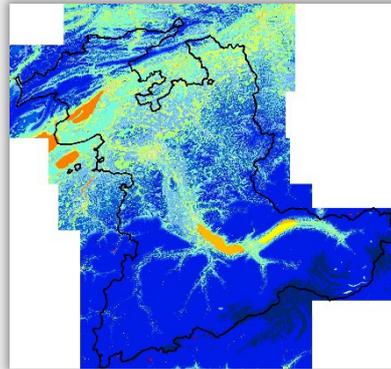
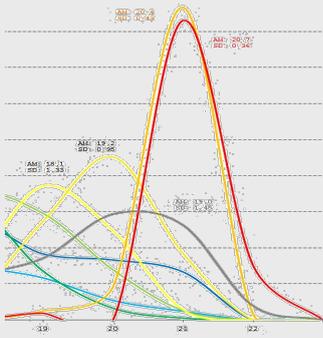
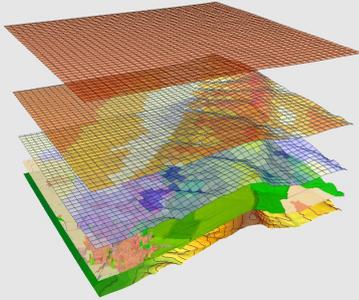
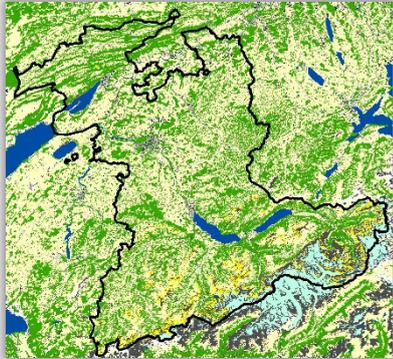


# Klimaökologische Situation im Kanton Bern: Modellbasierte Klimaanalyse

Abschlussbericht



Auftraggeber:

**Kanton Bern**  
Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion  
Amt für Umwelt und Energie  
Laupenstrasse 22  
3008 Bern



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Grosse Pfahlstrasse 5a  
3 0 1 6 1 Hannover  
Tel. (0511) 3887200  
FAX (0511) 3887201  
[www.geo-net.de](http://www.geo-net.de)

Hannover, Mai 2023



# Inhaltsverzeichnis

Seite:

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Eingangsdaten .....	6
<b>3. Methode der modellgestützten Siedlungsklimaanalyse.....</b>	<b>8</b>
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D .....	8
3.2 Synoptische Rahmenbedingungen.....	9
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	11
3.4 Klimatische Grundlagen .....	12
3.4.1 Aktuelles Klima an der kantonaler Wetterstation Bern/Zollikofen.....	13
3.4.2 Beobachteter Klimawandel an kantonalen Wetterstationen .....	14
3.4.3 Hauptanströmrichtung.....	15
3.4.4 Klimawandelszenario .....	16
<b>4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....</b>	<b>21</b>
4.1 Nächtliches Temperaturfeld.....	21
4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur.....	27
4.3 Autochthones Windfeld .....	31
4.4 Kaltluftvolumenstrom .....	38
<b>5 Klimaanalysekarte.....</b>	<b>45</b>
<b>6 Planungshinweiskarten Siedlungsklima.....</b>	<b>49</b>
6.1 Vorgehensweise .....	49
6.1.1 Bewertung der Nachtsituation.....	49
6.1.2 Bewertung der Tagsituation.....	53
6.2 Ergebnisse .....	53
6.2.1 Nachtsituation.....	53



6.2.2 Tagsituation..... 59

**7 Detailbetrachtung von städtebaulichen Entwicklungsflächen ..... 65**

**8 Massnahmenkatalog Siedlungsklima ..... 71**

**9 Literatur ..... 78**

### Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse..... 1

Abb. 2.1: Exemplarische Referenzflächen für die Siedlungstypologie „Arbeiten“ am Beispiel Bern und Biel sowie abgeleitete Mischpixelfläche „Arbeiten“ am Beispiel Biel Allmendweg..... 5

Abb. 2.2: Geländehöhe im Untersuchungsgebiet..... 6

Abb. 2.3: Nutzungsstruktur im Kantonsgebiet ..... 7

Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen ..... 10

Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation ..... 11

Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn ..... 12

Abb. 3.4: Klimadiagramm Station Bern / Zollikofen, Normperiode 1991 – 2020. Quelle: (Meteoschweiz 2020b)..... 13

Abb. 3.5: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. Quelle: (Meteoschweiz 2020d)..... 14

Abb. 3.6: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. Quelle: (Meteoschweiz 2020d) ..... 15

Abb. 3.7: Windrosen der Station Bern/Zollikofen 365 m ü.M. für die Sommermonate JJA. Quelle: (Meteoschweiz 2020c). ..... 16

Abb. 3.8: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013) ..... 17

Abb. 3.9: Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 in den Regionen Mittelland und Voralpen (NCCS 2018) ..... 18

Abb. 3.10: Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Bern/Zollikofen. Quelle: (NCCS 2018) ..... 19

Abb. 4.1: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund) ..... 24

Abb. 4.2: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)..... 24

Abb. 4.3: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund) ..... 25

Abb. 4.4: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund) ..... 25



Abb. 4.5: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund) ..... 26

Abb. 4.6: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund) ..... 26

Abb. 4.7: PET Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund) ..... 28

Abb. 4.8: PET Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund) ..... 29

Abb. 4.9: PET Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund) ..... 29

Abb. 4.10: PET Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund) ..... 30

Abb. 4.11: PET Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund) ..... 30

Abb. 4.12: PET Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund) ..... 31

Abb. 4.13: Prinzipskizze Flurwind ..... 32

Abb. 4.14: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 34

Abb. 4.15: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 34

Abb. 4.16: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 35

Abb. 4.17: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 36

Abb. 4.18: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 36

Abb. 4.19: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 37

Abb. 4.20: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom ..... 38

Abb. 4.21: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern ..... 39

Abb. 4.22: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 41

Abb. 4.23: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens ..... 42

Abb. 4.24: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr ..... 42

Abb. 4.25: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr ..... 43

Abb. 4.26: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr ..... 44

Abb. 4.27: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr ..... 44

Abb. 5.1: Klimaanalysekarte im Bereich Biel - Gegenwart ..... 47

Abb. 5.2: Klimaanalysekarte im Bereich Biel – Zukunft ..... 48

Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht ..... 52

Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Nachtsituation Gegenwart für den Bereich Biel ..... 55

Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Nachtsituation) - Gegenwart ..... 57



Abb. 6.4: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Nachtsituation) –  
Zukunft ..... 58

Abb. 6.5: Planungshinweiskarte Tagsituation Gegenwart für den Bereich Biel ..... 61

Abb. 6.6: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Tagsituation) -  
Gegenwart..... 62

Abb. 6.7: Planungshinweiskarte Tagsituation Zukunftsszenario für den Bereich Biel..... 63

Abb. 6.8: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Tagsituation) -  
Zukunftsszenario ..... 64

Abb. 7.1: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsfläche im Raum Moutier..... 66

Abb. 7.2: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Biel..... 67

Abb. 7.3: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Bern ..... 68

Abb. 7.4: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Steffisburg/Thun..... 69

Abb. 8.1: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen ..... 77

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung ..... 3

Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle..... 4

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden..... 27

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms..... 39

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im bebauten Siedlungsraum ..... 50

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden..... 53

Tab 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete  
Planungshinweise..... 56

Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete  
Planungshinweise..... 57

Tab. 6.5: Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation am Tage und abgeleitete  
Planungshinweise..... 59

Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete  
Planungshinweise..... 60

Tab. 7.1: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer siedlungsklimatisch wirksamer Massnahmen für  
den Kanton Bern ..... 74



## Glossar

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

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

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

**Austauscharme Wetterlage:** → *Autochthone Wetterlage*

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

**Autochthones Windfeld:** Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch grossräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

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

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

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

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

**Kaltluftabfluss:** Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

**Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb des bebauten Siedlungsraumes (Siedlungsflächen innerhalb des Kantonsgebietes, die von einem klimatisch wirksamen



→ *Kaltluftvolumenstrom*  $> 5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durchflossen werden sowie eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mindesten  $0,2 \text{ m/s}$  aufweisen; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Kantonsgebiet).

**Kaltluftentstehungsgebiete:** Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen → *Kaltluftvolumenstrom*, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen (→ *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

**Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichsströmungen sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts einer 10 m Rasterzelle (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

**Kelvin (K):** SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) interpretiert werden.

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

**Planungshinweiskarte:** Bewertung der bioklimatischen Belastung im bebauten Siedlungsraum sowie an Strassen und Plätze im Kantonsgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

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

**Strahlungswetterlage** → *Autochthone Wetterlage*

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

**Strukturwind:** Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Strasse).

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

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



## Zusammenfassung

Im Auftrag des Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion des Kantons Bern wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Kantonsgebiet Bern erstellt. Ziel war es, meteorologische Basisdaten in einer hohen räumlichen Auflösung zu simulieren (10 m x 10 m Raster) und die stadtklimatischen Zusammenhänge und Prozesse herauszuarbeiten – insbesondere die Kaltluftentstehungsgebiete einschliesslich des Kaltluftvolumenstroms in Grün- und Freiflächen sowie die Siedlungsflächen mit einem Wärmeinseleffekt. Zudem wird auch die Aufenthaltsqualität an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung bewertet. Zentraler Baustein dieses Verfahrens war das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Diese Herangehensweise beinhaltet folgende wichtige Vorteile:

- Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Gesamttraum wird gewährleistet
- Klimaökologische Ausgleichs- und Prozessräume werden im Kantonsgebiet verortet und in ihrer (möglichst exakten) räumlichen Ausprägung dargestellt.
- Ein wichtiger Aspekt des klimaökologischen Ausgleichspotenziales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - kann nur auf diese Weise flächendeckend untersucht werden. Zudem können auch quantitative Aussagen z.B. zu den abfliessenden Kaltluftvolumina getroffen werden

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Kantonsgebiet vor. Die Nachtsituation ist dahingehend von Relevanz, da nur dann eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Mengen an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischlufte für den Siedlungsbereich liefern und dort die Wärmebelastung während sommerlicher Hitzeperioden abmildern können. Dargestellt wird eine windschwache, austauscharme sommerliche Wettersituation für die Monate Juli / August. Diese Wetterlage ist das sogenannte Worst-Case-Szenario, das wegen seiner belastenden Wirkung auf die Gesundheit des Menschen unter besonderer Beachtung von Älteren, Kranken und Kindern zur Beurteilung der bioklimatischen Situation gemäss VDI-RL 3785 Blatt 1 herangezogen wird.

Besondere Bedeutung haben im stadtklimatischen Zusammenhang die windschwachen autochthonen Luftaustauschprozesse. Der Begriff 'autochthon' bezeichnet dabei klimatische Vorgänge, die an Ort und Stelle bzw. von selbst (also ohne Fremdwirkung, z.B. durch grossräumige Windströmungen) entstehen (Gegensatz: allochthon). Verglichen mit einer „mittleren“ sommerlichen Wettersituation gehen die austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen häufig mit höheren Lufttemperaturen und einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einher („Worst-Case“-Szenario). Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen ohne nennenswerte übergeordnete Windströmung können nächtliche Kalt- und/oder Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Der „Antrieb“ für diesen Luftaustausch ist der Temperaturunterschied zwischen warmen Siedlungsflächen und kühleren Grün- und Freiflächen.

In bebautem Gelände üben die einzelnen Gebäude eine Hinderniswirkung auf nächtliche Kaltluftströmungen aus und verzögern diese. Als Kaltluft produzierende Bereiche werden



vegetationsgeprägte Freiflächen identifiziert, wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen.

Die Kaltluftströmungen tragen direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der angrenzenden Siedlungsflächen bei. Zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens befinden sich ca. 95 % der Siedlungsfläche im Einwirkungsbereich. Es zeigt sich, dass eine gering überbaute Einzel- und Reihenhausbebauung besser durchströmt wird als eine Block- und Blockrandbebauung bzw. die verdichteten Innenstadtbereiche wie von Bern oder Biel. Überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina entstehen vor allem durch Kaltluftabflüsse über Hangbereichen, welche über hunderte von Metern in die Bebauung einwirken können.

Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkungsbereich vergrössern. Eine hohe Bedeutung kommt aber auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Zudem können diese an Tagen mit starker Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstungskühle auch (kleinräumig) klimatisch günstige Aufenthaltsbereiche darstellen.

Teile der überbauten Flächen wie beispielsweise auch die Innenstadtbereiche der kleineren Städte weisen während austauscharmer sommerlicher Hochdruckwetterlagen einen Mangel an Durchlüftung auf und werden nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Eine starke Wärmebelastung am Tage ist über den stark versiegelten Strassen und Plätzen, Gleisanlagen sowie Gewerbeflächen anzutreffen. Mit Blick auf die naturräumliche Gliederung des Kantons Bern, den Höhenlagen sowie den subalpinen Bedingungen im Süden weisen sowohl die Intensität der Überwärmung als auch die auftretenden Kaltluftabflüsse eine grosse Spannweite auf. Ganz generell kann festgehalten werden, dass mit zunehmender Höhenlage auch der Wärmeinseleffekt in den Siedlungsflächen zurückgeht.

Neben der gegenwärtigen Situation, deren Bebauungssituation den Stand 2020 abbildet, wird auch ein Zukunftsszenario simuliert. Dieses beinhaltet städtebauliche Entwicklungsflächen, welche in absehbarer Zeit realisiert werden. Diesem Zukunftsszenario werden die mit dem Klimawandel zu erwartenden Einflüsse zugrunde gelegt, wobei die Antriebstemperatur der Modellrechnung um +2,6 K erhöht wird. Das entspricht der Änderungen der sommerlichen Mitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Bezugsjahr 2060. Dies ermöglicht, die Daten der globalen bzw. Schweizer Klimaprojektionen auf die räumlich hoch aufgelöste Flächenkulisse der FITNAH-Simulation aufzuprägen. Dabei zeigt sich, welche Stadtstrukturen eher abschwächend oder verstärkend auf die zukünftig ansteigende Wärmebelastung wirken werden. Letzteres betrifft vor allem die innerstädtischen Siedlungsflächen sowie die gewerblich genutzten Areale. Aber auch zahlreiche Siedlungsflächen mit derzeitig moderater Überwärmung können bis 2060 in eine Belastungssituation eingeordnet werden. Im Allgemeinen werden aber sowohl die Grünflächen als auch der Siedlungsraum wärmer. Die Grünflächen liefern aber auch zukünftig kalte Luft. Allerdings ist diese - unter dem Einfluss des Klimawandels - etwas wärmer verglichen mit der Gegenwart, aber immer noch kühler als die Siedlungsräume. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Landnutzungen sowie der Luftaustausch insgesamt bleiben ähnlich ausgeprägt.



Die simulierten Parameter bodennahe Lufttemperatur, Kaltluftproduktionsrate, bodennahes Kaltluftströmungsfeld sowie der Kaltluftvolumenstrom stellen die Grundlage für die Herleitung der Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten dar.

Die Klimaanalysekarte beschreibt die wesentlichen stadtklimatischen Prozesse für die Nachtsituation. An dieser Stelle findet aber noch keine Bewertung statt. Es werden vielmehr die absolute Überwärmung von Siedlungsflächen einerseits und die Quantitäten an Kaltluft dargestellt, die über den Grünräumen entstehen und in der Bebauung klimatisch ausgleichend einwirken. Neben den regionalen und lokalen bedeutsamen Luftaustauschbeziehungen werden über die Kaltlufteinzugsgebiete auch die Prozessräume der Kaltluftströmungen abgegrenzt. Da am Tage diese Prozesse nicht auftreten, wird in der Klimaanalysekarte nur die Nachtsituation betrachtet. Die Beurteilung der Werteausprägungen und die daraus folgende planerische Bewertung von Siedlungs- und Grünräumen erfolgt in den Planungshinweiskarten.

Die Planungshinweiskarten (PHK) stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Dabei wird zwischen Tag- und Nachtsituation unterschieden. Am Tage wird die Aufenthaltsqualität in den Grün- und Siedlungsflächen bewertet. Diese wird vor allem über die Sonneneinstrahlung beeinflusst, so dass in Bereichen mit hohem Baumanteil meist auch eine günstige Situation vorliegt. In der Nachtsituation stehen dagegen die Wärmebelastung der Siedlungsflächen sowie die Versorgung mit klimatisch ausgleichenden Kaltluftströmungen im Vordergrund.

Ausgangspunkt der PHK ist die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch belastete Siedlungsräume (Wirkungsraum) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinandergrenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können vor allem linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (Luftleitbahnen) beide miteinander verbinden. Darüber hinaus treten im Kantonsgebiet vor allem flächendeckende Hangabwinde auf. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges innerhalb des Kantonsgebietes. Die Planhinweiskarte gibt Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen bzw. baulichen Entwicklungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Massnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Mit Blick auf die stadtklimatische Situation wurde den Gemeinden eine planerische Relevanz zugewiesen. Während in der gegenwärtigen Situation 12 Gemeinden eine entsprechende Relevanz haben, wird deren Zahl zum Zeithorizont 2060 auf 170 zunehmen. Dies ist auf den Einfluss des Klimawandels und des ansteigenden Anteils an wärmebelasteter Siedlungsfläche zurückzuführen. Im Hinblick auf die zu erwartende weitere Nutzungsintensivierungen im Kanton Bern sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Die aus den meteorologischen Parametern zur Tag- und Nachtsituation abgeleiteten Planungshinweiskarten sollen dafür als Abwägungsgrundlage dienen.



## 1. Aufgabenstellung

Die Schutzgüter Klima bzw. Luft sind wichtige Aspekte der räumlichen Planung und Bestandteile der Abwägung in der Nutzungsplanung, Umweltverträglichkeitsprüfung und bei Massnahmen in der Bestandsbebauung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieser Schutzgüter. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas sowie der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Im Auftrag des Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Bern wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover, Deutschland) im Zeitraum 2020 bis 2022 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Kantonsgebiet durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (auch autochthone Wetterlagen genannt), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergehen. Technisch ermöglichen nur solche Wetterlagen eine Analyse der lokalklimatischen Situation, da übergeordnete Wetterphänomene aufgrund von grossräumigen Luftdruckdifferenzen die zu analysierenden lokalen Phänomene nicht überlagern. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

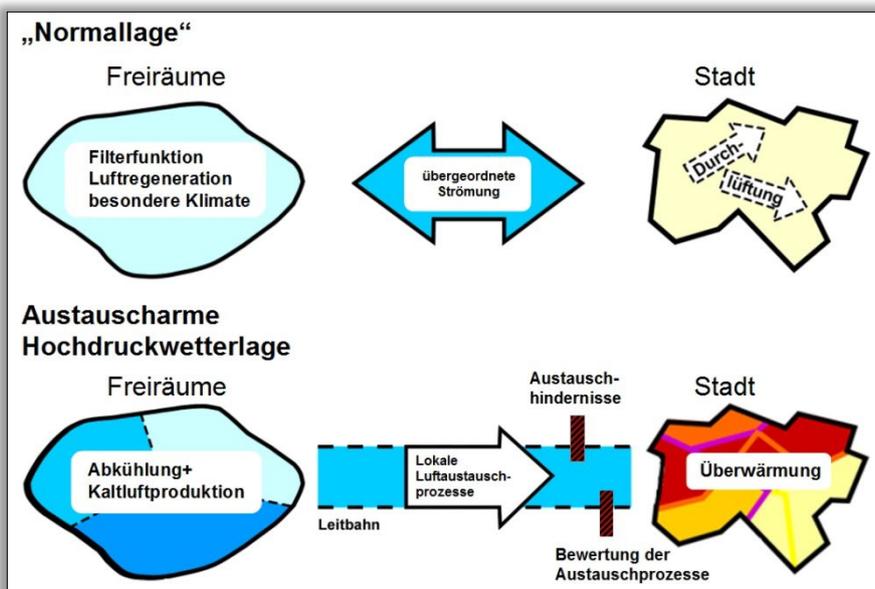


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Zwischen klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und städtisch verdichteten Bereichen andererseits sowie verbindender Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Kanton Bern.



Wesentliches Ziel der Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) und den aus der Klimaanalyse gewonnenen Ergebnissen eine umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Kanton Bern durchzuführen. Weiterhin besteht das Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Kantonsgebiet vor. Diese erlauben eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Planungshinweiskarten). Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet.

Der vorliegende Bericht stellt die siedlungsklimatische Analyse dar, geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Planhinweiskarten ein und schliesst mit der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das regionale Klima im Kanton Bern ab.



## 2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung der Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die grösserskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Das Untersuchungsgebiet für den Kanton Bern wird als rechteckiges Rechengebiet aufgespannt und hat eine Abmessung von 127 km x 135 km. Um dieses grosse Areal in einer Auflösung von 10 m x 10 m verarbeiten zu können, wurden das Modellgebiet in 34 sich überlappenden Einzelkacheln untergliedert und nach erfolgtem Rechenlauf wieder zusammengefügt. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- Geländehöhe (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Bodenbedeckung)
- Strukturhöhe (Gebäude- und Vegetationshöhen)
- Versiegelungsgrad.

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Nutzungsstruktur mit dem jeweiligen Versiegelungsgrad und der Höhe. Für die Gebäude und Vegetationsklassen werden die Höhenangaben aus den vorhandenen Datensätzen übertragen.

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Nutzungs- klasse	Beschreibung	Versiegelungsgrad [%]	Strukturhöhe [m]
20	einzelne, freistehende Gebäude	100	individuell
22	unbebaut versiegelt (Strassen)	95	0
14	Gewässer	0	0
7	Gleis	25	0,5
9	Rasen plus niedrige Vegetation	5	individuell
15	Rebflächen	5	2
24	versiegelt plus hohe Vegetation	90	individuell
25	hohe Vegetation über Rasen = grössere zusammenhängende Waldflächen	0	individuell
10	kleinere Strassen/Wege innerhalb von Waldgebieten	30	individuell
16	freiliegender Fels	95	0
27	Geröll, Sand, naturferner Boden ohne Vegetation	0	0

Da der Kanton Bern in einer 10 m Auflösung, also mikroskalig simuliert wurde, sind Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss (aus der Bodenbedeckung) als auch ihrer Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Die räumliche Auflösung von 10 m



ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insb. kleinkronige) Bäume auf dieser Masstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden.

Die anderen Nutzungsklassen aus Tabelle 2.1 wurden über Look-Up Tabellen, die auf die Kategorien der Bodenbedeckung zugegriffen haben, in die Eingangsdaten für FITNAH übertragen. Die Versiegelungsgrade wurden ebenfalls für die Nutzungsklassen per Look-Up-Tabellen übertragen (siehe Tabelle 2.1). Die Gesamtheit der in Tabelle 2.2 zusammengefassten Daten repräsentiert das Jahr 2020.

Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle.

Informationsebene	Quelle	Jahr
Gebäude	Aus MoPuBe: <a href="https://www.geo.apps.be.ch/de/geodaten/suche-nach-geodaten/sheet/de-DE/a71ad9ac-4e0f-cac4-816b-a0bd22237c16/geocatalog/complete/search_list.html">https://www.geo.apps.be.ch/de/geodaten/suche-nach-geodaten/sheet/de-DE/a71ad9ac-4e0f-cac4-816b-a0bd22237c16/geocatalog/complete/search_list.html</a>  Swiss Buildings 3d = LOD2 <a href="https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/buildings3d2.html#technische_details">https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/buildings3d2.html#technische_details</a>	Datenbezug im März 2021  2018 für Kanton Bern
Digitales Geländehöhenmodell (DGM)	<a href="https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html">https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html</a>	2019
Landnutzung	Swiss TLM <a href="https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html">https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html</a>  MoPuBe <a href="https://www.geo.apps.be.ch/de/geodaten/suche-nach-geodaten/sheet/de-DE/a71ad9ac-4e0f-cac4-816b-a0bd22237c16/geocatalog/complete/search_list.html">https://www.geo.apps.be.ch/de/geodaten/suche-nach-geodaten/sheet/de-DE/a71ad9ac-4e0f-cac4-816b-a0bd22237c16/geocatalog/complete/search_list.html</a>	Download März 2020  Download März 2020
Vegetation	Schweizweites Vegetationsmodell  Christian Ginzler (2018). Vegetation Height Model NFI. National Forest Inventory (NFI). doi:10.16904/1000001.1. <a href="http://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4343">http://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4343</a> <a href="https://www.envidat.ch/dataset/vegetation-height-model-nfi">https://www.envidat.ch/dataset/vegetation-height-model-nfi</a>	2018



### Flächenkulisse Zukunftsszenario

Um die Nutzungsstrukturen möglichst aktuell abzubilden, werden alle städtebaulichen Entwicklungsflächen, deren Realisierung in den nächsten 4 bis 5 Jahre absehbar ist, in die Flächenkulisse für die Gegenwart eingebunden. Für das Zukunftsszenario werden die perspektivisch absehbaren Siedlungserweiterungen berücksichtigt, wobei hier zwischen den Nutzungsarten Arbeiten und Wohnen unterschieden wird. Im Kanton Bern wurden insgesamt 146 Entwicklungsflächen berücksichtigt. Dabei wurden bei bereits konkreten städtebaulichen Entwürfen die Gebäude übernommen. In den Flächen, wo dies nicht der Fall war, kam der sogenannte „Mischpixel-Ansatz“ zum Einsatz. Dabei wird eine statistisch signifikante Menge von Rasterpixeln ähnlicher siedlungstypologischer Ausprägung ausgewählt, um die jeweilige Entwicklungsfläche möglichst repräsentativ in das Quartiersbild einzubetten. Für die zukünftig zu entwickelnden Gebiete werden Flächen aus der Ist-Situation ausgewählt, die dem Bebauungszustand der Zukunft entsprechen. Auf der Grundlage der FITNAH-Eingangsdaten erfolgt eine Auswertung hinsichtlich der repräsentativen Verteilung der Oberflächenbedeckung. Somit lassen sich die Entwicklungsflächen in das Modellumfeld übertragen, ohne dafür eine konkrete Konstruktion auf der jeweiligen Fläche erzeugen zu müssen.

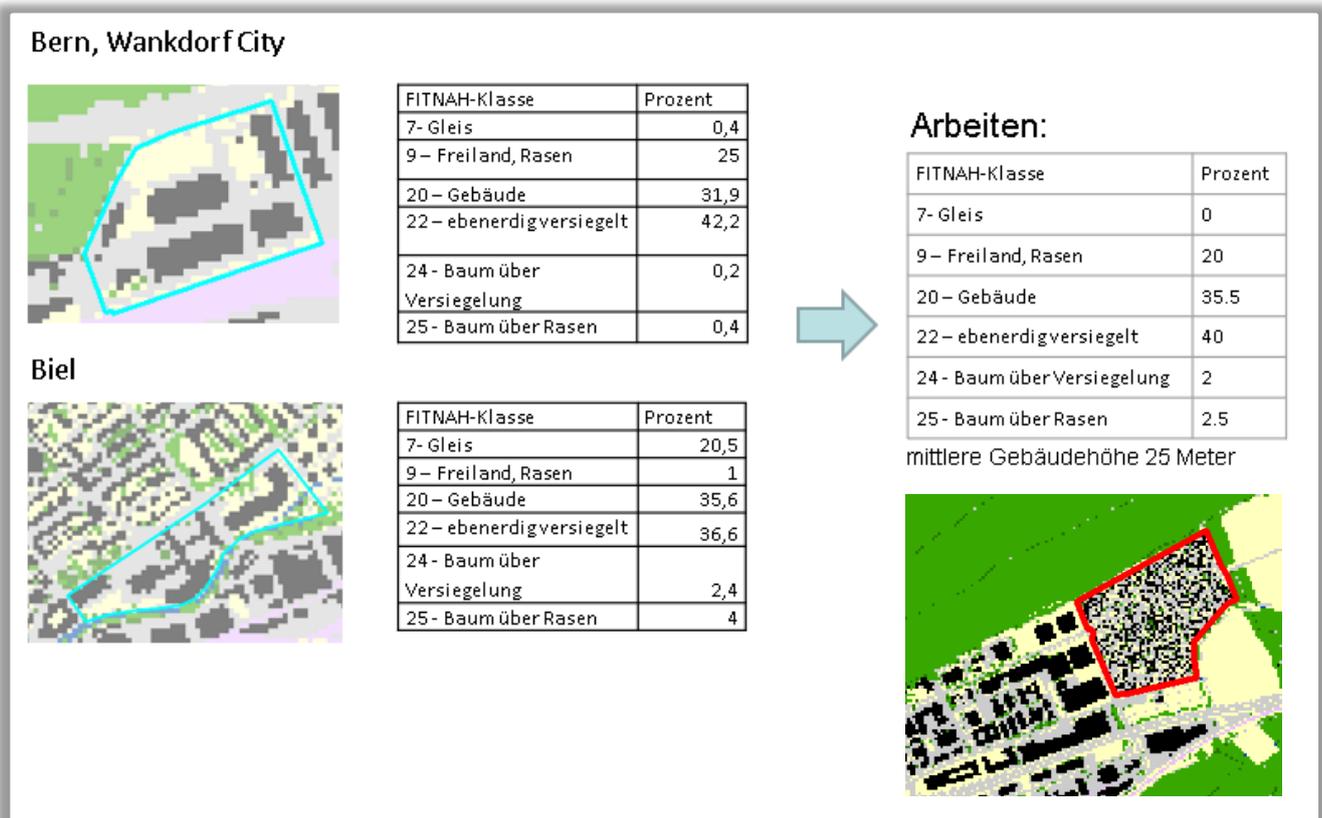
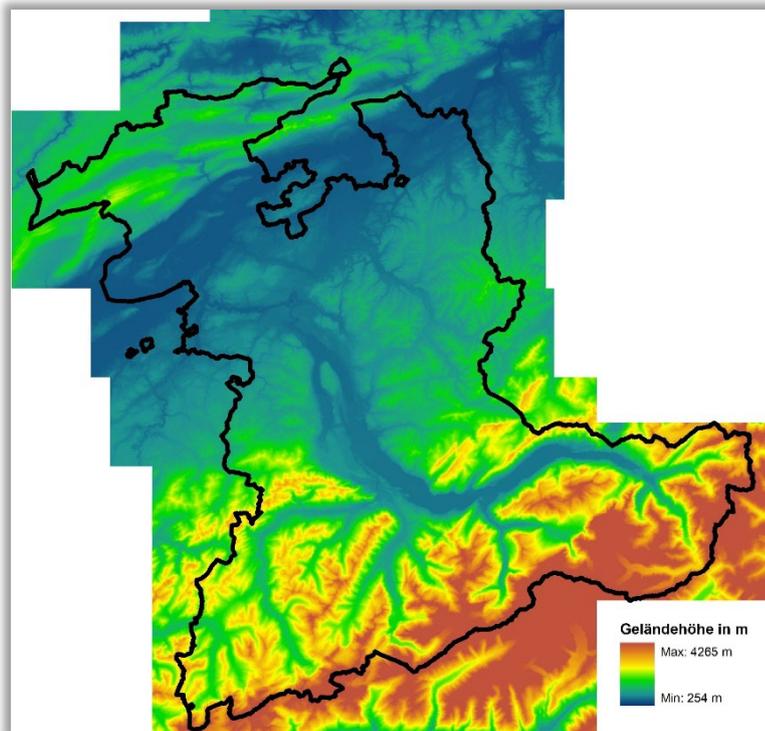


Abb. 2.1: Exemplarische Referenzflächen für die Siedlungstypologie „Arbeiten“ am Beispiel Bern und Biel sowie abgeleitete Mischpixelfläche „Arbeiten“ am Beispiel Biel Allmendweg



## 2.1 Eingangsdaten

Die Abgrenzung des Simulationsraumes deutlich über das Kantonsareal hinaus und zielt darauf ab, auch ausserhalb des Kantonsgebietes vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren und die relevanten Höhenzüge für den Kanton zu erfassen. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten - insbesondere des Reliefs -



berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 10 m. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell (DTM aus dem Jahr 2019) mit einer Auflösung von 10 m zurückgegriffen werden, welches das gesamte Kantonsgebiet repräsentiert (Abb. 2.2).

Abb. 2.2:

Geländehöhe im Untersuchungsgebiet

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurden im Wesentlichen Daten aus der Informationsebene Bodenbedeckung (Amtliche Vermessung; Datenstand Mai 2019) verwendet sowie weitere zur Verfügung gestellte Eingangsdaten, die bspw. die noch nicht enthaltenen Gebäude in der Bodenbedeckung beinhalteten. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein 11-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet (siehe Tabelle 2.1). Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen zu ermöglichen (Mosimann et al. 1999). Die Abbildung 2.3 zeigt die rasterbasierten Eingangsdaten für den gesamten Kanton für die FITNAH-Modellrechnung mit einer Auflösung von 10 m x 10 m. Das Modellgebiet erstreckt sich über die Grossregionen Jura, Mittellands sowie Voralpen.

