden, d.h. durch den Temperaturunterschied zwischen kühleren Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetriebene Aus-

gleichsströmungen. In Abb. 22 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

Für die Klimasimulation wird die Situation des 21. Juni (Sonnenhöchststand) mit einer 0/8 Bewölkung angenommen. Der Modellierungszeitraum erstreckt sich von 21:00 Uhr bis zum Folgetag um 14:00 Uhr, wobei sich die Auswertung der Ergebnisse auf die Zeitpunkte 04:00 Uhr für Nachtsituation und 14:00 Uhr für den Tag bezieht. Die Starttemperatur der Modellierung beträgt 21 °C in 2 m über Grund. Insofern repräsentiert die Modellrechnung eine meteorologische Situation, die jedes Jahr mehrfach auftritt.

Im Sommer können auch wind- und austauschstärkere Bedingungen mit thermischem Belastungspotential auftreten (z.B. „Schwüle“). Diese können insbesondere in der Nacht teilweise mit noch höheren Temperaturen verbunden sein als Strahlungswetterlagen. Bei diesen allochthonen Wetterlagen entwickeln sich jedoch keine ausgeprägten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland. Folglich bilden sich auch keine Bodeninversionen und damit auch keine größeren Flurwindssysteme bzw. Kaltluftflüsse aus, die durch planerisches Handeln unterstützt oder gestört werden könnten. Insofern besteht keine fachliche Notwendigkeit, diese explizit in einer Stadtklimaanalyse zu berücksichtigen. Gleichwohl ist festzuhalten, dass einstrahlungsreduzierende Maßnahmen auch bei diesen Wetterlagen wirksame Optionen zur Verbesserung des thermischen Wohlbefindens am Tage darstellen.

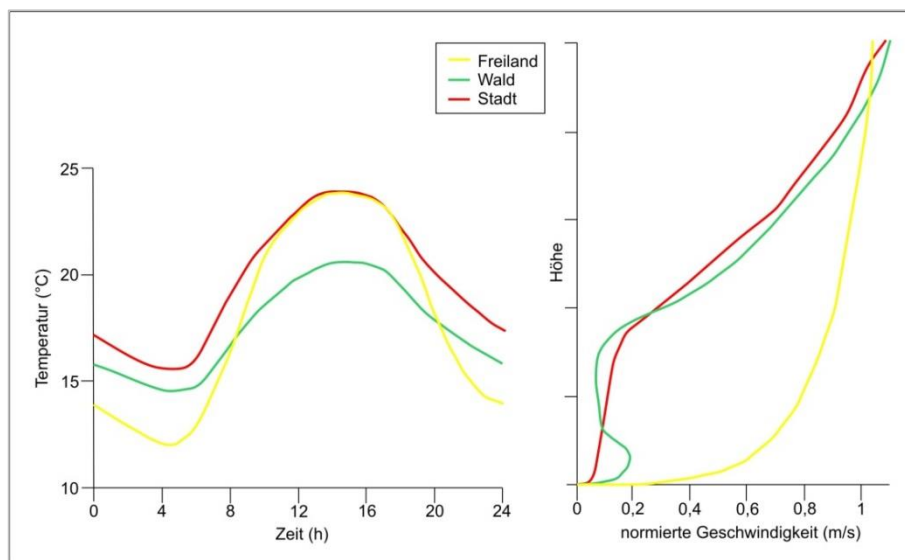


Abb. 22: Schematische Darstellung des Tagesgangs der Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen (Eigene Darstellung nach Groß 1992)

Die für das **Zukunftsszenario** vorgenommenen Modifikationen der meteorologischen Modell-Randbedingungen sind im Vorkapitel beschrieben.



4.4 Eingangsdatenaufbereitung

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die von der Region Hannover zur Verfügung gestellt wurden:

- Geländehöhe
 - ✘ Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2017-2020)
- Landnutzung
 - ✘ ATKIS-Basis-DLM (2015)
 - ✘ Digitale Orthofotos (Stand 2020)
 - ✘ ALKIS (Stand 2020)
- Strukturhöhe
 - ✘ Digitales Geländemodell (DGM) in 1 m Auflösung (Stand 2017-2020)
 - ✘ Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2017-2020)

Die Klimaanalyse kann den Zustand immer nur zu einem bestimmten Zeitpunkt abbilden. Die aktuelle Situation in der Region Hannover wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von 2020 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination verschiedener Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Alle Eingangsdaten wurden jedoch hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthofotos⁸ aus dem Jahr 2020 sowie mit in der Software ESRI ArcGIS integrierten aktuellen Luftbildern verglichen, sodass ein aktueller Stand gewährleistet werden kann.

Das Gebiet der Region Hannover erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 71 km in Ost-West- und ca. 60 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von ca. 2.290 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von knapp 4.520 km² (73 km x 62 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Klima in der Region Hannover berücksichtigt werden können. Außerhalb des Gebiets der Region Hannover wurden auf frei verfügbare Daten wie Corine Land Cover (Copernicus Land Monitoring Service 2018, Version 2020, ALKIS-Daten) sowie das EU-DEM (European Digital Elevation Model v. 1.0, Copernicus Land Monitoring Service 2016) zurückgegriffen. Die Eingangsdaten für das Umland der Region Hannover sind weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen in der Region und ihrem Umland hinreichend genau zu erfassen.

Geländehöhe

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird mit einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 1 m – Auflösung in das für die Modellierung notwendige 25 m-Raster gemittelt wurde (Abb. 23) Die Region Hannover befindet sich im Übergangsbereich des Norddeutschen Tieflands zum im Süden der Region liegenden Niedersächsischen Berglands. Die höchste Erhebung in der Region Hannover ist dabei mit bis zu 405 m Ü.NHN. der dem Calenberger Bergland zugeordnete Deister.

⁸ Luftbildaufnahmen, bei denen der (durch unterschiedliche Geländehöhe bedingte) zentralperspektivische Blickpunktversatz mithilfe eines digitalen Höhenmodells rückgerechnet wurde.

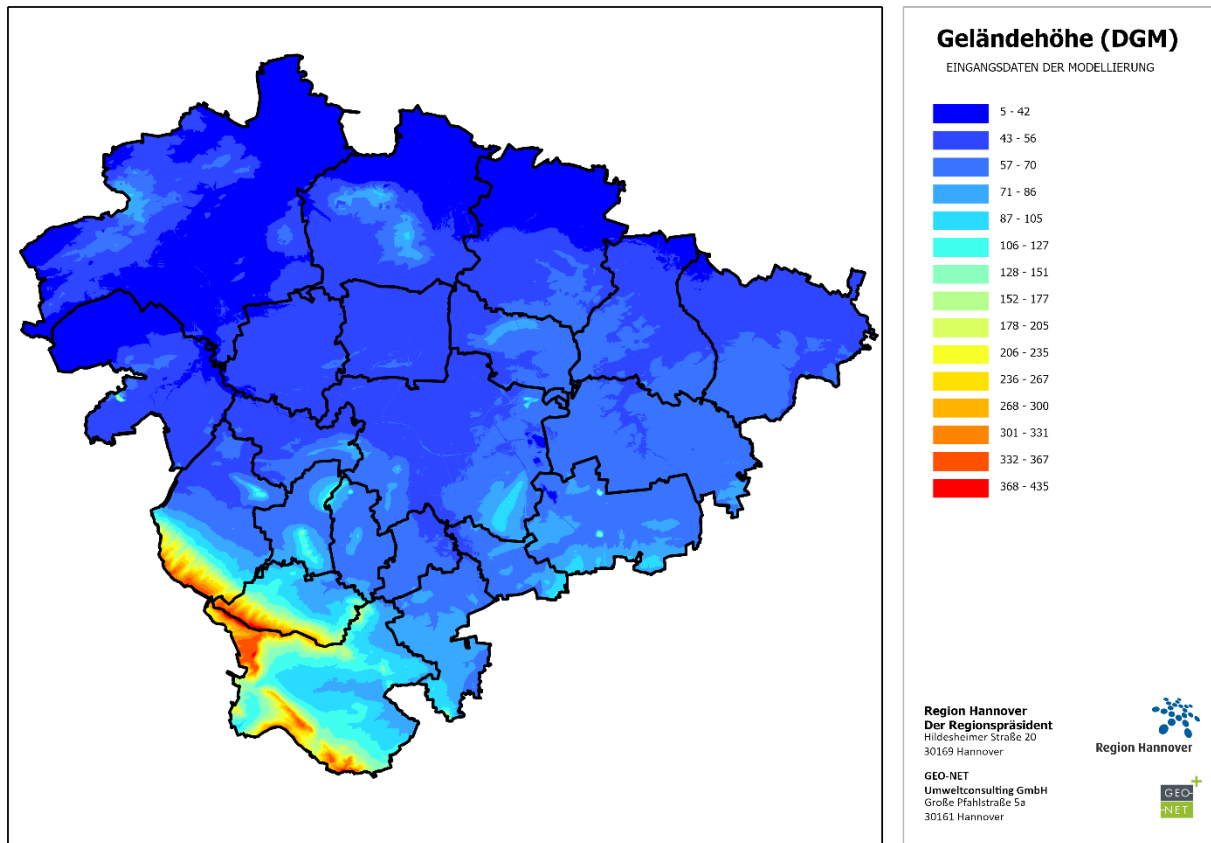


Abb. 23: Digitales Geländemodell für die Region Hannover

Landnutzung

Die möglichst exakte Abbildung der Nutzungsstruktur ist für die Klimamodellierung von zentraler Bedeutung: Nutzungsbedingte Veränderungen des örtlichen Windfeldes und des Wärmehaushaltes sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung eines gegenüber dem Umland veränderten Stadtklimas. Zahlreiche der vielen stadtklimatologisch relevanten Parameter lassen sich daher über die Strukturhöhe, die Bebauungsdichte und den Grad der Oberflächenversiegelung einer Fläche abschätzen. Die Ausprägung dieser Einflussgrößen ist nutzungsabhängig und nimmt bei gleichen Nutzungstypen ähnliche Werte an. Somit ermöglicht die Analyse der Nutzungen im Untersuchungsgebiet eine Abgrenzung von Gebieten ähnlicher stadtstruktureller Ausstattung und damit einhergehender stadtklimatischer Charakteristika. Für die Einordnung dieser Einflussgrößen wurden im vorliegenden Gutachten Nutzungsklassen definiert, die eine unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten sinnvolle Differenzierung der Oberflächenstruktur erlauben (s. Mosimann et al. 1999). Dabei wurde ein vereinfachter 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet (Tab. A 3) dessen Abgrenzung eine Zuweisung des Versiegelungsgrades und der Strukturhöhe auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen erlaubt (Abb. 24).

Die nutzungsspezifische Übertragung der städtebaulichen Entwicklung in die Modellumgebung des Zukunftsszenarios ist in Kap. 4.2 im Rahmen der Szenarien-Entwicklung beschrieben.

