

Auftraggeber: Stadt Pforzheim
Amt für Umweltschutz
Östliche Karl-Friedrich-Str. 9

75175 Pforzheim



Durch die DAkkS nach
DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium.
Die Akkreditierung gilt für die in
der Urkunde aufgeführten Prüf-
verfahren

Akkreditiert für
Ausbreitungsrechnung
n. TA Luft und GIRL
Messstelle n. § 29b BImSchG

Fortschreibung der Stadtklimauntersuchung der Stadt Pforzheim

Projekt-Nr.: 13-04-05-S
Umfang: 148 Seiten
Datum: 04.02.2015
Bearbeiter: **Dipl.-Met. Werner-Jürgen Kost, FRMetS, CMet**
(Anerkannter Beratender Meteorologe DMG e.V.
Fellow of The Royal Meteorological Society (UK))
Dipl.-Met. Dr. Markus Hasel
Dipl.-Met. Dr. Jost Nielinger
M.Sc. Stephan Fischer
IMA - Immissionen · Meteorologie · Akustik
Richter & Röckle GmbH & Co. KG
Niederlassung Stuttgart
Hauptstraße 54
D-70839 Gerlingen
Tel. 07156 / 4389 16
Fax: 07156 / 5026-18
E-Mail: hasel@ima-umwelt.de
Internet: ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

1	SITUATION UND AUFGABENSTELLUNG.....	5
1.1	Bisherige Untersuchungen zum Stadtklima von Pforzheim.....	6
2	BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....	6
2.1	Definition des Begriffs „Stadtklima“.....	6
2.2	Temperatur.....	7
2.3	Kaltluftströmungen.....	8
2.4	Flurwinde.....	12
2.5	Dreidimensionale Strömungssysteme.....	14
2.6	Anthropogener Wärmestrom.....	16
3	METHODIK.....	17
3.1	Das prognostische Simulationsmodell FITNAH.....	17
3.2	Das Rechengebiet von FITNAH.....	17
3.3	Eingangsdaten.....	19
3.3.1	Orographie.....	19
3.3.2	Landnutzung.....	20
3.3.3	Meteorologische Situation und Anfangszustand.....	21
4	GRUNDLAGEN DER AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	22
4.1	Humanbiometeorologische Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas.....	22
4.1.1	Ermittlung der PMV-Werte.....	23
4.2	Standardisierung (z-Transformation).....	24
4.3	Wann liegt eine Belastung vor?.....	25
4.3.1	Kältebelastung.....	26
4.3.2	Wärmebelastung.....	26
4.4	Klimafunktionskarte.....	28
4.4.1	Siedlungsflächen.....	28
4.4.2	Grün- und Freiflächen.....	29
4.4.3	Luftleitbahnen und lokale Kaltluftabflüsse.....	30
4.5	Planungshinweiskarte.....	31
4.5.1	Siedlungsflächen.....	31
4.5.2	Grün- und Freiflächen.....	31
5	ERGEBNISSE.....	33
5.1	Bodennahes Lufttemperaturfeld.....	33

5.2	Strömung	35
5.2.1	Bodennah.....	35
5.2.2	Überdach-Niveau	38
5.3	Klimafunktionskarte.....	40
5.4	Planungshinweiskarte.....	43
6	MODELLVALIDIERUNG	46
6.1	Messungen	46
6.1.1	Meteorologische Randbedingungen während der Intensivmesskampagne	46
6.1.2	Punktuelle kontinuierliche Temperaturmessungen	48
6.1.3	Temperaturbegehungen	51
6.1.4	Kontinuierliche Windmessung	52
6.1.5	Rauchpatronenversuche	53
6.2	Vergleich mit den Modellergebnissen	54
6.2.1	Östliches Untersuchungsgebiet	55
6.2.2	Nördliches Untersuchungsgebiet.....	56
6.2.3	Westliches Untersuchungsgebiet.....	57
6.2.4	Südliches Untersuchungsgebiet.....	59
6.2.5	Südliche Stadtteile.....	61
6.2.6	Versiegelte Freiflächen	63
7	KLIMA-PROJEKTION 2050 FÜR PFORZHEIM	64
7.1	Aufgabenstellung.....	64
7.1.1	Das Klimamodell COSMO-CLM	64
7.1.2	Auswahl des Klimaszenarios.....	65
7.1.3	Regionale Klimatelemente	67
7.2	Die „Quader-Methode“ zur Klimaprojektion	69
7.3	FITNAH-Modellgebiet für die Klimaprojektion 2050 Pforzheim	72
7.4	Ergebnisse.....	73
7.4.1	Häufigkeit von Sommertagen.....	73
7.4.2	Häufigkeit von heißen Tagen	75
7.4.3	Häufigkeit von Tropennächten	77
8	GRÜNFLÄCHEN.....	79
8.1	Parkanlagen.....	81
8.1.1	Enzaupark	81
8.1.2	Stadtgarten und Kallhardtanlage	83
8.1.3	Oststadtpark – Alter Friedhof.....	85
8.1.4	Parks mittlerer Größe	87
8.1.5	Westentaschenparks	92
8.1.6	Parks auf den nördlichen Randhöhen	93