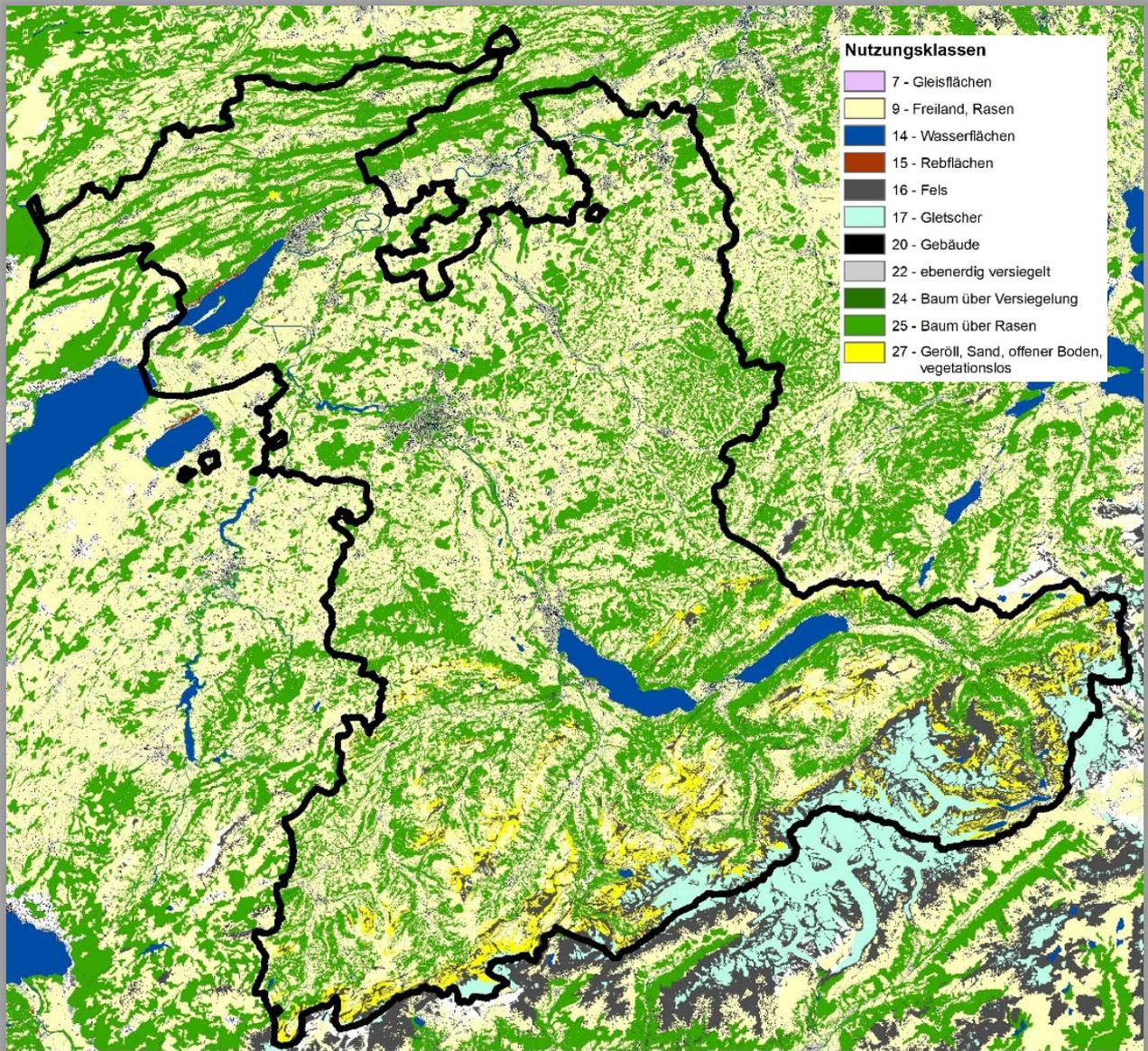


Abb. 2.3: Nutzungsstruktur im Kantonsgebiet

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen und der Vegetation dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben, weil sie als Hindernisse wirken. Da bei der 10 x 10 m Masstabsebene Einzelgebäude und Baumgruppen aufgelöst werden können, sind die realen Gebäude- und Vegetationshöhen auf das Rechenraster übertragen worden.

Weiteren massgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie der Versiegelungsgrad aus. Dieser wird wie in Tabelle 2.1 dargestellt den jeweiligen Nutzungsklassen angehängt. Diese Werte beruhen auf Analyse und Auswertung von Versiegelungsgraden deutscher Städte. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Nutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden.



### 3. Methode der modellgestützten Siedlungsklimaanalyse

#### 3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (DWD) oder in der Schweiz von der MeteoSchweiz für die tägliche Wettervorhersage routinemässig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse. Der Grossteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Grössenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmassnahmen).

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

#### **GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE**

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Grössen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH



3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, 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.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung siedlungsklimatologisch wichtiger Grössen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. 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 10 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 4, 10, 15, 20, 30, 40, 50 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 Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

### **3.2 Synoptische Rahmenbedingungen**

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Region besonders gut ausbilden, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Dahingehend wurden die grossräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermassen festgelegt:



- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Bedeckungsgrad 0/8
- Kein überlagernder geostrophischer Wind
- Lufttemperatur über Freiland um 21:00 Uhr in Anlehnung an die in Kap. 4.1 beschriebenen Referenzstationen

Um im Zukunftsszenario die klimawandelbedingte Zunahme der Wärmebelastung abzubilden, ist die Antriebstemperatur der Modellrechnung um +2,6 K erhöht worden. Das entspricht der Änderungen der sommerlichen Mitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Bezugsjahr 2060.

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist hingegen die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde und Kaltluftabflüsse), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. In Abb. 3.1 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

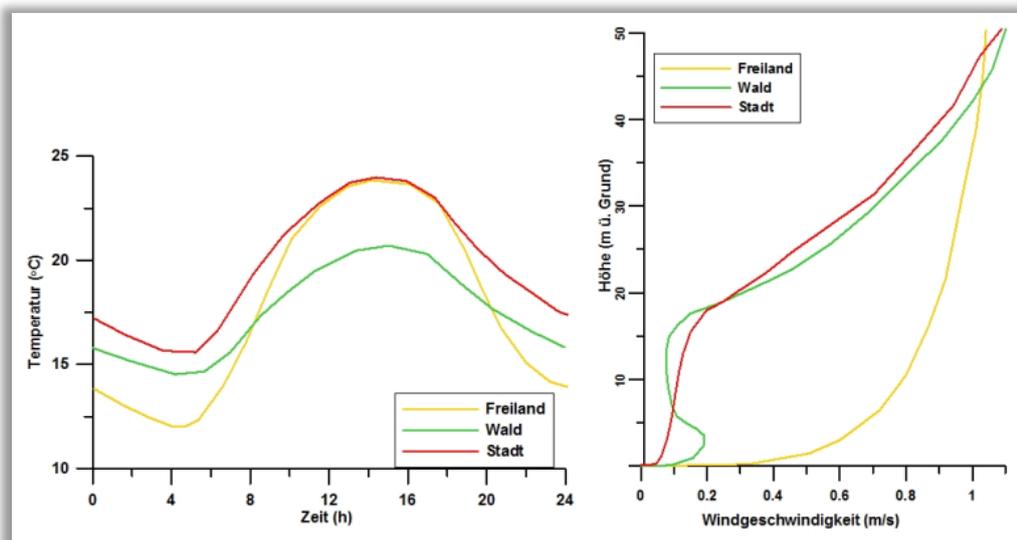


Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Hinsichtlich des Temperaturverlaufs zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien hingegen deutlich geringer ist. Bei den durch Wiese geprägten Grünflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen Temperaturniveau bei, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.



### 3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 10 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 3.2). Qualifizierende 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 sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und massstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche den Mittelwert der für eine Bewertung relevanten Klimaparameter, welcher die flächenspezifische Werteausprägung repräsentiert. So führt beispielsweise die hohe Oberflächenversiegelung einer Gewerbebebauung in den Nachtstunden zu einem höheren Flächenmittelwert der Lufttemperatur als eine stark durchgrünte Wohnbebauung am Ortsrand.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap. 4), zum anderen als planungsrelevante und massstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap. 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

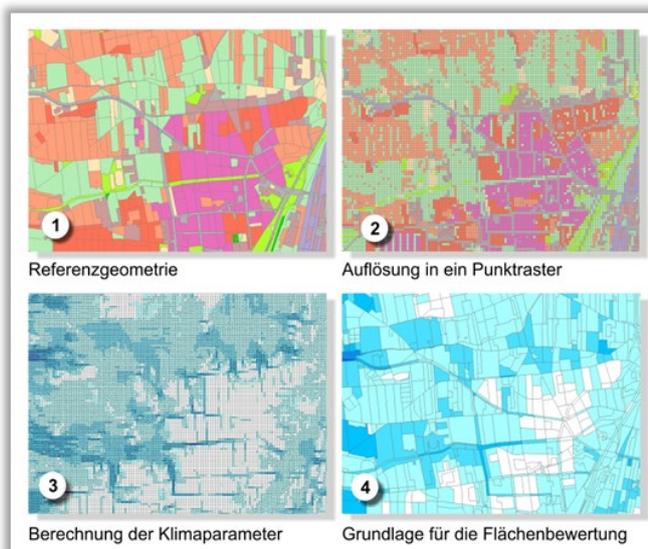
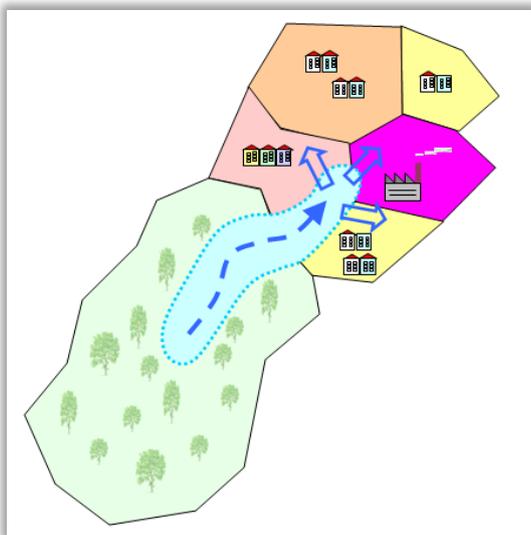


Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



### KALTLUFTLEITBAHNEN

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 3.3). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Planungshinweiskarte dargestellt. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Strassenräume. Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von  $\geq 1^\circ$  aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung.



Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus siedlungsklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Aufgrund der ausgeprägten Reliefsituation im Kantonsgebiet werden Kaltluftabflüsse nicht gesondert ausgewiesen.

Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn

### 3.4 Klimatische Grundlagen

Für die stadt- bzw. siedlungsklimatische Analyse des Kantons Bern benötigt das verwendete Modell FITNAH meteorologische Eingangsdaten, die als modellinterner Antrieb fungieren. Idealerweise werden hierfür Messdaten verwendet, die an Tagen mit autochthoner Wetterlage (strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage) erhoben wurden, um die human-biometeorologische Bedeutung bestmöglich abbilden zu können. Die Darstellung der Klimaparameter an dieser Stelle beruht auf den bei MeteoSwiss vorhandenen Grafiken und Auswertungen in den Sommermonaten. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der MeteoSwiss Station Bern/Zollikofen.

Das Klima charakterisiert den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt. In der Schweiz gilt für die Beschreibung des Klimas jeweils die aktuellste Klimaperiode, momentan die Periode 1981-2010 (Begert et al. 2013) und beinhaltet damit auch schon den bereits beobachteten Klimawandel, der sich seit Mitte der 1980er Jahre bemerkbar macht.



### 3.4.1 Aktuelles Klima an der kantonaler Wetterstation Bern/Zollikofen

Der Kanton Bern ist dem mitteleuropäischen Kontinentalklima zuzuordnen, erstreckt sich innerhalb der Schweiz aber über die drei Grossregionen Jura, Mittelland sowie Alpen. Die Abbildung 3.4 zeigt ein Klimadiagramm für die Station Bern für die Normperiode 1991 – 2020, die im folgenden Abschnitt exemplarisch für die Sommermonate kurz beschrieben werden soll.

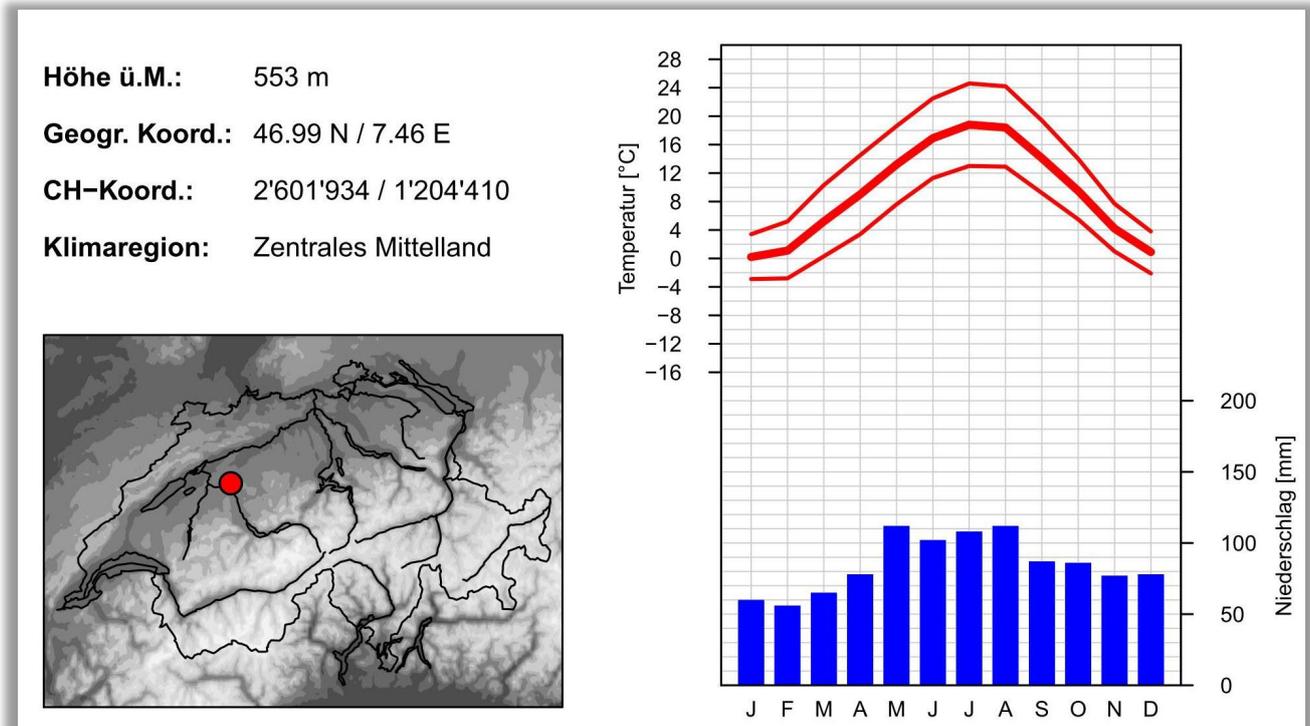


Abb. 3.4: Klimadiagramm Station Bern / Zollikofen, Normperiode 1991 – 2020. Quelle: (Meteoschweiz 2020b)

Für die Sommermonate Juni, Juli und August ist zu sehen, dass die Temperaturen im Monatsmittel unter 20° C verbleiben (dicke rote Linie im Diagramm). Die Maximaltemperaturkurve (obere rote Kurve) reicht in den Sommermonaten JJA hingegen weit über 20°C, im Juli sind es sogar 24,6°C. Im Juni sind 10 Tage, im Juli 15,5 Tage und im August 14 Tage als Sommertage (Maximaltemperatur am Tag > 25 °C) im Mittel gemessen worden. Hitzetage (Maximaltemperatur am Tag > 30 °C) gab es in der Anzahl weniger: für Juni 1,6; für Juli ca. 4 und für den August 3,4 Tage. Tropennächte sind an der Station Bern/Zollikofen für die Normperiode nicht ausgewiesen. Der Juli ist der heisseste Monat des Sommers. Damit spiegelt die für die FITNAH-3D angenommene Starttemperatur am Abend von 21 °C in 2 m Höhe eine mittlere sommerliche Situation wider. Die mittlere Temperatur gibt für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar positive Werte über Null °C an. Die Minimumtemperatur (untere rote Kurve) zeigt jedoch noch geringe Minusgrade von -2,1 °C für den Dezember und -2,9 im Januar. Den Temperaturen gegenüber stehen in der Abbildung 3.4 der Niederschlag. Die monatlichen Niederschlagssummen sind in den Sommermonaten mit jeweils über 100mm als Monatssumme am höchsten, wobei die maximale Niederschlagssumme im Mai mit 112 mm genauso hoch ist wie im Juli. Somit gehen die über das Jahr betrachtet höchsten monatlichen Niederschlagssummen mit den wärmsten Monaten einher. Ob dieser Niederschlag für die Versorgung der Vegetation ausreichend ist, gibt die Grafik nicht wider.



### 3.4.2 Beobachteter Klimawandel an kantonalen Wetterstationen

Die Zunahme der Schweizer Mitteltemperatur seit 1864 bis heute beträgt rund 2 °C. Das ist im Vergleich zur Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von 0,8 °C deutlich mehr und liegt hauptsächlich an der zentralen kontinentalen Lage der Schweiz. Wird der Blick gen Zukunft gewandt, so ermitteln die Klimaszenarien CH2018 eine Temperaturzunahme für die Schweiz zum vorindustriellen Zeitalter bis 2100 von +6 °C (Begert et al. 2019), was jedoch mit konsequentem Klimaschutz auf 2,5°C für die Schweiz begrenzt werden kann. Dem Schweizer Mittelland wird eine hohe Zunahme der Temperatur aufgrund des Klimawandels vorhergesagt. In der Abbildung 3.5 ist die Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen, um die Trends der Entwicklung nachzuvollziehen. Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Jahre ab 2015 weichen alle von der Periode 1961 – 1990 mit über +3 °C ab. Das Jahr 2003 ist das mit der höchsten positiven Abweichung zur Periode von fast +5°C. Diese Grafik verdeutlicht, dass bereits jetzt der Klimawandel stattfindet und in den Messreihen beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

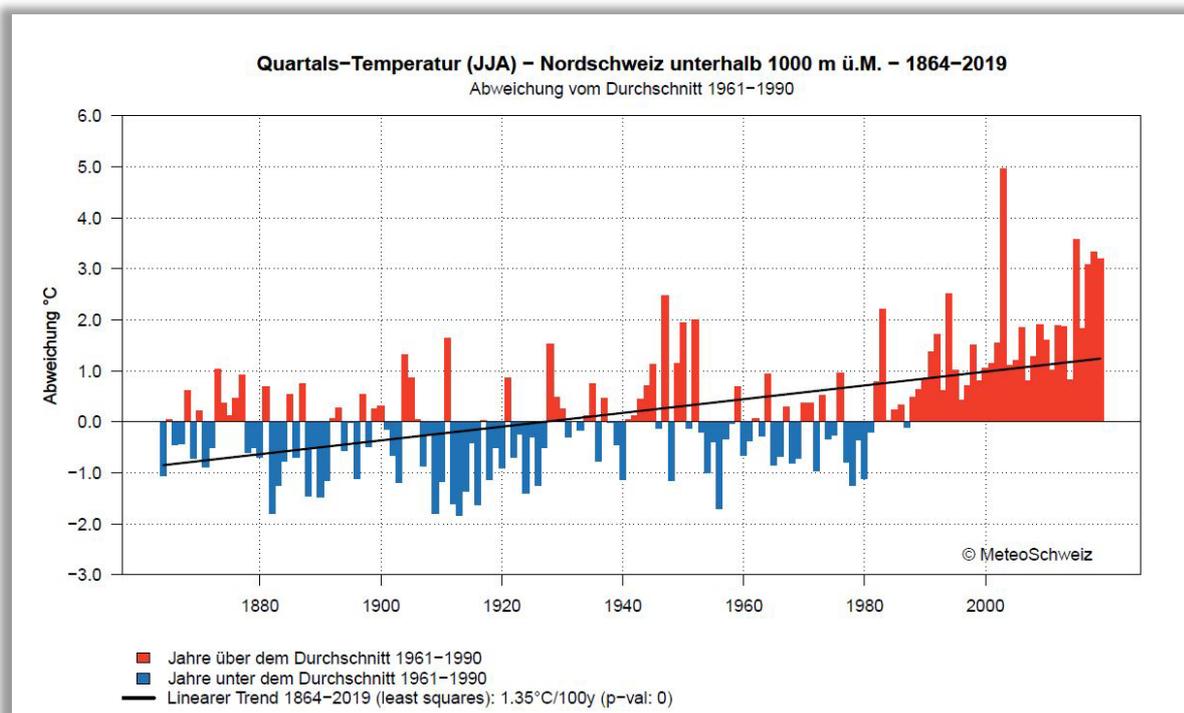


Abb. 3.5: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. Quelle: (Meteoschweiz 2020d)

Abbildung 3.6 zeigt die langjährige Entwicklung der Niederschlagssummen im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 für die Nordschweiz für Gebiete unter 1.000m. Hier ist kein signifikanter Trend zu sehen und die Werte schwanken positiv als auch negativ um den Durchschnitt der Klimaperiode 1961 – 1990.

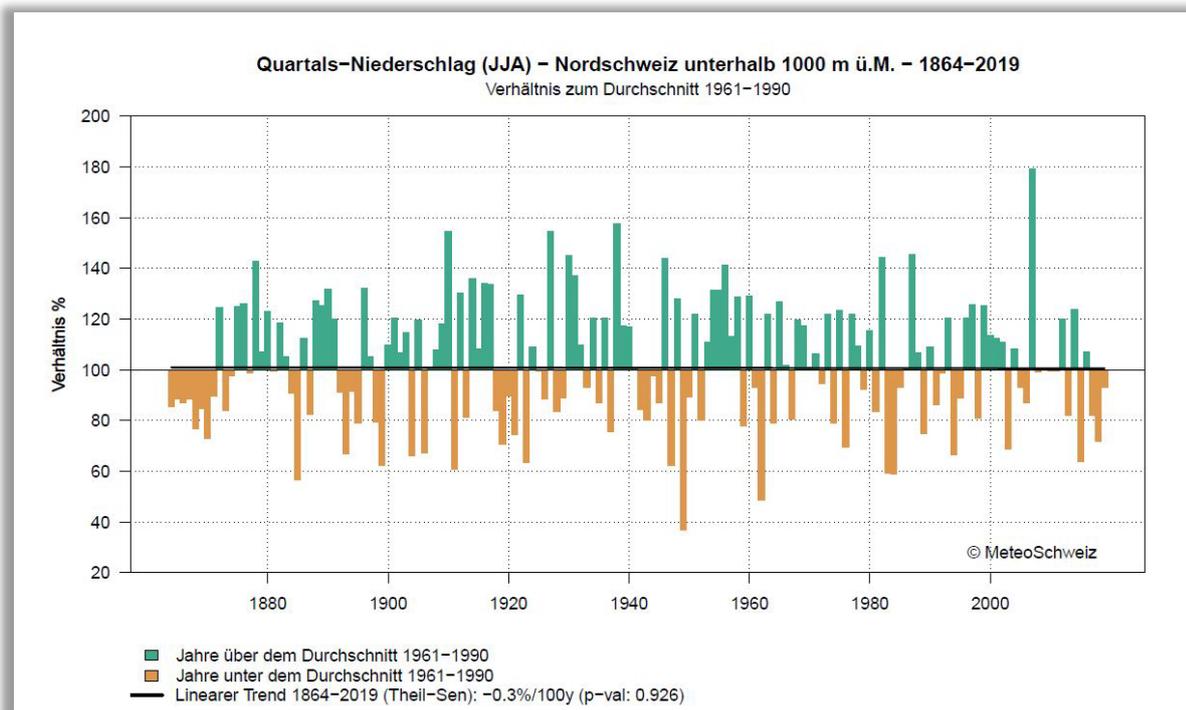


Abb. 3.6: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 - 1990. Quelle: (Meteoschweiz 2020d)

### 3.4.3 Hauptanströmrichtung

Die Abbildung 3.7 zeigt die Windrosen der Station Bern/Zollikofen für die Sommermonate Juni, Juli und August. Die Hauptwindrichtung der Station Bern/Zollikofen ist Nordnordost für Juni und Juli, hauptsächlich mit Windgeschwindigkeiten von < 3m/s. Es treten jedoch auch Windgeschwindigkeiten von 3 bis unter 6 m/s auf, nicht nur in der Hauptwindrichtung. Im August nimmt die südliche Strömungskomponente etwas zu, während die Häufigkeit einer Anströmung aus Nordnordost zurückgeht. Gleichzeitig gehen auch die auftretenden Windgeschwindigkeit tendenziell zurück. Dies zeigt sich einerseits an der Zunahme der Kalmen auf etwa 10 %. Kommt es zeitgleich zu einer hohen thermischen Belastung z.B. in den urban geprägten Räumen, so ist das Empfinden der Temperaturen deutlich höher, da die schwächeren auftretenden Winde für weniger Kühlung sorgen.

Die Station Bern/Zollikofen ist nicht repräsentativ für den gesamten Kanton, da die Windverhältnisse stark an die lokalen bzw. naturräumlichen Gegebenheiten gebunden sind. Jedoch verdeutlichen die Windrosen, dass es durchaus zu monatlichen Schwankungen in den Windrichtungen, -stärken und -häufigkeiten kommen kann.

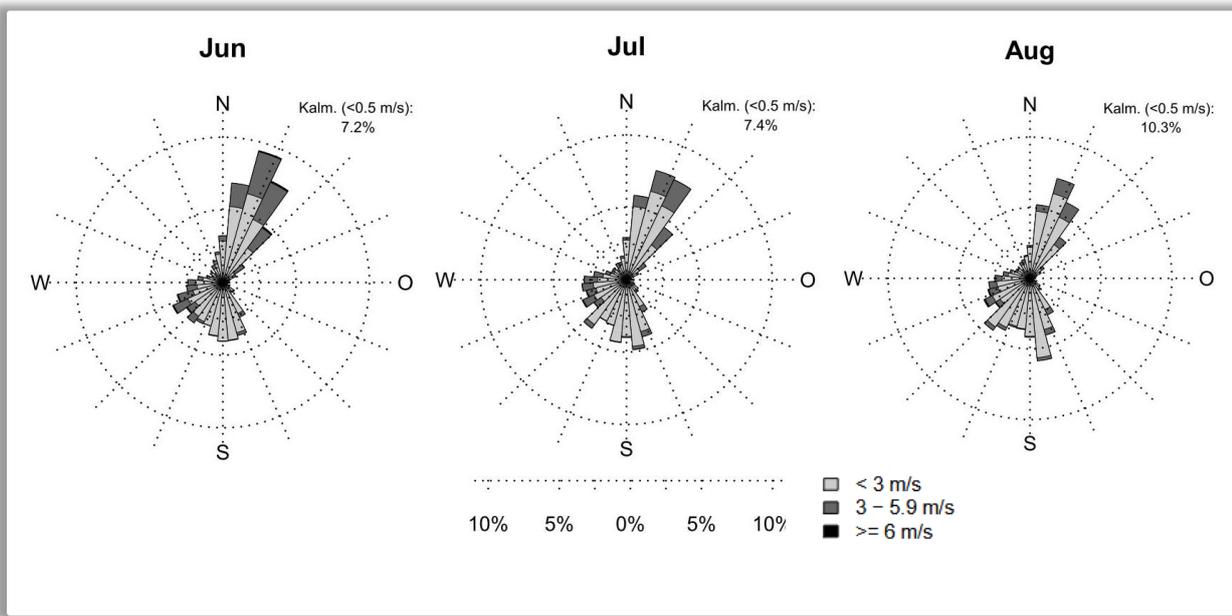


Abb. 3.7: Windrosen der Station Bern/Zollikofen 365 m ü.M. für die Sommermonate JJA. Quelle: (Meteoschweiz 2020c).

### 3.4.4 Klimawandelszenario

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-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, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways), die seit dem fünften IPCC-Bericht die SRES-Szenarien abgelöst haben (Special Report on Emissions Scenarios). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m<sup>2</sup>, der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abb. 3.8):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m<sup>2</sup>. Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m<sup>2</sup> ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 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. Diese Situation liegt dem für den Kanton Bern modellierten Zukunftsszenario zugrunde.

Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf



dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen.

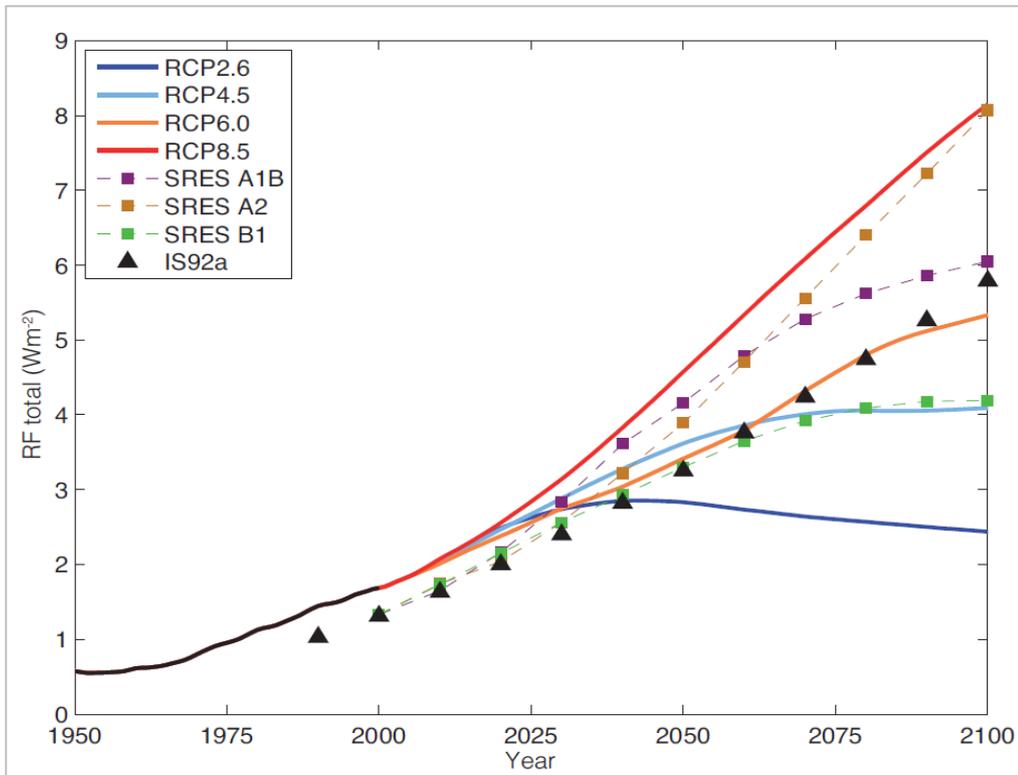


Abb. 3.8: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)

Die Abb. 3.9 zeigt die Abweichung der gemessenen mittleren sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 für die Regionen Mittelland und Voralpen sowie die Projektion für die RCP-Szenarien 2.6 und 8.5. Im 30-jährigem Mittel lässt sich für beide Regionen eine deutliche Zunahme der Temperatur ab den 80er Jahren beobachten.