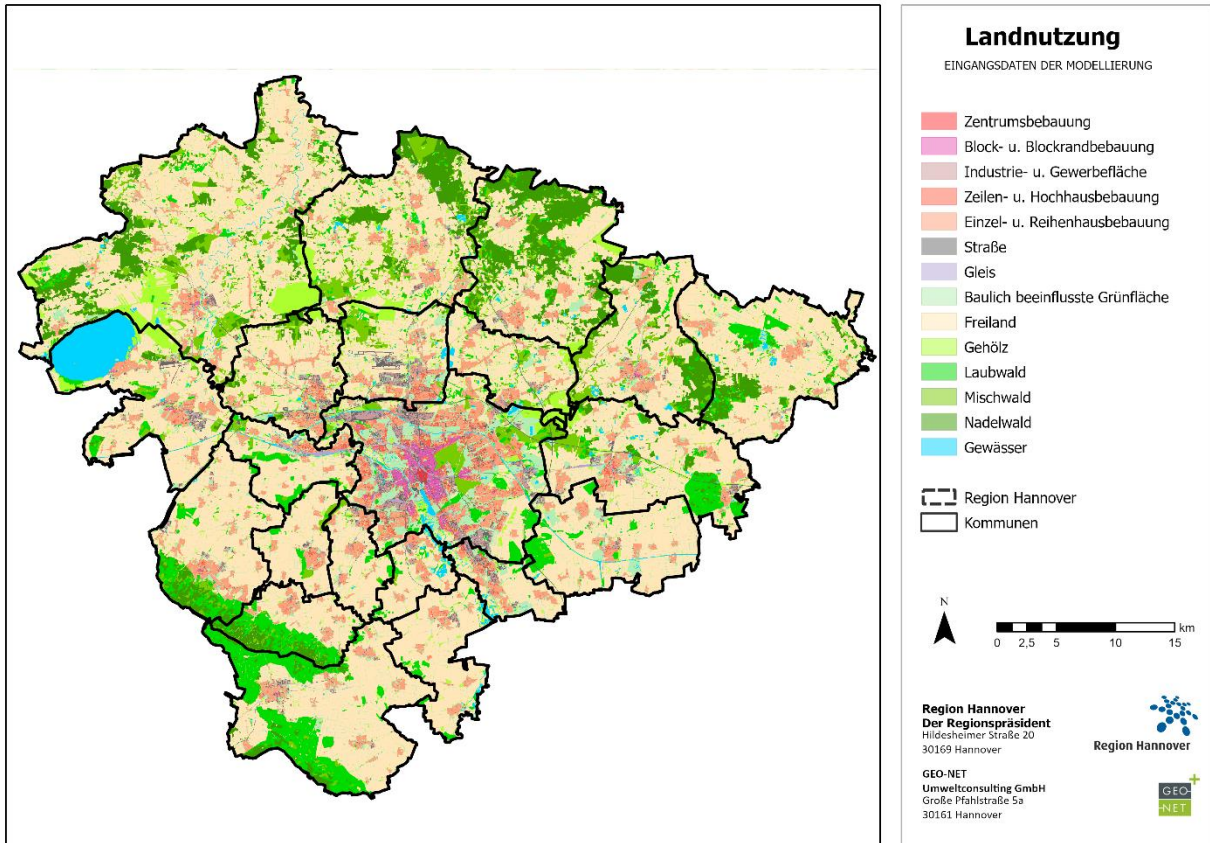
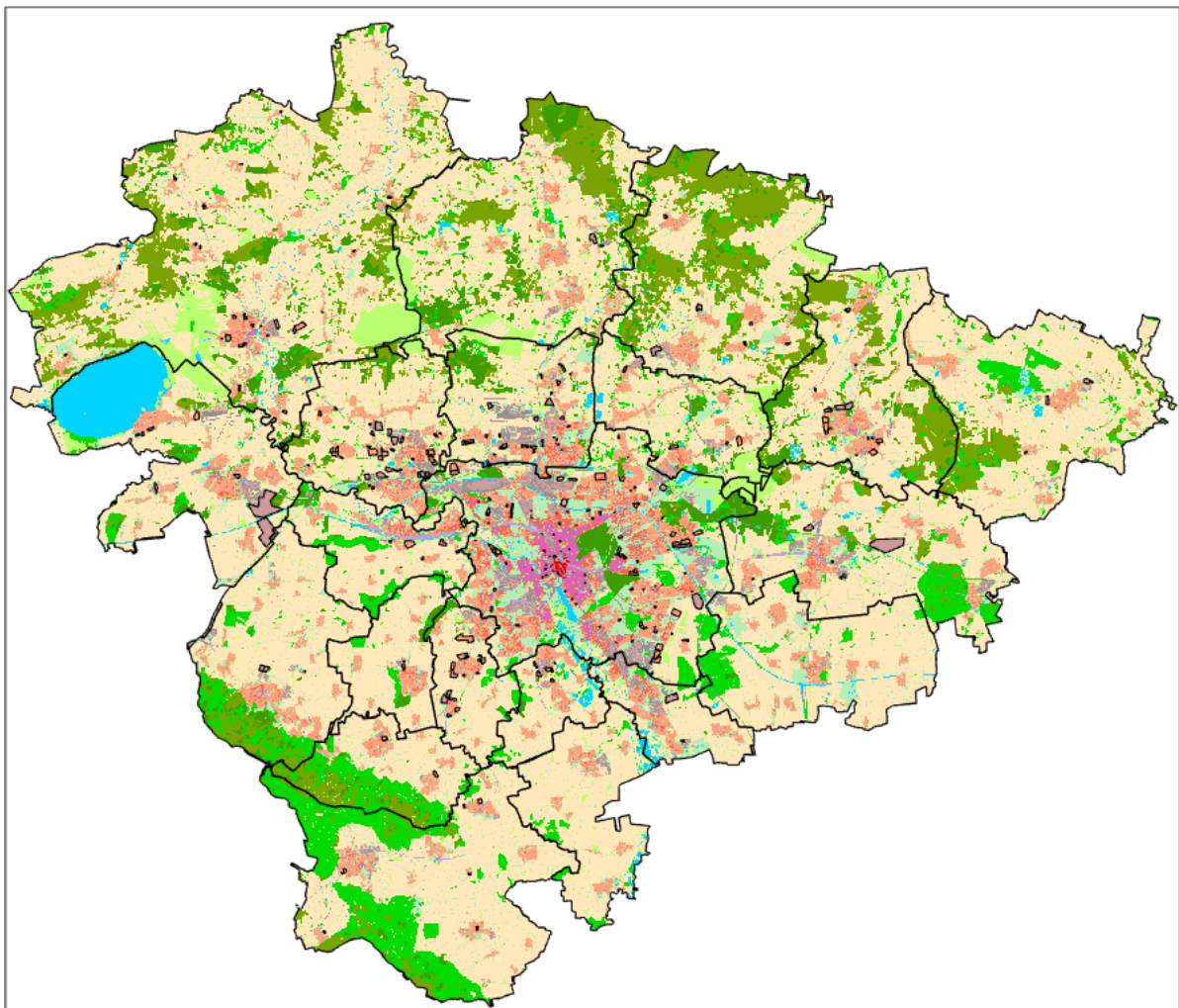


Abb. 24: Aktuelle Landnutzungsklassifizierung für die Region Hannover und städtebauliche Entwicklung im Szenario „Nahe Zukunft“ (unten, schwarz gekennzeichnet)





Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen der Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 25 m zu erzeugen (Schritt 1 und 2 in Abb. 25). Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der einzelnen Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ATKIS-Daten (2020), die auf Basis von digitalen Orthofotos (2020) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockfläche gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen beispielsweise zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4 in Abb. 25).

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

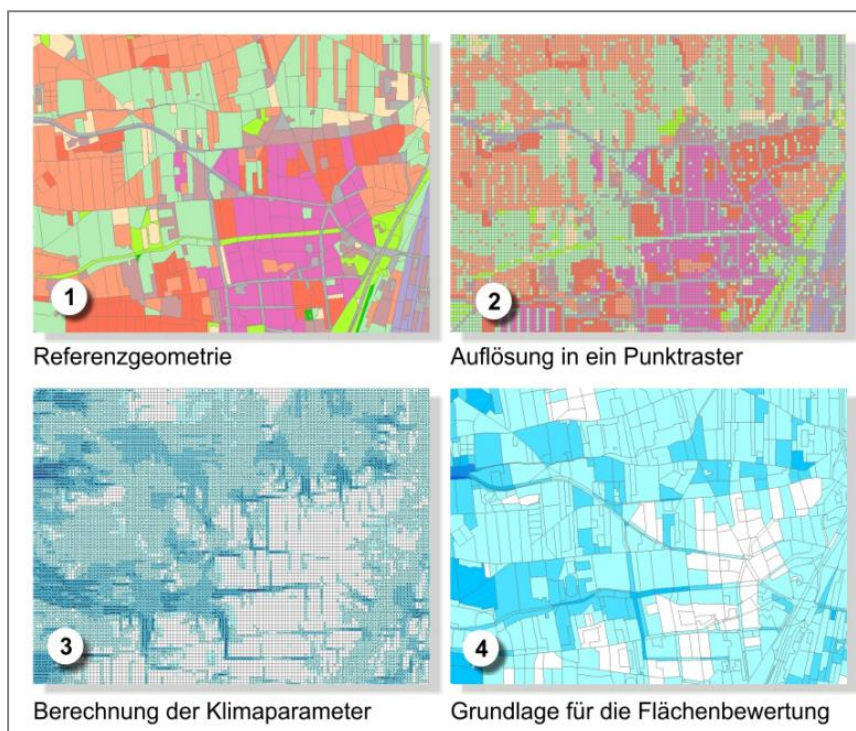


Abb. 25: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



4.5 Modellunsicherheiten und aktuelle Entwicklungstendenzen

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres flächendeckenden, das Prozessgeschehen abbildenden 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 sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dies lediglich 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 auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis in das letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich diejenigen, welche zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. Es erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3783 definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E⁹-Vorhaben ist. Ein Nachweis für eine tatsächliche Verbesserung der Modellergebnisse steht somit noch aus und kann nach heutigem Erkenntnisstand am ehesten vom Modell PALM-4U erwartet werden, dass noch bis Ende 2022 mit BMBF¹⁰-Fördermitteln zu einem marktreifen Produkt reifen soll und an dessen Erprobung GEO-NET im Rahmen der Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ intensiv beteiligt ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „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 Szenarienrechnungen enthält – also z. B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmenzenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 - 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich in den Bewertungskarten aufgrund der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert.

Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der PHK-Basisgeometrie. Insgesamt

⁹ Forschung und Entwicklung

¹⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung



zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der Bewertungskarten zu vernachlässigen sind.

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

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

Bzgl. der Aktualität der Daten wird auf Kapitel 4.4 verwiesen. Dabei gilt grundsätzlich: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Insbesondere in sich dynamisch entwickelnden Städten sollte der Erhebungszeitpunkt nur für einzelne, das Ergebnis nicht nachhaltig beeinflussende Datensätze mehr als 2-3 Jahre in der Vergangenheit liegen. Diese Prämisse ist für die vorliegende Analyse erfüllt. Widersprüchliche und veraltete Daten konnten zudem anhand des Abgleichs mit dem Orthofoto zum Teil korrigiert bzw. aktualisiert werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden. Es empfiehlt sich daher, den Fortschreibungsrhythmus der Klimaanalyse nicht an ein starres zeitliches Korsett, sondern an die Aktualisierung zentraler Eingangsdaten durch Dritte (insbesondere den Befliegungsturnus des Landes Niedersachsen und die daraus abgeleiteten Produkte wie DOM, DGM und CIR-Luftbilder) zu koppeln. In den letzten 10 Jahren hat die fernerkundliche Erhebungsqualität noch einmal deutlich zugenommen. Die Aufnahmen aus Befliegungen haben heute eine räumliche Genauigkeit von wenigen Zentimetern, sodass sich in der vorliegenden Analyse allenfalls noch kleinere Unsicherheiten aus sichttoten Räumen (z.B. in Gebäudeschatten) ergeben. Schon mit der nächsten Generation (sog. TrueDOP) wird sich aber auch diese Unsicherheitsquelle auflösen.

Sämtliche Eingangsdaten wurden in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 625 m² repräsentiert. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass mehrere verschiedene Strukturtypen 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.

Beispielsweise werden Gebäude und einzelne Bäume aufgrund der Rasterauflösung von 25 m nicht explizit aufgelöst, sondern gehen entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle lediglich über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. In Bezug auf die Gebäude werden der jeweiligen Nutzungsklasse weiterhin mittlere Bauvolumina und Versiegelungsgrade zugeordnet. Aufgrund dessen sind kleinräumigere Analysen der Klimaparameter, beispielsweise für Straßenräume, kaum sinnvoll möglich. Daher empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten. Zusammenfassend kann also 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. Nichtsdestotrotz wird es eine Aufgabe der Stadtklimatologie in den kommenden Jahren sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern. Das größte Potential besteht in diesem Zusammenhang in der Optimierung der Berücksichtigung von Gebäude- und Bodeneigenschaften.



5. Modellergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für die Bestandssituation beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 25 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 3.2). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet¹¹.

5.1 Nächtliches Temperaturfeld

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

Ergebnisse

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur einen Minimalwert von ca. 10 °C über siedlungsfernen Freiflächen und Maximalwerten bis knapp über 21 °C in hoch versiegelten Bereichen eine Spannweite von mehr als 11 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,7 °C.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. Aufgrund seiner Ausdehnung fällt die Überwärmung in Städten wie Hannover deutlich höher aus, als dies in kleineren Städten der Fall ist. Die höchsten nächtlichen Belastungen (über 21 °C) treten vorwiegend in hoch versiegelten Gewerbegebieten und Stadtzentren auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum finden sich in stark durchgrüntem Flächen oder in aufgelockerter Bebauung am Siedlungsrand (Abb. 26).

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte bis 15 °C auf. In Wäldern bzw. dicht bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte um 16 °C – 17 °C erreicht werden. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsraum bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen

¹¹ Um die Karten anschaulicher zu gestalten, werden die Ergebnisse nicht rasterzellengenau dargestellt, sondern an den Übergängen der Rasterzellen geglättet (vereinfacht ausgedrückt: gemittelt). Dies geschieht automatisiert in der GIS-Software über das mathematische Verfahren der bilinearen Interpolation.



eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser¹² sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über größeren Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen sogar höher als in der Umgebung sein und deren Abkühlung verringern können (z.B. das Steinhuder Meer). Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld.

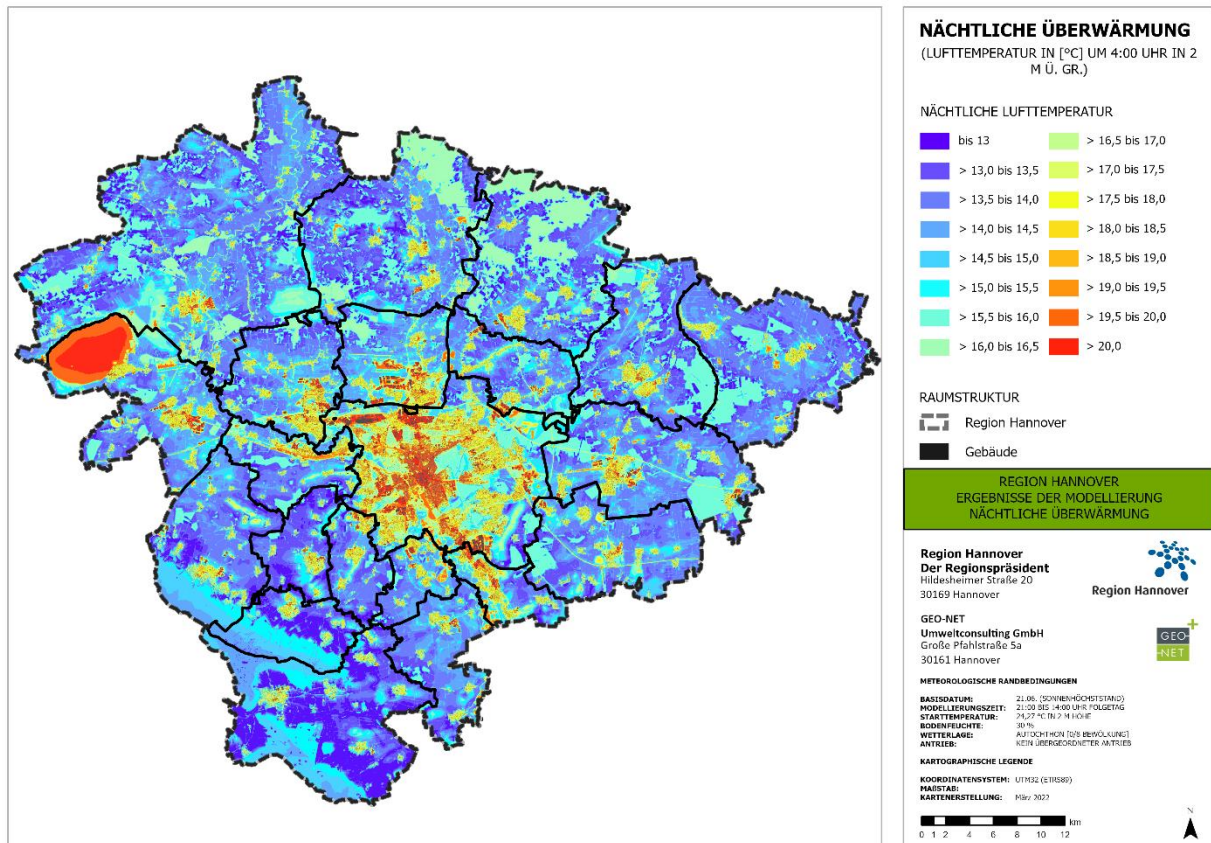


Abb. 26: Nächtliche Überwärmung in der Region Hannover (Bestandssituation)

5.2 Kaltluftströmungsfeld

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

¹² Thermische Energie wird im Wasser gespeichert.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d. h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünfläche ein umfassender Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 27).