8.1.7	Wallberg.....	96
8.2	Buckenberg.....	98
8.3	Rennbach.....	102
8.4	Fazit.....	105
9	STADTTEILBEGEGHUNGEN.....	105
9.1	Klimaanpassungsstrategien.....	106
9.1.1	Grünflächen und Versiegelung.....	107
9.1.2	Begrünung von Straßenzügen.....	108
9.1.3	Dachbegrünung.....	109
9.1.4	Fassadenbegrünung.....	109
9.1.5	Offene Wasserflächen.....	109
9.1.6	Kaltluft.....	110
9.1.7	Bauwerke.....	110
9.2	Weststadt.....	111
9.2.1	Teilbereich 1.....	117
9.2.2	Teilbereich 2 (nördlich Messplatz bis Westliche-Karl-Friedrich-Str.).....	119
9.2.3	Teilbereich 3 (nördlich der Westlichen-Karl-Friedrich-Str.).....	120
9.2.4	Teilbereich 4.....	121
9.3	Leopoldstraße / Bleichstraße.....	123
9.3.1	Teilbereich 1 (Westliche Innenstadt).....	129
9.3.2	Teilbereich 2 (Südlich der Enz).....	132
9.3.3	Teilbereich 3 (Südliche Bleichstraße – Stadtgarten).....	134
9.3.4	Teilbereich 4 (Rennfeld).....	135
9.4	Innenstadt Ost.....	136
9.4.1	Teilbereich 1 (Blumenhof - Schloßkirche).....	140
9.4.2	Teilbereich 2 (Rathaus – Östliche Karl-Friedrich-Straße).....	141
10	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT.....	144
	LITERATUR.....	147

1 Situation und Aufgabenstellung

Die Stadt Pforzheim möchte bei zukünftigen Stadt- und Grünflächenplanungen und als Teil einer kommunalen Klimaanpassungsstrategie verstärkt stadtklimatische Aspekte berücksichtigen. Grundlage hierfür soll ein neues lokalklimatologisches Gutachten als Fortschreibung der bestehenden Klimaanalyse von 1993 sein.

Die Fortschreibung soll den Stadtplanern im Vorfeld von Planungen, bei konkreten Bebauungsplanvorhaben und in der Flächennutzungsplanung Anhaltspunkte zu möglichen Konflikten bezüglich der Themen:

- Innerstädtische Überwärmung
- Belastungsbereiche im Siedlungsraum
- Frisch-Kaltluftluftzufuhr
- Kaltluftentstehung
- bioklimatische Belastungen

bieten.

Es sollen Grundlagen erarbeitet werden, die es erlauben, in der Stadtplanung die Erhaltung und die Verbesserung eines günstigen Kleinklimas und einer günstigen lufthygienischen Situation adäquat zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung der derzeitigen klimatischen Verhältnisse wurde eine umfassende Bestandserhebung vorgenommen. Diese basiert auf modellgestützte Simulationen mit dem Klimamodell FITNAH. Im Zentrum der Betrachtungen standen hierbei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, welche mit zunehmender Häufigkeit mit einer hohen Wärmebelastung für die Bevölkerung verknüpft sind. Daneben wurden auch umfangreiche Feldmessungen durchgeführt, welche die Modellergebnisse validieren und weiter verfeinern sollten. Als Zukunftsperspektive sollten zudem mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtgebiet näher untersucht werden. Mit dem Modell FITNAH wurde hierfür hochaufgelöst und flächendeckend die Entwicklung für den Zeithorizont 2050 berechnet. Die hieraus abgeleiteten meteorologischen Parameter erlauben die sommerliche Wärmebelastung der Zukunft zu prognostizieren.

Auf der Basis dieser Informationen sowie den Erkenntnissen aus früheren Untersuchungen wurden eine neue Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte erarbeitet, die Frischluftsysteme und Kaltluftentstehungsgebiete identifizieren und bewerten. Weiterhin wurden alle flächendeckenden Informationen digital aufbereitet, so dass ein Benutzer in der Lage ist, die verschiedenen klimatischen Aspekte in unterschiedlichen Maßstäben zu visualisieren. Der flächendeckende Charakter der Klimainformationen des vorliegenden Gutachtens schafft für die Stadt Pforzheim Planungssicherheit hinsichtlich der Auswirkungen aktueller und künftiger Änderungen der Flächennutzung auf das lokale Klima.