**Temperatur**

Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Mittelland

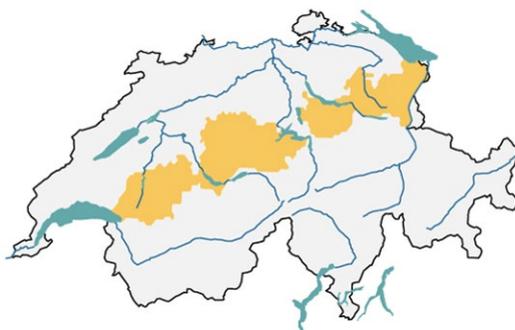
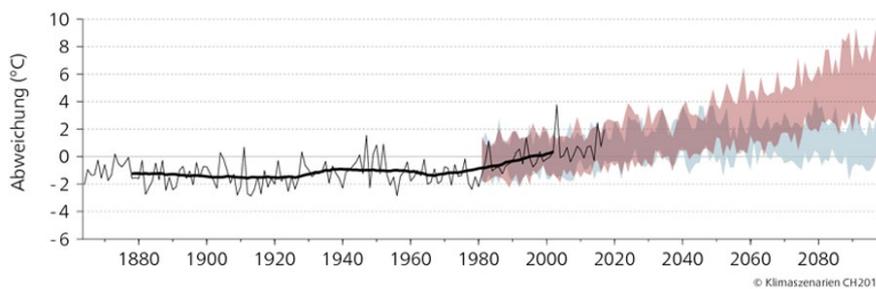
— Beobachtungen

— 30-jähriges gleitendes Mittel

RCP2.6

RCP8.5

Sommer



**Temperatur**

Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Voralpen

— Beobachtungen

— 30-jähriges gleitendes Mittel

RCP2.6

RCP8.5

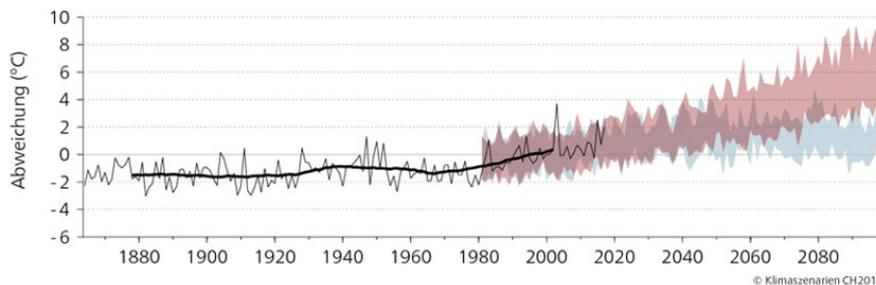


Abb. 3.9: Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 in den Regionen Mittelland und Voralpen (NCCS 2018)

Im weiteren Verlauf der Messungen festigt sich seit dem Jahr 2000 der Trend stetig steigender Temperaturen. Dieser entwickelt sich je nach betrachtetem RCP-Szenario in unterschiedliche Richtungen. Während sowohl im Szenario 2.6 und 8.5 bis etwa 2040 ein ähnlich ausgeprägter Anstieg zu erwarten ist, steigen die Temperaturen im Szenario 8.5 weiter an. Hier wird zum Ende des Jahrhunderts eine



Abweichung gegenüber der Normperiode 1981-2010 in einer Grössenordnung von 5 bis 6 °C projiziert. Im „Klimaschutz-Szenario“ 2.6 hingegen ist der Anstieg mit 1 °C wesentlich niedriger.

Die Abbildung 3.10 zu den Sommertagen und Hitzetagen für die Station Bern/Zollikofen verdeutlichen die kontinuierliche Zunahme der meteorologischen Kenntage Sommer- und Hitzetage bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts. Sommertage sind Tage, wo die maximale Tagestemperatur  $\geq 25^{\circ}\text{C}$  ist, Hitzetage sind Tage, an denen die Maximaltemperatur am Tag  $30^{\circ}\text{C}$  übersteigt. Die Graphiken zeigen die Entwicklung für das RCP-Szenario 2.6 mit Klimaschutzmassnahmen (links) und das pessimistische RCP-Szenario 8.5 ohne Massnahmen (rechts). Das dem simulierten Zukunftsszenario zugrunde liegende RCP-Szenario 4.5 (Mitte) nimmt eine vermittelnde Stellung ein.

Bei den Sommertagen zeigt sich für das Szenario 2.6 eine Zunahme von ca. 42 im Jahr 1995 auf etwa 56 im Bezugsjahr 2035. Dieser Wert steigt bis 2060 auf 58 an und bleibt bis zum Betrachtungsjahr 2085 unter der Annahme wirksamer globaler Massnahmen zum Klimaschutz annähernd stabil. Im Szenario 4.5 ist die Anzahl der Sommertage für 2035 zunächst mit dem Szenario 2.6 vergleich, steigt allerdings bis 2060 auf durchschnittlich 66,4 Tage/Jahr an. Im Jahr 2085 ist der weitere Anstieg auf ca. 69 Sommertage/Jahr moderat.

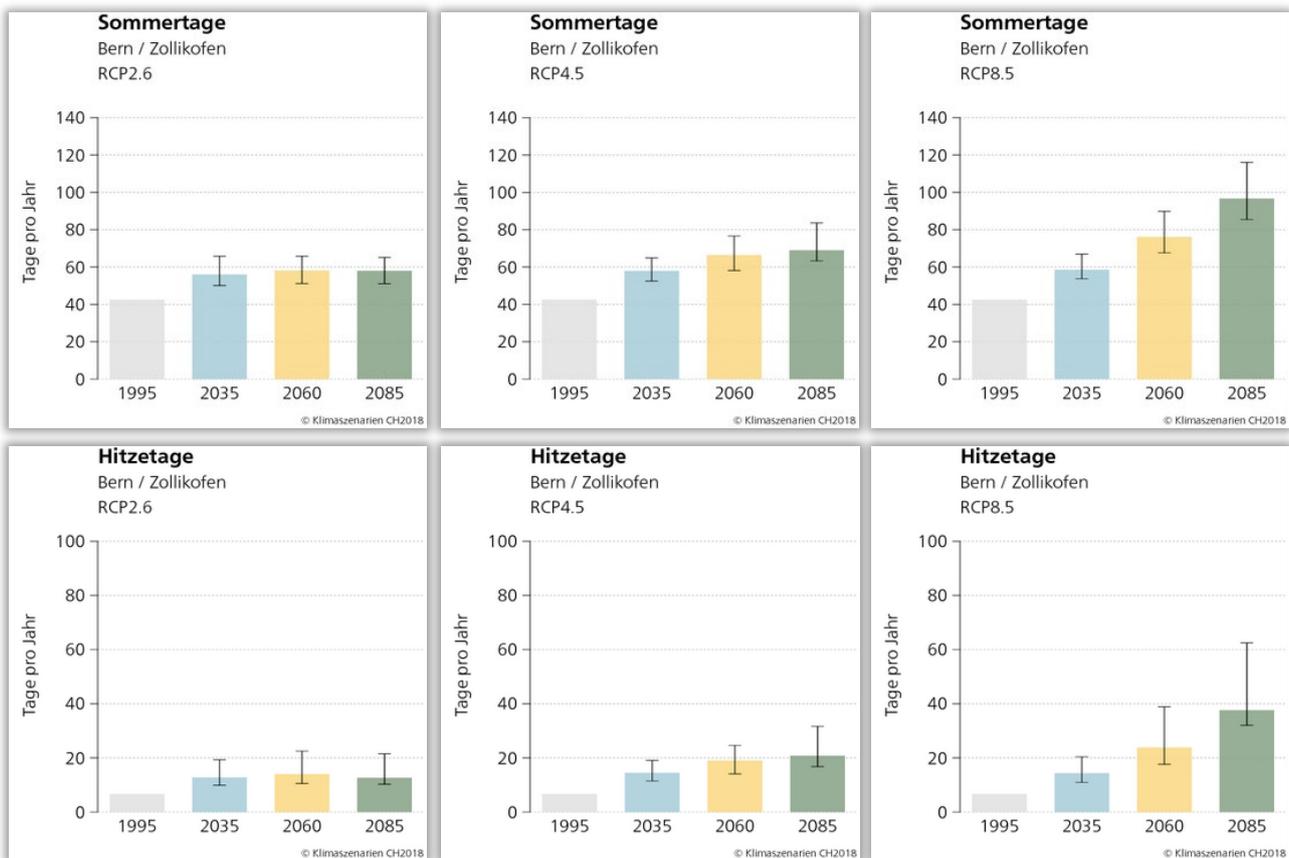


Abb. 3.10: Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Bern/Zollikofen. Quelle: (NCCS 2018)

Für das Szenario 8.5 ist hingegen eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen, welche für das Jahr 2085 mit über 96,6 angegeben wird. Die für die Sommertage beschriebene Charakteristik für das Szenario 2.6 zeigt sich in ähnlicher Weise auch für die Hitzetage, wobei - ausgehend von 6,6 Tagen im Jahr 1995 - das Maximum mit 14 Tage/Jahr ab 2060 nicht mehr markant ansteigt. Im Betrachtungsjahr 2035 ist die Anzahl



der Hitzetage mit ca. 14 in den Szenarien 4.5 und 8.5 noch ähnlich ausgeprägt. Bis zum Jahr 2060 nimmt die Zahl der Hitzetage im Szenario 4.5 auf 19 zu, im Szenario 8.5 beträgt sie bereits knapp 24. Bis 2085 steigt im Szenario 4.5 die Anzahl an Hitzetagen moderat auf etwa 21 an, während für das Szenario 8.5 nunmehr 37,6 Hitzetage angenommen werden. Verglichen mit dem Szenario 2.6 stellt dies eine Verdreifachung dar.



## 4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Dargestellt werden die Ergebnisse für die Räume Biel, Bern und Thun für die Gegenwart und das Zukunftsszenario. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die siedlungsklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Die in Kap. 3.4 beschriebene Referenzstation wurde sowohl für den Modellantrieb als auch die Validierung der Ergebnisse herangezogen.

Für das Zukunftsszenario im Jahr 2060 wird eine mittlere sommerliche Temperaturzunahme von 2,6 K zugrunde gelegt (vgl. Kap. 3.4.4). Die unterschiedlichen Nutzungsstrukturen wirken darauf verstärkend (überbaute Räume) oder abschwächend (Grünräume) ein. Im Allgemeinen werden aber sowohl die Grünflächen als auch der Siedlungsraum wärmer. Daher ist der Wärmeinseleffekt oftmals nur geringfügig höher als in der Ist-Situation und die Kaltluftlieferung der Grünflächen vergleichbar mit der Ist-Situation ausgeprägt. Die Grünflächen liefern weiterhin kalte Luft, allerdings ist diese etwas wärmer verglichen mit der Gegenwart, aber immer noch kühler als die Siedlungsräume. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Landnutzungen sowie der Luftaustausch insgesamt bleiben ähnlich ausgeprägt.

### 4.1 Nächtliches Temperaturfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmass der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, grosse Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmass der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Grösse der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet).

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem grossen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum.



Grössere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – ausserdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tägliche Temperaturamplitude über grösseren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken grössere **Gewässer** auf bebauete Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern. Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen.

Die naturräumliche Gliederung des Kantons Bern umfasst mit dem Jura/Mittelland im Norden und den Voralpen mehrere Grossregionen der Schweiz, was sich in der Spannweite des nächtlichen Temperaturfeldes widerspiegelt. Die sich um 4 Uhr in der Nacht einstellenden Werte im Kantonsgebiet umfassen gegenwärtig zwischen Minimalwerten von  $-4.3\text{ °C}$  und Maximalwerten von bis zu  $23.0\text{ °C}$  eine Spannweite von etwa  $27\text{ °C}$ . Die mittlere Temperatur innerhalb des Kantonsgebietes liegt bei den angenommenen sommerlichen meteorologischen Rahmenbedingungen bei  $12.7\text{ °C}$ . Unter dem Einfluss des Klimawandels steigt im Zukunftsszenario für das Betrachtungsjahr 2060 die mittlere Lufttemperatur auf  $15.2\text{ °C}$  an. Das Minimum liegt dann lediglich bei  $-1.7\text{ °C}$ , während der Maximalwert  $24,8\text{ °C}$  beträgt.

Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Kernbereiche grösserer Städte wie Biel, Bern oder Thun sowie ausgedehnte Gewerbeflächen gegenwärtig die höchsten Temperaturen von mehr als  $20\text{ °C}$  auf, was mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung einher geht. Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich im Temperaturfeld beobachten lässt. In den durchgrünten Siedlungstypologien wie z.B. in Biel-Brügg sind Werte zwischen  $16.0\text{ °C}$  und  $17.0\text{ °C}$  zu beobachten (Abb. 4.1).

Innerhalb grösserer Hausgärten gehen die Temperaturen lokal auch weiter zurück. Je nach örtlichen Gegebenheiten führen lokale Kaltluftabflüsse zu einer zusätzlichen Abkühlung wie z.B. in Bern-Brunnadern (Abb. 4.2). Die innerstädtischen Grünflächen zeichnen sich, abhängig von ihrer Grösse und Lage, mit einem niedrigeren Wertenniveau ab. So weisen der Rosengarten östlich der Altstadt Temperaturen zwischen  $15.5\text{ °C}$  und  $17\text{ °C}$  auf, während das Wertenniveau der Kleinen Schanze aufgrund der vergleichsweise geringeren Grösse und der Nähe zur Altstadt mit  $16.5\text{ °C}$  bis  $19.0\text{ °C}$  höher ausgeprägt ist (Abb. 4.2).



Abb. 4.3 zeigt die Situation im Bereich Thun, wo einzelne Gewerbeflächen, grössere versiegelte Bereiche und die etwas stärker verdichtete Bebauung in der Stadtmitte mit Werten bis 20.0 °C lokal hervortreten. Das nächtliche Überwärmungspotenzial der übrigen Bebauung ist als vorwiegend gering zu bewerten. Ausserhalb der eher städtisch geprägten Räume sind in den peripheren bzw. kleineren Ortschaften wie Allmendingen insgesamt niedrigere Lufttemperaturen anzutreffen. Die Abkühlung über den grösseren landwirtschaftlich genutzten Flächen ist tendenziell stark ausgeprägt und kann je nach Höhenlage zu Minimumtemperaturen von weniger als 14.0 °C führen. Durch Wiese geprägte Areale weisen dabei die stärkste nächtliche Abkühlung auf, während sich in Waldflächen aufgrund ihres Bestandsklimas höhere Werte von etwa 15.0 °C bis 18.5 °C beobachten lassen.

Im Zukunftsszenario zeigt sich die klimawandelbedingte Zunahme der Lufttemperatur in einem insgesamt höheren Wertenniveau, welches ca. 2.6 °C über dem der Gegenwart liegt. So sind in den bereits jetzt überwärmten Teilbereichen perspektivisch für das Bezugsjahr 2060 Werte von 23,0 °C bis 24,0 °C anzutreffen. Die Situation im Raum Biel zeigt Abb. 4.4 für das Zukunftsszenario, wo im Innenstadtbereich nun flächenhaft Werte von mehr als 23 °C vorliegen. Kleinräumig kann die Lufttemperatur auch über 24 °C hinausgehen. Die Temperaturen in den durchgrünten Siedlungstypologien wie beispielsweise Brügg steigen auf 18 °C bis 19 °C an und können hier über grösseren versiegelten Teilflächen oder Hauptverkehrsstrassen durchaus auch mehr als 20 °C betragen. Ein ähnliches Bild zeigt sich in Bern, wo vor allem die Altstadt und Monbijou als überwärmte Bereiche hervortreten (Abb. 4.5). Gegenüber der gegenwärtigen Situation steigt durch die zukünftige Bebauung in den Entwicklungsflächen das thermische Niveau an (z.B. Grünfläche im Bereich Weissenbühl/Wabern östlich Morillonstrasse). Aber auch in Thun zeichnen sich die bislang überwärmten Zonen der Innenstadt sowie der Gewerbeflächen als Wärmeinseln ab. In Waldarealen sowie über den ausgedehnten und meist landwirtschaftlich genutzten Freiflächen nimmt die Minimumtemperatur im Vergleich zur gegenwärtigen Situation je nach Höhenlage und örtlichen Gegebenheiten in einer Grössenordnung von 2,0 bis 2,6 K zu.

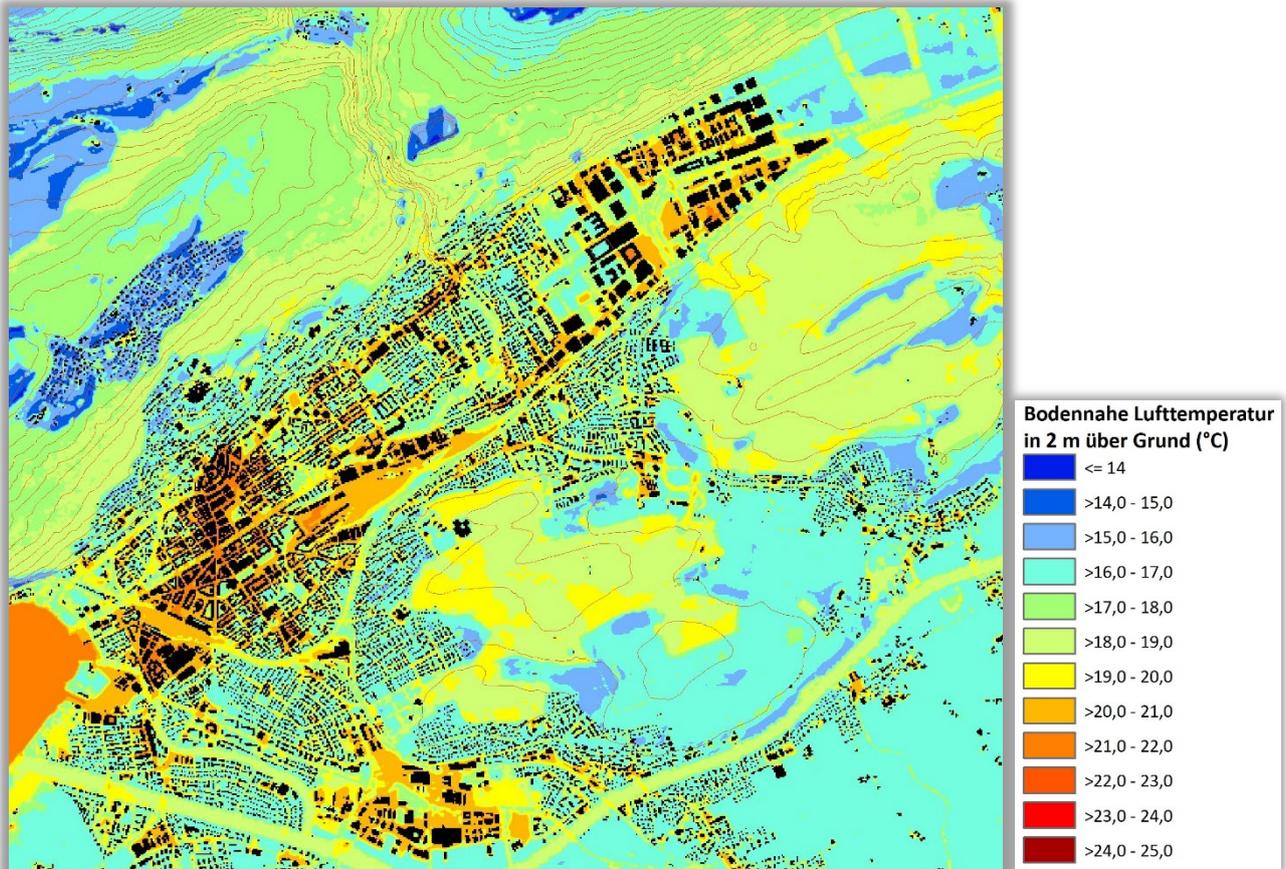


Abb. 4.1: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

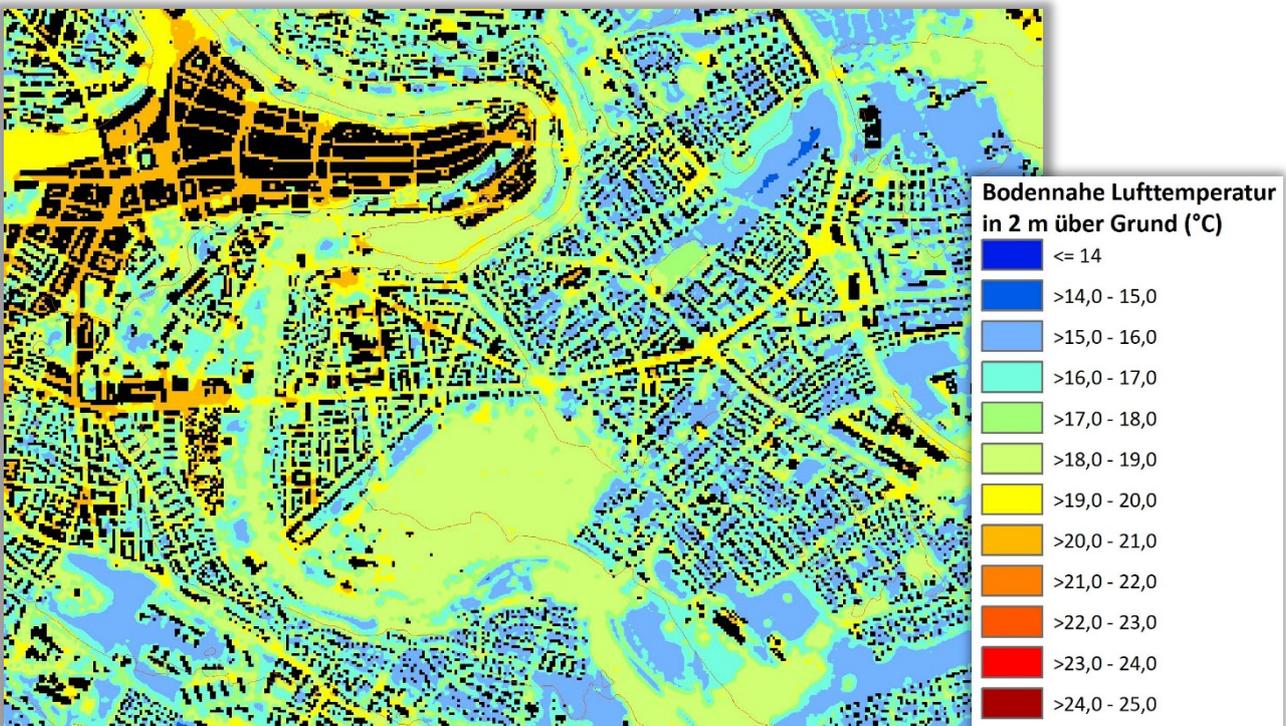


Abb. 4.2: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

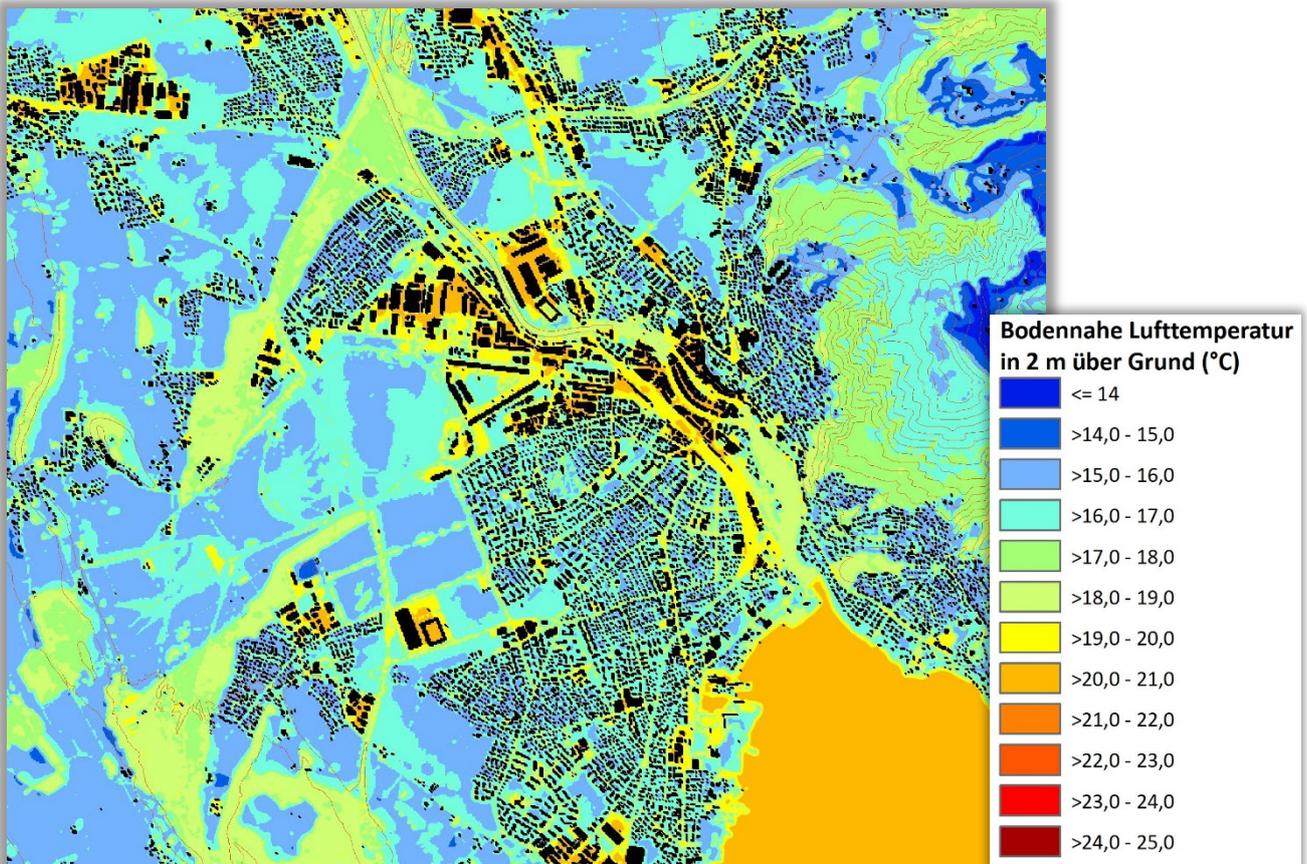


Abb. 4.3: Temperaturfeld Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

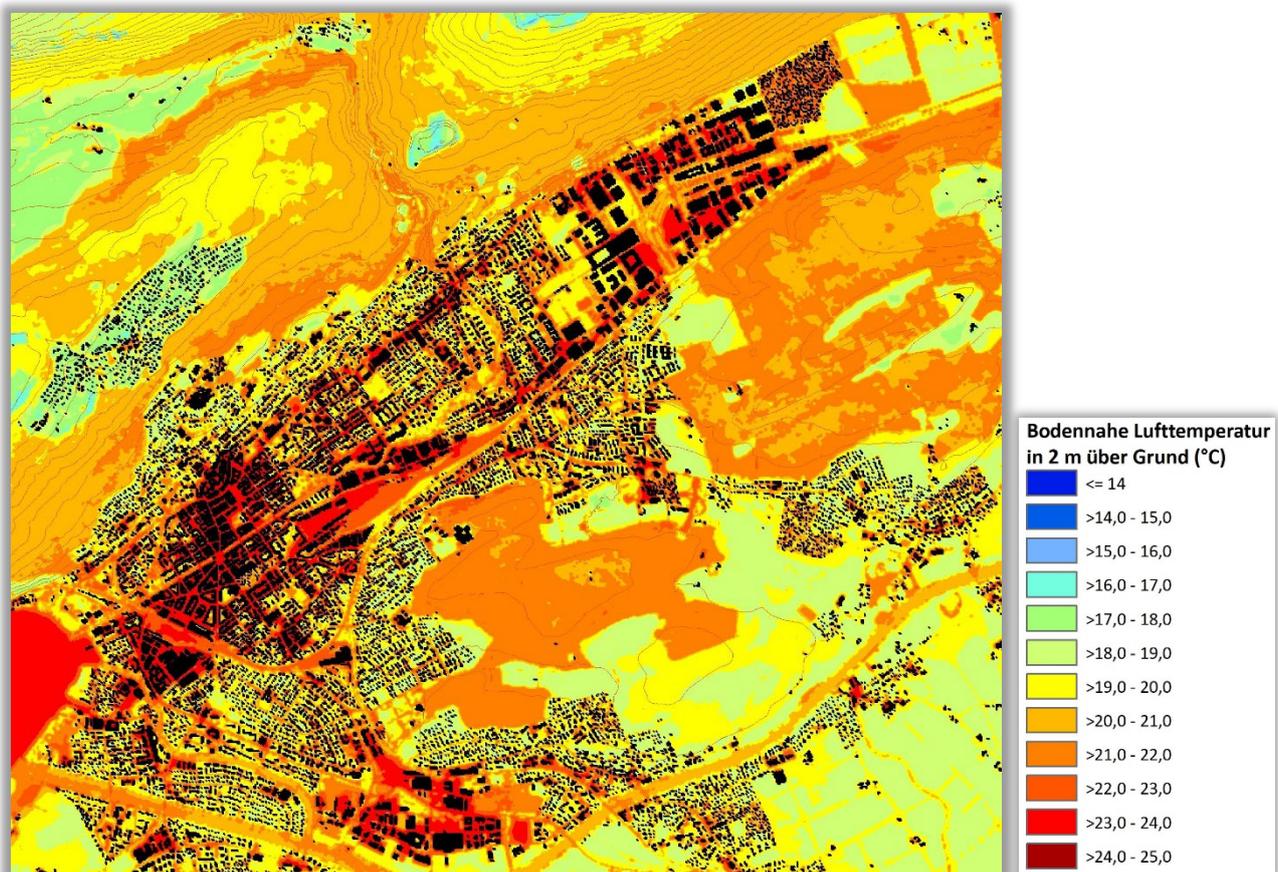


Abb. 4.4: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

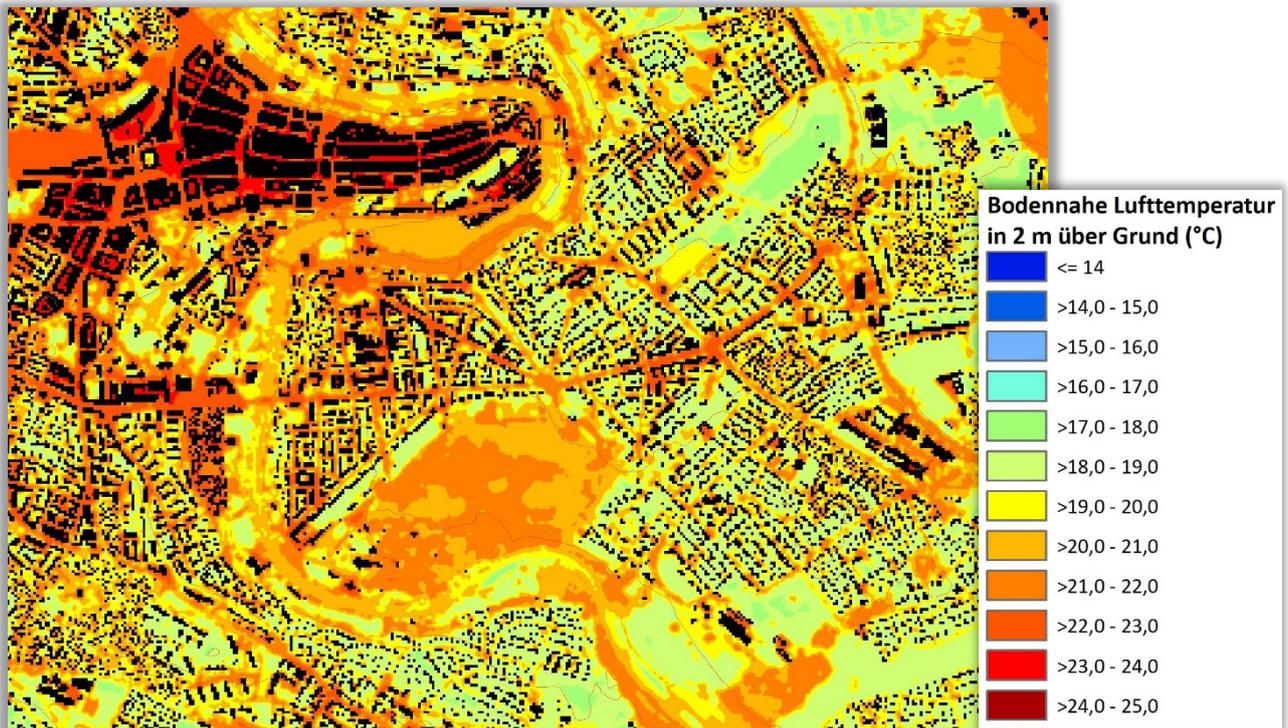


Abb. 4.5: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

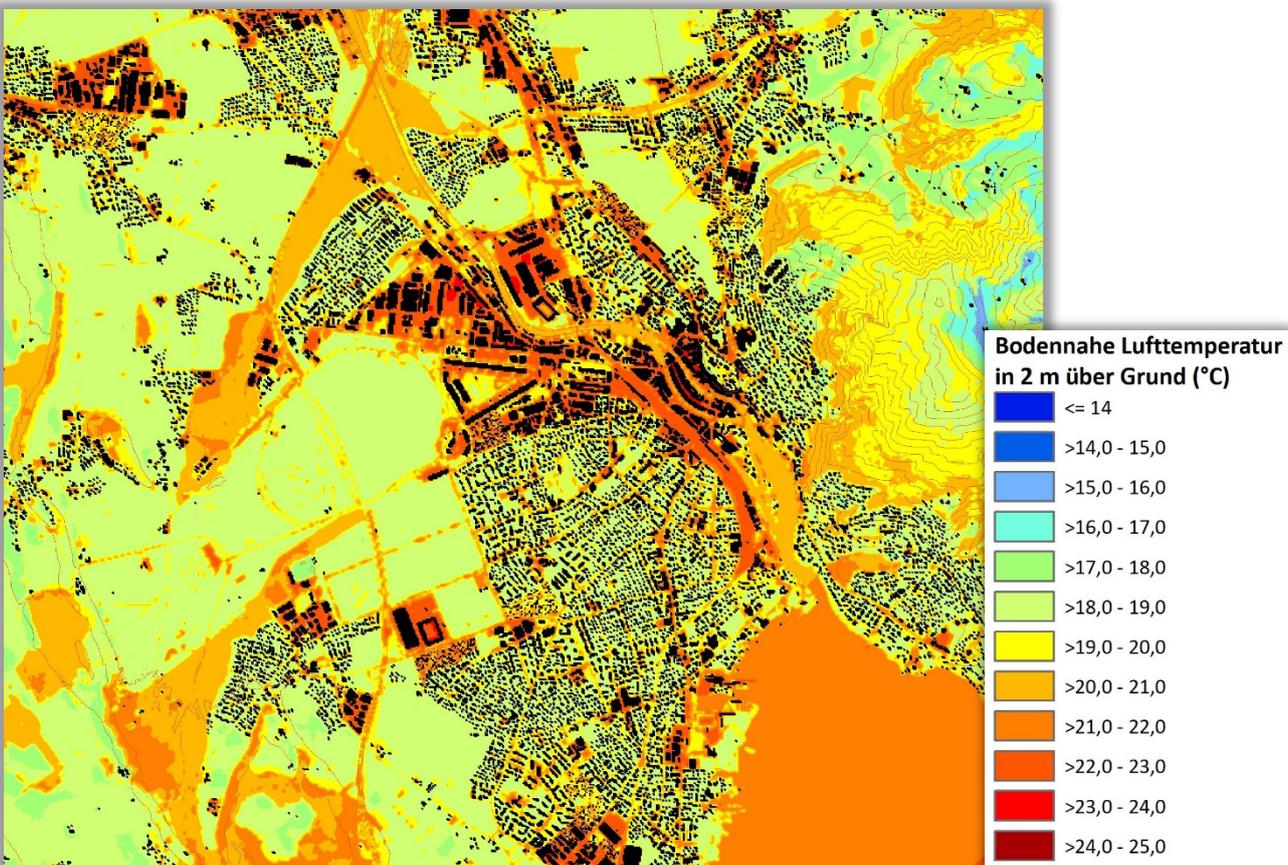


Abb. 4.6: Temperaturfeld Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)



## 4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrössen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen<sup>1</sup>. Beispiele für solche Kenngrössen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Grösse, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus dem Kanton Bern mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf aussenklimate Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar

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

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

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird.