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

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

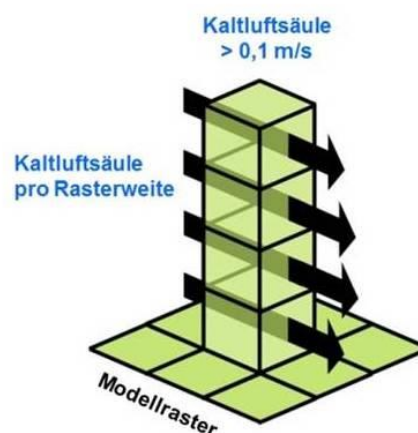


Abb. 27: Prinzipische Skizze Kaltluftvolumenstrom

Ergebnisse

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine große Variabilität und reicht von sehr gering bis zu maximalen Werten von ca. $206 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert in der Region Hannover liegt bei $12,8 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Die höchsten Kaltluftvolumenströme treten als Kaltluftabflüsse aus den Hangbereichen beispielsweise des Deisters auf (im südlichen Bereich der Region) (Abb. 28). Aber auch geringere Erhebungen wie der Brelinger Berg im Kreis Wedemark oder der Benthel Berg (westsüdwestlich der Stadt Hannover) treten mit einer höheren Kaltluftvolumenstromdichte in den Hangbereichen hervor. Auch über den Freiflächen entsteht Kaltluft, die aufgrund des Geländes oder aufgrund des Temperaturgradienten Richtung Siedlungsraum abfließt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem solche, auf das Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse.



Die Durchströmbarkeit des Siedlungsraumes wird begünstigt durch das Relief und die eine aufgelockerte Bebauungsstruktur. Letztere ermöglicht das Einströmen der Kaltluft am Siedlungsrand. Innerhalb der Bebauung nimmt die Kaltluftströmung ab und erreicht beispielsweise im Windschatten der höher versiegelten Gewerbegebiete und Stadtzentren die geringsten Werte. Über Waldgebieten können ebenfalls geringe Kaltluftvolumenströme auftreten. Dennoch stellen diese Flächen auch in der Nacht klimatische Ausgleichsleistungen bereit (etwa, weil sie sich über den Tag weniger stark aufheizen).

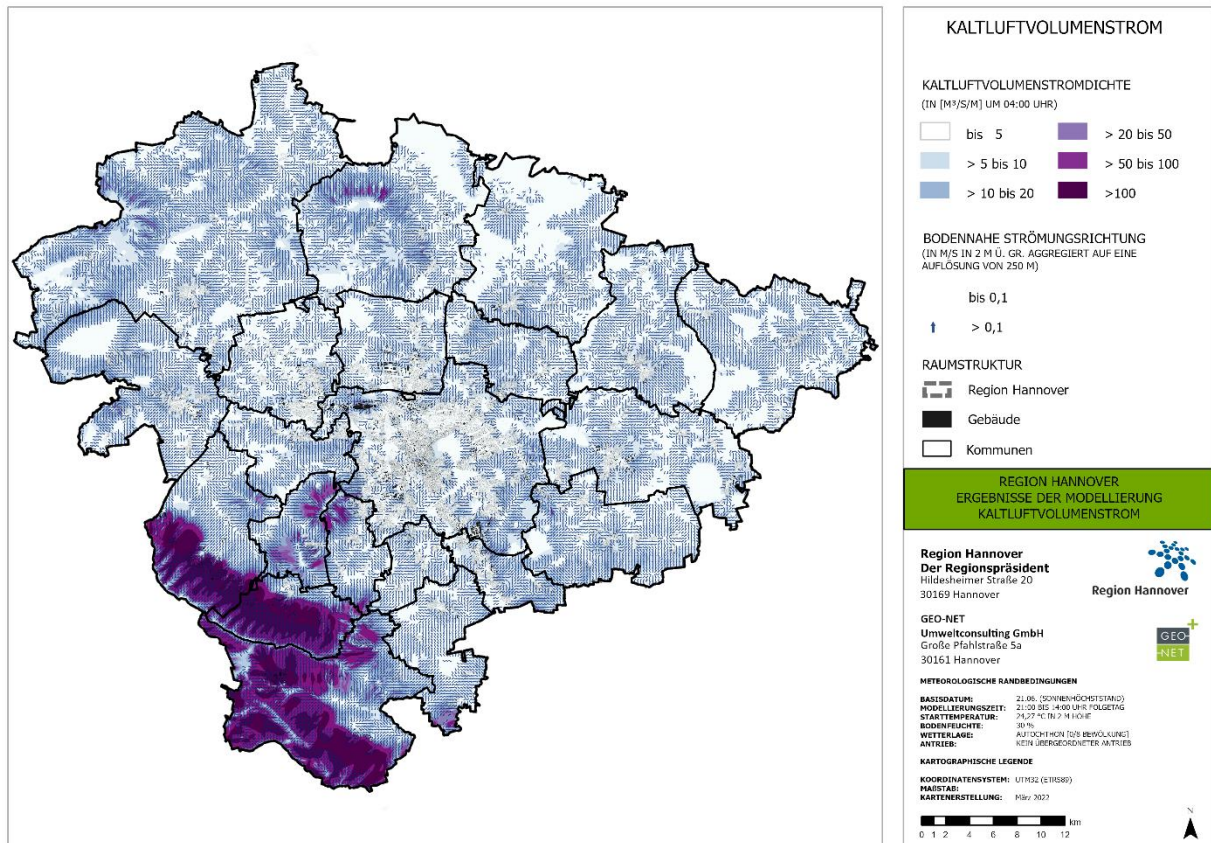


Abb. 28: Ausprägungen des Kaltluftvolumenstroms in der Region Hannover (Bestandssituation)

Abb. 29 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie die Windrichtung (anhand einer Pfeilsignatur¹³) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Die potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen.

Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeldes folgt größtenteils dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. In der Region Hannover sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 3,8 m/s im Bereich der genannten Ausgleichsräume vorzufinden (Kaltluftabflüsse beispielsweise aus den höher gelegenen Waldgebieten des Deisters aber auch höhere Windgeschwindigkeiten im Kontext des Benther Bergs oder Brelinger Bergs). In zwei Metern über Grund tritt allerdings die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass vereinzelte Bereiche des Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren.

Innerstädtische Grünflächen können lokal für Entlastung sorgen, indem die umliegende Bebauung von deren Kaltluftproduktion und kleinräumigen Strömungen profitiert. Diese sind in begrünten Gärten und Innenhöfen zu erkennen, insbesondere wenn diese im Umfeld stark überwärmter (Gewerbe-) Flächen liegen.

¹³ Die Pfeile wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in einer geringen räumlichen Auflösung abgebildet.



Weiterhin sind im innerstädtischen Kontext die kühlende Wirkung der Parks (beispielsweise Stadtwald Eilenriede in Hannover) auf die angrenzenden Strukturen hervorzuheben. Durch die Kaltluftproduktion entstehen dort lokale Strömungen, sogenannte Parkwinde, die sich positiv auf die thermische Belastungssituation in der anrainenden Siedlungsstruktur auswirkt.

Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Straßenraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann - unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport (insbesondere in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).

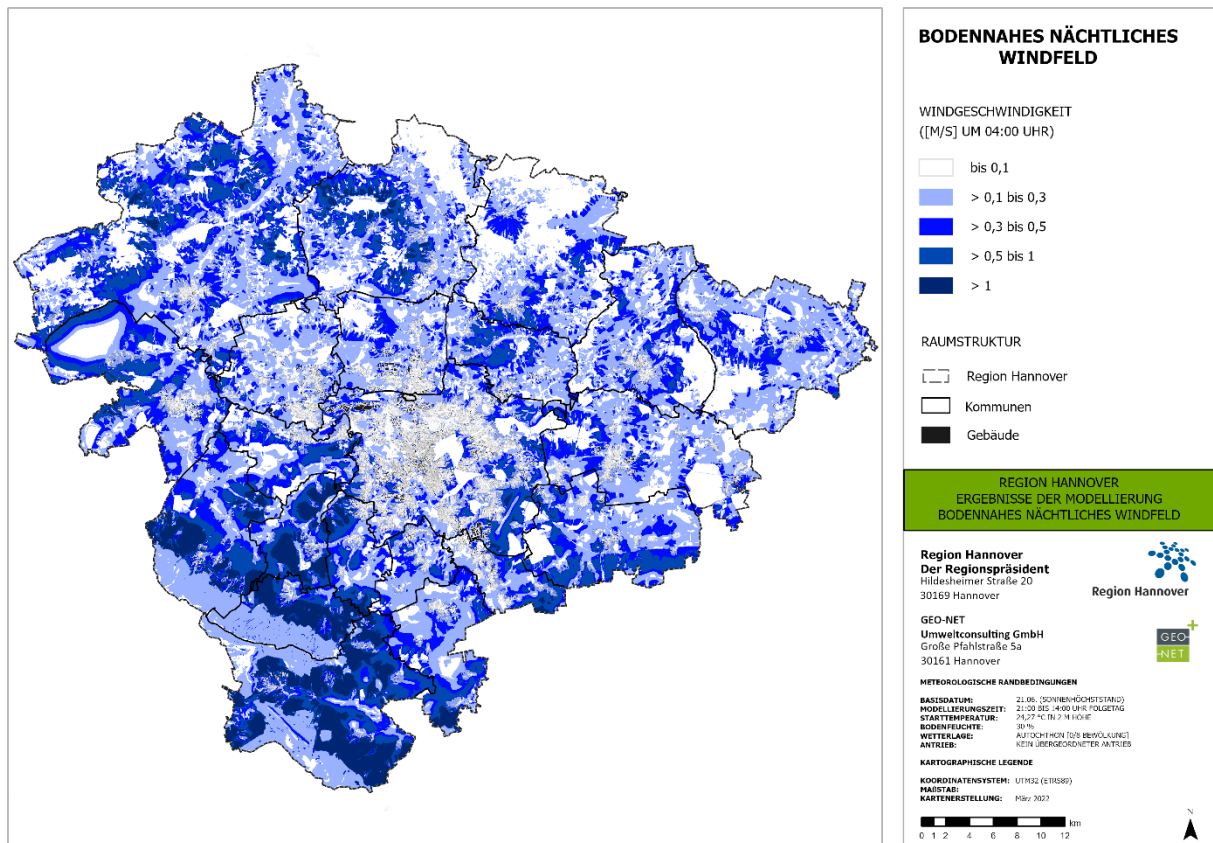


Abb. 29: Bodennahes nächtliches Windfeld in der Region Hannover (Bestandssituation)



5.3 Thermische Belastung am Tage

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit der Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹⁴.

In dem vorliegenden Gutachten wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis und Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können¹⁵. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einem „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes, bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C;

Tab. A 4 im Anhang).

Bei der Interpretation des PET-Feldes aus mesoskaligen Modellrechnungen müssen einige Einschränkungen beachtet werden: Beispielsweise werden Gebäude und einzelne Bäume aufgrund der Rasterauflösung von 25 m nicht explizit aufgelöst, sondern gehen entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle lediglich über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. Da die PET aber ganz wesentlich von der Sonneneinstrahlung (und damit auch vom Schattenwurf) abhängt, sind kleinräumigere Analysen der Wärmebelastung am Tage, beispielsweise für Straßenräume, kaum sinnvoll möglich.

Ergebnisse

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich bewaldete Gebiete mit den geringsten PET-Werten von großflächig 23 °C – 26 °C ab (*schwache Wärmebelastung*). Da Bäume einen großen Teil der Strahlung bereits im Kronen- und Stammraum absorbieren, bewirken sie bei starken Einstrahlungsintensitäten eine erhebliche Abkühlung der Oberflächen- und Lufttemperatur. Stadtnahe Wälder können daher als bioklimatische Erholungsräume dienen und am Tage mitunter sogar Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen (z. B. Stadtwald Eilenriede; Abb. 30).

Auch Gewässer weisen vergleichsweise geringe PET-Werte auf und wirken tagsüber kühlend auf ihr nahes Umfeld (beispielsweise das Steinhuder Meer oder Fließgewässer wie die Leine).

Besonders hohe Belastungen weisen Flächen mit einer ungehinderten Einstrahlung auf: Neben Straßen, Plätzen oder Gleisanlagen, bei denen versiegelungsbedingt zusätzlich die Evapotranspiration eingeschränkt

¹⁴ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“, vgl. Jendritzky 1990).

¹⁵ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universal Thermal Climate Index).



ist, können dies auch landwirtschaftliche Nutzflächen sein. Zu beobachten ist eine entsprechende Temperaturentwicklung über landwirtschaftlich genutzten Flächen beispielsweise im Deistervorland. Hier kommt es aufgrund der sonnenexponierten Lage zu einer teils extremen Hitzebelastung am Tag. Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in der Zentrumsbebauung weniger stark aus, da die dichte und zumeist hohe Bebauung für eine gewisse Verschattung sorgt. Innerhalb der Stadtgebiete stellen auch Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge mit ihrer vergleichsweise geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar.