1.1 **Bisherige Untersuchungen zum Stadtklima von Pforzheim**

In den Jahren 1979 und 1993 wurde für die Stadt Pforzheim jeweils ein Klimagutachten erstellt (DWD 1979, Bangert 1993). Beide beruhen auf umfangreichen Naturmessungen, unter anderem mit Vertikalsondierungen, stationären meteorologischen Messungen im Stadtgebiet, Rauchversuchen, Temperaturfahrten und der Erstellung von Thermalbildern.

Für die Modellregion Mittlerer Oberrhein/ Nordschwarzwald wurden im Rahmen des Projekts „Modellvorhaben der Raumordnung (MORO), Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ in den Jahren 2012 und 2013 für die Region Pforzheim Analysen und Prognosen des Lokalklimas durchgeführt. Das vorliegende Klimagutachten stellt eine Fortschreibung des Gutachtens von 1993 dar. Der neue Schwerpunkt bei dieser Untersuchung lag auf der numerischen Simulation, die flächendeckende Informationen für die Klimafunktionen liefert und vor allem als Grundlage für Planungshinweise dient.

Die Messungen der bestehenden Klimagutachten wurden für die Validierung der numerischen Simulationen herangezogen. Sie wurden ergänzt durch eigene Messungen im Sommer 2013.

2 **Begriffsbestimmungen**

Im Gutachten werden eine Vielzahl von Fachbegriffen aus dem Bereich der Meteorologie und des Klimas verwendet. Die folgenden Abschnitte sollen einen Überblick und einige Hintergründe zu diesen Größen vermitteln.

2.1 **Definition des Begriffs „Stadtklima“**

Beim Wort „Klima“ denkt man in der Regel an ganze Kontinente oder Großregionen wie die Tropen, Subtropen, gemäßigten Breiten oder Polargebiete. Doch nicht nur diese Gebiete weisen ein für sie typisches Klima auf, sondern auch kleinräumige Strukturen wie Wiesen, Flusstäler, Siedlungen und Städte.

Die Definition des Stadtklimas wurde von der World Meteorological Organization (WMO) folgendermaßen festgelegt:

Das Stadtklima ist das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima.

Im Wesentlichen zeichnet sich das Stadtklima durch folgende Eigenschaften aus:

1. Veränderung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse

Das bekannteste stadtklimatologische Phänomen ist die Ausbildung einer Wärmeinsel. Je nach Größe der Stadt oder Gemeinde können die Temperaturen innerhalb der Bebauung während klarer Sommernächte um bis zu 10 K höher als im Umland sein. Die Ursache hierfür liegt vor allem in der Wärmespeicherung der städtischen Baumaterialien, der herabgesetzten Verdunstung und der reduzierten nächtlichen Wärmeabstrahlung.

2. Veränderung der Windverhältnisse

Die erhöhte Rauigkeit der städtischen Bebauung bewirkt im Mittel eine Verringerung der Windgeschwindigkeiten, was gleichzeitig den Luftaustausch verschlechtert. In der Nähe von hohen

Gebäuden kann es hingegen zu einer Zunahme der Windgeschwindigkeitsspitzen, also einer Erhöhung der Böigkeit, kommen.

3. Veränderung der lufthygienischen Situation

Üblicherweise treten innerhalb von Stadtgebieten höhere Emissionen als im Umland auf. Während früher Hausbrand und Gewerbegebiete hierfür verantwortlich waren, ist in den vergangenen Jahren der Kfz-Verkehr zum Hauptverursacher geworden. In Verbindung mit dem reduzierten Luftaustausch kommt es zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen im Stadtgebiet.

Wie aus der Aufzählung ersichtlich ist, beinhaltet der Begriff „Klima“ die Zusammenschau verschiedenster Parameter, die zum Teil konkurrierenden Prinzipien unterworfen sind. So kann eine Optimierung im Hinblick auf eine bestimmte Situation (z.B. Minderung der Wärmebelastung an einem Sommertag durch Anpflanzung von schattenwerfenden Bäumen) Nachteile bei anderen Situationen bringen (z.B. Verminderung des Luftaustausches aufgrund der Hinderniswirkung von Bäumen).

Eine wie auch immer definierte klimatische Optimierung steht daher stets in Konkurrenz zu anderen ökologischen sowie zum großen Feld der sozioökonomischen Planungsziele wie preiswerter Wohnraum, Urbanität, günstige Verkehrserschließung, Sicherheit und vielem anderen mehr.

2.2 Temperatur

Die Lufttemperatur weist einen ausgeprägten Tagesgang auf. Sie ist direkt verknüpft mit der Energiebilanz der Erdoberfläche. Wesentlicher Einflussfaktor hierfür ist die Landnutzung, welche die Eigenschaften der Oberfläche bestimmt (Abb. 2-1).