<sup>1</sup> Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m<sup>2</sup> Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).



In der gegenwärtigen Situation ist eine schwache Wärmebelastung mit einer PET von weniger als 29°C vor allem unter den grösseren Waldbeständen zu beobachten (Türkis; Abb. 4.7 bis 4.9). Aber auch im Bereich grösser Baumgruppen von innerstädtischen Grünflächen sind günstige Aufenthaltsbedingungen anzutreffen. Dahingehend können in Biel der Stadt- und Elfenaupark sowie in Bern der Bereich Kleine Schanze und Floraanlage als innenstadtnahe Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität angesehen werden. Je nach Baumbestand weisen auch grössere Hausgärten mit weniger als 35 °C eine schwache bis mässige Wärmebelastung auf.

Dem stehen die stark besonnten Areale gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von deutlich mehr als 35°C meist als stark einzustufen ist (Gelb/Orange/Rot). Die höchste Belastung treten in den urbanen Räumen über den stark versiegelten Oberflächen und Platzbereichen ohne Verschattung auf. Allerdings können auch die rasengeprägten Grünräume aufgrund der intensiven solaren Einstrahlung eine erhebliche Wärmebelastung aufweisen.

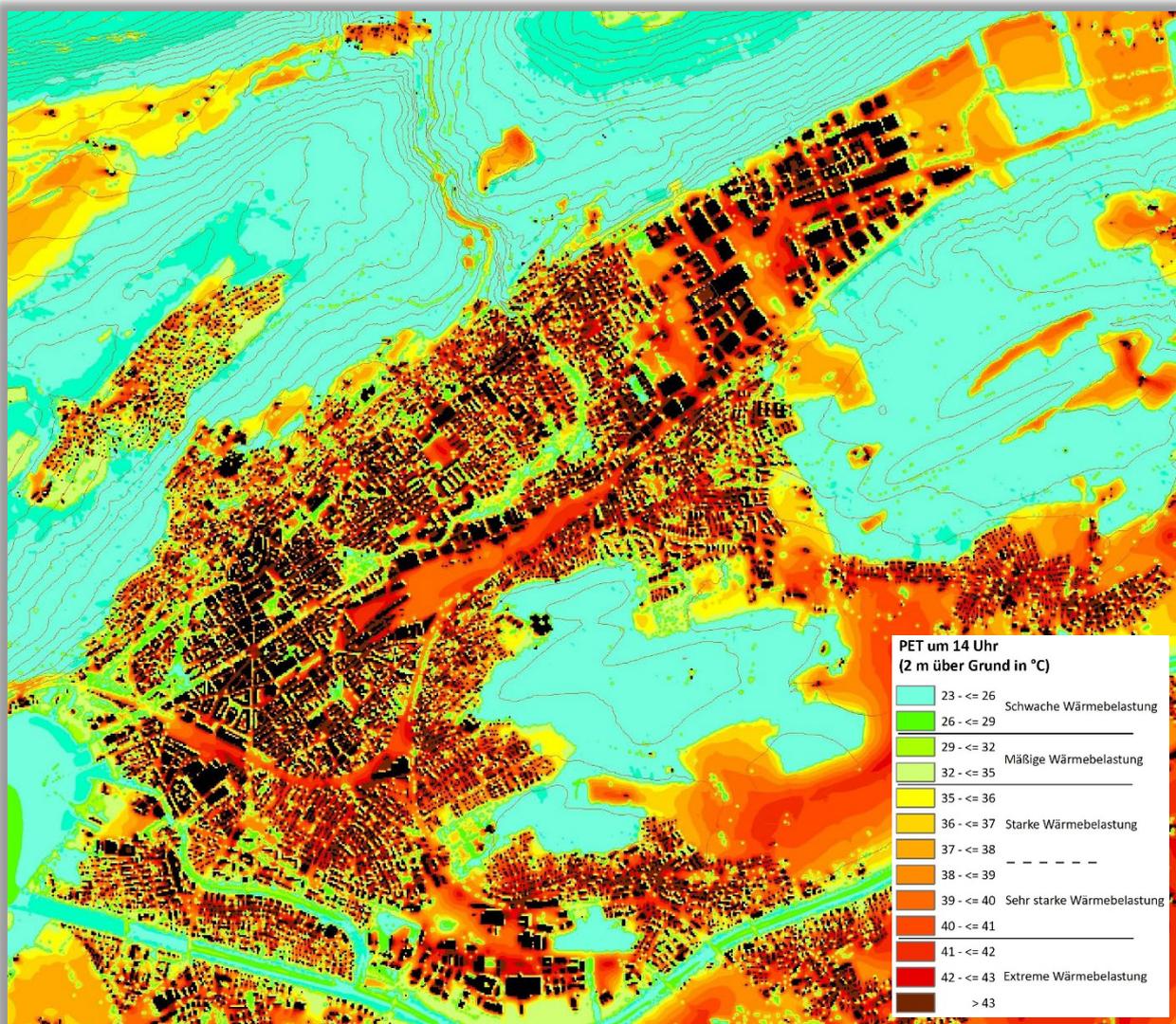


Abb. 4.7: PET Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

Im Zukunftsszenario ist unter dem Einfluss des Klimawandels auch am Tage von einer insgesamt stärkeren Wärmebelastung im Kantonsgebiet auszugehen (Abb. 4.7). Dies zeigt sich auch in der simulierten PET, wobei die intensiv durch Vegetation verschatteten Bereiche auch weiterhin als Zonen mit höherer



Aufenthaltsqualität hervortreten (grüne Farben). Über den versiegelten Arealen nimmt die PET um durchschnittlich 2,5 C° bis 3,1 K zu, so dass gegenwärtig noch mässig wärmebelastete Siedlungsräume zukünftig eine starke Belastung aufweisen können. Sehr kleinräumig sind Zunahmen bis etwa 5 K zu beobachten. Dies unterstreicht die Bedeutung siedlungsnaher Grünflächen mit ausreichender Verschattung als Aufenthaltsbereiche an Tagen mit starker Wärmebelastung.

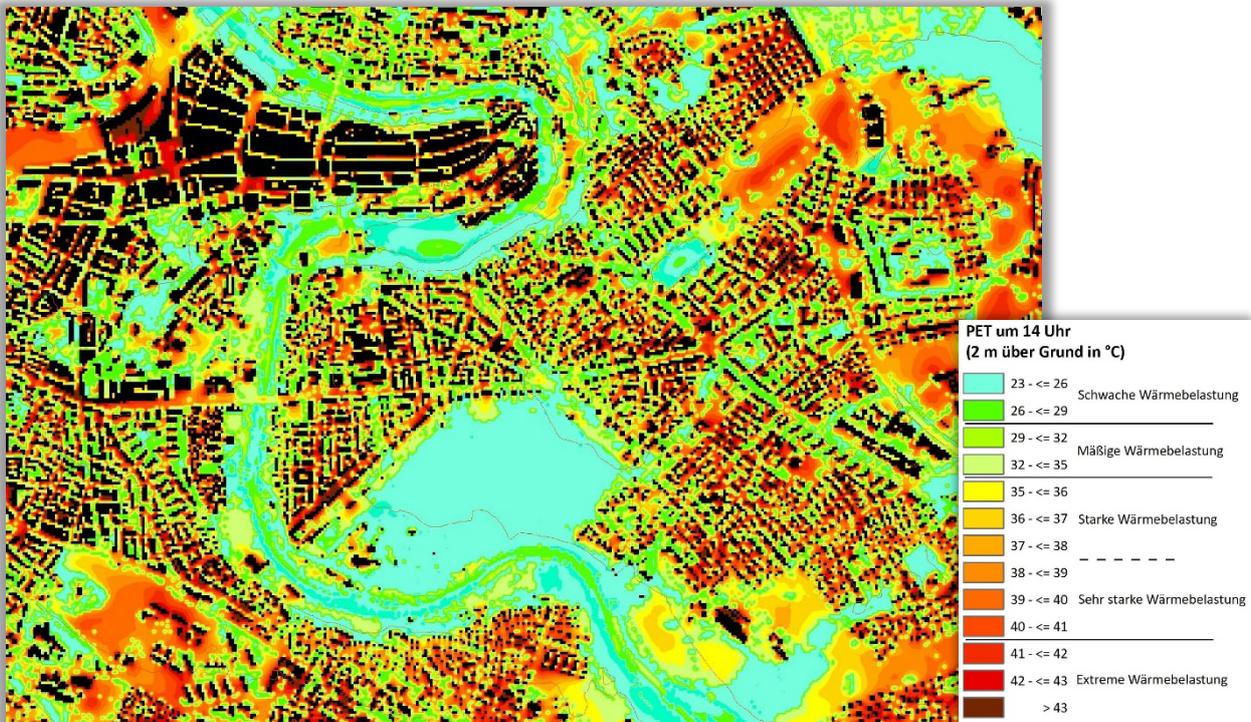


Abb. 4.8: PET Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

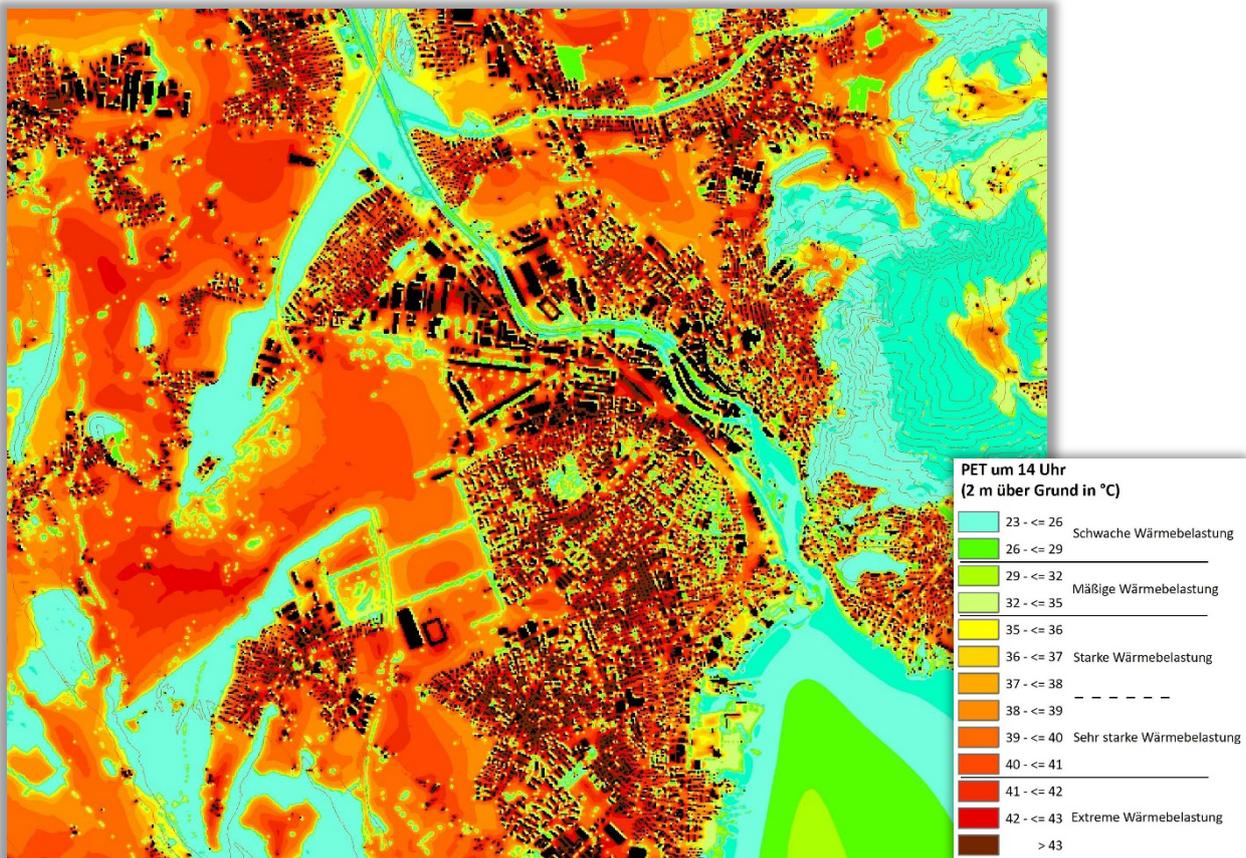


Abb. 4.9: PET Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)

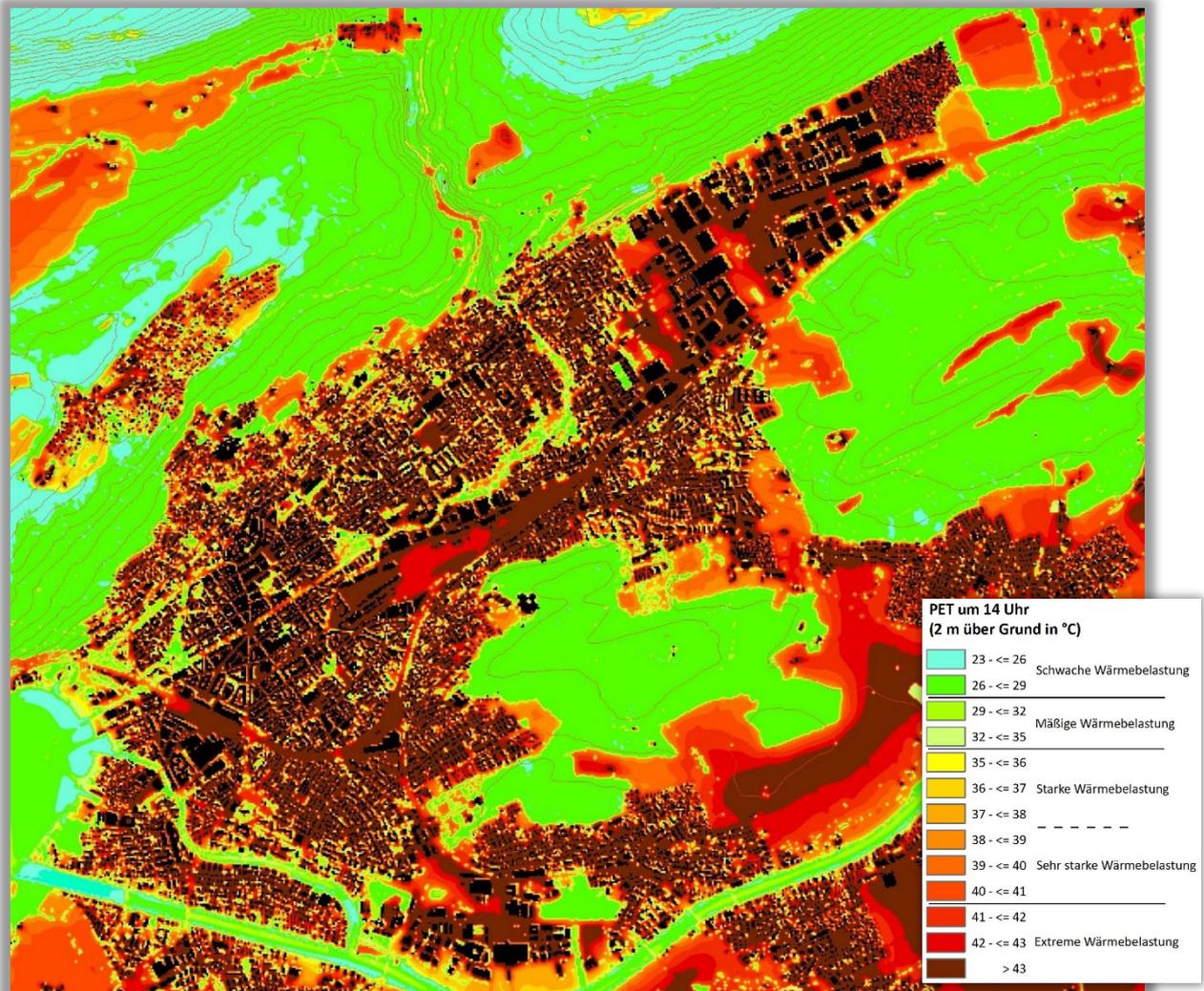


Abb. 4.10: PET Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)

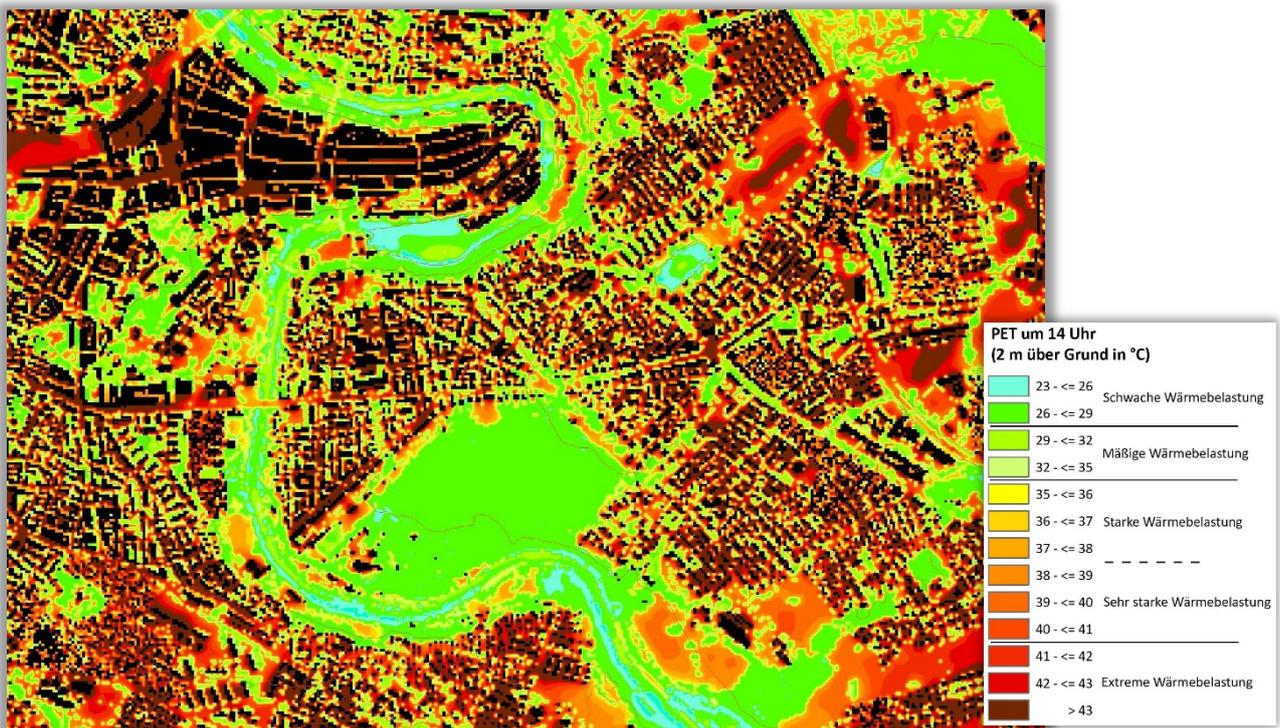


Abb. 4.11: PET Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)

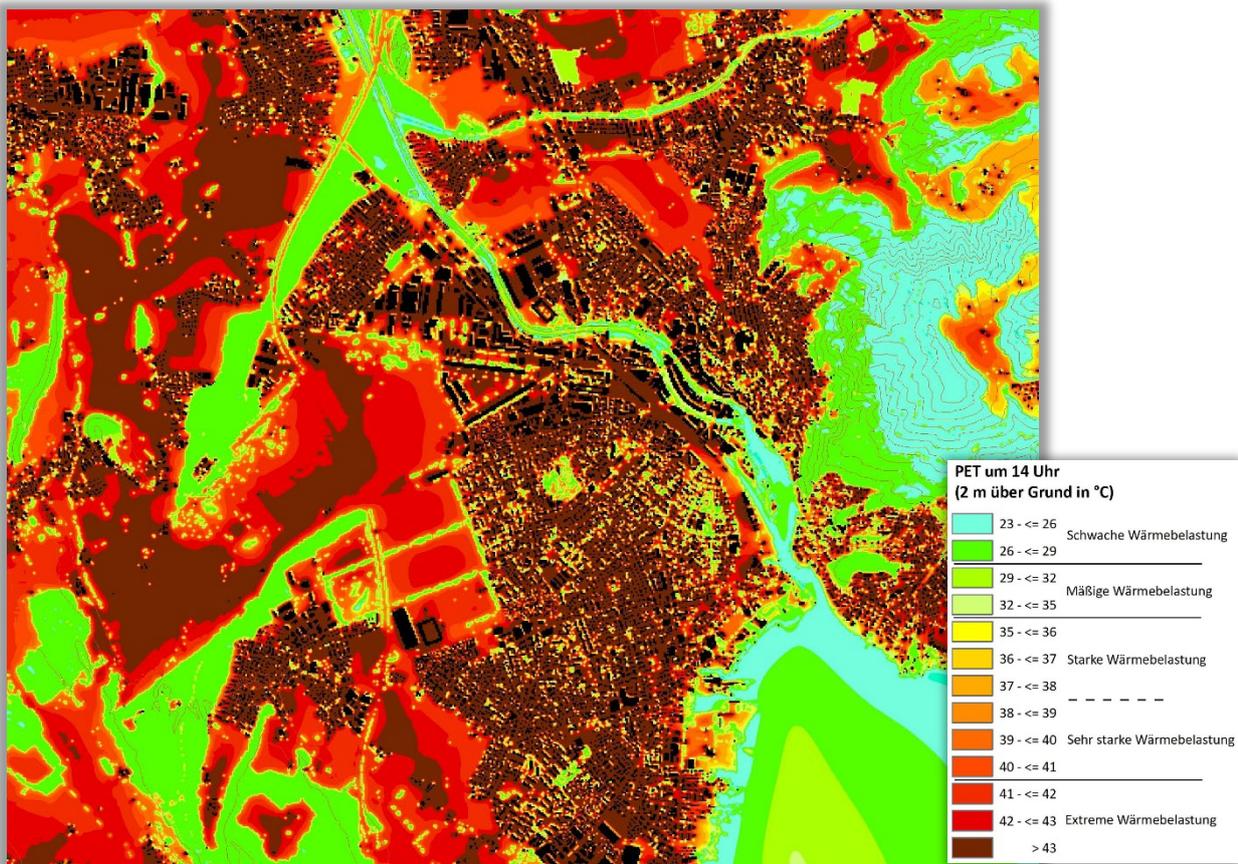


Abb. 4.12: PET Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)

### 4.3 Autochthones Windfeld

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt. Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 4.13).

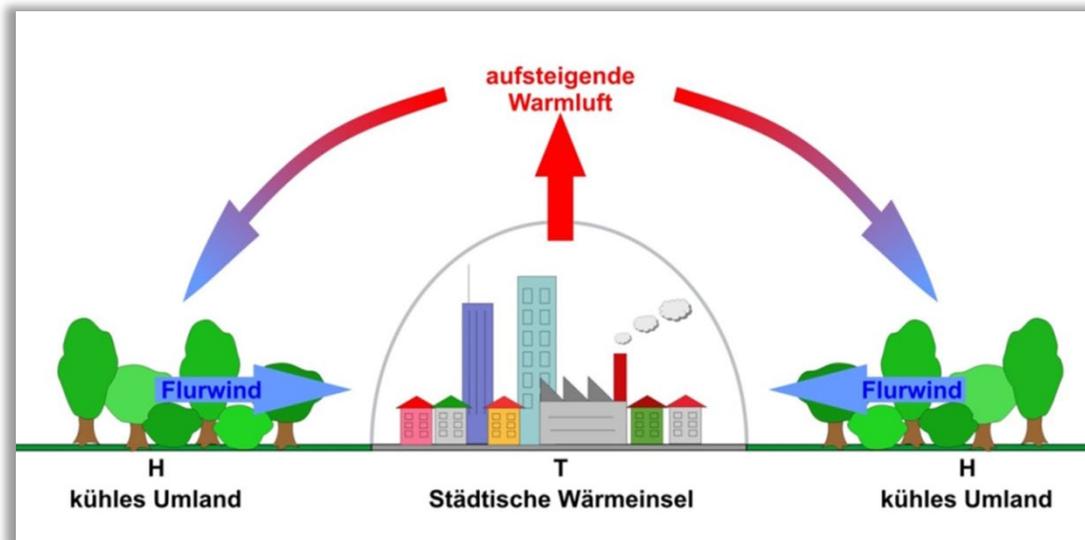


Abb. 4.13: Prinzipskizze Flurwind

Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von 2 m/s (Mosimann et al. 1999). Im Bereich stärkerer Hangneigungen treten im Untersuchungsraum Kaltluftabflüsse mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s auf. Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden.

Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den grossen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen. Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Grössere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis.

Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Strassenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bauart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.



Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltluftthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen. Die im Bericht beschriebenen Beispiele stehen stellvertretend für zahlreiche ähnliche Situationen im Kanton Bern.

Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird in den Abbildungen in zwei Ebenen dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 200 m x 200 m Kantenlänge (entspricht 400 Rasterzellen) aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 10 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von  $> 0,1$  m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau berechneten Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 4,8 m/s über den stark geneigten Hängen in den subalpinen bzw. alpinen Gemeinden. Die gegenwärtige Situation im Raum Biel zeigt Abb. 4.14. Die Kaltluftdynamik wird hier deutlich von Kaltluftabflüssen geprägt, welche sich über den Hangbereichen ausbilden. Während innerhalb des der Waldbestände der Stammraum die Ausbildung höherer Strömungsgeschwindigkeiten in Bodennähe unterbindet, zeigt sich über den durch Rasen geprägten Randbereichen nördlich der Altstadt ein flächenhaftes Ausströmen von Kaltluft in die Bebauung, wobei niedrige Gebäude und breite Strassenräume/Abstandsflächen ein Eindringen in die Siedlungsfläche begünstigen (**A**). Im Bereich Gugglerstrasse/Zihl werden einige Siedlungsflächen hingegen nicht mehr nennenswert von bodennaher Kaltluft durchströmt, da die zunehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen (**B**). Östlich davon zeichnet sich gleichzeitig der Friedhof Madretsch als Kaltluftleitbahn ab, da hier bodennah Kaltluft kanalisiert wird und in Richtung Gugglerstrasse strömt (**C**).

Auch im Bereich Bern zeichnen sich mehrere Leitbahnbereiche ab (Abb. 4.15). Dahingehend sind der Bereich Egelmösl mit östlich vorgelagerter Freifläche (**D**) sowie die Kleingartenanlage Bern-Ost mit den Freiflächen im Umfeld vom Schloss Wittigkofen anzusprechen (**E**). Aber auch das Aaretal in Höhe Kirchenfeld führt Kaltluft in Richtung auf die thermisch belasteten Siedlungsflächen der Altstadt (**F**). Darüber hinaus treten im Raum Bern ebenfalls flächenhafte ausgeprägte Kaltluftabflüsse auf.

Auch im Raum Thun wirken Kaltluftabflüsse in die Bebauung ein, vor allem östlich von Aare bzw. Thunersee (**G**; Abb. 4.16). Teilbereiche des Westquartiers werden hingegen im bodennahen Bereich weniger intensiv durchlüftet (**H**). Dies erscheint allerdings unproblematisch, da die dortigen Bautypologien ohnehin eine eher unterdurchschnittliche bauliche Dichte mit einhergehender schwacher Überwärmung aufweisen. In der nördlich angrenzenden Gemeinde Steffisburg tritt der Freiflächenverbund entlang des Mülibachs im Bereich des Zubringers A6 als Kaltluftleitbahn mit Bezug zum Stadtgebiet Thun hervor (**I**).