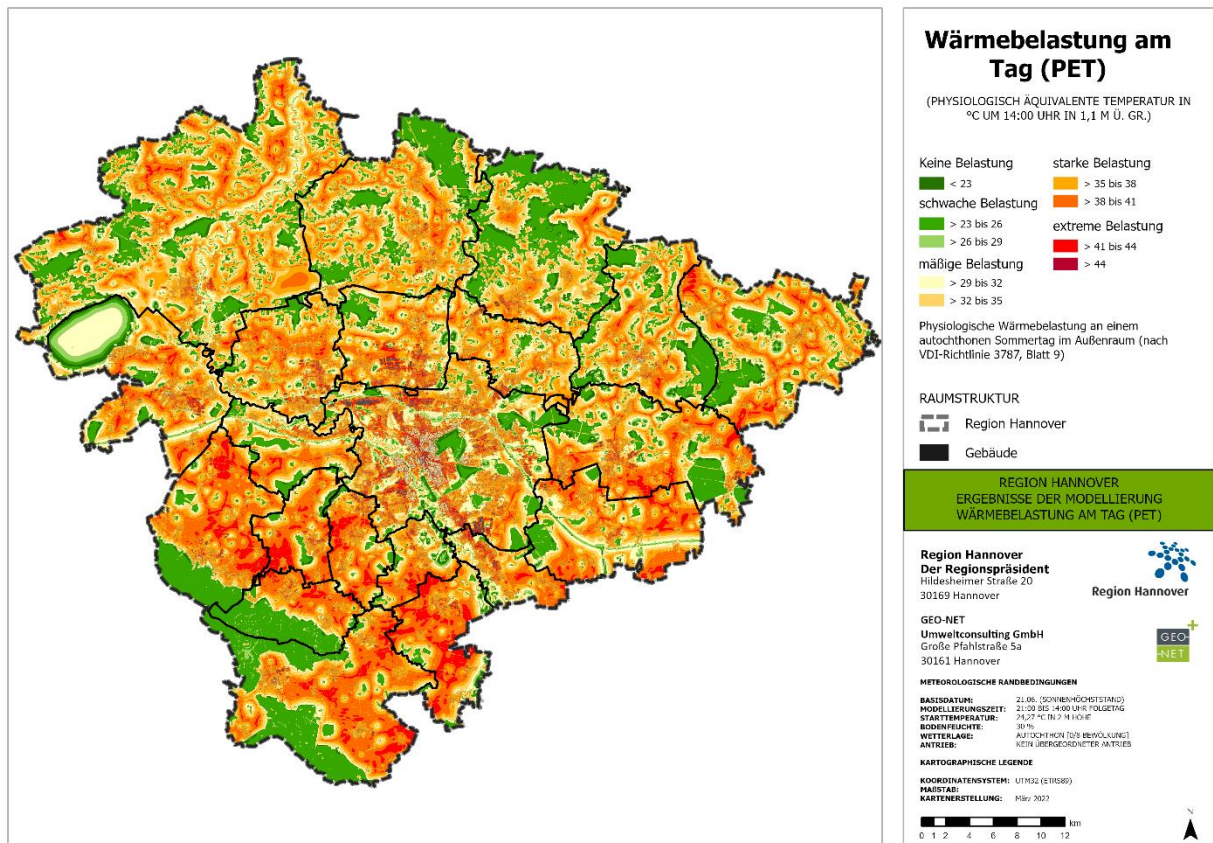


Abb. 30: Thermische Belastung am Tag in der Region Hannover (Bestandssituation)



6. Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14:00 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter (vgl. Kap. 5.3), sodass die Karte der PET als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden kann (Abb. 30).

In der Klimaanalysekarte sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt (Abb. 31). Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen die nächtliche Überwärmung im Vordergrund (Lufttemperatur in 2 m ü.Gr.). Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert, sodass kleinräumige Windsysteme aus der Karte nicht ersichtlich werden (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Straßenabschnitten). Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in der Region Hannover eine wichtige Rolle spielen: Kaltluftentstehungsgebiete, Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüsse.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftproduktion, unabhängig davon, ob die produzierte Kaltluft den Siedlungsraum erreicht oder nicht. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mindestens $22,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ Kaltluft produzieren (bezogen auf 04:00 Uhr nachts). Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander verbinden und einen elementaren Bestandteil des Luftaustausches darstellen. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, sollten als Faustregel jedoch mindestens 50 m breit sein (Mayer et al. 1994). Insbesondere entlang von Grünachsen dringt Kaltluft in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Kaltluftabflüsse treten flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf. Aufgrund der relativ höheren Dichte von Kaltluft setzt sich diese, 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.

Zu den bedeutenden Kaltluftstrukturen in der Region Hannover zählen unter anderem die Kaltluftabflüsse. Diese treten vor allem im Kontext der Hangbereiche, wie beispielsweise im Süden des Gebiets in Verbindung mit dem Deister, aber auch dem Benter Berg oder dem Brelinger Berg in großer Mächtigkeit auf.

Wichtige Leitbahnen in der Region sind beispielsweise entlang der Leine-Aue im Stadtgebiet Hannover oder entlang der Fösse zwischen den Hannoveraner Stadtteilen Badenstedt und Davenstedt, sowie in Hannover Vahrenheide verortet.

Für die Kaltluftversorgung der Siedlungsbereiche spielen auch kleinräumigere Windsysteme eine wichtige Rolle, wie unter anderem die Kalt- und Frischluftströmungen entlang der Leine in Neustadt.

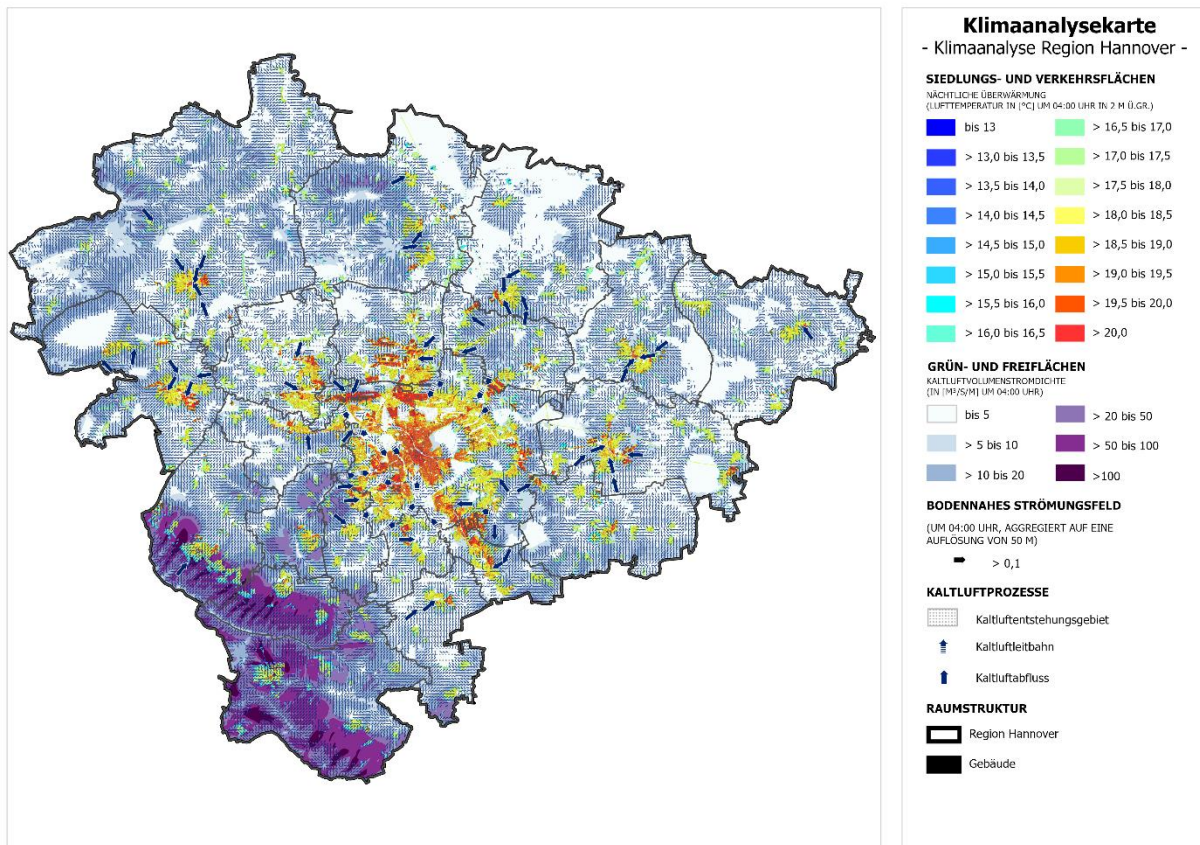


Abb. 31: Klimaanalysekarte Region Hannover (Bestandssituation)

7. Bewertungskarten

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Bewertung in den Bewertungskarten fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurde eine gemeinsame Planungshinweiskarte für die Nacht- und Tagsituation erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Siedlungsraum (Wirkraum) sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008a, VDI 2015). Die Bewertung beruht auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

Ausgehend von ihrer Bewertung wurden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

7.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation)

Für die Bewertung meteorologischer Größen bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie *Hoch* und *Niedrig* oder *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale Wertenniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a). Erstrebenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um diese Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine z-Transformation standardisiert. Das Ergebnis der z-Transformation sind sog. "z-Werte", die die Standardabweichungen vom Mittelwert darstellen. Ein z-Wert von 0 entspricht genau dem Mittelwert, ein z-Wert von 1 bedeutet, dass der Wert eine Standardabweichung über dem Mittelwert liegt (Abb. 32).

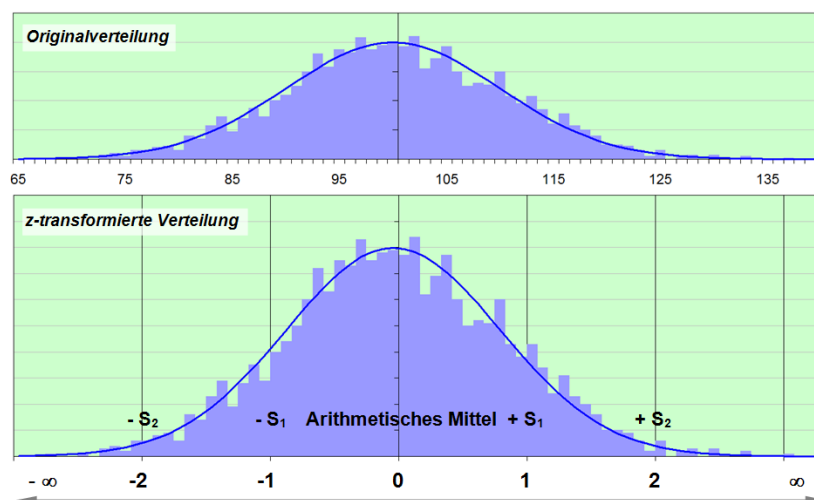


Abb. 32: z-Transformation zur Standardisierung der vergleichenden Bewertung von Parametern



7.2 Bewertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenflächen (Wirkraum)

Die Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen sowie der Straßenraum stellen den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Unter Gewerbeflächen werden hier unbewohnte Flächen verstanden (bzw. dominiert die gewerbliche Nutzung der Fläche), d.h. neben „klassischen“ Industrie- und Gewerbegebieten zählen auch Schulen zu dieser Kategorie. Für Autobahnen und Gleisflächen wird keine Bewertung vorgenommen, da sie keinen Aufenthaltsraum darstellen und i.d.R. nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Wohngebieten liegen bzw. baulich von diesen getrennt sind. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation im Wirkungsraum geschildert.

BEWERTUNG DER NACHTSITUATION

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt, da ein Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, S. 25). Daher sei in den Sommermonaten eine möglichst starke Abkühlung der Luft im Umfeld der Schlafräume (außen) anzustreben. Diesen Gedanken greift das Climate Service Center Germany mit dem „Schlecht-Schlaf-Index“ auf, der über Nächte, in denen die Temperatur im Außenraum 18 °C nicht unterschreitet, definiert ist (GERICS 2019). Sinkt die nächtliche Temperatur nicht unter 20 °C wird von einer Tropennacht gesprochen, die gemeinhin als besonders belastend gilt. Gesetzliche Grenzwerte oder verbindliche Bewertungsskalen zur thermischen Belastung gibt es jedoch weder für den Außenraum noch für den Innenraum. Für die gemeinsame Planungshinweiskarte erfolgte die räumliche Bewertung anhand der nächtlichen Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von *sehr günstig* bis *sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 8). Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, jedoch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung

Tab. 8: Einordnung der nächtlichen thermischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbebereich mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	Lufttemperatur in der Nacht [°C]	Qualitative Einordnung
Bis -1	Bis 16,5	1 = Sehr günstig
> -1 bis 0	> 16,5 bis 17,7	2 = Günstig
> 0 bis 0,5	> 17,7 bis 18,3	3 = Mittel
> 0,5 bis 1	> 18,3 bis 18,9	4 = Ungünstig
> 1	> 18,9 bis 21,0	5 = Sehr ungünstig

Nicht bewertungsrelevante Parameter

Das Wohlbefinden und die Schlafqualität im Siedlungsraum hängen, wie soeben erläutert, wesentlich von der Außentemperatur im Wohnumfeld ab. Zusätzlich spielt die Durchlüftung des Siedlungsraums eine Rolle. Im besten Falle kann herantransportierte Kaltluft die Überwärmung senken und zu günstigeren Bedingungen beitragen. Doch handelt es sich beim Begriff „Kaltluft“ um eine relative Angabe: Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des



Kaltluftvolumens gibt es bisher nicht (VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5¹⁶). Kaltluft im Zentrum ist also in der Regel wärmer als Kaltluft in aufgelockerten Siedlungsrandbereichen. Allerdings trägt der rein dynamische Aspekt der Luftbewegung – unabhängig davon, ob die Außentemperatur dadurch weiter gesenkt wird – über die Fensterlüftung zum Luftaustausch der tagsüber aufgeheizten Innenräume bei. Daher ist eine nächtliche Strömung im Wohnumfeld bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen auch ohne eine zusätzliche Kühlleistung im Außenbereich als erhaltenswert zu betrachten.

Aus diesem Grund werden Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen mit einer hohen Durchlüftung als Kaltluftereinwirkbereich gekennzeichnet (überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 11,9 \text{ m}^3(\text{s} \cdot \text{m})$ oder bodennahe Windgeschwindigkeit $\geq 0,3 \text{ m/s}$). Der Kaltluftereinwirkbereich wird in der Bewertungskarte Nacht über eine Signatur hervorgehoben, fließt jedoch nicht in die bioklimatische Bewertung der Siedlungsflächen ein. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche oder Straße als Kaltluftereinwirkbereich ausgewiesen (vgl. Abb. 34).

BEWERTUNG DER TAGSITUATION

Zur Erstellung der Bewertungskarte Aufenthaltsqualität am Tag wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 5.3). Die Bewertung der thermischen Belastung in Wohnsiedlungs- und Gewerbeflächen in der Region Hannover wurde mittels einer z-Transformation in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tab. 9). Die Klassengrenzen spiegeln die lokalen Verhältnisse in der Region während der betrachteten autochthonen Wetterlage wider. Folglich stimmen sie nicht exakt mit den physiologischen Belastungsstufen der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 überein, zeigen jedoch einen deutlichen Zusammenhang (vgl.

Tab. A 4 im Anhang).

Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität außerhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht bestimmt werden.

Tab. 9: Einordnung der Wärmebelastung am Tag im Siedlungs-, Gewerbe- und Straßenraum mittels z-Transformation

Mittlerer z-Wert	PET [°C]	Qualitative Einordnung
Bis -1	Bis 34,5	1 = Sehr günstig
> -1 bis 0	> 34,5 bis 36,9	2 = Günstig
> 0 bis 0,5	> 36,9 bis 38,2	3 = Mittel
> 0,5 bis 1	> 38,2 bis 39,4	4 = Ungünstig
> 1	> 39,4 bis 44,5	5 = Sehr ungünstig

7.3 Bewertung von Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)

In der Planungshinweiskarte steht die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es im Hinblick auf planerische Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Stadtgebiet. Der während einer autochthonen Sommernacht über Grünflächen entstehenden Kaltluft wird nur dann eine planerische Relevanz zugesprochen, wenn sie in Zusammenhang mit Siedlungsräumen steht, die von ihrer Ausgleichsleistung profitieren. Erfüllt eine Grünfläche dagegen

¹⁶ Die Aktualisierung der VDI-Richtlinien insbes. zur physikalischen Einordnung des Begriffs Kaltluft wird für Mitte 2023 erwartet.



für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellt keinen Ausgleichsraum dar, ist ihre klimaökologische Bedeutung geringer einzustufen. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt bewertet und in vier Stufen *von geringe bis sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt.

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüssen stehende Grünflächen eine *sehr hohe Bedeutung*, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Kernbereich), und eine *hohe Bedeutung*, 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. Eine Grünfläche, die eine angrenzende Siedlungsfläche mit hoher thermischer Belastung mit Kaltluft versorgt, bekommt beispielsweise die höchste bioklimatische Bedeutung zugewiesen. Die folgende Abbildung (Abb. 33) zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Hohe Kaltluftfunktion: Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 11,9 \text{ m}^3(\text{s} \cdot \text{m})$, überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 12,0 \text{ m}^3(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ oder überdurchschnittlich hohe bodennahe Windgeschwindigkeit $0,3 \text{ m/s}$
- Nahbereich zu Siedlungsräumen: Entfernung bis 300 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 600 m Luftlinie

Als Lesehilfe des Bewertungsschlüssels kann folgendes Beispiel dienen: Für eine Grünfläche, die nicht Teil einer Kaltluftleitbahn bzw. eines Kaltluftabflusses ist und im Nahbereich von Wohngebieten mit hoher Belastung liegt, gilt folgende Zuordnung:

- Die Fläche weist eine hohe Kaltluftfunktion auf → sie besitzt eine *sehr hohe bioklimatische Bedeutung*
- Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf → sie besitzt eine *hohe bioklimatische Bedeutung*

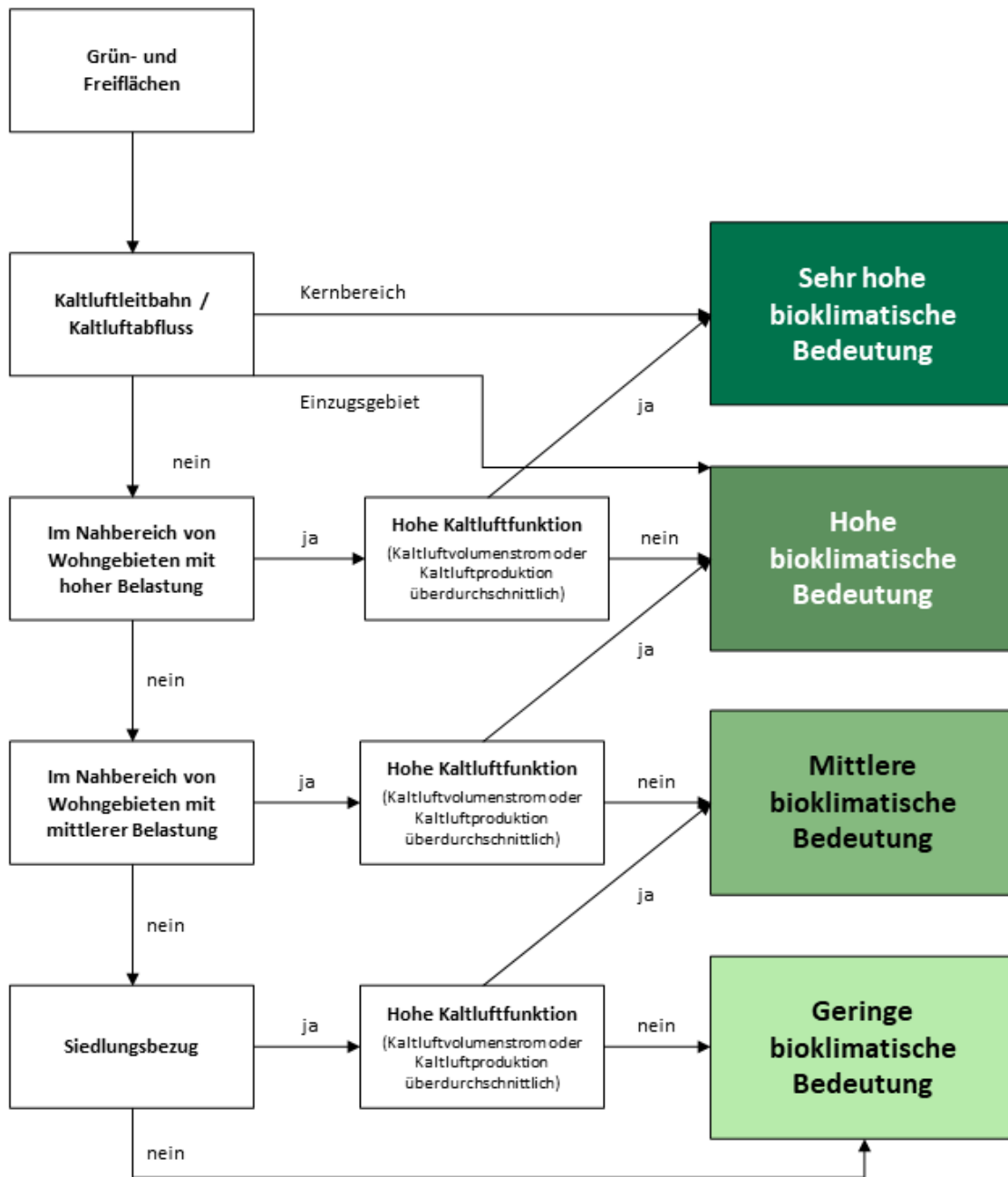


Abb. 33: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation



Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen allein auf der modellierten Wärmebelastung (PET; Tab. 10). Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Tab. 10: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen in der Tagsituation

PET [°C]	Qualitative Einordnung
PET ≤ 26,8 °C	Sehr hohe bioklimatische Bedeutung
26,8 °C < PET ≤ 29,8 °C	Hohe bioklimatische Bedeutung
29,8 °C < PET ≤ 35,7 °C	Mittlere bioklimatische Bedeutung
35,7 °C < PET ≤ 38,7 °C	Geringe bioklimatische Bedeutung
38,7 °C < PET ≤ 42,7 °C	Sehr geringe bioklimatische Bedeutung

7.4 Ergebnisse der Bewertungskarten

Die Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Klimaanalyse der Region Hannover und erlauben Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist die Inwertsetzung der Ergebnisse, z.B. in Form der beiden Bewertungskarten, jeweils für die Tag- und die Nachtsituation. In diesen wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als „Wirkungsraum“ sowie der Grünflächen als „Ausgleichsraum“ hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation vorgenommen. Die Bewertung beruht auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Bewertungskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

BEWERTUNGSKARTE NACHT

In der Bewertungskarte „Nacht“ orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt der Siedlungsräume, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen bzw. den für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden (Abb. 34), in denen möglichst keine Strömungshindernisse geschaffen bzw. bei geplanten baulichen Entwicklungen unbedingt auf den Erhalt der Leitbahn-Funktion hingewirkt werden sollte. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur ausgerichtet, (siedlungsferne) Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind von geringerer Bedeutung. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung jedoch ggf. neu vorgenommen werden.

Neben den Kaltluftleitbahnen ist in der Karte das Strömungsfeld in Pfeilsignatur dargestellt, um das Strömungssystem außerhalb der Siedlungsräume abzubilden und damit mögliche klimaökologische Konflikte bei etwaigen größeren Vorhaben erkennen zu können.

Die Bewertung des Siedlungsraums basiert auf der nächtlichen Überwärmung, sodass die hochversiegelten Gewerbegebiete die ungünstigsten Bedingungen aufweisen. Der Fokus in der Bewertungskarte Nacht liegt jedoch auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit der Wohnbebauung. In den dichter bebauten Bereichen der Siedlungsräume in der Region Hannover treten teilweise ungünstige bioklimatische Bedingungen auf, zu deren Verbesserung proaktiv Maßnahmen angegangen werden sollten. In den Ortsrandlagen oder Siedlungsräumen von geringer Ausdehnung herrscht vorwiegend ein mittleres oder günstiges Belastungsniveau (aufgrund aufgelockerter Strukturen und guter Durchlüftung). Proaktive Maßnahmen zur Verbesserung sind daher nicht vorrangig umzusetzen, sollten aber bei sich bietender Gelegenheit geprüft werden (beispielsweise bei Straßensanierungen). Zudem sollte bei Nachverdichtungen auf die begleitende



Umsetzung optimierender Maßnahmen hingewirkt werden (z.B. Verschattungsmaßnahmen für Gebäudefassaden).

Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund (aufgrund dessen wird von einer Darstellung des Straßenraums in der Bewertungskarte Nacht abgesehen), jedoch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Infolge des Klimawandels ist in der Region Hannover zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrt auftretenden Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorherrscht.

Tab. 11: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsfläche Bewertungskarte Nacht

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]	
	Wohnen	Gewerbe
1 = Sehr günstig	14,8	2,1
2 = Günstig	42,5	2,9
3 = Mittel	13,4	1,9
4 = Ungünstig	4,8	3,0
5 = Sehr ungünstig	4,5	10,3

Tab. 12: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Freiflächen Bewertungskarte Nacht

Bewertung der Freiflächen	Flächenanteil [%]
1 = Sehr hoch	0,6
2 = Hoch	19,7
3 = Mittel	14,5
4 = Gering	16,3
5 = Sehr gering	49,0

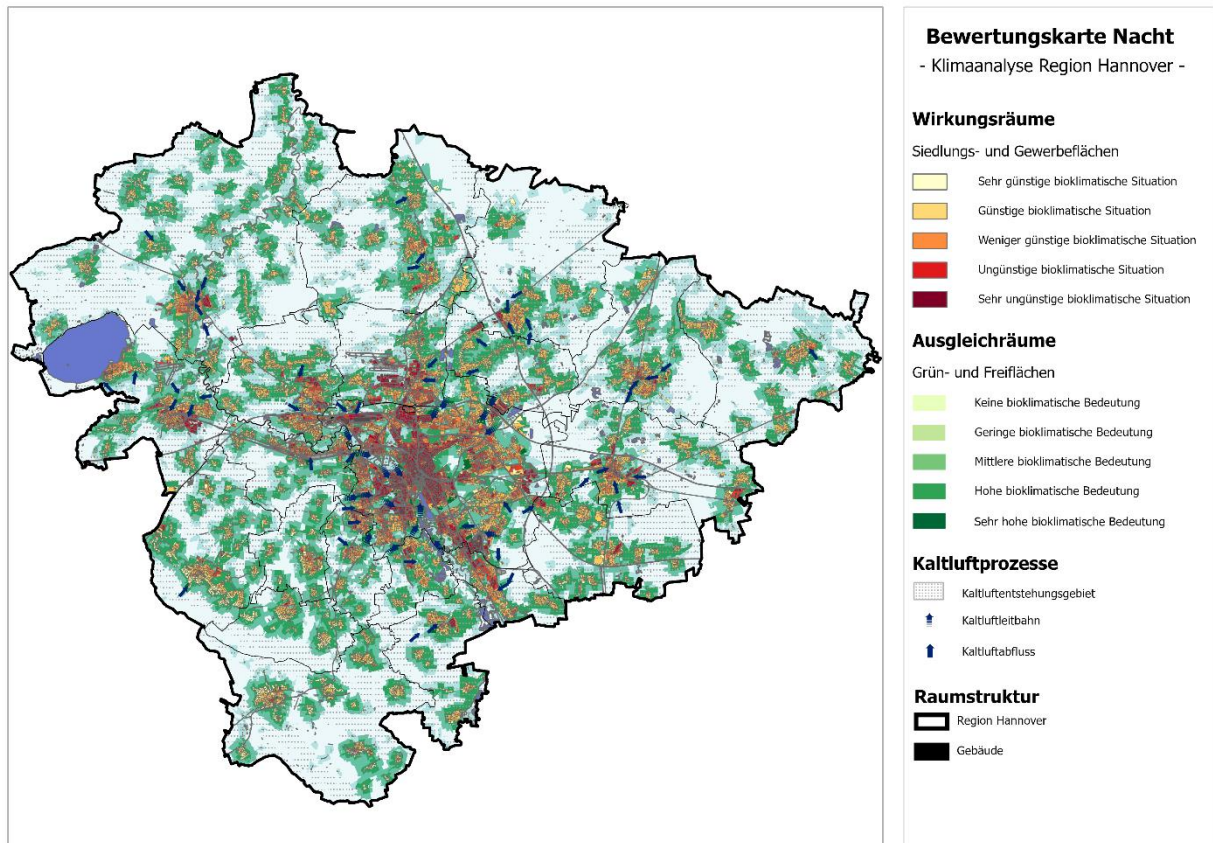


Abb. 34: Bewertungskarte Nacht

BEWERTUNGSKARTE TAG

Die Bewertungskarte „Tag“ betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden (Abb. 35). Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung. In den Vordergrund rücken zudem der Straßenraum für Wegebeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen. Die Bewertungen einzelner Flächen weichen dabei teilweise von der Nachtsituation ab.

Dies wird gerade bei den Grünflächen deutlich, deren Bedeutung dann am höchsten ist, wenn sie eine hohe Aufenthaltsqualität durch verschattete Bereiche bieten, fußläufig erreichbar und zudem öffentlich zugänglich sind (Hauptausgleichsräume).

Die höchsten Belastungen im Siedlungsraum treten in hochversiegelten Räumen mit geringer Grünausstattung auf, insbesondere in Gewerbegebieten und auf Plätzen.