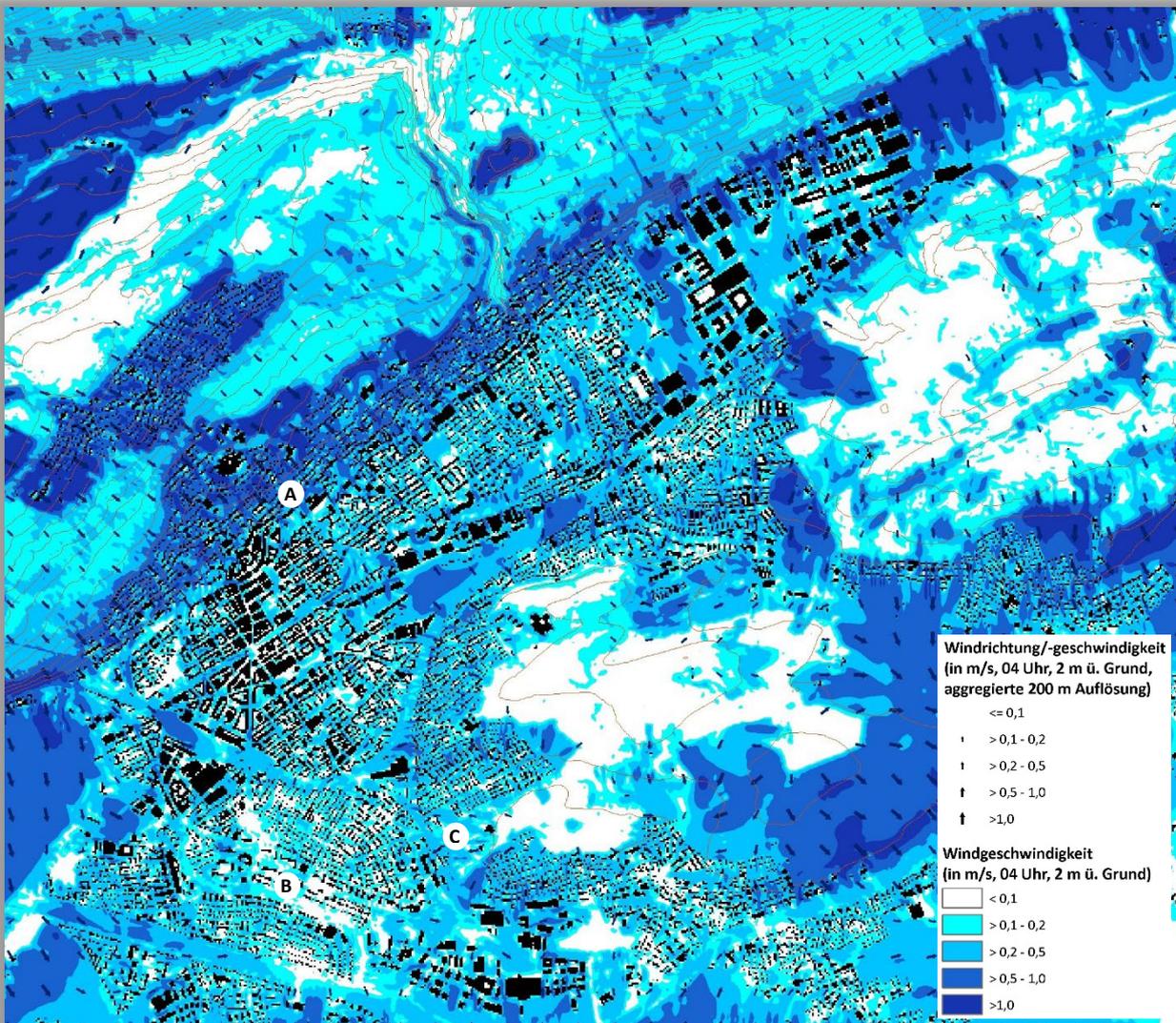


Abb. 4.14: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

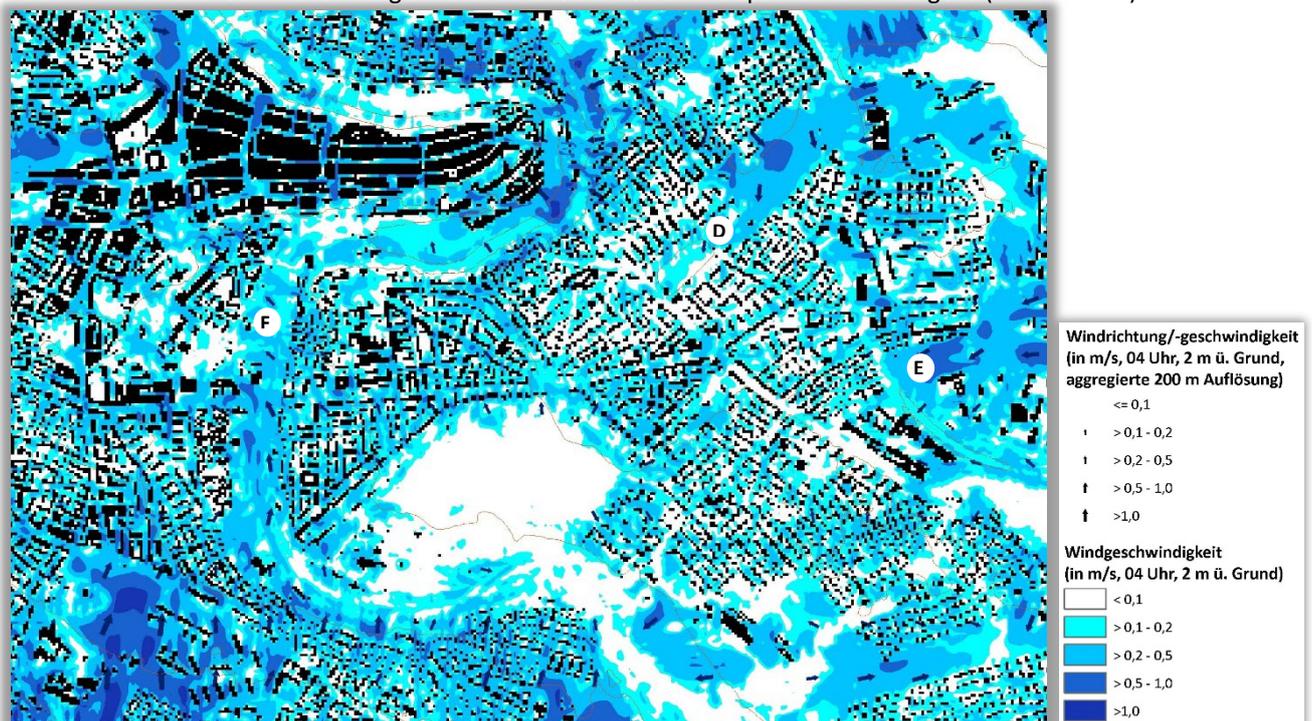


Abb. 4.15: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

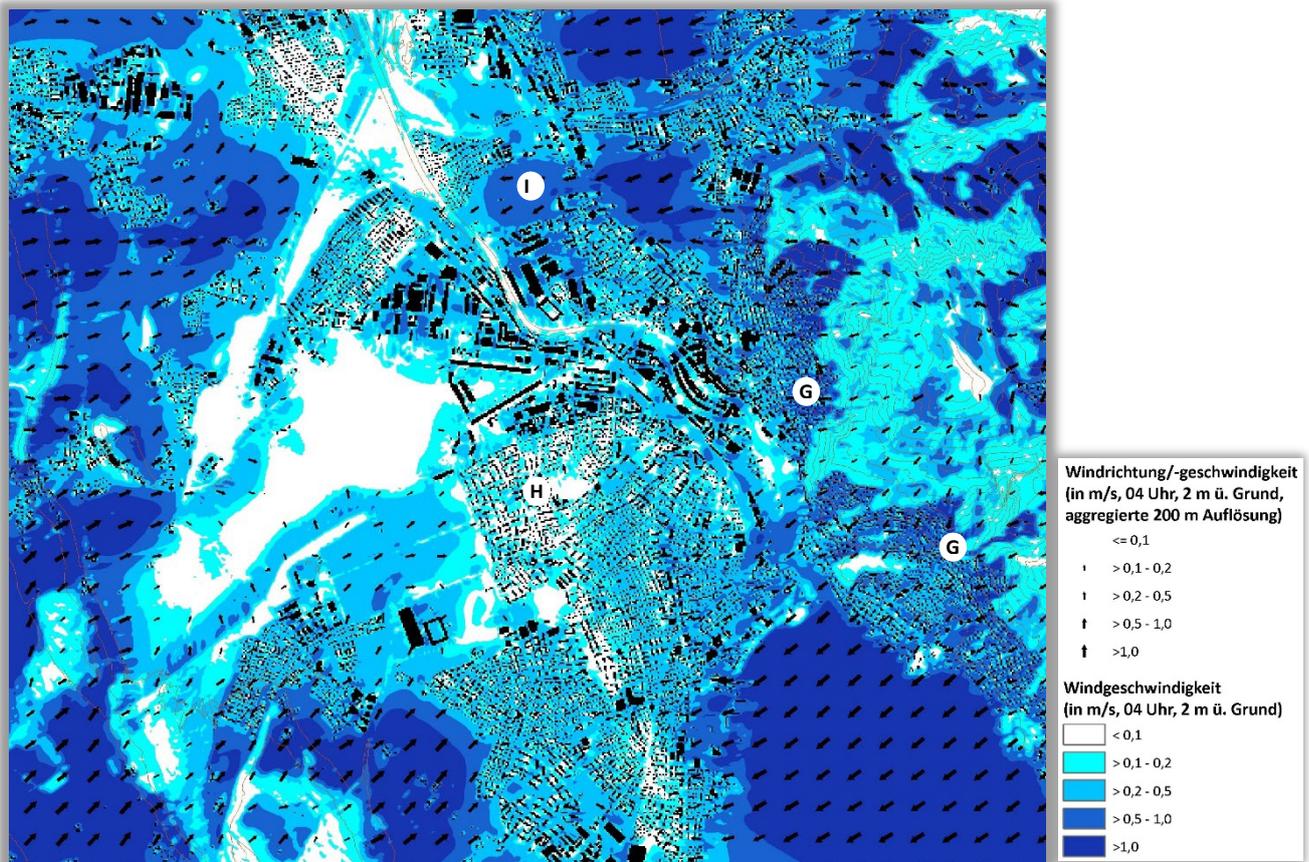


Abb. 4.16: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Im Zukunftsszenario entwickelt sich auch unter dem Einfluss des Klimawandels ein Kaltluftsystem mit sehr ähnlicher Ausprägung wie in der Gegenwart (Abb. 4.8). So liegt im Prognosejahr 2060 zwar ein insgesamt höheres Temperaturniveau vor. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Grün- und Freiflächen und den wärmeren Siedlungsräumen bleiben als „Antrieb“ für den Luftaustausch weiterhin bestehen. Es sind hinsichtlich der Einwirktiefe der Kaltluft nur graduelle Unterschiede erkennbar.

Das Einwirken von Kaltluft kann von einer zukünftigen Bebauung modifiziert werden und von der gegenwärtigen Situation abweichen. So zeigt sich in Abb. 4.17 im nordöstlichen Stadtgebiet Thun im Bereich einer gewerblichen Entwicklungsfläche deren Einfluss auf den Kaltluftstrom (J). Da die hier über dem zuvor unbebauten Hang hinweg abfliessende Kaltluft keinen Bezug zu wärmebelasteten Siedlungsflächen hat, bleibt dessen Beeinflussung ohne Negativwirkung. Im betrachteten Ausschnitt für die Stadt Bern führt die Flächenentwicklung im Bereich der Kaltluftleitbahn (K) zu einer leichten Beeinflussung des lokalen Luftaustausches. Ein negativer Einfluss auf die Klimafunktion der Leitbahn ist aber nicht erkennbar. Im Gebiet Thun (Abb. 4.19) führt die Flächenentwicklung am nördlichen Stadtrand zu einem Anstieg des Bauvolumens im Bereich der Leitbahn (L). Da deren Querschnitt aber nicht eingeengt wird und weiterhin ein Zustrom von Kaltluft aus Osten erfolgt, ist auch hier die planbedingte Auswirkung auf die Leitbahnstruktur als vertretbar einzuordnen. Auf kantonaler Ebene zeigt sich somit die wichtige Rolle grösserer Grünzüge, da sie die Kaltluft als Leitbahnen tief in die Bebauung heranführen können.

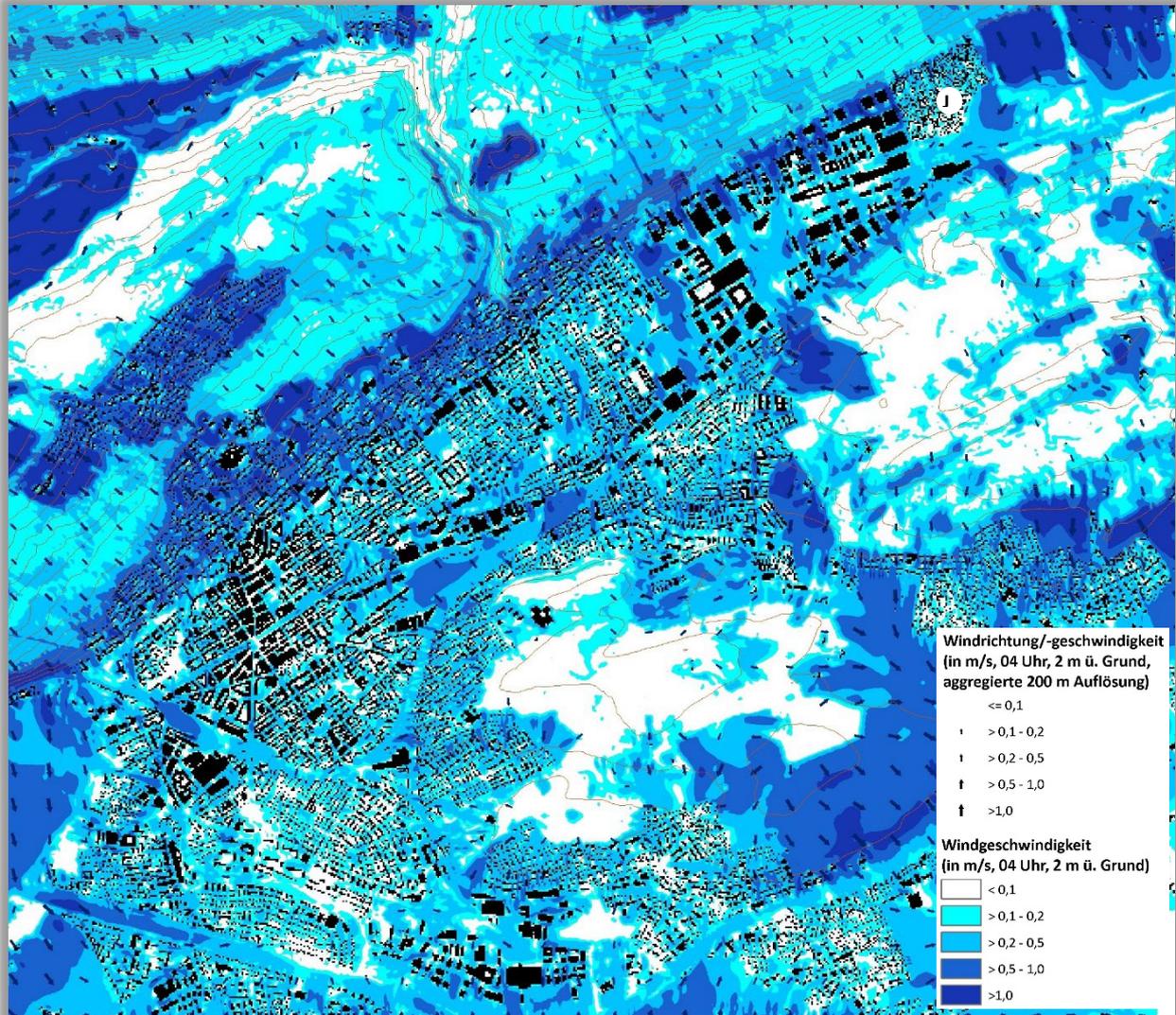


Abb. 4.17: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

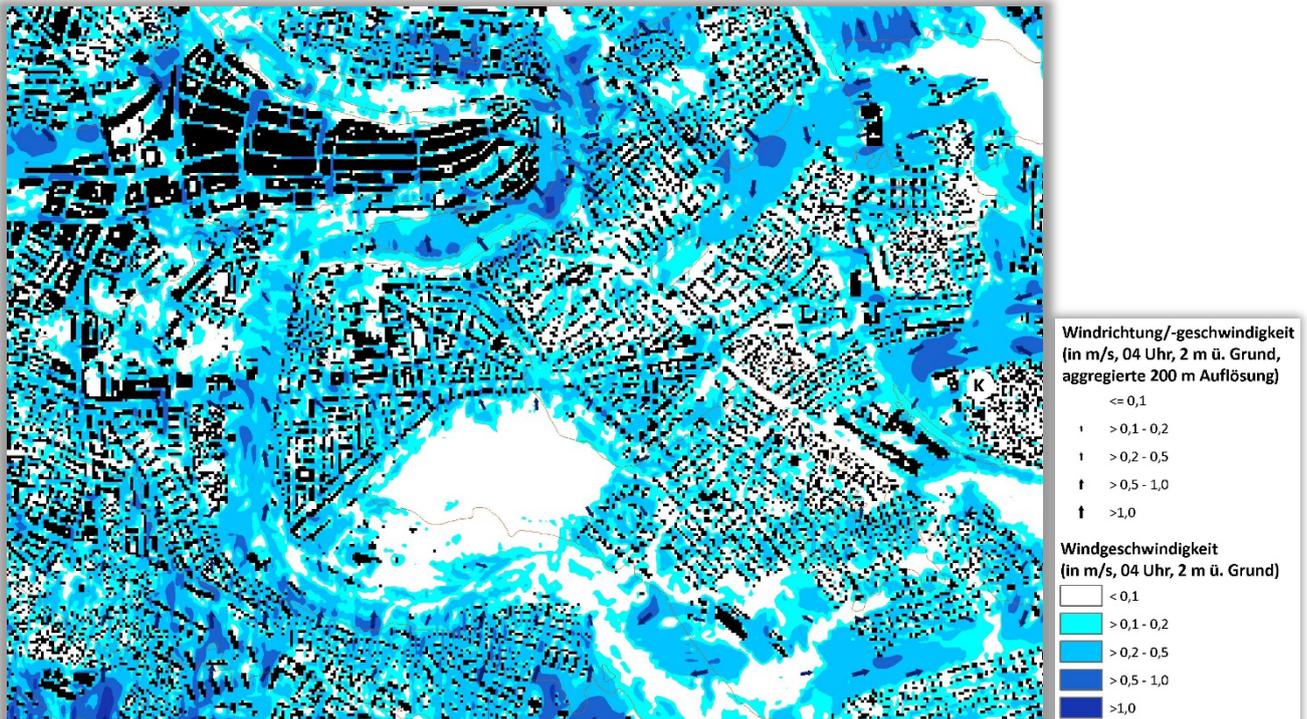


Abb. 4.18: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

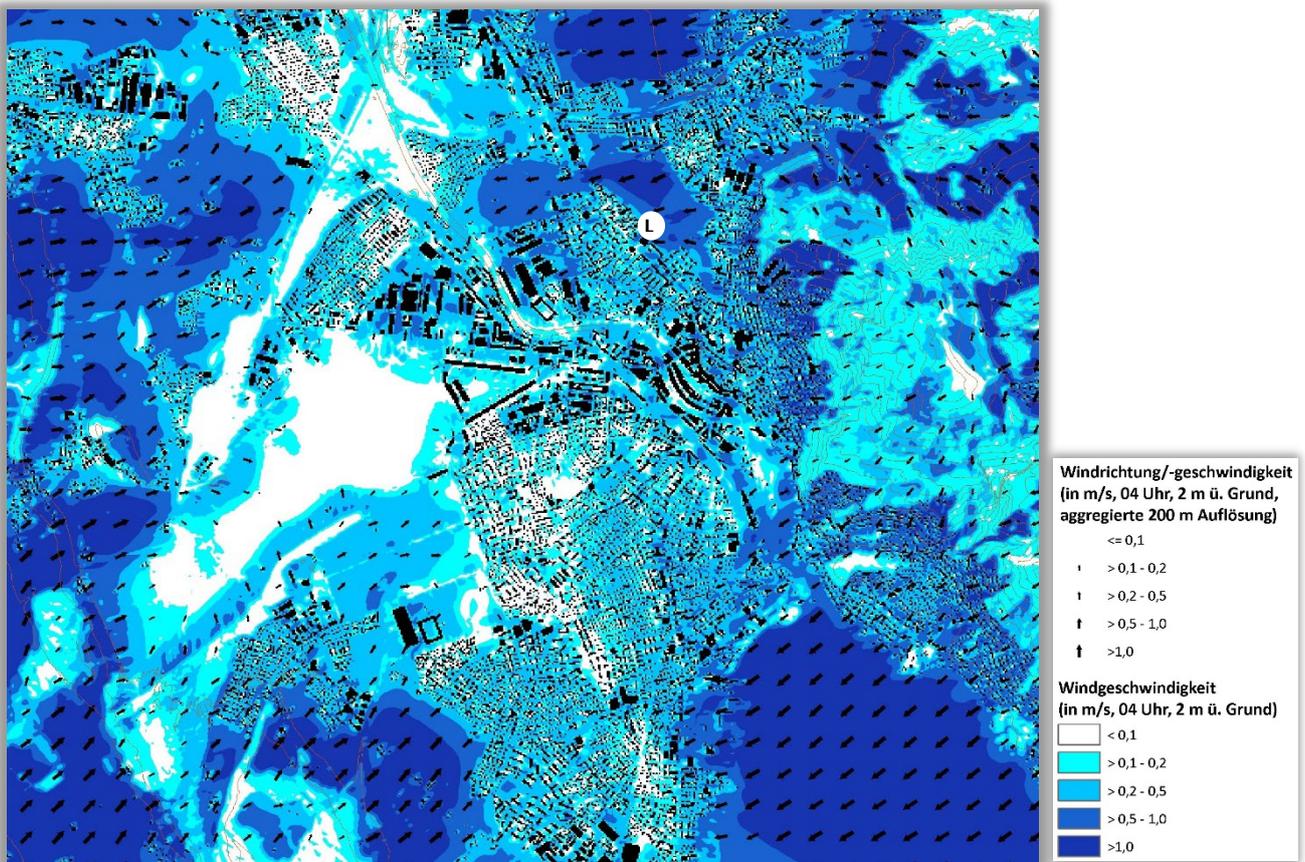


Abb. 4.19: Nächtliches Windfeld Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

#### 4.4 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen grösserer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 04 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.

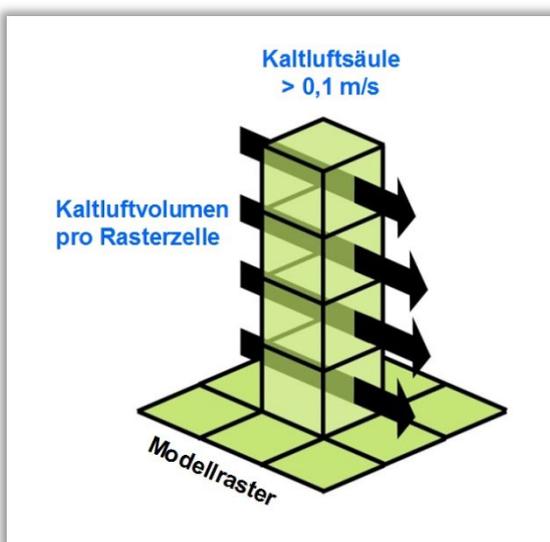


Abb. 4.20: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fliesst. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte

Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 10 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>2</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 4.20). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Mass für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Grössenordnung des Durchlüftungspotenzials.

#### STANDARDISIERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (Z-TRANSFORMATION)

Für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren 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 ist. In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) wird daher vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale oder regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren

<sup>2</sup> Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit nicht höher als 0,1 m/s wird



Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen. Wünschenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurde der Parameter Kaltluftvolumenstrom über das Verfahren der z-Transformation standardisiert<sup>3</sup>. Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschliessend werden die Originalmasseinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet. Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (standardmässig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere  $S_1$ -Schranke; s. Abb. 4.21).

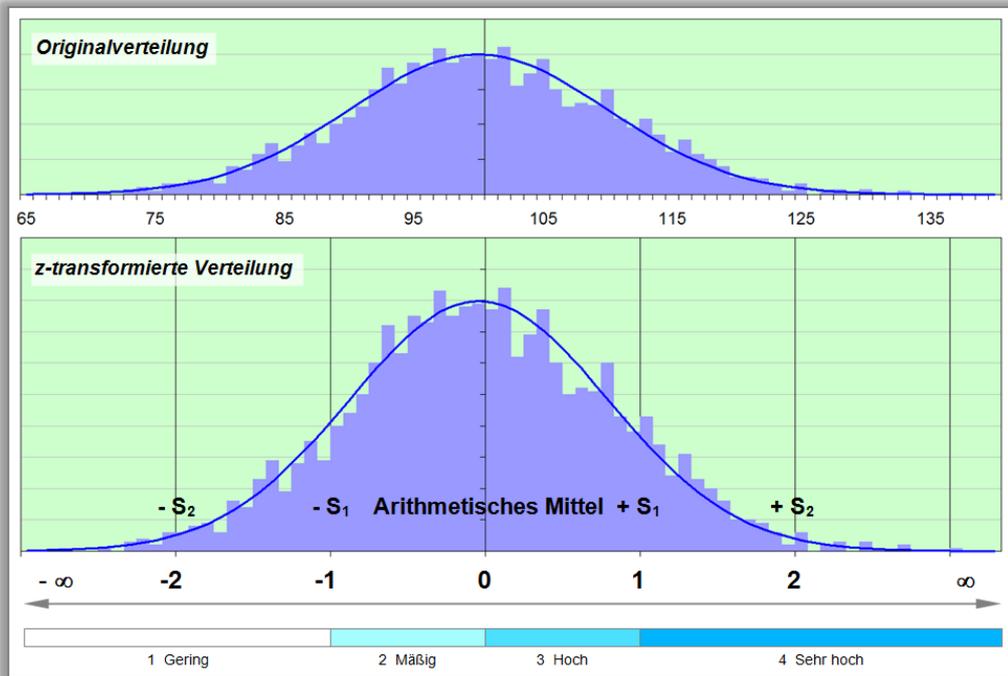


Abb. 4.21: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich somit am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Kantonsgebietes. Die daraus abgeleitete qualitative Bewertung dieser meteorologischen Grösse zeigt Tab. 4.2.

Mittlerer z-Wert	Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m <sup>3</sup> /s um 04:00 Uhr
> 1	Sehr hoch	> 50
> 0 bis 1	Hoch	50 bis ≥ 30
> -1 bis 0	Mässig	30 bis ≥ 5
bis -1	Gering	< 5

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

<sup>3</sup> Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt



Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens  $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen bis mässigen Volumenstrom aufweisen. Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Grösse, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann zunächst als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und später in der Nacht von diesen über- oder umströmt werden.

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 – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann. Gebäude, Mauern oder Strassendämme können als Strömungshindernisse wirken und luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgrösse, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher.

Abbildung 4.22 zeigt den Kaltluftvolumenstrom für den Ausschnitt Biel in einer qualitativen und quantitativen Abstufung. Ausgehend vom Malewagwald sind intensive Kaltluftabflüsse zu beobachten, welche vorwiegend flächenhaft ausgeprägt sind, sich teilweise hangabwärts aber auch an den sich anschliessenden Tiefenlinien orientieren. Dies lässt sich entlang der Schüss beobachten, wo die Kaltluft weit in die Bebauung bis zum Ortsteil Mett einwirkt (**A**). Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte meist über den mit Rasen bewachsenen und gut überströmbaren Hangbereichen auf (**B**). Während in der Gemeinde Nidau ebenfalls ein hohes bzw. sehr hohes Wertenniveau beobachtet werden kann (**C**), dominiert im übrigen Betrachtungsraum ein mässiger Volumenstrom. Lediglich kleine Teilbereiche weisen einen geringen Kaltluftvolumenstrom auf (z.B. südliche Neustadt; **D**).

Dagegen weist der in Abb. 4.23 dargestellte Ausschnitt für Bern auch in der Kernstadt einen nahezu flächendeckenden mittleren Volumenstrom auf. Hohe Werte treten vor allem im Aaretal südlich der Altstadt (**E**) sowie im Umfeld der Villa Morillon auf (**F**). Im Bereich der stark überwärmten Altstadt wird die einwirkende Kaltluft stellenweise durch die Bebauung kanalisiert. Dahingehend zeichnen sich Waisenhaus-, Korn- und Casinoplatz mit hohen Volumenströmen hervor (**G**). Dagegen liegt in Teilen von Schönberg und Murifeld lokal ein geringer Kaltluftvolumenstrom vor (**H**).

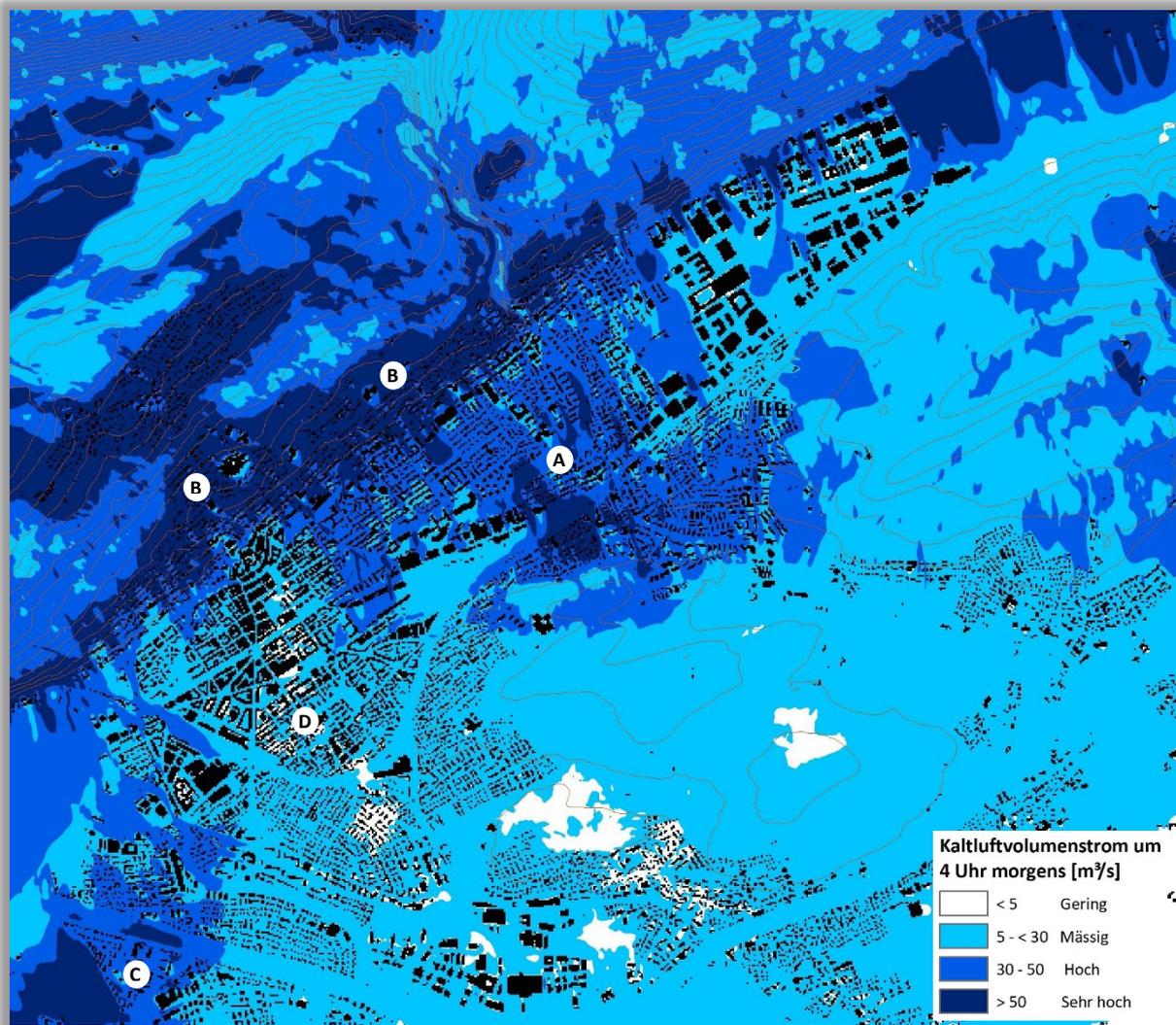


Abb. 4.22: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Ähnlich wie in Biel ist die Kaltluftdynamik auch im Raum Thun stark durch die Geländesituation geprägt. So treten sehr hohe Kaltluftvolumenströme im Bereich Steffisburg (H), Mülibach (I) sowie über dem Südwesthang des Hiltfingerwalds auf (J). Hier fokussieren sich die sehr hohen Volumenströme beispielsweise auf die Tiefenlinie des Seegartenbachs oder den Aussenanlagen und Sportplätzen an der Oberstufenschule Hunibach. Die in den Ortsteil Neufeld einwirkende Luft hat ihr Quellgebiet hingegen im Bereich des Bürgerwaldes (K).