Tab. 13: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Siedlungsfläche Bewertungskarte Tag

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]		
	Wohnen	Gewerbe	Straße
1 = Sehr günstig	11,6	2,1	1,5
2 = Günstig	31,7	3,7	1,2
3 = Mittel	25,5	3,8	0,7
4 = Ungünstig	6,1	5,1	0,5
5 = Sehr ungünstig	1,0	4,2	1,2

Tab. 14: Flächenanteile nach Bewertungsklassen Freiflächen Bewertungskarte Tag

Bewertung der Freiflächen	Flächenanteil [%]
1 = Sehr hoch	23,9
2 = Hoch	2,2
3 = Mittel	38,6
4 = Gering	20,2
5 = Sehr gering	15,1

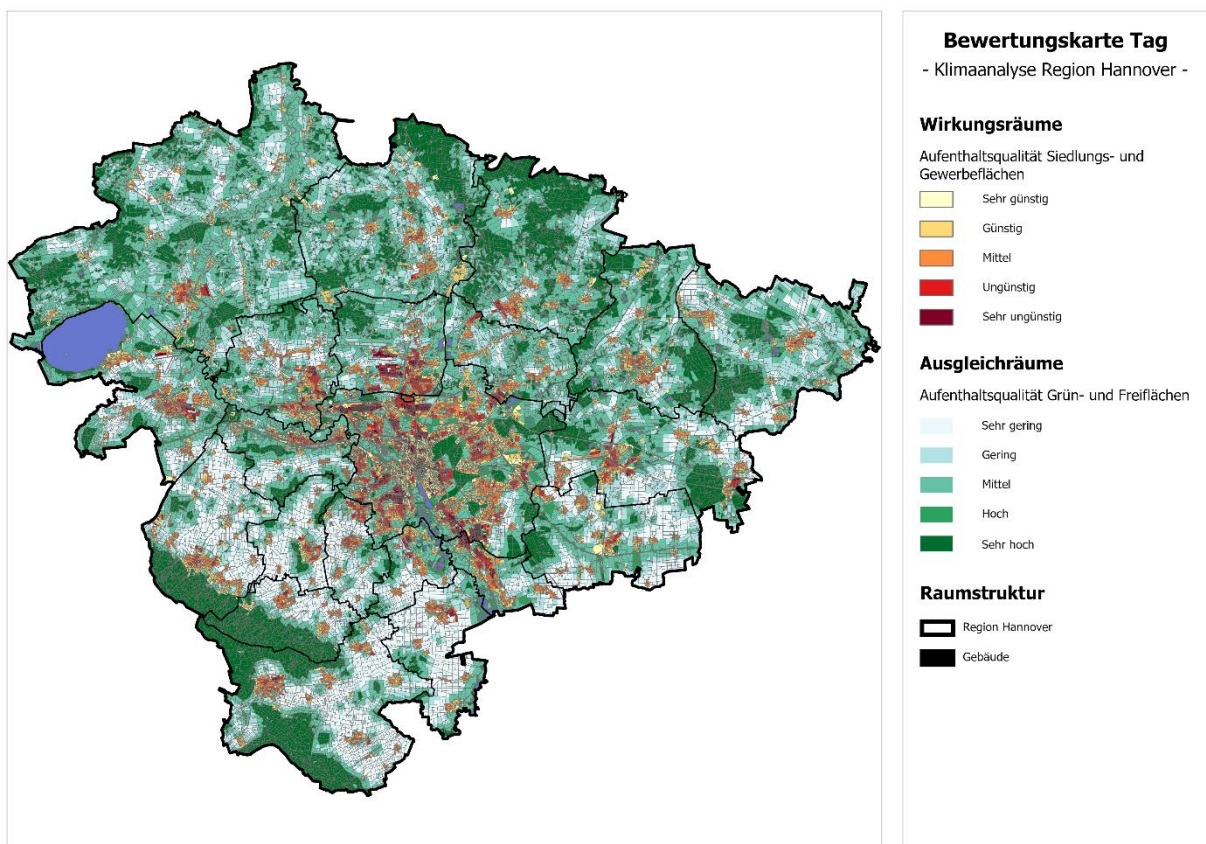


Abb. 35: Bewertungskarte Tag Region Hannover



8. Zusammenfassung

Zu den stadtklimatischen Zusammenhängen in der Region Hannover konnten bislang Aussagen aus der Klimaanalyse Region Hannover (GEO-NET 2007) abgeleitet werden. Diese wird nun durch die vorliegende Klimaanalyse aktualisiert.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse bieten einen guten Überblick über die aktuelle klimatische Entwicklung in der Region und können als eine Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen zur Hitzevorsorge in den Bereichen Siedlungsplanung und Städtebau, Straßen- und Freiraumplanung herangezogen werden.

Ergebnisse der Modellierung

Als Maß für die Wärmebelastung wird die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) um 14:00 Uhr betrachtet. Neben der Temperatur berücksichtigt die PET u.a. die Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung und kann, vereinfacht ausgedrückt, als gefühlte Temperatur verstanden werden. Die Modellrechnung beruht auf der Annahme einer sommerlichen Strahlungswetterlage ohne Bewölkung, sodass die Wärmebelastung stark von der Verschattung gesteuert wird. Die geringsten Werte finden sich entsprechend in Wäldern, mit Bäumen bestandenen Grünzügen oder in Parks. Diese treten als Bereiche mit geringer Wärmebelastung hervor und eignen sich an heißen Sommertagen als Rückzugsorte für die Bevölkerung in der Region Hannover. Je nach Bebauungsdichte und Grünanteil weisen die Siedlungsräume in der Region mäßige bis starke Wärmebelastungen auf (gelb bis orange). Die höchsten Werte sind im Straßenraum und auf versiegelten Plätzen und Gewerbeflächen zu finden (extreme Wärmebelastung). Unter der Annahme eines Sommertags ohne Bewölkung zeigen auch unversiegelte Freiflächen relativ hohe Wärmebelastungen (beispielsweise Ackerland), wobei diese Flächen ohnehin nicht für den Aufenthalt der Bevölkerung gedacht sind.

In der Nacht kühlen diese Freiflächen dagegen stark ab und können mit ihrer Kühlwirkung und als Kaltluftentstehungsgebiete wichtige stadtklimatische Funktionen bereitstellen. Im Vergleich zu den Grün- und Freiflächen weist der Siedlungsraum in der Region größtenteils eine deutliche nächtliche Überwärmung auf, die in der Spitze über 10 °C höheren Temperaturen als im Umland führen kann. Dieser in der Stadt typische „Wärmeinseleffekt“ kommt vor allem nachts zum Tragen und geht unter anderem auf den höheren Versiegelungsgrad bzw. geringeren Grünanteil, die Beeinträchtigung der Strömung durch Hindernisse sowie Emissionen aus Verkehr, Industrie und Haushalten zurück.

Zwischen dem kühleren Umland und dem Siedlungsraum können sich lokale Ausgleichsströmungen bilden und für Entlastung in den Siedlungsgebieten sorgen. Neben durch den Temperaturunterschied hervorgerufene Flurwinde sind reliefbedingten Hangabwinden die wichtigsten dieser Windsysteme, die im günstigsten Fall über zusammenhängende Grünzüge Kalt- und Frischluftzufuhr bis weit in die Siedlungsräume erlauben. Besonders wichtige Funktionen als „Kaltluftleitbahnen“ finden sich beispielsweise im Bereich der Leine Aue im Stadtgebiet Hannover oder entlang der Fösse zwischen den Hannoveraner Stadtteilen Badenstedt und Davenstedt, sowie in Hannover Vahrenheide.

Auch kommt es zu flächenhaften Kaltluftabflüssen vor allem aus den Hangebereichen, wie beispielsweise im Süden des Gebiets in Verbindung mit dem Deister, aber auch dem Benthler Berg oder dem Brelinger Berg.



Bewertungskarten

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Klimaanalyse der Region Hannover und erlauben Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist die Inwertsetzung der Ergebnisse, z.B. in Form der Bewertungskarten. In diesen wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als „Wirkraum“ sowie der Grünflächen als „Ausgleichsraum“ hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation vorgenommen. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen ohne Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Bewertungskarten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der Bewertungskarte Nacht orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt der Siedlungsräume der Region, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen bzw. für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden. Die Bewertung ist auf die gegenwärtige Siedlungsstruktur ausgerichtet, (siedlungsferne) Grünflächen ohne relevante Klimafunktion sind von geringerer Bedeutung. Neben Kaltluftleitbahnen ist in der Karte das Strömungsfeld in Pfeilsignatur dargestellt, um das Strömungssystem außerhalb der Siedlungsräume abzubilden und damit mögliche klimaökologische Konflikte bei etwaigen größeren Vorhaben erkennen zu können.

Die Bewertung des Siedlungsraums spiegelt die nächtliche Überwärmung wider, sodass hochversiegelte Gewerbegebiete die ungünstigsten Bedingungen aufweisen. Der Fokus in der Bewertungskarte Nacht liegt jedoch auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit der Wohnbebauung. In den dichter bebauten Siedlungsbereichen der Region Hannover treten teilweise ungünstige bis sehr ungünstige bioklimatische Bedingungen auf. Ähnlich wie Gewerbegebiete steht der Straßenraum in der nächtlichen Betrachtung weniger im Vordergrund, doch geben aufgeheizte Plätze und Straßen nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit ebenfalls die Situation in der umliegenden Bebauung.

Infolge des Klimawandels ist in der Region Hannover zukünftig von höheren Temperaturen und vermehrten Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in den städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeinseleffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorliegt.

Die Bewertungskarte Tag betrachtet die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung, um die Auswirkungen auf die wohnende und arbeitende Bevölkerung abzubilden. In den Vordergrund rücken zudem der Straßenraum für Wegbeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen. Für den Kaltlufthaushalt wichtige Freiflächen sind an Sommertagen dagegen von geringerer Bedeutung, da die fehlende Verschattung zu einer starken Wärmebelastung führt.

Umgekehrt weisen Wälder am Tage eine höhere Bewertung auf als in der Nacht (z.B. Stadtwald Eilenriede). Die höchsten Belastungen im Siedlungsraum treten in hochversiegelten Räumen mit geringer Grünausstattung auf, insbesondere in Gewerbegebieten und auf Plätzen.



9. Literaturverzeichnis

- Beckmann S., 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*, Volume 32
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Cubasch U., Wuebbles D., Chen D., Facchini M.C., Frame D., Mahowald N., Winther J.-G. (2013): Introduction. In: *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Donat M. G., Leckebusch G. C., Pinto J. G., Ulbrich U. (2010): European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research* 42:27–43.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2018): Klimareport Niedersachsen. Offenbach am Main. 52 Seiten.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020a): Nationaler Klimareport. 4. Korrigierte Auflage. Stand Errata 8. Juni 2020.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020b): Datenbasis: Beobachtungsdaten des DWD. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020c): Datenbasis: Raster-daten des DWD. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020d): Wetterlexikon (Homepage). Online: www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- 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:L07803.
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung*. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58(3):175-183.
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht – Schlaf – Index. Online: https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/de-tail/078103/index.php.de.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- ISO - International Organization for Standardization (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jendritzky, G. et al. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr.114.
- Kaspar, F., G. Müller-Westermeier, E. Penda, H. Mächel, K. Zimmermann, A. Kaiser-Weiss, T. Deuschländer: Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *Adv. Sci. Res.*, 10, 99–106, 2013
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig*. Band 13.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam, 56 S.
- Matzarakis, A. und Mayer, H. (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter No. 18*: 7 – 10.



- McDonald R. E. (2011): Understanding the impact of climate change on Northern hemisphere extra-tropical cyclones. *Climate Dynamics* 37:1399–1425.
- Mayer, H. Beckröge, W. und Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265 – 268.
- Mosimann et al. (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- 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.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4–6.
- Piani C., Haerter J.O., Coppola E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99:187–192
- Pinto J. G., Ryers M. (2017): Winde und Zyklonen. In: Brasseur G., Jacob D., Schuck-Zöllner S. (Hrsg.) (2017): Klimawandel in Deutschland.
- 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* 32:711–737
- Rauthe M., Malitz G., Gratzki A., Becker A. (2014): Starkregen. In: Becker P., Hüttl R. F. (Hrsg.): Forschungsfeld Naturgefahren. Potsdam und Offenbach, S. 112.
- ReKliEs-De (2017): Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland - Nutzerhandbuch
- Schär, Ch., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surro-gate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. Online: www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. Online: www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html
- Themeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31(10):1530–1544.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Luft-hygiene in räumlichen Planungen.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2015): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2020): Starkniederschlag. Online: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/starkniederschlag>



10. Anhang I

Tab. A 1: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	✗	✗	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	✗	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	✗	✗
8	MIROC5	REMO2015	✓	✗	✗	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	✗	✗	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	✗	✗
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	✗	✗
15	MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	✗	✗
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

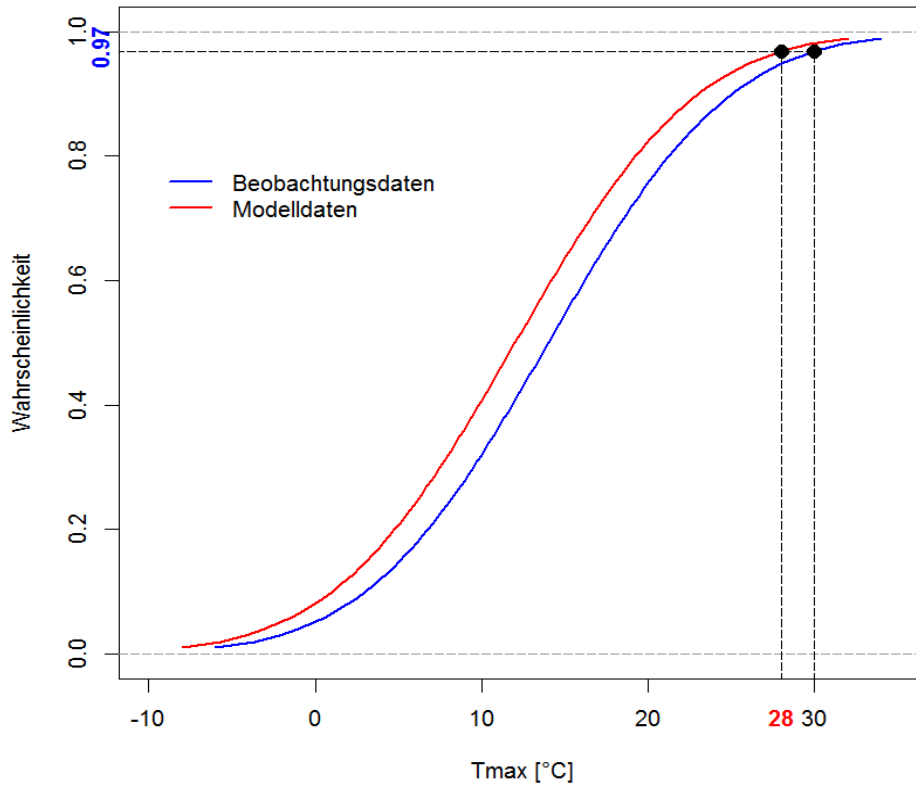


Abb. A 1: Methode der Adjustierung von Schwellenwerten für Kenntage. Die blaue Zahl auf der y-Achse zeigt das berechnete Perzentil des Schwellenwertes und die rote Zahl auf der x-Achse zeigt den adjustierten Schwellenwert

Tab. A 2: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses.

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
$\geq 2,0$	sehr stark zunehmend
$\geq 1,5$ und $< 2,0$	stark zunehmend
$\geq 1,0$ und $< 1,5$	schwach zunehmend
$< 1,0$ und $> -1,0$	kein Trend
$\leq -1,0$ und $> -1,5$	schwach abnehmend
$\leq -1,5$ und $> -2,0$	stark abnehmend
$\leq -2,0$	sehr stark abnehmend

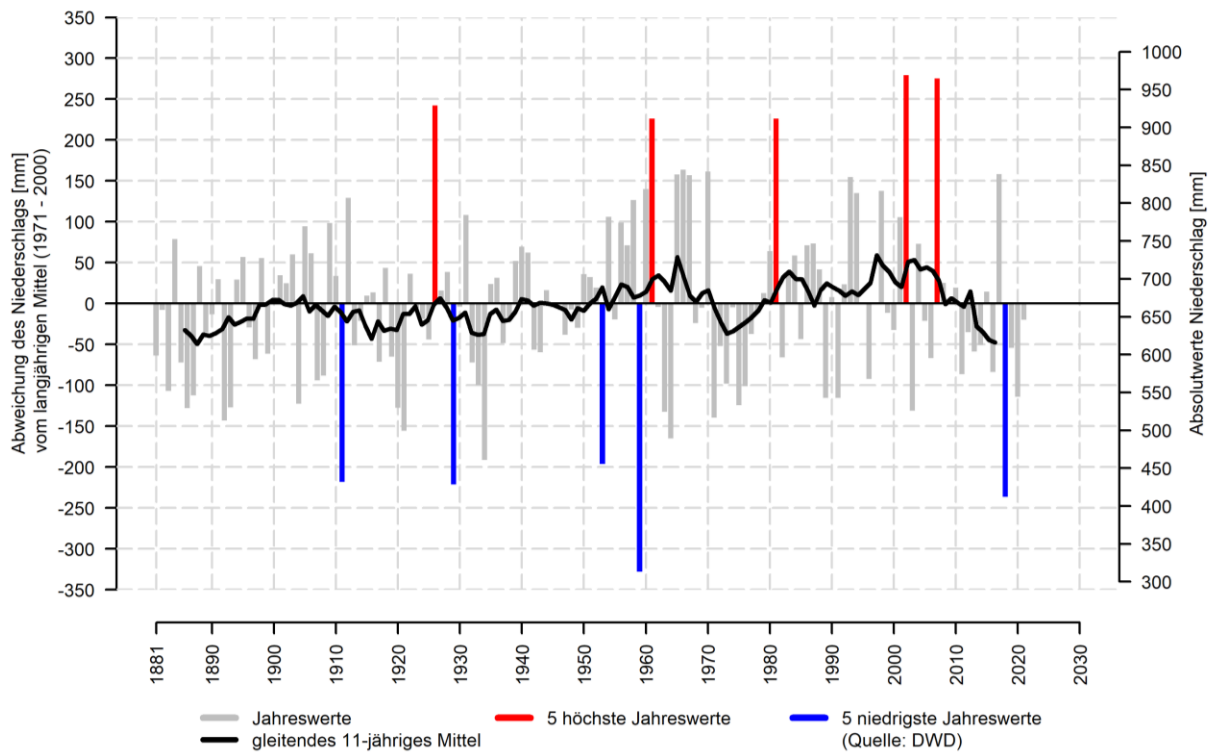


Abb. A 2: Entwicklung des Niederschlags in der Region Hannover (Quelle: nach DWD 2020b)

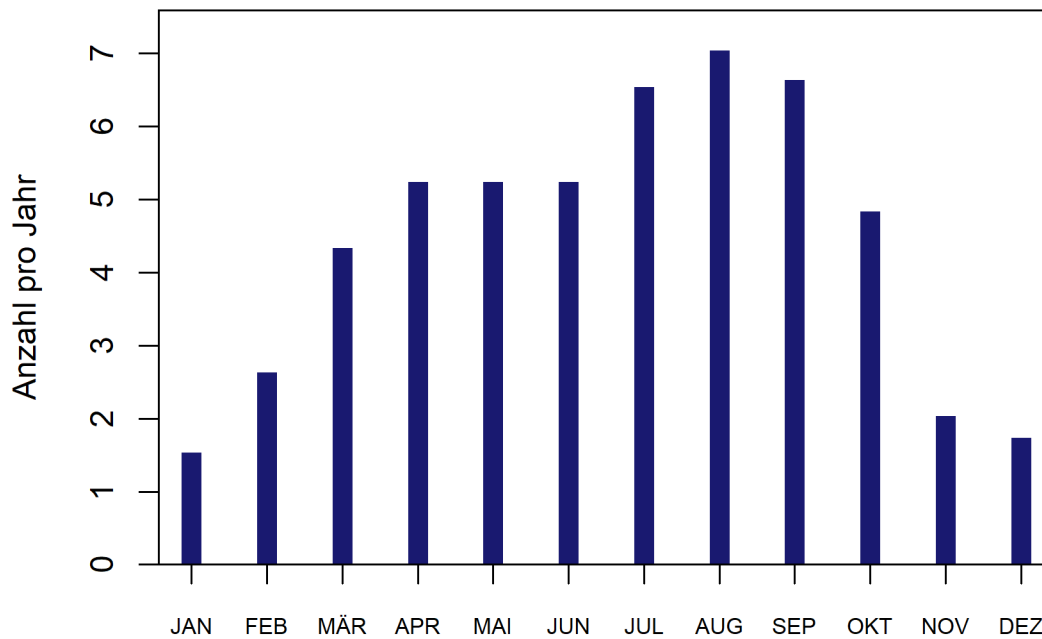


Abb. A 3: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in der Region Hannover für den Zeitraum 1991 – 2020, basieren auf der DWD-Station Hannover (DWD 2020)



TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

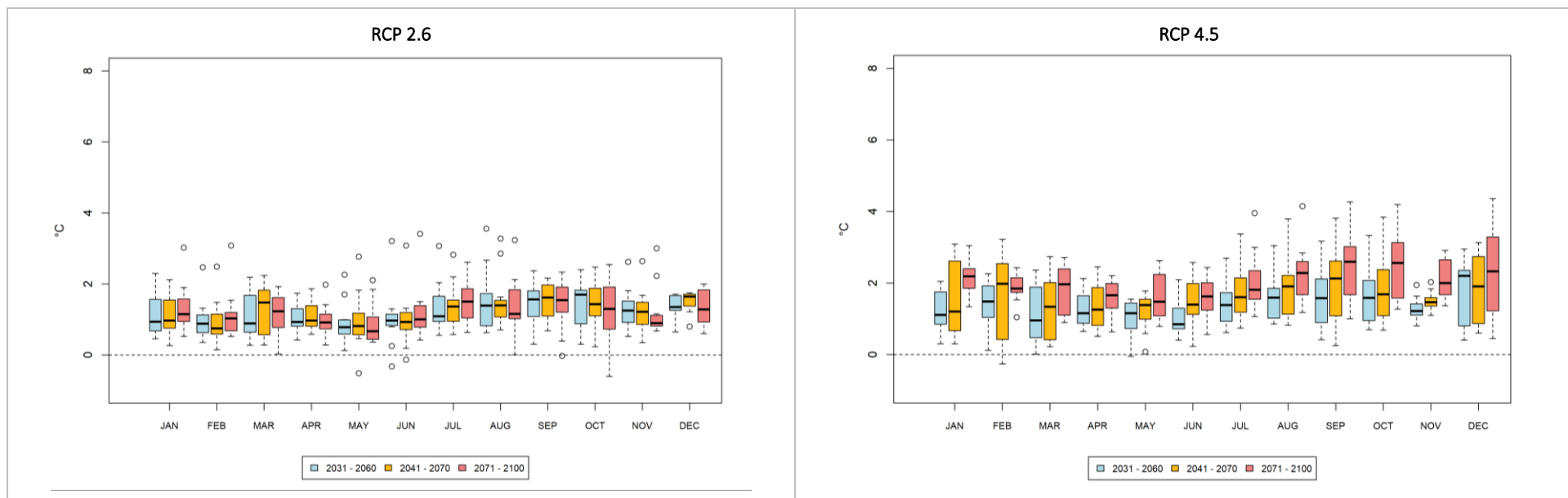


Abb. A 4: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in der Region Hannover für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

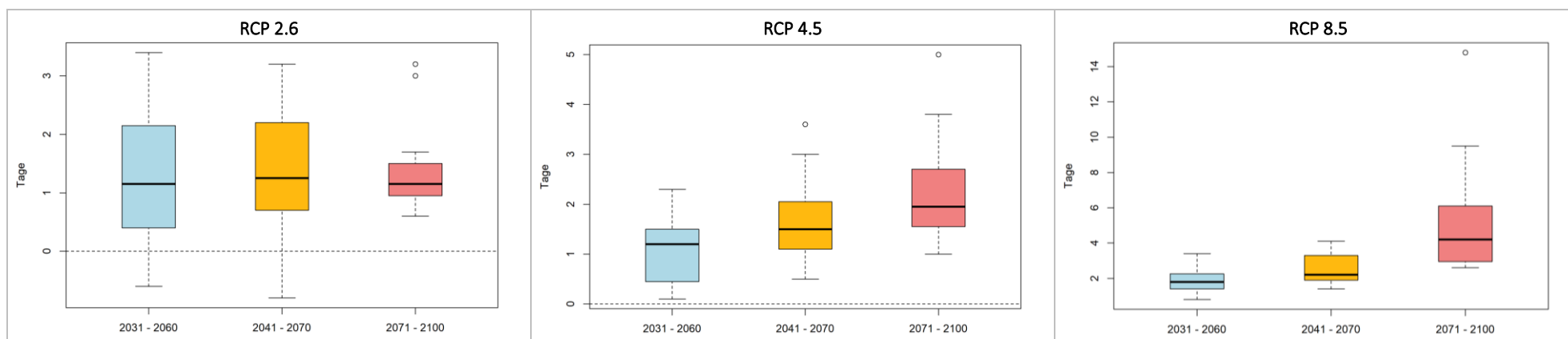


Abb. A 5: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) in der Region Hannover in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

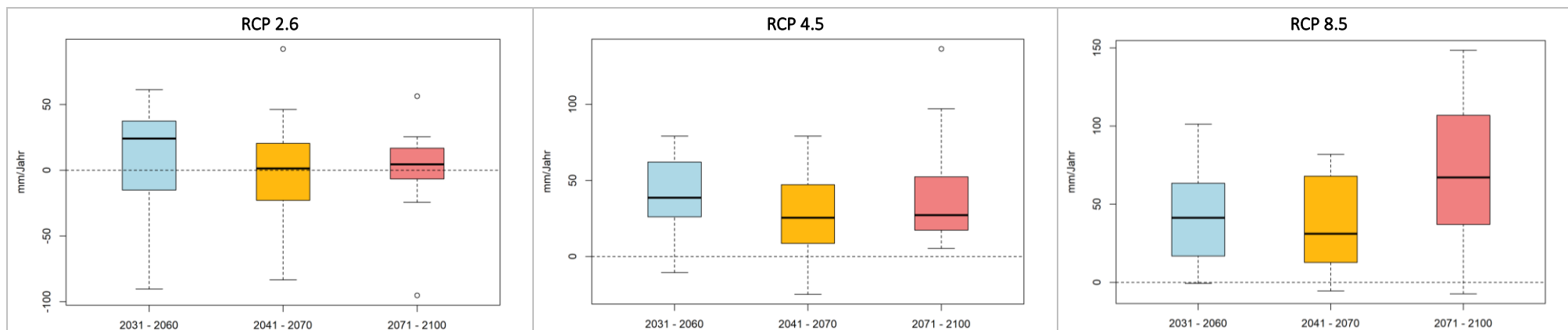


Abb. A 6: Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in der Region Hannover in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

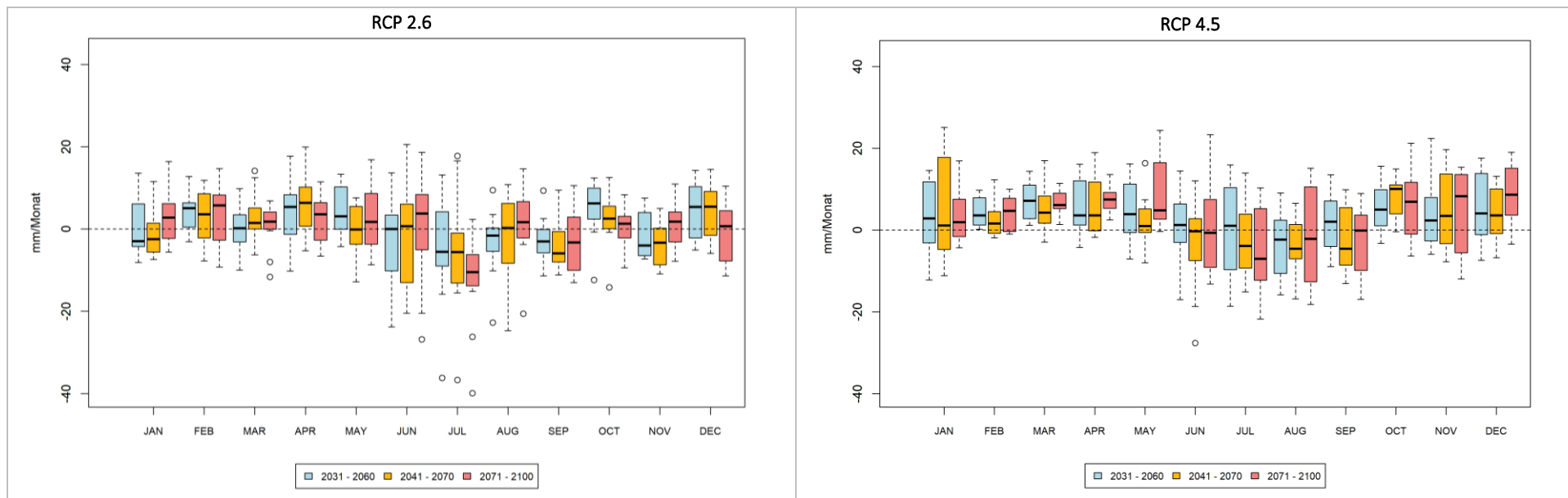


Abb. A 7: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in der Region Hannover für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)