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. Folglich können die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter sein als die bodennahen Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

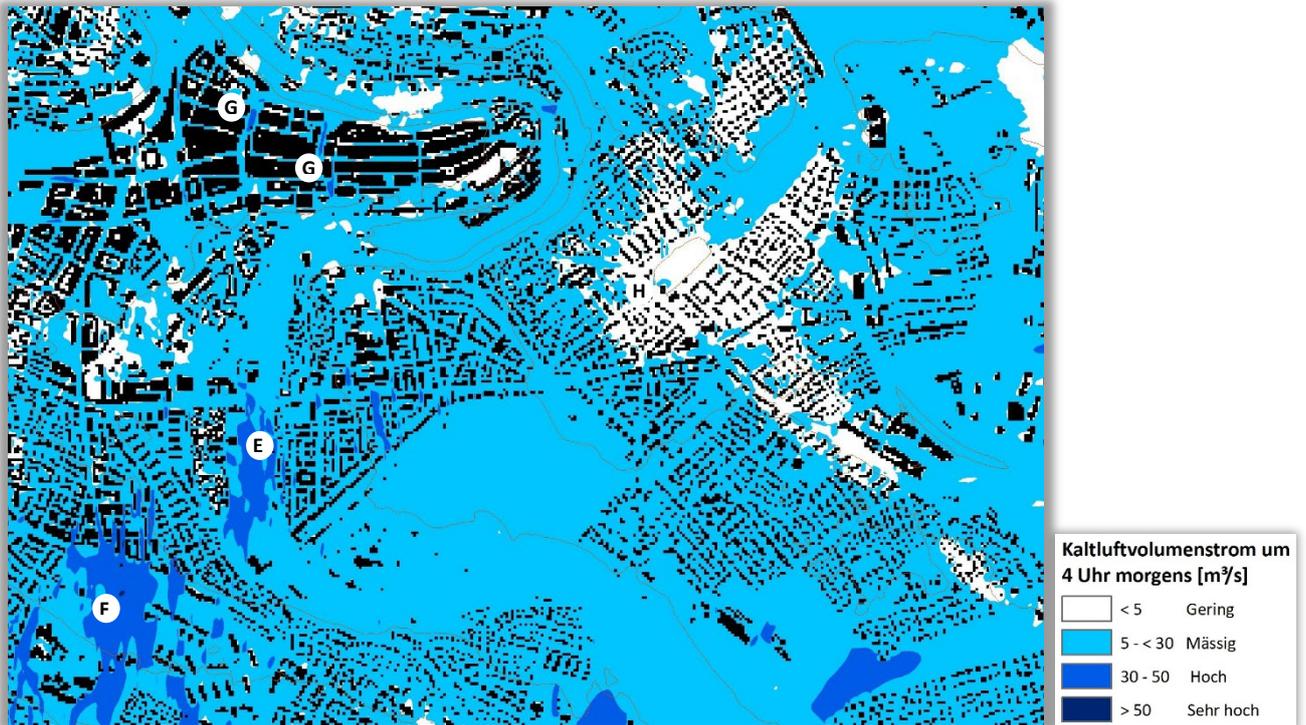


Abb. 4.23: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

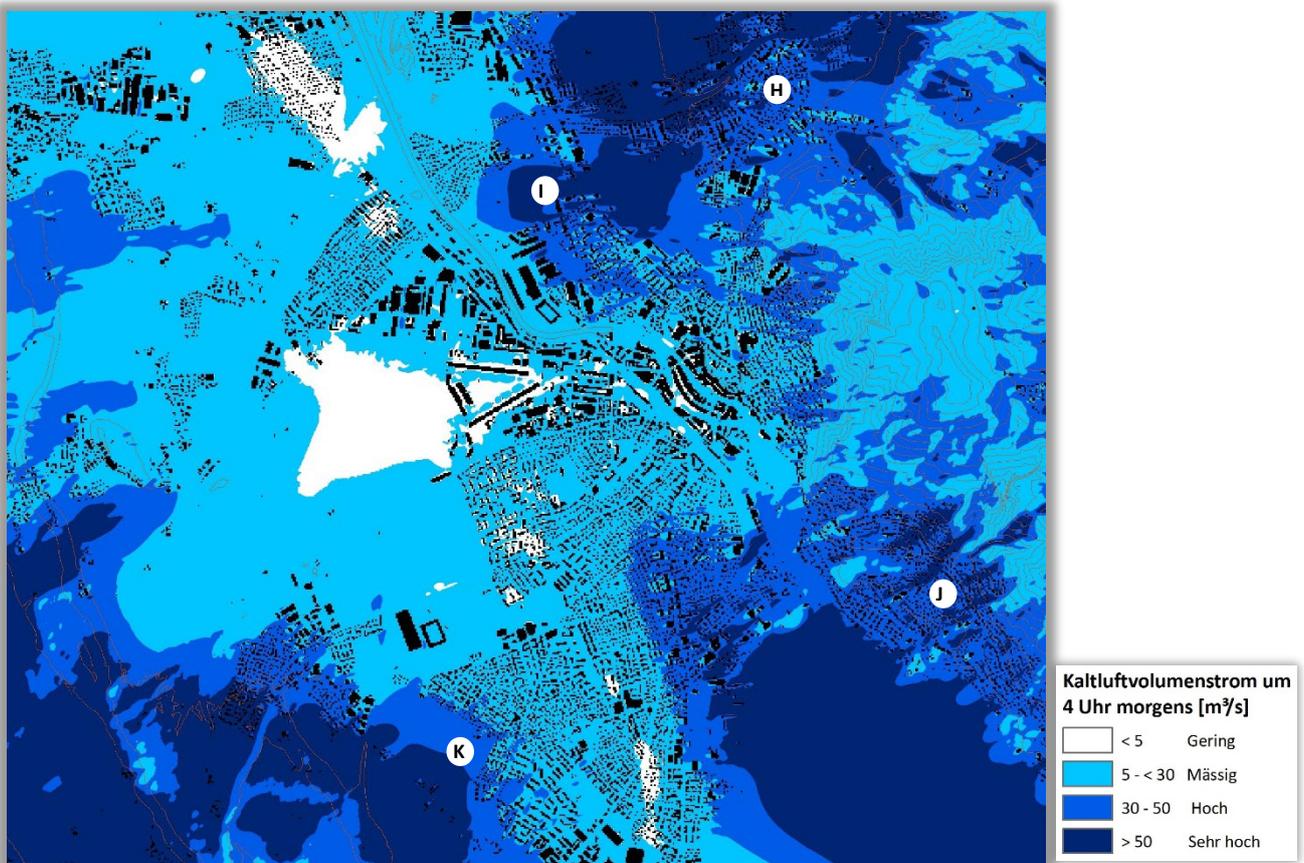


Abb. 4.24: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr

Im Zukunftsszenario bleibt der Kaltluftvolumenstrom auch unter dem Einfluss des zu erwartenden Klimawandels in seiner räumlichen Ausprägung und Intensität erhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das allgemeine Temperaturniveau zwar ansteigt, die relativen Temperaturunterschiede zwischen



Grünflächen und Bebauung als „Antrieb“ für den Luftaustausch auch weiterhin vorhanden bleiben. Im dargestellten Ausschnitt für Biel ist lediglich im Umfeld der an die Bielstrasse angrenzenden gewerblichen Entwicklungsfläche eine signifikant verminderte Einwirktiefe zu beobachten (**K**; Abb. 4.25). Während dort gegenwärtig noch ein sehr hoher Kaltluftvolumenstrom vorhanden ist, liegt dort zukünftig nur noch ein mässiger Volumenstrom vor.

**K**

Abb. 4.25: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Biel zum Zeitpunkt 4 Uhr

Die im Raum Bern vorgesehenen Entwicklungsflächen führen im Wesentlichen nur zu einer schwach ausgeprägten Beeinflussung der Durchlüftungssituation. Allerdings zeigt sich für die gegenwärtig noch durchgrünte Fläche an der Morillon-Villa eine starke Beeinflussung des Kaltluftabflusses. Die geplante Bebauung führt hier voraussichtlich zu einem Rückgang des Kaltluftvolumens von hoch auf mässig (**L**).

Im Raum Thun ist die Kaltluftdynamik weiterhin intensiv ausgeprägt (Abb. 4.26). Die im Bereich Mülibach vorgesehene Entwicklungsfläche wird analog zur bodennahen Windgeschwindigkeit keine nennenswerten Negativeffekte aufweisen (**M**). Auch hier zeigt sich die Relevanz von Durchlüftungszonen und Abstandsflächen, die auch im Zuge einer geplanten Bebauung möglichst offengehalten werden sollten. Für die Funktionalität einer Kaltluftleitbahn ist es zudem von Bedeutung, eine Verbindung zum unbebauten Aussenraum bzw. zu den Kaltluftentstehungsflächen zu gewährleisten.

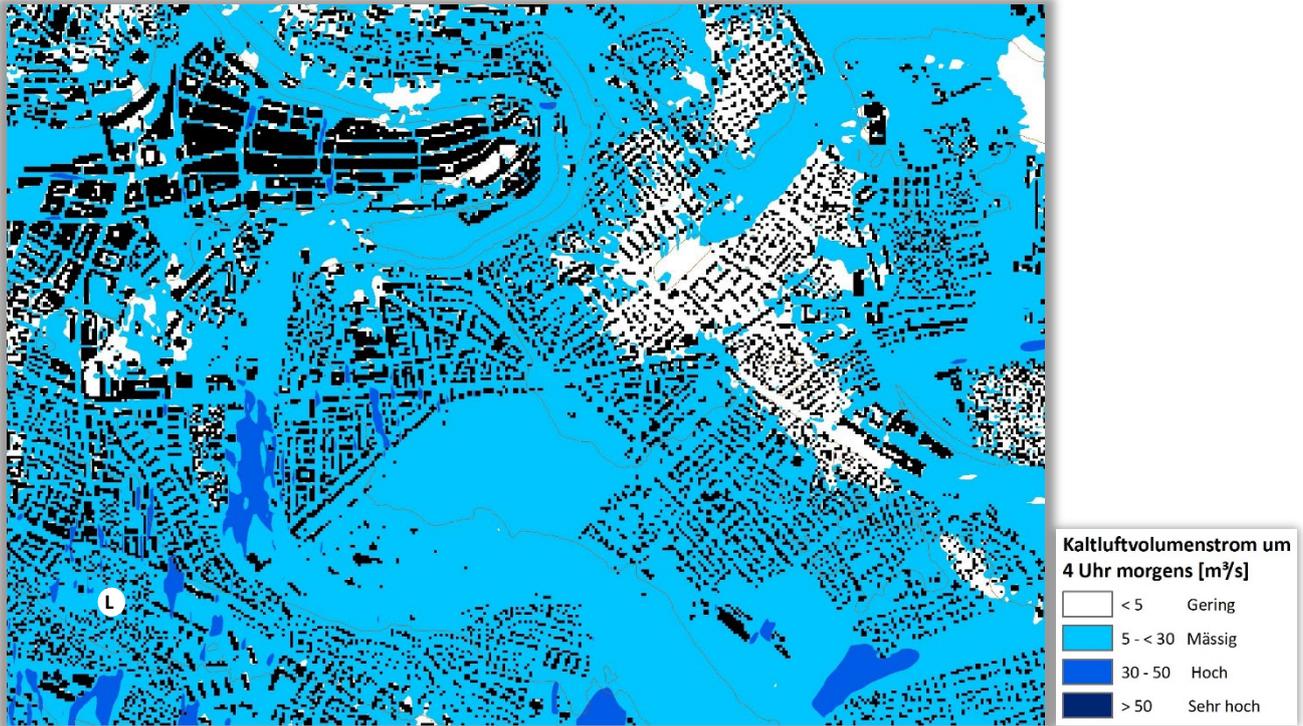


Abb. 4.26: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr

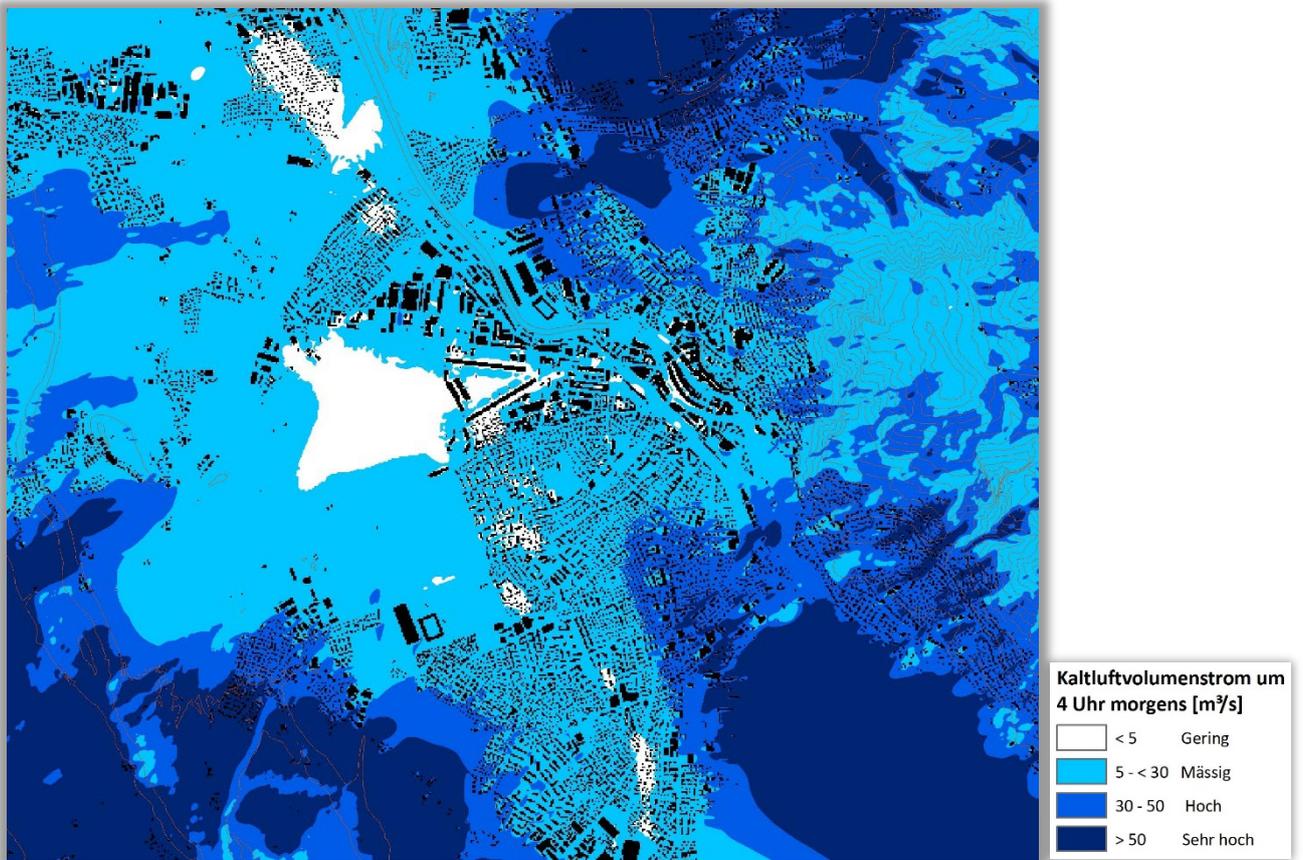


Abb. 4.27: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario im Bereich Thun zum Zeitpunkt 4 Uhr



## 5 Klimaanalysekarte

Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Kantonsgebiet Bern zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsraum**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (**Luftleitbahnen**) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** innerhalb des Kantonsgebietes. Im Gegensatz zur Planungshinweiskarte werden in der Klimaanalysekarte nicht die Gevierte als Bezugsgeometrien sondern die rasterhaft vorliegenden Ergebnisse dargestellt. Damit zeigt sich deutlich die flächeninterne Heterogenität in den Gevierten.

### **KALTLUFT**

#### *Windvektoren in 2 m über Grund*

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geeigneten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes als Kaltluftabfluss in Bewegung. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt 04 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird über eine Pfeilsignatur dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 200 m x 200 m Kantenlänge (entspricht 400 Rasterzellen) aggregiert worden sind.

#### *Prozessräume*

Die Prozessräume kennzeichnen die Bereiche mit einheitlichem Abflussgeschehen nach dem Wasserscheidenprinzip als Kaltlufteinzugsgebiete. Sie sind das Ergebnis einer GIS-basierten Reliefanalyse nach KING (1973). In die Reliefanalyse werden auch die Plateaubereiche einbezogen. Hier wird der Einfluss auf die Strömungsrichtung dann weniger vom Relief bestimmt als vielmehr durch den horizontalen Temperaturgradienten als „Antrieb“ für den bodennahen Luftaustausch. Dies gilt auch für die vorwiegend ebenen Flächenanteile im Kantonsgebiet.

#### *Kaltlufteinwirkbereich innerhalb der Bebauung*

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftstroms befinden. Zur Abgrenzung wird eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mindestens 0,2 m/s und ein klimatisch wirksamer Kaltluftvolumenstrom  $> 5 \text{ m}^2/\text{s}$  pro Rasterzelle herangezogen.

#### *Kaltluftentstehungsflächen mit hoher und sehr hoher Kaltluftproduktion*

Innerhalb der Grün- und Freiflächen werden die Teilareale mit hoher/sehr hoher Kaltluftproduktion hervorgehoben. Dabei handelt es sich um die rasterhaft modellierten Werte mit einer stündlichen Kaltluftproduktion von mehr als  $10 \text{ m}^3 \text{ pro m}^2$ . Dabei erweisen sich vor allem die Waldflächen mit stärkeren Hangneigungen als besonders kaltluftproduktiv, da die im Kronendach gebildete Kaltluft hangabwärts strömt anstatt im Bestand „einzusinken“.



#### **KALTLUFTLIEFERUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN**

Für die Kaltluftentstehungsflächen wird der rasterhaft berechnete Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kap. 4.4) in einer quantitativen Abstufung dargestellt. Somit wird die räumliche Ausprägung und die Identifikation von Teilflächen mit besonders hohen Werten gut sichtbar.

#### **WÄRMEINSELEFFEKT IM SIEDLUNGSGEBIET**

Basierend auf den modellierten bodennahen Lufttemperaturen wird der Wärmeinseleffekt über die Abweichung vom Temperaturmittel der Grün- und Freiflächen berechnet. Aufgrund der ausgeprägten Geländesituation im Kantonsgebiet erfolgte eine Berechnung für die Höhenstufen 350 m, 500 m und 750 m. Dargestellt wird dies für alle Rasterzellen (exklusive der Gebäude), welche sich innerhalb einer Siedlungsfläche entsprechend der Basisgeometrien befinden. Der Wärmeinseleffekt stellt die Grundlage für die sich anschliessende Bewertung in der Planungshinweiskarte dar. Er wird für den Siedlungsraum und die Verkehrsflächen separat dargestellt.

Einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Raum Biel zeigt Abb. 5.1. Das im Kap. 4.3 beschriebene bodennahe Strömungsfeld wird über die Pfeilsignatur wiedergegeben, wobei die blaue Linie den Reliefbedingungen entsprechend die Kaltlufteinzugsgebiete abgrenzt. Sehr häufig verläuft diese Grenze entlang von Kuppen- und Scheitelbereichen, welche die Abflussrichtung der Kaltluft bestimmen.

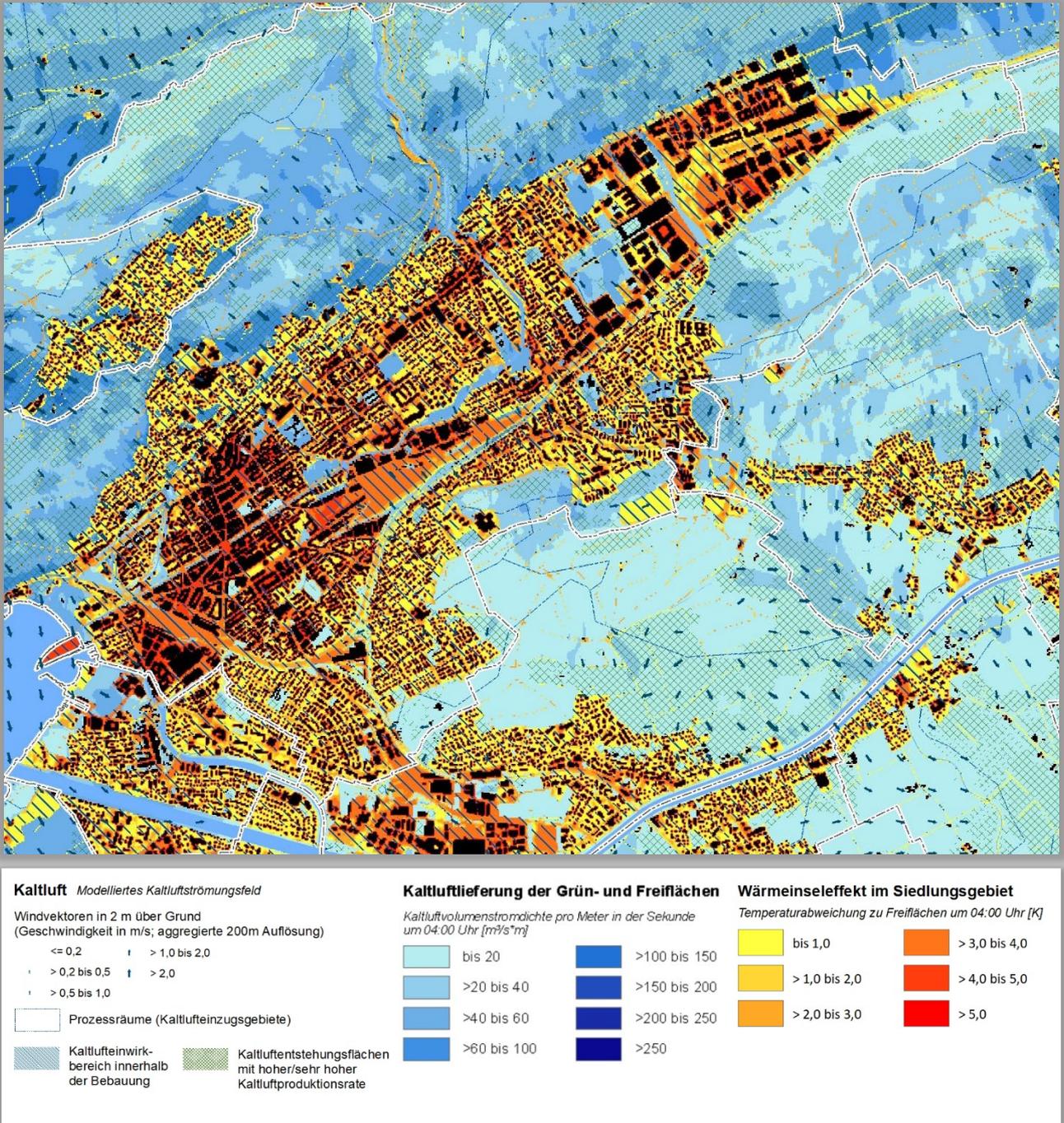


Abb. 5.1: Klimaanalysekarte im Bereich Biel - Gegenwart

Grünflächenanteile mit überdurchschnittlich hoher Kaltluftproduktionsrate werden mit der grünen Signatur gekennzeichnet, im Raum Biel sind es vor allem die mit Wald bestandenen Hangbereiche. Aber auch die mit Rasen bestandene Arealen weisen durch die intensive nächtliche Abkühlung dahingehend hohe Werte auf. Hinsichtlich der Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen treten auf kantonaler Ebene vor allem die stärker geneigten Hänge sowie die sich anschliessenden Tiefenlinien mit hohen Werten hervor.

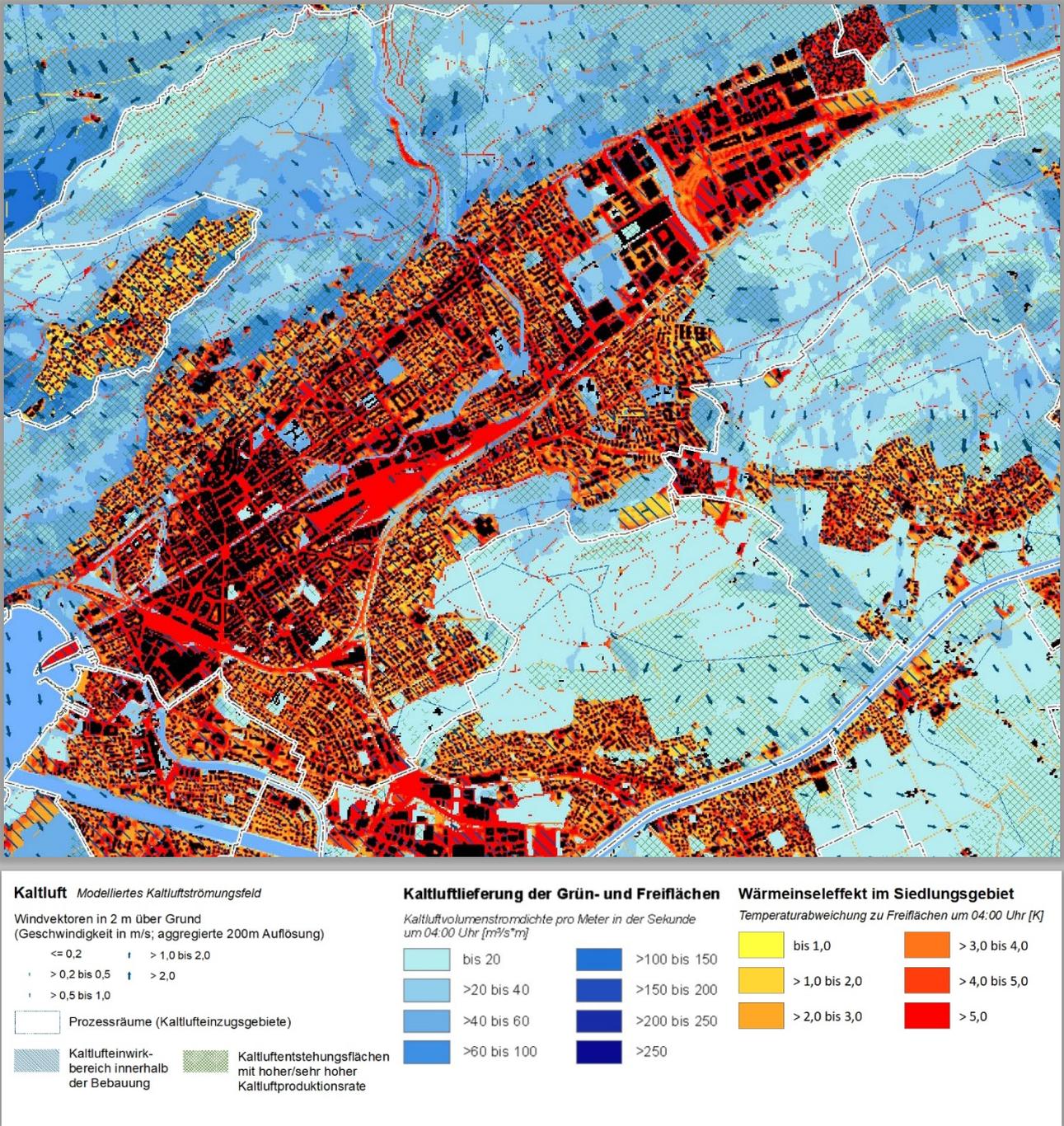


Abb. 5.2: Klimaanalysekarte im Bereich Biel – Zukunft

Die in Kap. 4.1 beschriebene nächtliche Temperatursituation zeichnet sich auch im städtischen Wärmeineffekt ab. Während die gering bis moderat verdichteten Siedlungsflächen eine eher niedrige Überwärmung bis 2 K gegenüber den Grün- und Freiflächen aufweisen, steigt sie mit zunehmender städtebaulicher Dichte an und beträgt mehr als 4 K im Innenstadtbereich von Biel oder Bern sowie den grösseren Gewerbeflächen. In den Ortskernen kleinerer und mittlerer Siedlungen treten lokal Werte von bis zu 2 K auf. Diese Werte werden für die Planungshinweiskarte Nacht zu einem Flächenmittelwert für jede Block- bzw. Geviertfläche berechnet. Die Situation für das Zukunftsszenario zeigt Abb. 5.2, wobei sich das insgesamt höhere Temperaturniveau auch im Wärmeineffekt widerspiegelt. Dies ist vor allem in den urban geprägten Siedlungsflächen der Fall, wo die Zunahme gegenüber heute mehr als 2,6 °C betragen kann. In den durchgrüneten Siedlungstypen ist die Zunahme dagegen schwächer ausgeprägt. Das Kaltluftsystem entspricht hinsichtlich räumlicher Ausprägung und Intensität der heutigen Situation.



## 6 Planungshinweiskarten Siedlungsklima

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadt-/Siedlungsklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Planungshinweiskarten Stadtklima stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihnen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Planungshinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Massnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Es wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Kantonsgebiet Bern beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

### 6.1 Vorgehensweise

#### 6.1.1 Bewertung der Nachtsituation

##### **KALTLUFT**

Die bereits in der Klimaanalysekarte dargestellten Elemente Windvektoren, Prozessräume und Kaltlufteinwirkungsbereich werden in der Planungshinweiskarte um Kaltluftleitbahnen ergänzt. Hierbei handelt es sich um Strukturen, welche Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander verbinden und aufgrund ihrer Klimafunktion elementarer Bestandteil des Luftaustausches sind. Hierbei handelt es sich häufig um Tiefenlinien, aber auch um Grünstrukturen und breite Strassenräume, welche sich in den Siedlungsraum erstrecken. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. In Bereichen mit ausgeprägten Kaltluftabflüssen und flächenhaftem Einwirken von Kaltluft werden allerdings keine Leitbahnen gekennzeichnet.

##### **SIEDLUNGSRAUM**

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation wird die nächtliche Überwärmung in den Nachtstunden (04 Uhr morgens) herangezogen. Da die Planungshinweiskarte die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches abbilden soll, wird hier der nächtliche Wärmeineffekt betrachtet. In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines



erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Aussenluft die entscheidende Grösse“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Aussen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während Tropennächte mit einer Minimumtemperatur  $\geq 20$  °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über den nächtlichen Wärmeineffekt. Dafür wurde die mittlere Überwärmung pro Block- bzw. Geviertefläche in vier Klassen untergliedert (Tab. 6.1).

Abweichung der Temperatur gegenüber den Grün- und Freiflächen um 04:00 (K)	Beurteilung der nächtlichen Überwärmung	Bioklimatische Bewertung
$\leq 1$ °C	Gering	Günstig
> 1 °C bis 2 °C	Mässig	Weniger günstig
> 2 °C bis 3 °C	Hoch	Ungünstig
> 3 °C	Sehr hoch	Sehr ungünstig

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeineffekts im bebauten Siedlungsraum

Unter dem Einfluss des Klimawandels werden weitere Siedlungs- und Verkehrsflächen eine Wärmebelastung aufweisen. In der Planungshinweiskarte Zukunft werden die Siedlungsbereiche mit einer Signatur gekennzeichnet, welche gegenwärtig günstige/weniger günstige Bedingungen aufweisen und in der Zukunft als wärmebelastet hervortreten (ungünstig/sehr ungünstig; vgl. Tab. 6.1). Diese werden als „Siedlungs- und Verkehrsfläche mit perspektivischer Zunahme der nächtlichen Wärmebelastung“ angesprochen.

### GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika der Grünflächen<sup>4</sup> im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wird ein teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt (vgl. Abb. 6.1). Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und

<sup>4</sup> Als „Grünfläche“ werden hier unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung all jene Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal etwa 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.



muss ggf. neu bewertet werden. Die einzelnen Klassen für die bioklimatische Bedeutung von Aussenräumen werden wie folgt bestimmt:

### **Sehr hohe bioklimatische Bedeutung:**

1. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *hoher und sehr hoher* nächtlicher Überwärmung (Flächengrösse > 0,1 ha)
2. Ermittlung der an (1) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 250 m).  
Grünflächen im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen kommt grundsätzlich eine sehr hohe Bedeutung zu. Sie sind geeignet, unabhängig von ihrem Kaltluftliefervermögen ausgleichend auf das thermische Sonderklima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld zu wirken.
3. Ermittlung von *Leitbahnen*  
Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation.
4. Allen Grünflächen aus (2) und (3) wird eine **sehr hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

### **Hohe bioklimatische Bedeutung**

5. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *mässigem* nächtlichen Wärmeineffekt (Flächengrösse > 0.1 ha)
6. Ermittlung der an (5) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 100 m).  
Wie unter (2) erfolgt die Einstufung auch dieser Flächen unabhängig von der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter
7. Ermittlung der an (2), (3) und (4) direkt *angrenzenden Grünflächen (Umfeldflächen)*.  
Bereiche, die zur Ausweisung von „Kaltluftquellgebieten“ der besonders bedeutenden Flächen dienen.
8. Grünflächen aus (6) wird generell eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen
9. Grünflächen aus (7) und wird eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn sie einen hohen Kaltluftvolumenstrom aufweisen

### **Mittlere bioklimatische Bedeutung**

10. Grünflächen aus (7) wird eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn es sich um einen Waldbestand handelt
11. Waldflächen wird – wenn sie nicht bereits in eine der vorgenannten Kategorien fallen – pauschal ebenfalls eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.  
Wald kommt generell eine von der Stärke des nächtlichen Kaltluftliefervermögens unabhängige bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zu.

Freiflächen, die keinem der oben genannten Kriterien entsprechen, wird eine nur **geringe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen. Die nach diesem Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Freiräume basiert zum einem auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d.h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermassen aussagekräftig sind. So kann eine Grünfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Freiräume im direkten Umfeld von Siedlungsbereichen mit nächtlicher Überwärmung und einhergehenden ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen generell eine hohe bioklimatische Bedeutung zugesprochen. Somit verfügt eine in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Grünfläche über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch stark belasteten Wirkungsraum.



Eine als „Hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch belasteten Wirkungsraum oder weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist gleichzeitig als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen.

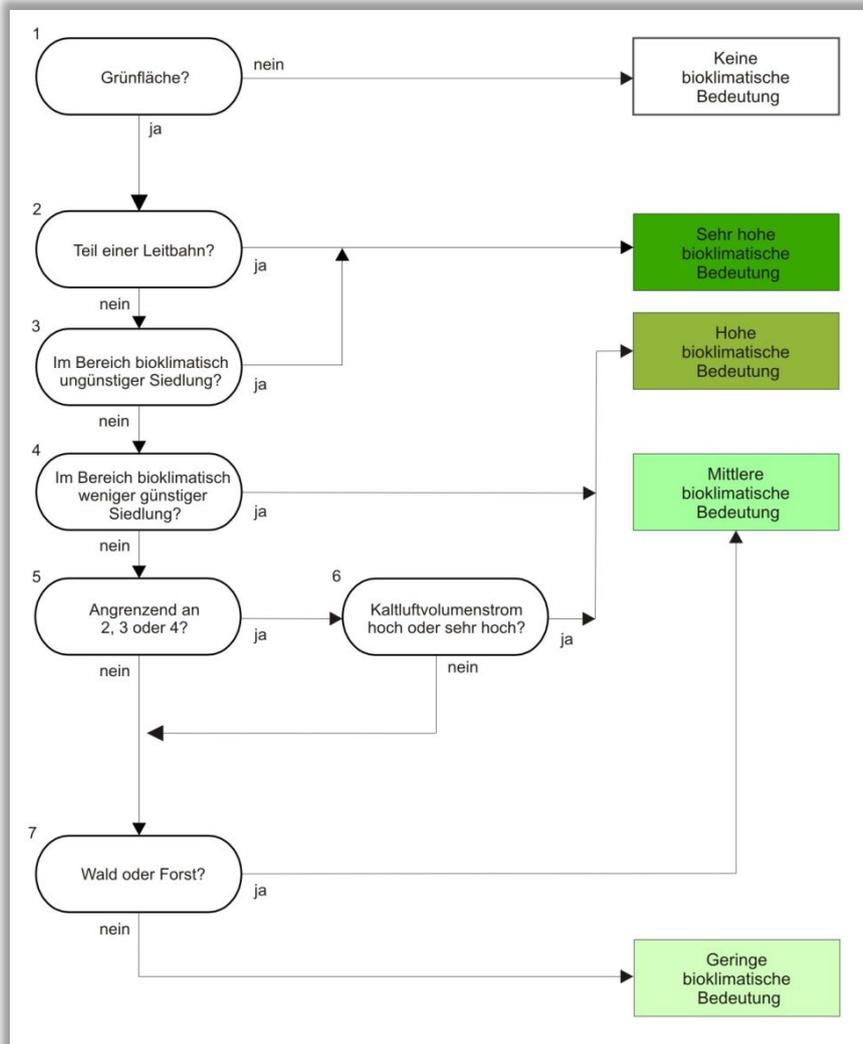


Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht

Zudem werden die Leitbahnbereiche innerhalb von Grün- und Freiflächen mit einer flächenhaften Schraffur gekennzeichnet sowie Grünflächen mit perspektivisch hoher/sehr hoher Bedeutung.

### PLANUNGSRELEVANTE GEMEINDEN

In der Planungshinweiskarte Nacht werden für die gegenwärtige Situation zunächst 12 planungsrelevante Gemeinden ausgewiesen. Deren Auswahl erfolgte durch den Kanton Bern. Die übrigen Gemeinden sind mit einer überlagernden Signatur belegt, so dass sie optisch in den Hintergrund treten. Im Zukunftsszenario wird der Umfang der relevanten Gemeinden erweitert. Dies erfolgt anhand des wärmebelasteten Flächenanteils an der gesamten Siedlungsfläche in einer Gemeinde. Über das Verfahren der Z-Transformation (Kap. 4.4, S. 39) lässt sich ein Flächenanteil von 73 % belasteter Siedlungsfläche als Schwellenwert ermitteln. So weisen unter dem weiteren Einfluss des Klimawandels 170 Gemeinden einen Anteil von mehr als 73 % auf und sind somit als planungsrelevant anzusehen.



### 6.1.2 Bewertung der Tagsituation

Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tab. 6.2). Die Bewertung der thermischen Belastung im Kanton Bern orientiert sich daran. Da die Kategorien jeweils eine Wertespanne von mehreren °C abdecken, ist zur besseren Darstellung der Belastungssituation im bebauten Siedlungsraum eine weitere Kategorie hinzugefügt worden. Diese umfasst den Temperaturbereich 38 °C bis 41 °C (als „sehr starke Wärmebelastung“) und führt zu einer besseren Differenzierung der Belastungssituation vor allem im urbanen Gebiet. Die Werteausprägung in den Grün- und Freiflächen machte diese zusätzliche Kategorie hingegen nicht notwendig.

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
38°C	Heiss	Sehr starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden

Die Zuweisung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte beruht auf der jeweiligen physiologischen Belastungsstufe. So liegt eine hohe Aufenthaltsqualität bei einer schwachen oder nicht vorhandenen Wärmebelastung vor, während eine starke oder extreme Wärmebelastung zu einer geringen bzw. sehr geringen Aufenthaltsqualität führt. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Mass für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen ausserhalb von Gebäuden sowie in Grün- und Freiflächen. Diese beeinflusst auch die Situation innerhalb der Gebäude, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren (z.B. gebäudebezogenen) Faktoren ab. Diese Zusammenhänge können im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter vertieft werden.

## 6.2 Ergebnisse

### 6.2.1 Nachtsituation

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Aussenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der



thermophysiologischen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Wie in Kap. 3.3 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis der nächtlichen Überwärmung ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende Kaltlufteinwirkbereiche, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Die Einwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Am Ende einer warmen Sommernacht werden im Kanton Bern bis 04 Uhr ca. 95 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen. Im Zukunftsszenario 2060 ist dies mit ca. 93 % etwas schwächer ausgeprägt.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Kerne der grösseren Städte wie Bern oder Biel sowie grössere Gewerbeflächen, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung.

Abbildung 6.2 zeigt in einem Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte den Bereich Biel, wobei die thermische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung ist in der Innenstadt anzutreffen (Dunkelbraun). Auch in den grossflächigen Gewerbearealen treten viele Flächen mit ungünstigen thermischen Bedingungen hervor. Die übrige Bebauung weist vorwiegend eine schwache bis mässige Überwärmung auf. Der Einwirkbereich der Kaltluft ist mit einer Schraffur dargestellt. Die in Kap. 4.4 beschriebenen Bereiche mit von den Hangbereichen ausgehenden intensiven Kaltluftabflüssen spiegeln sich in der Ausweisung von Kaltluftleitbahnen wider.

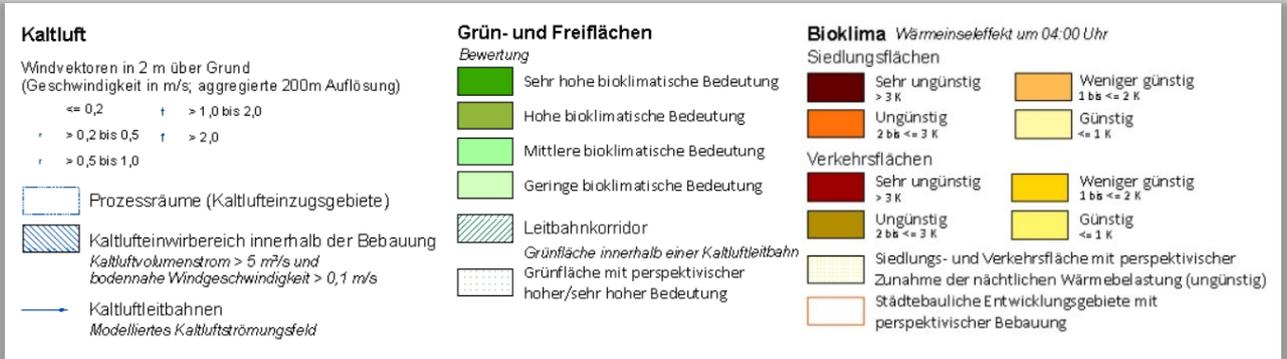
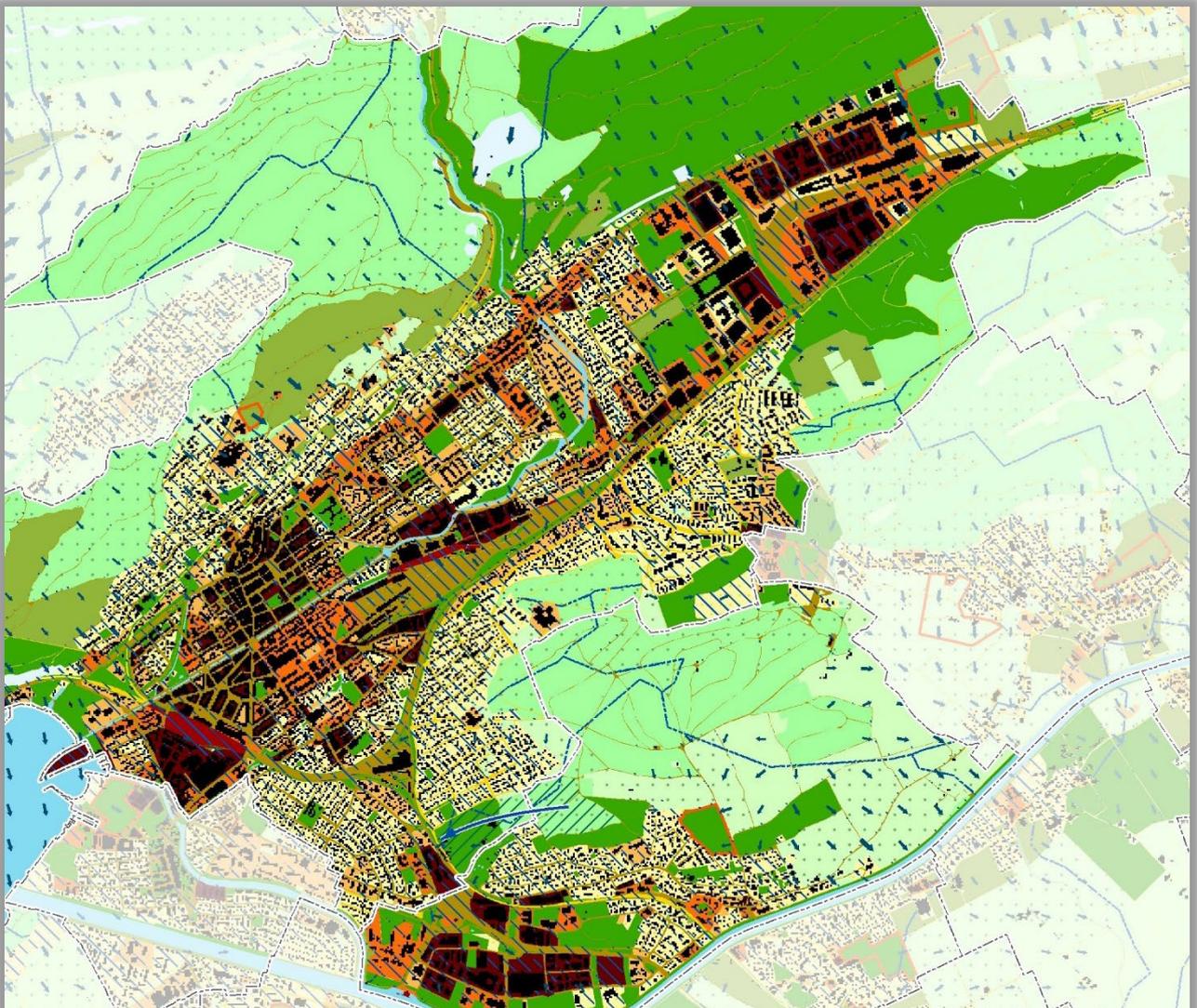


Abb. 6.2: Planungshinweiskarte Nachtsituation Gegenwart für den Bereich Biel

Flächen mit einer sehr hohen Überwärmung machen unter den **Siedlungsflächen** im Kanton Bern nur einen geringen Anteil von 4.5 % aus. Sie sind vorwiegend in den urbaner geprägten Räumen sowie innerhalb von Gewerbeflächen anzutreffen. Der Anteil von Flächen mit ungünstigen Bedingungen bzw. hoher thermischer Belastung beträgt 8.6 %. Während in 13.6 % der Siedlungsflächen eine mässige Belastung vorliegt,



dominiert in 73.3 % der Siedlungsräume eine schwache Überwärmung und ist somit die am häufigsten auftretende Kategorie.

Bewertung	Flächenanteil am Siedlungsraum (%)	Allgemeine Planungshinweise
Günstig - schwache thermische Belastung	73.3	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
Weniger günstig - mässige thermische Belastung	13.6	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
Ungünstig - hohe thermische Belastung	8.6	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Sehr ungünstig -sehr hohe thermische Belastung	4.5	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmassnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Tab 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

Den **Grün- und Freiflächen** im Kanton kommt zu etwa 15 % eine hohe bis sehr hohe bioklimatische Bedeutung zuteil (9.2 % bzw. 5.6 %; vgl. Tab 6.4). Eine mittlere Bedeutung lässt sich 35.9 % der Grünflächen zuordnen. Etwa 49.3 % der Grünflächen weisen eine geringe Bedeutung auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar. Mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Ackerflächen.



Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Gering	49.3	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
Mittel	35.9	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen (z.B. Baukörperstellung).
Hoch	9.2	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
Sehr hoch	5.6	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der klimatischen Ausgleichsleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss. Die Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen sind in Abb. 6.3 zusammengefasst:

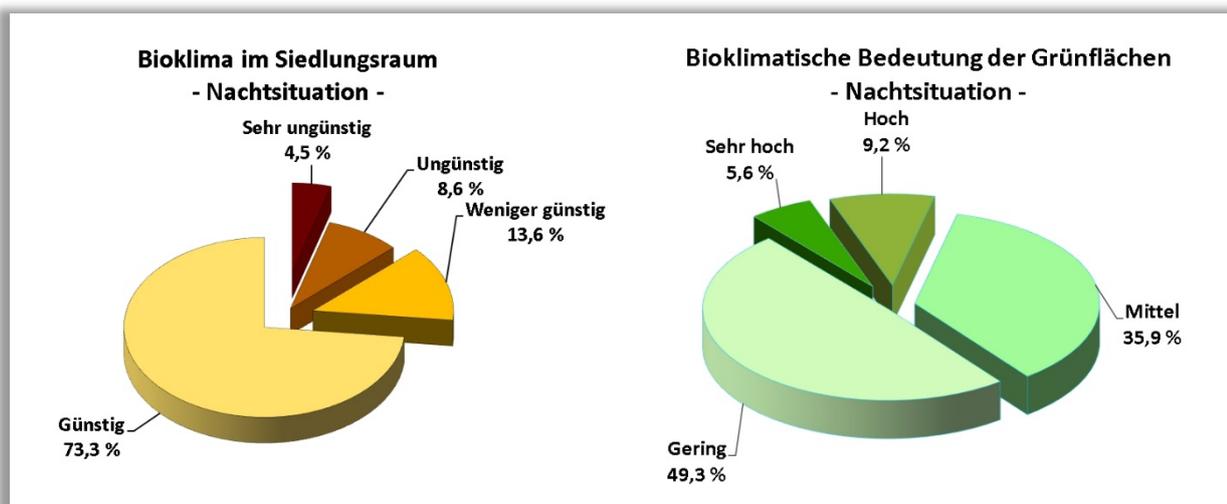


Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Nachtsituation) - Gegenwart



Im Zukunftsszenario 2060 treten einige Siedlungsflächen mit einer Belastungssituation hervor, welche gegenwärtig noch günstige bioklimatische Bedingungen aufweisen. Die Wärmebelastung nimmt perspektivisch auch in den grösseren Verkehrsflächen zu. Die zuvor beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels spiegeln sich auch in den Flächenbilanzen wider, wobei im Zukunftsszenario der Anteil der Siedlungsareale mit Wärmebelastung auf etwa 67 % der Fläche zunimmt. Perspektivisch sind in der Summe dann 83,4 % der Siedlungsfläche als wärmebelastet einzuordnen (Abb. 6.4).

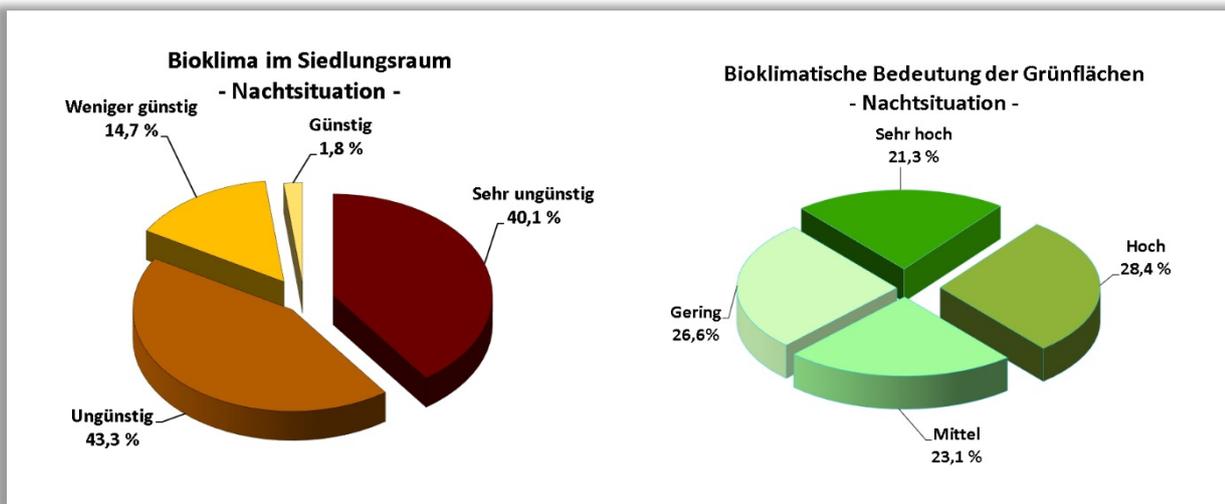


Abb. 6.4: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Nachtsituation) – Zukunft

Dies resultiert in einer Zunahme der Bedeutung daran angrenzender Grün- und Freiflächen als Kaltluft produzierende Bereiche. Somit sind zukünftig etwa 49,7 % des Freiflächenbestand als bioklimatisch bedeutsam für überwärmte Siedlungsbereiche anzusehen.



### 6.2.2 Tagsituation

Am Tage sind deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 6.4). **Urbane Siedlungsflächen** lassen mehrheitlich eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung erkennen (28.1 % bzw. 41.6 %). Dies trifft vor allem auf Gewerbeflächen zu, welche oftmals grosse versiegelte Areale aufweisen und in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude aufweisen, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt. Auf 9 % der Fläche ist sogar eine extreme Belastung anzutreffen. Verkehrsflächen weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt die höchsten thermischen Belastungen auf, wenngleich ihr Flächenanteil mit extremer Belastung nur 0.3 % beträgt und daher eher gering ist (Tab. 6.5). Bei diesem Flächentyp liegt generell eine grosse Bandbreite struktureller Ausprägungen vor - von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschatteten Strassenabschnitten.

Eine mässige Belastung ist mit einem Anteil von 17.8 % in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil mit Schatten spendenden Grünstrukturen zu beobachten. Vor allem im Nahbereich zu grösseren Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung grösserer Baumbestände für die angrenzende Bebauung (Abb. 6.5).

Belastungssituation	Flächenanteil (%)		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsraum	Verkehrsflächen	
Schwach	3.5	10.8	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuss- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
Mässig	17.8	49.2	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fussläufig erreichbar und zugänglich sein.
Stark	28.1	32.8	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Sehr stark	41.6	6.9	Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Extrem	9.0	0.3	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fussläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Tab. 6.5: Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation am Tage und abgeleitete Planungshinweise



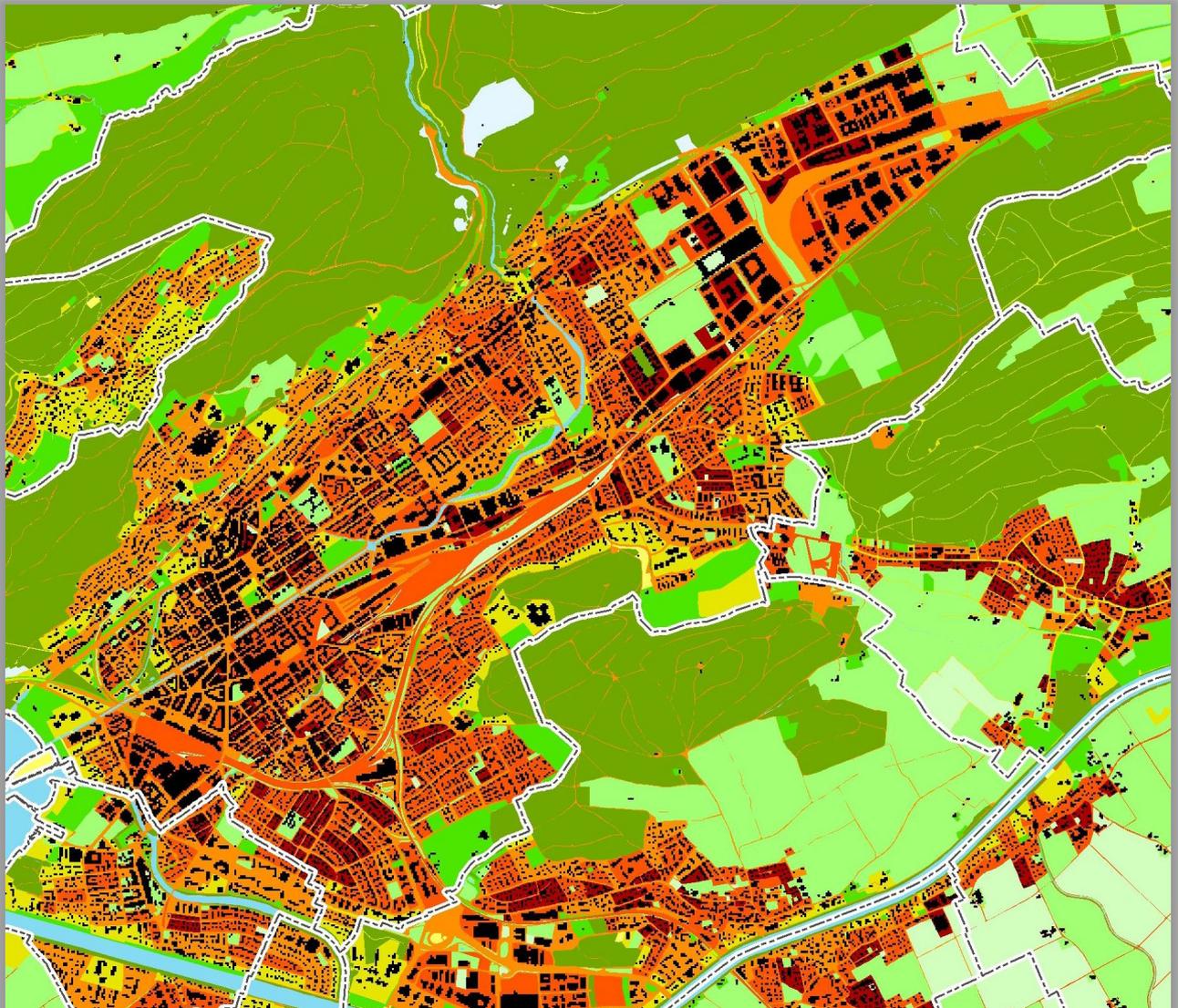
Bebauung mit schwacher Belastung spielt mit einem Flächenanteil von 3.5 % eine untergeordnete Rolle, wobei diese Kategorie in den Verkehrsflächen mit 16.7 % deutlich höher ist.

Bei den **Grünflächen** weisen 60 % eine hohe Aufenthaltsqualität mit geringer PET auf, d.h. sie bieten an Sommertagen eine hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung (Tab. 6.6). Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Die zahlreichen und weitläufigen landwirtschaftlichen Flächen im Kantonsgebiet erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzugsort und tragen zu einem hohen Anteil an Grünflächen mit geringer bzw. sehr geringer Bedeutung (23.4 % bzw. 1.6 %) bei.

Aufenthaltsqualität der Grünflächen	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Hoch	60.0	Grünflächen mit einem hohen Mass an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fussläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), eine gute Erreichbarkeit sollte dahingehend gewährleistet sein.
Mässig	15.0	Grünflächen mit einem durchschnittlichen Mass an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) sowie ggf. auszubauen. Zudem kann es sich um siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung handeln, die nicht in fussläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Aufenthaltsbereiche am Tage dienen können.
Gering	23.4	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion). Eher schlechte Eignung als Aufenthaltsbereich. Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
Sehr gering	1.6	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).

Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise

Einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für die Tagsituation ist in Abb. 6.4 dargestellt. Hier zeichnen sich häufig die nicht mit Bäumen verschatteten Strassenbereiche mit einer sehr starken Belastung ab. In den bebauten Siedlungsflächen dominiert je nach Siedlungstypologie eine starke bis sehr starke Belastung. In Leibringen ist eine vorwiegend mässige Situation zu beobachten, was im Wesentlichen auf den höheren Grünanteil der Bebauung zurückzuführen ist. Auch die übrigen peripheren Siedlungsflächen mit ausgeprägtem Baumbestand weisen ebenfalls eine mässige Belastungssituation auf.



**Bioklima in den Siedlungsflächen**

*Bioklimatische Belastungssituation*

-  Extreme Belastung
-  Sehr starke Belastung
-  Starke Belastung
-  Mässige Belastung
-  Schwache Belastung

**Bioklima im Strassen- und Fusswegenetz**

*Bioklimatische Belastungssituation*

-  Extreme Belastung
-  Sehr starke Belastung
-  Starke Belastung
-  Mässige Belastung
-  Schwache Belastung

**Grün- und Freiflächen**

*Aufenthaltsqualität am Tage*

-  Hoch
-  Mässig
-  Gering
-  Sehr geringe

Abb. 6.5: Planungshinweiskarte Tagsituation Gegenwart für den Bereich Biel



In zahlreichen Grünflächen können Bäume durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Dahingehend treten das Frankegut sowie der Rathausgarten mit angrenzendem Friedhof mit hoher Aufenthaltsqualität hervor. Eine Bilanzierung der Flächenanteile für die Tagsituation zeigt Abb. 6.6.

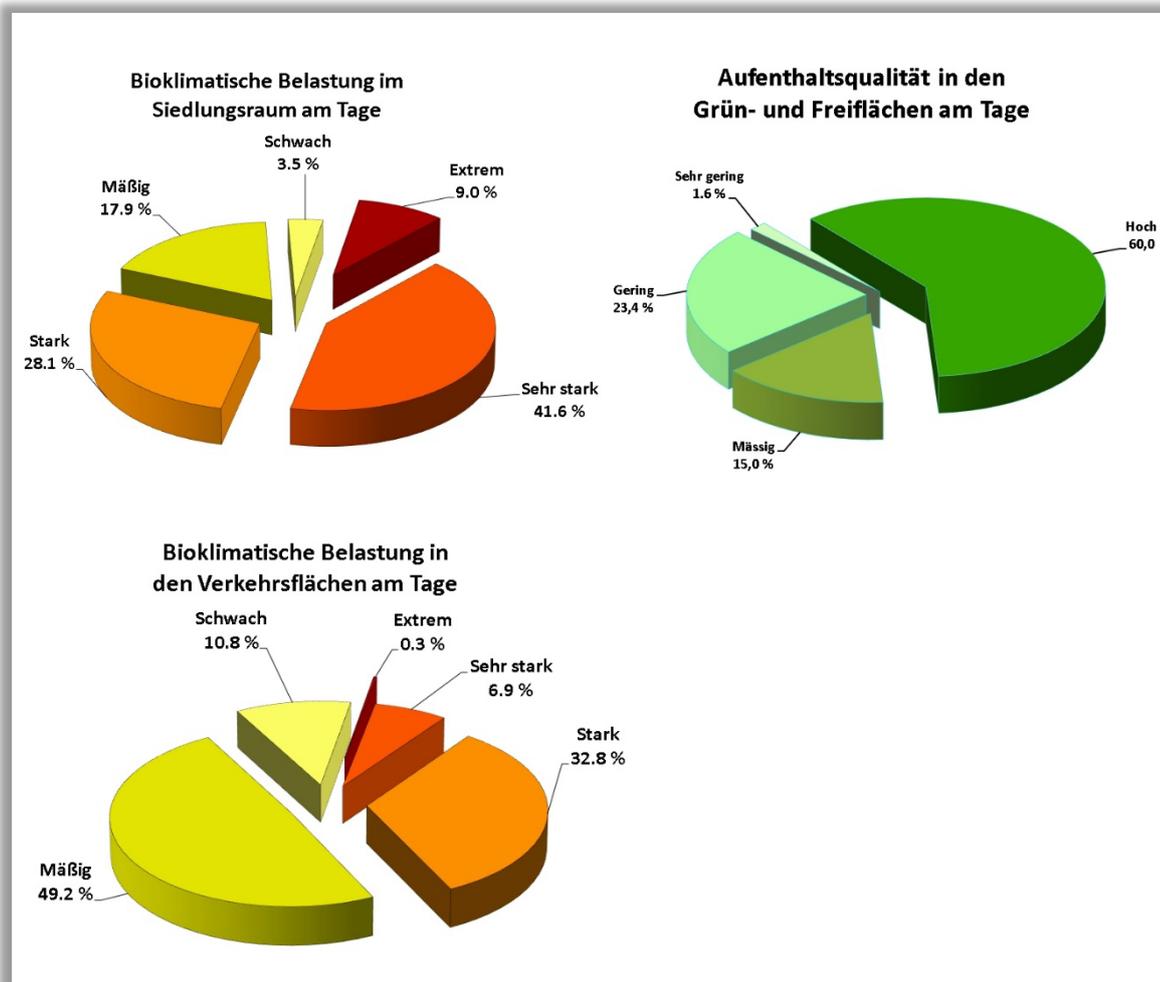


Abb. 6.6: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Tagsituation) - Gegenwart

Der unter dem Einfluss des Klimawandels zu erwartende Anstieg der sommerlichen Wärmebelastung führt in zahlreichen Siedlungs- und Grünflächen zur Einordnung in eine stärkere Belastungskategorie (Abb. 6.7). Sow weisen im Bezugsjahr 2060 ca. 49 % der Siedlungsfläche eine extreme sommerliche Wärmebelastung im unbebauten Aussenraum auf. Dies verdeutlicht die Relevanz von Massnahmen zur Hitzeanpassung sowohl im unbebauten Aussenraum der Siedlungsflächen als auch an den Gebäuden selbst

Eine Verschiebung der Flächenanteile in eine Kategorie mit höherer Belastung zeichnet sich auch für die Grünflächen ab. Während gegenwärtig in ca. 49 % der Grünflächen eine mässige bis hohe Aufenthaltsqualität anzutreffen ist, wird dies zukünftig nur noch bei ca. 11 % der Fall sein (Abb. 6.8). Somit sind auch für die Grünflächen Massnahmen zum Erhalt bzw. zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität geboten.