TROCKENHEIT

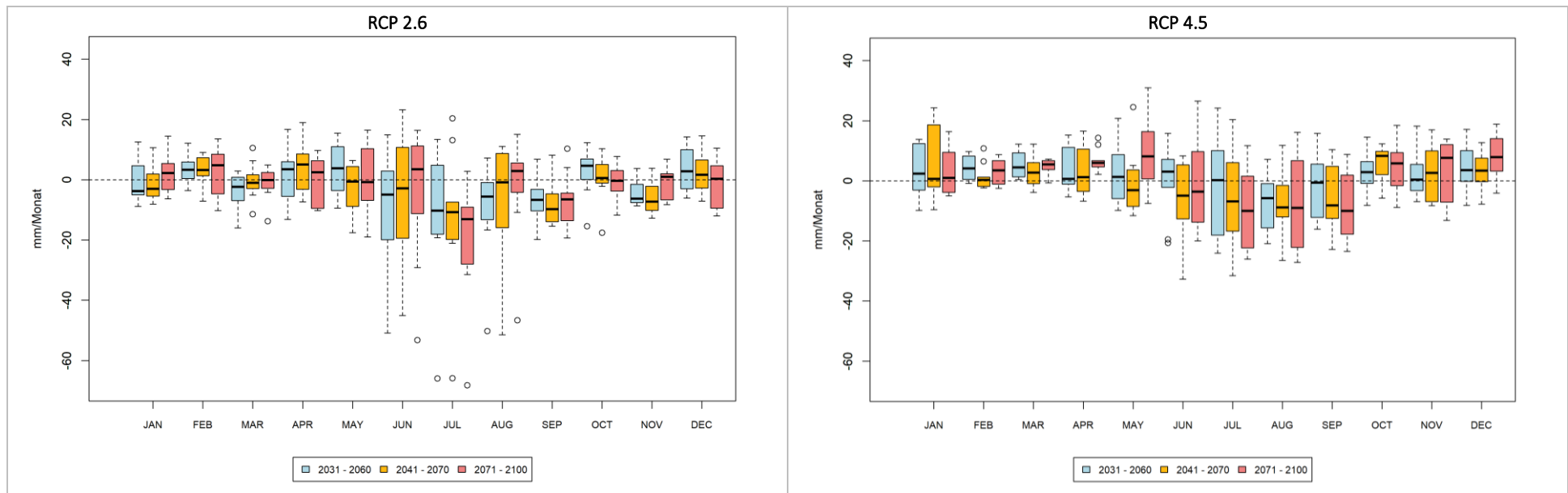


Abb. A 8: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in der Region Hannover für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

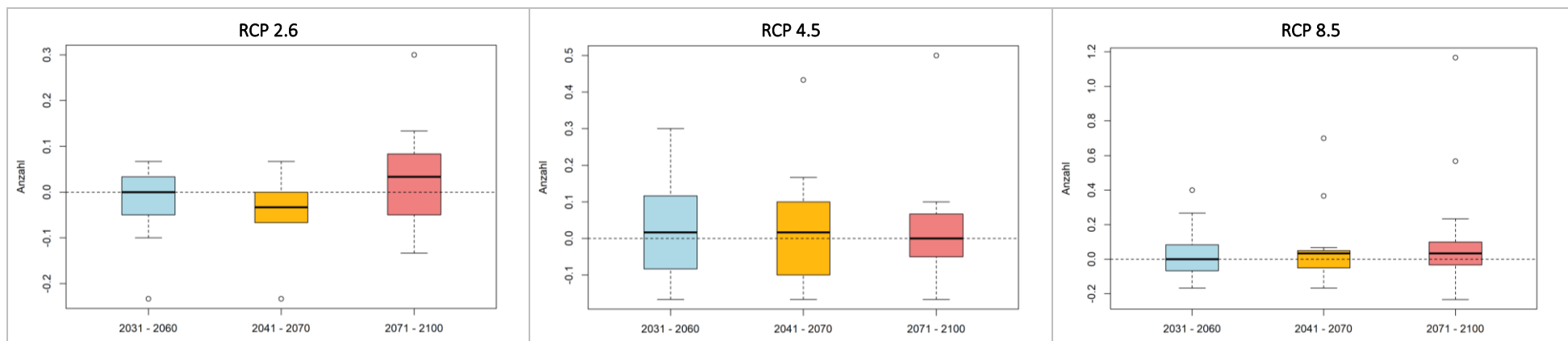


Abb. A 9: Änderung der jährlichen mittleren Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit einem Niederschlag < 1 mm) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in der Region Hannover in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 10$ MM/D)

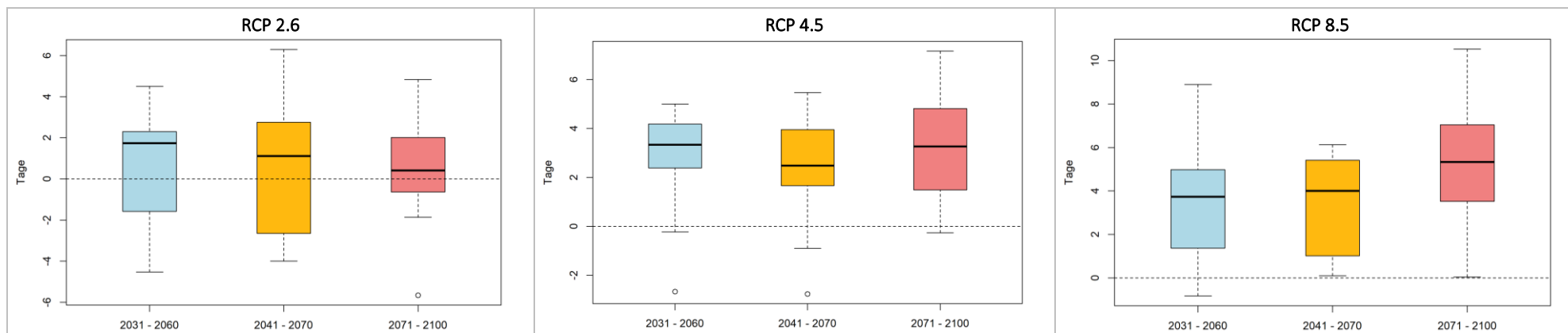


Abb. A 10: Änderung der jährlichen Auftretshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 10$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in der Region Hannover in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STÄRKERER NIEDERSCHLAG ($N \geq 20$ MM/D)

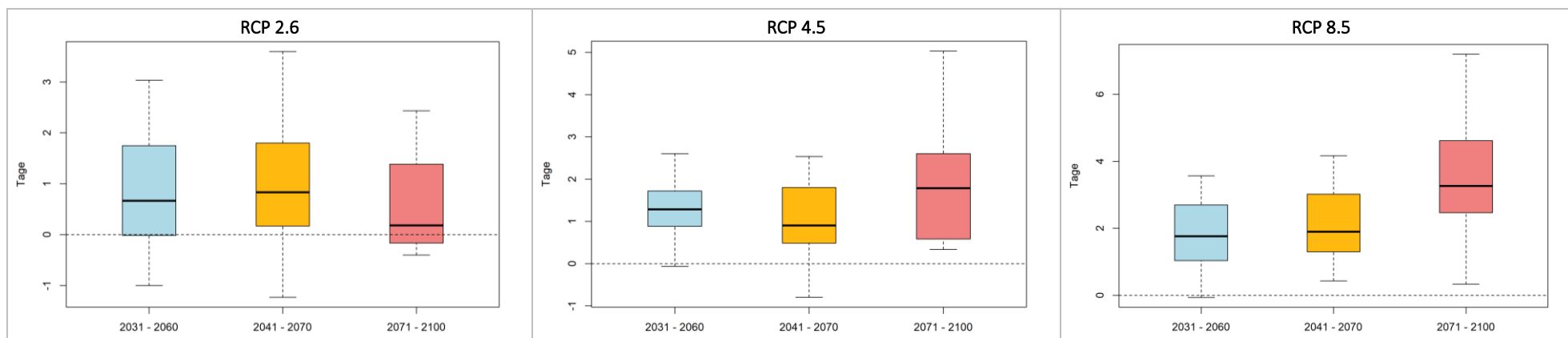


Abb. A 11: Änderung der jährlichen Auftretshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 20$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKNIEDERSCHLAG ($N \geq 30$ MM/D)

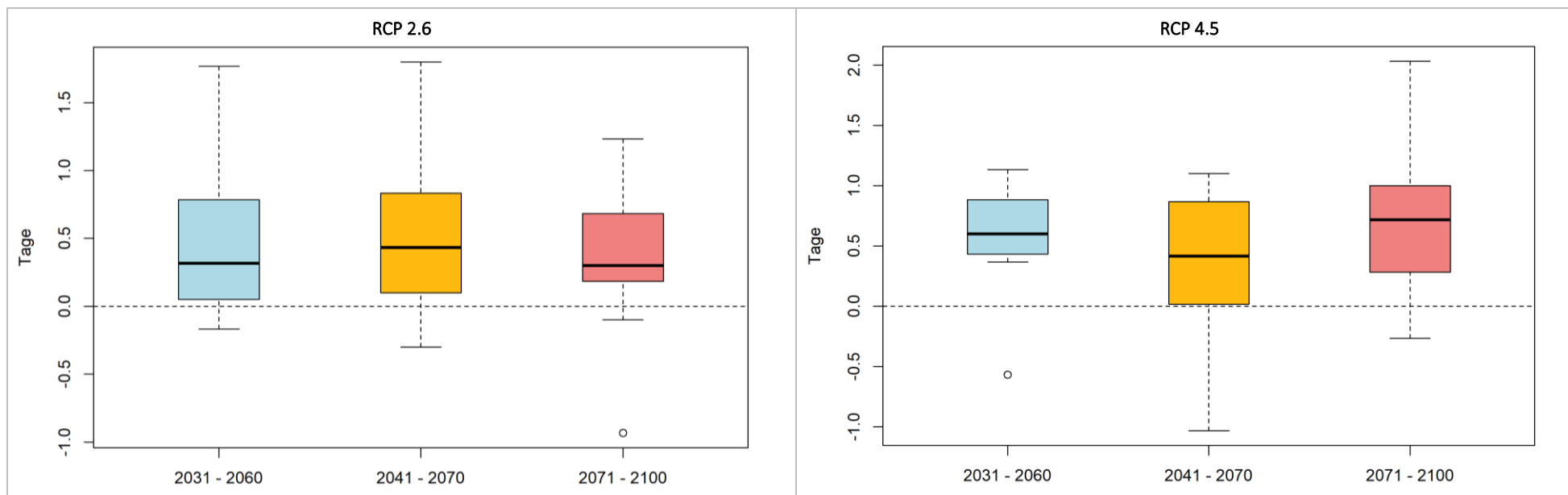


Abb. A 12: Änderung der jährlichen Auftretshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in der Region Hannover in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) sowie 4.5 (rechts)

STURM

Die Auswertungen zum Thema Sturm erbrachten aufgrund der hohen Unsicherheit der Ergebnisse keine validen Aussagen. Aus diesem Grund sind die betreffenden Abbildungen und Tabellen an dieser Stelle nicht mit aufgeführt.



Tab. A 3: Mittlere Parameter der Nutzungskategorien im Untersuchungsgebiet

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%)	Mittlere Strukturbauhöhe (m)
1	Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, gekennzeichnet durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad.	95	25,0
2	Block- und Blockrandbebauung	Vergleichsweise dicht bebaute Siedlungsfläche. Geprägt durch vier- bis sechsgeschossige Mehrfamilienhäuser mit mehr oder weniger stark versiegelten Innenhofbereichen.	78	15,0
3	Industrie- und Gewerbefläche	Sehr hoch versiegelte und stark überbaute Flächen, meist gewerblich genutzt. Ähnlich hoher Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung, meist aber geringeres Bauvolumen.	87	10,0
4	Zeilen- und Hochhausbebauung	Zeilenbebauung, halboffene Blockrandbebauung, Hochhäuser. Typisch ist der durch unbebaute Abstandsflächen bedingte relativ hohe Freiflächenanteil.	55	15,0
5	Einzel- und Reihenhausbebauung	Flächen mit relativ geringem Überbauungsgrad im Übergang zwischen relativ dichter Reihenhausbebauung und baulich geprägter Grünfläche.	41	5,0
6	Straße	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.	95	0,0
7	Gleis	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturbauhöhe.	25	0,5
8	Baulich beeinflusste Grünfläche	Vegetationsgeprägte Flächen mit einem erhöhten Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) und/oder Bebauung. Hierzu zählen z. B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze.	25	5,0
9	Freiland, Grünfläche	Vornehmlich landwirtschaftlich genutzte Flächen wie Wiesen, Weiden und Äcker. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5	1,0
10	Gehölz	Gehölzgeprägte Flächen wie städtische Parkareale, Obstbauflächen, Brachen, Straßenbegleitgrün.	5	2,0
11	Laubwald	Waldgeprägte Flächen, vornehmlich sommergrün.	5	12,5
12	Nadelwald	Waldgeprägte Flächen, vornehmlich immergrün.	5	12,5
13	Mischwald	Waldgeprägte Flächen, Mischbestand.	5	12,5
14	Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.	0	0

Tab. A 4: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