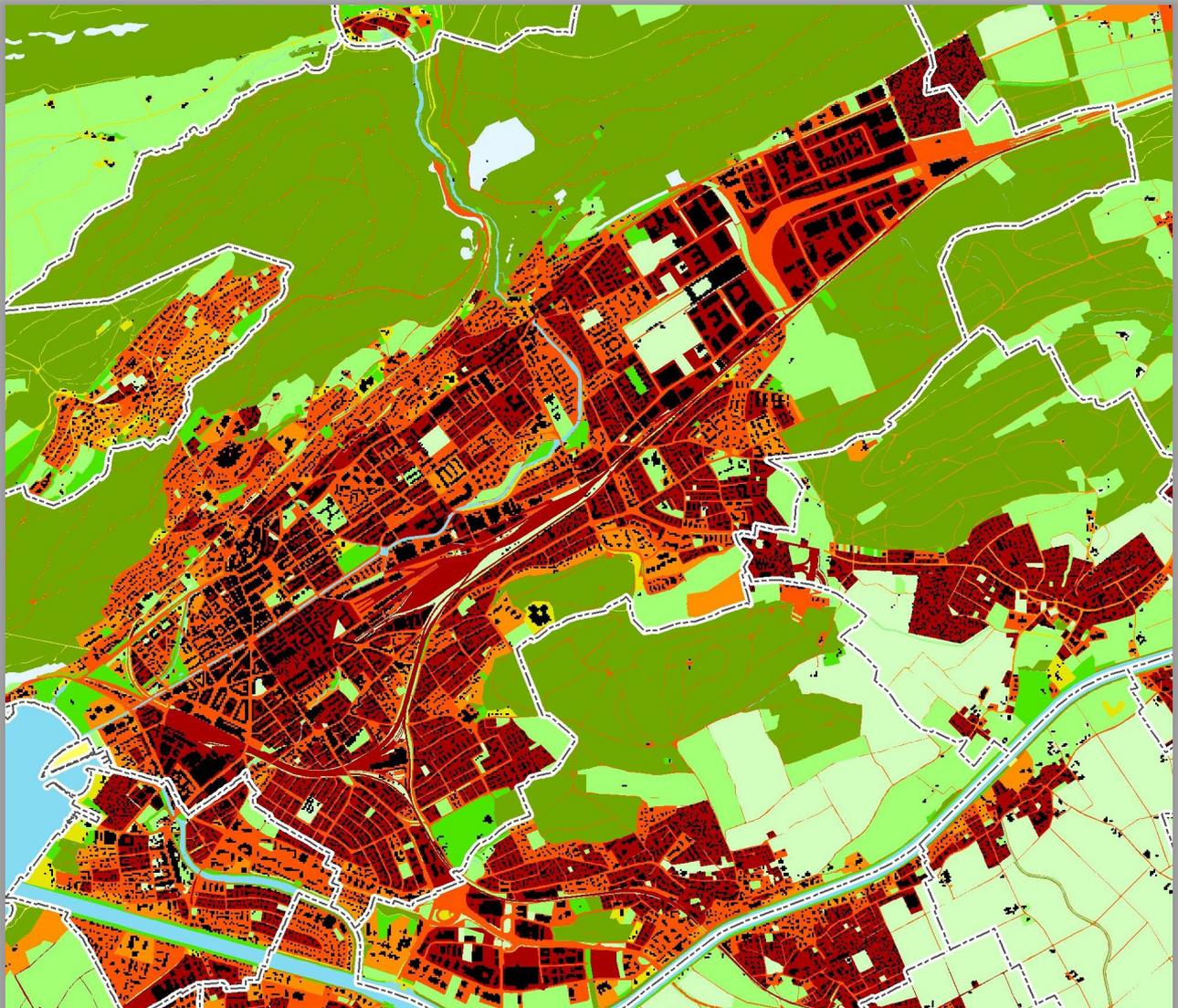


Abb. 6.7: Planungshinweiskarte Tagsituation Zukunftsszenario für den Bereich Biel

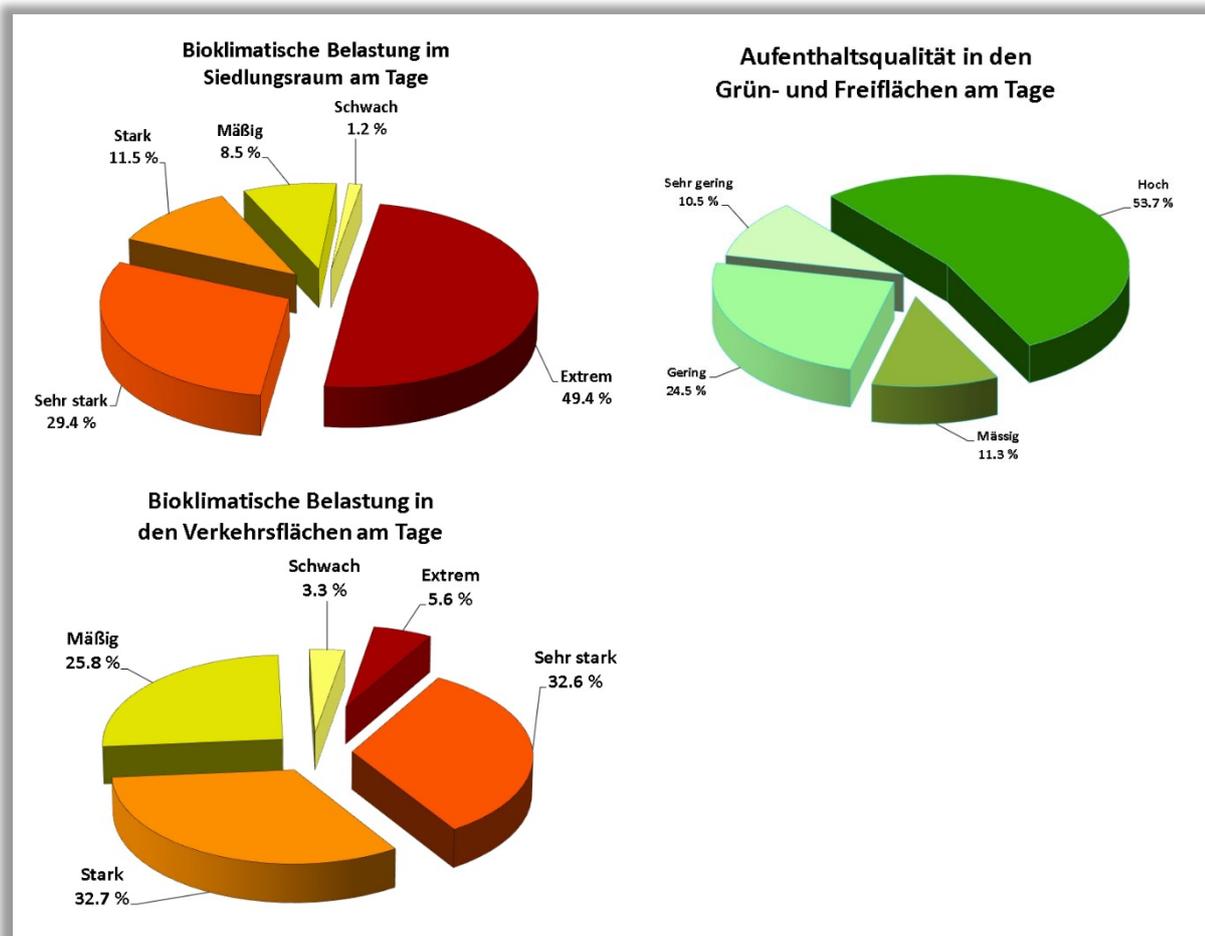


Abb. 6.8: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Kanton Bern (Tagsituation) - Zukunftsszenario



## 7 Detailbetrachtung von städtebaulichen Entwicklungsflächen

Wie in Kap. 2 beschrieben, werden alle städtebaulichen Entwicklungsflächen, deren Realisierung in den nächsten 4 bis 5 Jahre absehbar ist, in die Flächenkulisse für die Gegenwart eingebunden. Die darüber hinausgehende perspektivisch absehbaren Siedlungserweiterungen werden dagegen im Zukunftsszenario berücksichtigt. Durch die mit dem Klimawandel einhergehende Erwärmung weisen die Entwicklungsflächen in den meisten Fällen eine deutliche nächtliche Überwärmung auf. Sofern diese Areale an Bestandsflächen mit ebenfalls perspektivisch stark ausgeprägter Überwärmung angrenzen oder sogar eine Kaltluftleitbahn als wichtiges klimatisches Funktionselement tangieren und die Durchlüftung des Bestands negativ beeinflussen könnten, sind entsprechende Massnahmen sinnvoll. Dabei sind insbesondere die Flächen relevant, welche gegenwärtig noch unbebaut sind. Dem stehen die Areale gegenüber, welche bereits bebaut sind und somit auch im Zuge einer Neubebauung ein Potenzial für die Umsetzung von Massnahmen zur Hitzeminderung aufweisen.

Im Folgenden werden die räumlichen Entwicklungsschwerpunkte mit Konfliktpotenzial betrachtet und entsprechende Hinweise zur räumlichen Ausgestaltung oder baulichen Dichte gegeben. Darüber hinausgehende Empfehlungen bzw. Massnahmen können aufgrund der räumlichen Unschärfe nur ansatzweise gegeben werden. Sie gewinnen dann an Bedeutung, wenn konkrete Gestaltkonzepte für die Baufelder eine Verortung z.B. von Begrünung oder Verschattung erlauben. Ganz generell sollten die Aufenthalts-/Verweilbereiche sowie Quartiersplätze eine hohe Aufenthaltsqualität im Freien aufweisen, was im Wesentlichen mit der Verschattung durch Bäume einhergeht (vgl. Kap. 8). Gleichzeitig sollte eine offene Randbebauung zukünftiger Entwicklungsflächen das Einwirken von Kaltluft aus angrenzenden Freiflächen ermöglichen. In den jeweiligen Ausschnitten aus der Planungshinweiskarte Nacht sind die Entwicklungsflächen mit einem roten Umgriff gekennzeichnet. Bei dem dargestellten Strömungsfeld handelt es sich um eine aggregierte 50 m Auflösung.

### Moutier

Für die Entwicklungsfläche in Moutier ist eine perspektivische Wohnbebauung vorgesehen, wobei eine bislang unbebaute Fläche überplant wird (**A**). Diese befindet sich im Nahbereich einer Kaltluftleitbahn (Abb. 7.1). Die örtlichen Gegebenheiten und die Lage am Fliessgewässer Chalière lassen darauf schliessen, dass die Entwicklungsfläche in den Nachtstunden von Kaltluft überstrichen wird und den Zustrom von Kaltluft in Richtung Ortsmitte begünstigt. Daher sollten die zukünftigen Gebäude eine West-Ost-Orientierung aufweisen, um die Hinderniswirkung auf Kaltluftabflüsse zu minimieren.

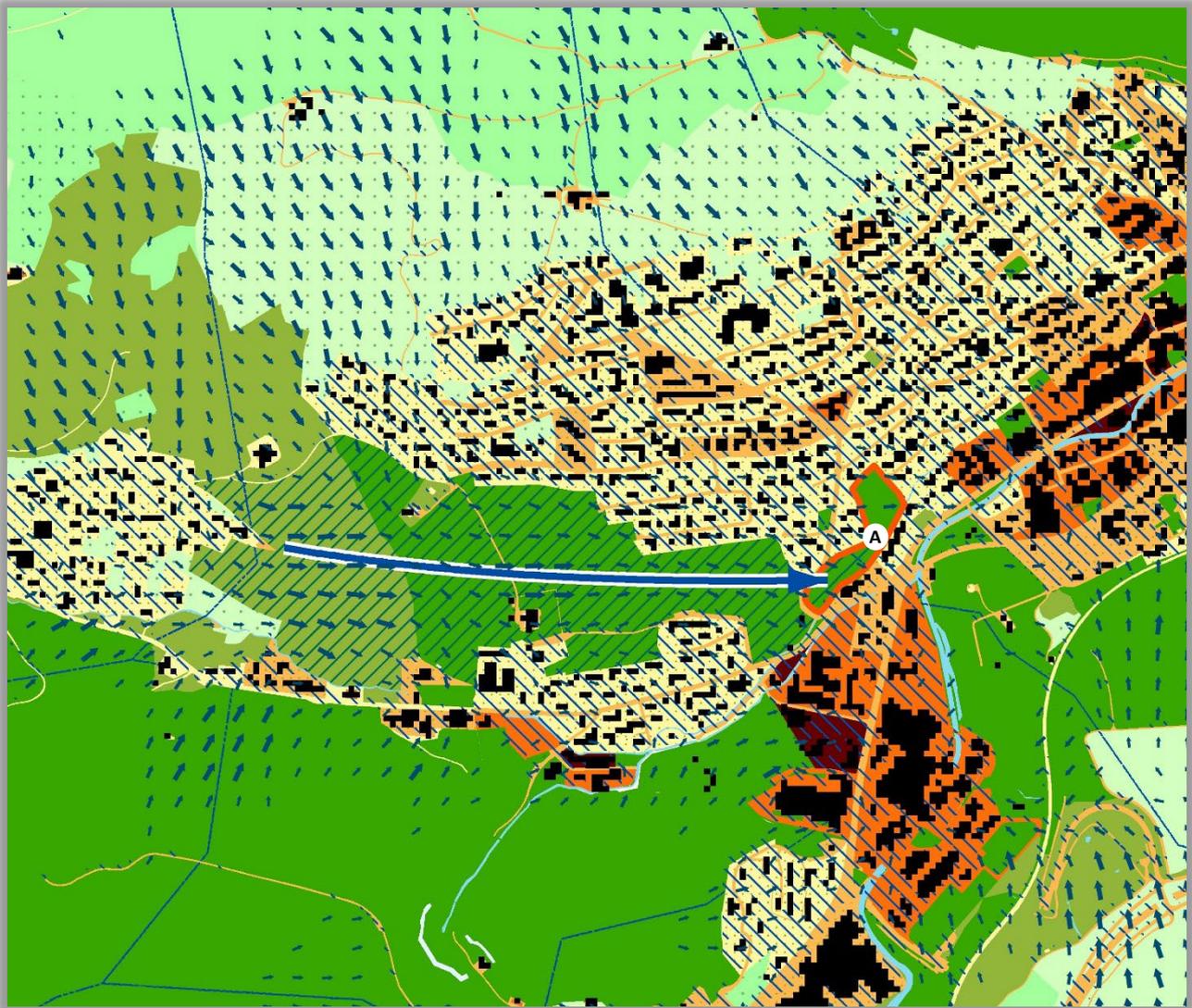


Abb. 7.1: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsfläche im Raum Moutier

### Biel

Im Raum Biel bilden sich aufgrund der ausgeprägten Hangneigungen intensive Kaltluftabflüsse aus, wobei auch der Bielersee überströmt wird (Abb. 7.3). Das bislang unbebaute und als Entwicklungsfläche ausgewiesene Expo Park Nidau wird gegenwärtig von Kaltluft überstrichen und begünstigt die Durchlüftung des östlich angrenzenden Bestands (A).



Die weitere Flächenentwicklung sollte daher eine gering überbaute lineare Achse aufweisen, welche sich vom Seeufer bis zum Schlosspark erstreckt und damit die lokale Durchlüftung unterstützt. Diese Struktur könnte auch die Erschliessung aufnehmen. Die unbebaute Entwicklungsfläche im Bereich Port (B) nimmt derzeit die aus Süden einströmenden Kaltluftabflüsse auf und trägt zur Durchlüftung der Siedlungsfläche nördlich der Nidau bei. Eine zukünftige Bebauung sollte daher ineinander übergehende Abstandsflächen in Süd-Nord-Ausrichtung und dadurch eine gewisse „Porosität“ aufweisen. Dies würde mögliche Negativeffekte auf die lokale Durchlüftung minimieren.



Abb. 7.2: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Biel



## Bern

In Bern treten mehrere Entwicklungsflächen hervor, für die sich klimatische Anforderungen formulieren lassen (Abb. 7.3). Das Areal **A** in Weissenstein ist durch eine Wohnnutzung geprägt, die vorwiegend eine Zeilentypologie aufweist. Mit der gegenwärtigen Südwest-Nordost-Ausrichtung wird sie bodennah gut von Kaltluft durchlüftet. Eine zukünftige Bebauung sollte daher eine ähnliche Baukörperstellung aufweisen um das Einwirken von Kaltluft zu unterstützen. Eine ähnliche Situation liegt für das Areal **B** vor, welches den Bahnhof Weissenbühl umfasst. Auch hier sollte eine durchlässige Bebauung das Einwirken der im Bereich des Steinhölzli gebildeten Kaltluft ermöglichen.



Abb. 7.3: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Bern



Die landwirtschaftlich genutzte Fläche östlich der Villa Morillon (C) weist einen intensiven Kaltluftabfluss auf, dessen Ausgangspunkt im Bereich des Gurten lokalisiert ist. Darüber hinaus weist die Fläche aufgrund ihrer Grösse auch eine eigene lokale Kaltluftentstehung auf. Um weiterhin die Durchlüftung des angrenzenden Bestands zu unterstützen, sollte eine gering überbaute Zone in einer Linie zwischen den Freiflächen der Schulanlage Lebermatt im Süden und dem Friedhelmweg im Norden als Durchlüftungsachse realisiert werden.

**Thun/Steffisburg**

In Steffisburg grenzen mehrere Entwicklungsflächen an die ausgewiesene Kaltluftleitbahn an (A; Abb. 7.4).

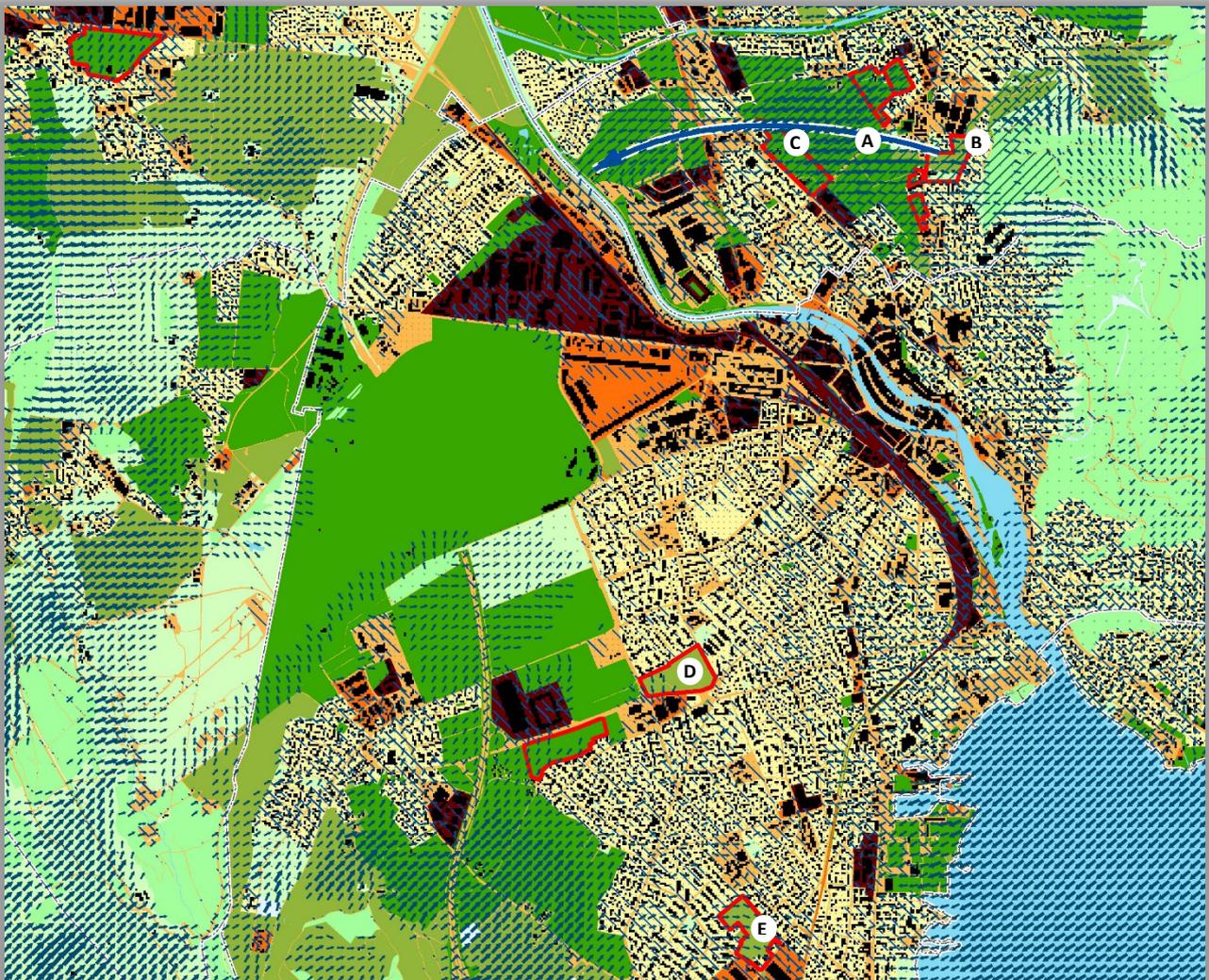


Abb. 7.4: Planungshinweiskarte Nacht mit Entwicklungsflächen im Raum Steffisburg/Thun



In diesem Zusammenhang ist die Entwicklungsfläche **A** an der Thunstrasse von besonderer Relevanz, da sie zwischen der bestehenden Bebauung lokalisiert ist und die Verbindung zwischen dem Kaltluftentstehungsgebiet im Osten und der landwirtschaftlich genutzten Freifläche im Westen potenziell beeinträchtigt. Daher sollte hier sowohl das Bauvolumen als auch die Bauhöhe möglichst gering gehalten werden (<3 Geschosse). Innerhalb der Entwicklungsfläche an der Bernstrasse (**C**) sollte die Gebäudehöhe ebenfalls geringgehalten werden, um die Hinderniswirkung für den Kaltluftstrom zu minimieren. Die bislang unbebaute Entwicklungsfläche an der Weststrasse (**D**) begünstigt das Einwirken von Kaltluft in den Bestand. Mit Blick auf die Kaltluftentstehung über den westlich angrenzenden Freiflächen sollte hier die Baukörperstellung eine West-Ost-Ausrichtung aufweisen. Die unbebaute Fläche (**E**) hat zwar keinen direkten Anschluss an ein Kaltluftentstehungsgebiet, begünstigt durch die Lage innerhalb der Bebauung aber als „Trittstein“ die Durchlüftung. Daher können für diese Fläche ein geringer Überbauungsgrad bzw. Gebäudehöhe empfohlen werden.



## 8 Massnahmenkatalog Siedlungsklima

Für den Kanton Bern wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmassnahmen zusammengefasst, wobei die Zuordnung bestimmter Massnahmensets aus dem Portfolio der 19 Einzelmassnahmen vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt) abhängt. Sie gehen über die in Kapitel 6 formulierten allgemeinen Hinweise hinaus und sind als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Massnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung Dachbegrünung auf der siedlungsklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre). Die Massnahmen sind stichpunktartig in Tab. 8.1 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Aussenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die Wirkung der Massnahmen wird qualitativ beschrieben, da verifizierte Daten nur sehr vereinzelt für ganz spezielle Fallstudien zur Verfügung stehen. Zum anderen hängt die Wirkung stark von der konkreten Ausgestaltung der Massnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Massnahme ab. Grundsätzlich sind alle Massnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Siedlungsklimas beizutragen – werden die Massnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven siedlungsklimatischen Effekte der einzelnen Massnahmen.

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

Neben ihres Potentials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Strassenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Massnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Strassenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Strassen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für



Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fliessrichtung angelegt werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Grosskronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. „Projekt Stadtgrün 2021“ der LWG Bayern<sup>5</sup> oder GALK-Strassenbaumliste<sup>6</sup>).

**Massnahmen zur Verschattung** verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Strassen, Fuss- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M05: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen). Bei grossflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeineffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen).

**Klimaangepasstes Bauen** enthält viele der bisher genannten Massnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Massnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung siedlungsklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen grösser, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Massnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente<sup>7</sup> oder energetische Sanierung<sup>8</sup> sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

---

<sup>5</sup> [www.lwg.bayern.de/landespflanze/urbanes\\_gruen/085113/index.php](http://www.lwg.bayern.de/landespflanze/urbanes_gruen/085113/index.php) (Abruf 12.08.2019)

<sup>6</sup> [www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste](http://www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste) (Abruf 12.08.2019)

<sup>7</sup> Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Aussenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

<sup>8</sup> Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermässiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.



Bei **Nachverdichtung** sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus siedlungsklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Ziel ist es, die Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf das urbane Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Dahingehend weisen vor allem die Siedlungsflächen mit geringer bis mässiger nächtlicher Überwärmung ein Entwicklungspotenzial auf. Dabei handelt es sich vor allem um Bebauungstypologien mit Reihenhaus- und Zeilenbebauung. Aufgrund des im Vergleich zu Innenstadtlagen geringen Überbauungsgrad bieten sich Chancen, im Zuge einer weiteren Verdichtung auch Grünareale mit hoher Aufenthaltsqualität am Tage zu realisieren.

Eine räumliche Zuordnung der in Tab. 6.7 zusammengestellten Massnahmen kann näherungsweise über die Belastungssituation am Tage bzw. in der Nacht erfolgen. So sind Massnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Freien vor allem dort prioritär, wo die thermische Belastung sehr stark ausgeprägt ist (vgl. Karte 08 – Planungshinweise Aufenthaltsqualität). Gleiches gilt für den gebäudebezogenen Wärmeschutz.

Mit Blick auf die Verbesserung der Durchlüftung in den Nachtstunden sind Massnahmen in Bereichen mit ausgeprägter nächtlicher Überwärmung bzw. ungünstigen / sehr ungünstigen Bedingungen sinnvoll. Einige urban geprägte Siedlungsflächen wie in Biel oder Biel weisen allerdings sowohl am Tage als auch in der Nacht bioklimatisch ungünstige Bedingungen auf. In den Bereichen ohne nennenswertes Einwirken von Kaltluft kommt mit Blick auf das stark versiegelte Umfeld der flächeninternen Abkühlung eine besondere Rolle zu: Durch ein günstiges „Binnenklima“ wird die Überwärmung während sommerlicher Hitzeperioden insgesamt abgefedert. Dies kommt sowohl dem Aufenthalt im Freien am Tage als auch einem erholsamen Schlaf in nur mässig überwärmten Wohnräumen zugute.

Tab. 8.1: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer siedlungsklimatisch wirksamer Massnahmen für den Kanton Bern

Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
<b>THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM</b>				
01	<b>Innen-/Hinterhofbegrünung</b>	Vegetation und Entsiegelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Hinterhöfe
02	<b>Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</b>	Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Vernetzung von Grünflächen</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Baulücken, grössere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
03	<b>Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten</b>	Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> </ul>	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Strassen, Wege, Plätze
04	<b>Entsiegelung</b>	Rasenflächen oder Teilversiegelung (Schotter, Rasengittersteine, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Strassen, Wege, Plätze, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
05	<b>Bäume im Strassenraum erhalten und neu pflanzen</b>	Bäume oder bautechnische Massnahmen (Markisen, Überdachung der Haltestellen, Sonnensegel, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts</li> </ul>	Strassen, Wege, Plätze
06	<b>Begrünung und Verschattung von Parkplätzen</b>	Bäume, Sträucher oder Überdachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts</li> <li>Deposition und Filterung von Luftschadstoffen</li> <li>Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	Parkplätze
07	<b>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</b>	Vielfältigkeit der Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> <li>Synergien zur Biodiversität</li> </ul>	Grün- und Freiflächen, Strassen, Wege, Plätze

08	<b>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung für den Kaltlufthaushalt</li> <li>▪ Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
09	<b>Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stadtklimafunktion grösserer Fliess- und Standgewässer</li> <li>▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird</li> <li>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks)</li> <li>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken</li> </ul>	Gewässer, Grün- und Freiflächen
10	<b>Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke</b>	<p>Partizipative Projekte (z.B. Quartiersmanagement) oder aus Bevölkerung heraus (z.B. Trinkpatenschaften, Urban Gardening)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Minderungen der Vulnerabilität der Quartiersbevölkerung gegenüber thermischem Stress</li> </ul>	(thermisch belastete) Quartiere hoher Einwohnerdichte
<b>VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG</b>			
11	<b>Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten</b>	<p>Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung</li> <li>▪ Reduktion des Wärmestaus</li> </ul>	Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen achten)
12	<b>Entdichtung (Rückbau)</b>	<p>Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts</li> <li>▪ Verbesserung der Durchlüftung</li> <li>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement</li> </ul>	Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen)
13	<b>Vermeidung von Austauschbarrieren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quer zur Fliessrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen</li> <li>▪ Schutz des Luftaustauschsystems</li> </ul>	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Strassen, Wege, Plätze
14	<b>Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung</li> <li>▪ Freihaltung grossräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, Felder, Kleingärten und Parklandschaften (im Aussen- und Innenbereich), die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben</li> <li>▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</li> <li>▪ Synergien zur Biodiversität</li> </ul>	Grün- und Freiflächen

**REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

15	<b>Dachbegrünung</b>	Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Bei grossflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas möglich</li> <li>▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement, Biodiversität und Klimaschutz</li> </ul>	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
16	<b>Fassadenbegrünung</b>	Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zur Luftreinhaltung, Biodiversität, Lärm- und Gebäudeschutz</li> </ul>	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
17	<b>Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen</b>	Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Massnahmen wie aussen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie, geeignete Raumlüftung (Verhalten der Bewohner)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wirkung tagsüber und nachts</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zum Klimaschutz</li> </ul>	Gebäude, v.a. Südfassaden und in Bezug auf Fenster- und sonstige Glasflächen (Neubau und Bestand)
18	<b>Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen</b>	Dämmung von Gebäuden, Erhöhung der Albedo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In erster Linie Klimaschutzmassnahme</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber</li> </ul>	Gebäude (Bestand)
19	<b>Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</b>	Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer (etwa im Krankenhaus))	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)</li> </ul>	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)



#### WEITERE HINWEISE ZUR AUFENTHALTSQUALITÄT VON GRÜNFLÄCHEN

Eine intensive Begrünung des Strassenraums und die Aufwertung der Bestandsbebauung mit Bäumen steigern die Aufenthaltsqualität im Freien beträchtlich, da somit grosse beschattete Bereiche geschaffen werden. Damit das Gehen/Radfahren im Schatten ermöglicht. Dieser Aspekt hat vor allem deshalb Relevanz, die siedlungsnaher Grünfläche an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung zu verbessern.

Im Übergangsbereich einer Grünfläche zur Bebauung sollte allerdings auf dichte Vegetationselemente wie Gehölze und Hecken verzichtet werden, da diese die bodennahe Kaltluftströmung beeinträchtigen können. Ein weiteres klimaausgleichendes Gestaltungselement können Brunnenanlagen in Platzbereichen bzw. Freiflächen darstellen. Insbesondere die Temperaturspitzen können kleinräumig durch die durch Wasserflächen erzeugte Verdunstungskälte reduziert werden und die Aufenthaltsqualität im Freien verbessern. Für die strukturelle Ausgestaltung der Grünanlage lassen sich die folgenden Hinweise geben.

Innerstädtische Grün- und Freiflächen sollten möglichst vielfältige Mikrokimate bereitstellen, wobei als Leitbild der erweiterte „Savannentyp“ dienen kann (KUTTLER 2013). Er besteht zu einem grossen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind (Abb. 8.1). Ziel sollte sein, möglichst vielgestaltige „Klimaoasen“ zu schaffen, welche ein abwechslungsreiches Angebot für die unterschiedlichen Nutzungsansprüche der Menschen (z.B. windoffene und windgeschützte Bereiche, offene „Sonnenwiesen“, beschattete Bereiche) darstellen. Durch diese heterogene Anordnung wird sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Abkühlung der Luft als auch der Aufenthalt am Tage für alle Zielgruppen optimiert ist.



Abb. 8.1: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen



## 9 Literatur

- Begert, M.; Frei, C.; Abbt, M. (2013): Einführung der Normperiode 1981-2010 - MeteoSchweiz. Hg. v. Meteoschweiz (245). Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz/klima-normwerte.subpage.html/de/data/publications/2013/9/einfuehrung-der-normperiode-1981-2010-.html>, zuletzt geprüft am 22.10.2020.
- Begert, M.; Stöckli, R.; Croci-Maspoli, M. (2019): Klimaentwicklung in der Schweiz - Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. Fachbericht. Hg. v. Meteoschweiz (274). Online verfügbar unter [https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/AB\\_Vorind\\_Refp\\_v1.1\\_de.pdf](https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/AB_Vorind_Refp_v1.1_de.pdf), zuletzt geprüft am 22.10.2020.
- 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.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017) – Deutscher Wetterdienst: Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abruf: 28.03.2018. [http://www.dwd.de/DE/forschung/klima\\_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt\\_koeln/stadtpl\\_koeln\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_koeln/stadtpl_koeln_node.html)
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 40 Seiten.
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- 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.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- KUTTLER, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Massnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).



- NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. Online verfügbar unter <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html>, Abgerufen am 22.06.2022.
- Meteoschweiz (2020b): Klimanormwerte Bern / Zollikofen. Normperiode 1991 - 2020. Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html?station=ber>. Abgerufen am 22.06.2022.
- Meteoschweiz (Hg.) (2020c): Windrosen pro Station. Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/windrosen-pro-station.html?region=Tabelle>. Abgerufen am am 23.06.2022.
- Meteoschweiz (2020d): Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. Online verfügbar unter [https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0\\_northlow\\_jja\\_1864-trend](https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0_northlow_jja_1864-trend). Abgerufen am 22.06.2022.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (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.
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.