Auf Vegetationsflächen wirken sich hier vor allem die Art des Bestandes und die Wasserverfügbarkeit aus sowie die Orientierung des Reliefs zum Sonnenstand. Da diese Eigenschaften oft kleinräumig variieren, ist auch das Temperaturfeld durch große Inhomogenität geprägt.

Innerhalb von Siedlungen weichen die Oberflächen von den natürlichen Gegebenheiten ab. Bebaute Areale zeichnen sich durch eine erhöhte anthropogene Wärmefreisetzung, höhere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, geringere Wasserverfügbarkeit und vermindertes Rückstreuvermögen (Albedo) bei gleichzeitig vergrößerter Oberfläche durch die Baukörper aus. Diese behindern darüber hinaus aufgrund ihrer Wirkung als Strömungshindernis auch die Durchlüftung und damit den Luftaustausch mit der Umgebung.

Im Falle strukturierten Geländes, wie es im Stadtgebiet von Pforzheim vorhanden ist, wirkt sich darüber hinaus auch die Höhenlage eines Ortes auf die Temperatur aus. Üblicherweise weist die Atmosphäre einen negativen Temperaturgradienten auf, d.h. die Temperatur nimmt mit der Höhe ab und höher gelegene Orte sind bei sommerlichen Hitze-Situationen begünstigt. Mit autochthonen Wetterlagen ist dagegen oft eine Temperaturinversion verknüpft, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Je nach vertikaler Mächtigkeit und Stärke der Inversion kann dies dazu führen, dass in höheren Lage die Temperatur zunimmt.

Neben diesen lokalen Einflüssen wirkt sich auch die Strömung, bedingt oder modifiziert durch das Relief, aus.

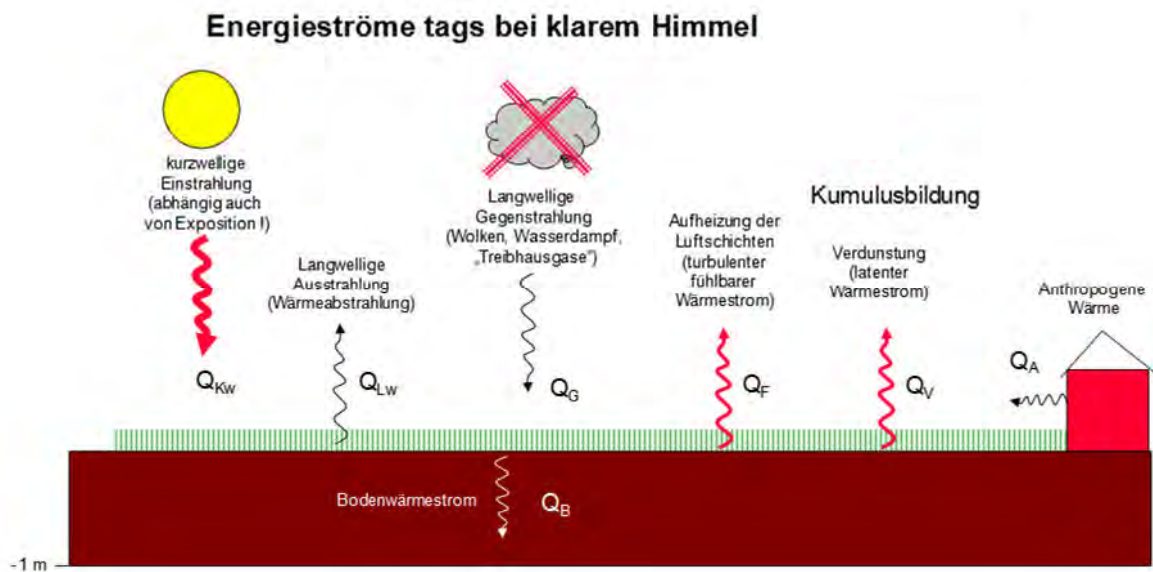


Abb. 2-1: Schema zur Erwärmung einer Landoberfläche aufgrund unterschiedlicher Strahlungsströme Q . Bewölkung behindert mit ihrer Gegenstrahlung die Ausstrahlung der Erdoberfläche und vermindert somit die Abkühlung.

2.3 Kaltluftströmungen

Als Kaltluftströmung wird in der Umweltmeteorologie bodennah gebildete Kaltluft verstanden, die sich in Bewegung gesetzt hat.

Zu beachten ist, dass sich der Begriff „Kaltluft“ dabei nicht auf absolut kalte Luft bezieht, sondern dass es sich um relativ kalte Luft handelt: „Luftmenge, die gegenüber durchschnittlichen Verhältnissen der Unterlage oder ihrer Umgebung eine niedrigere Temperatur aufweist“.

Die Bildung bodennaher Kaltluft wird durch die Abkühlung der Erdoberfläche aufgrund einer negativen Energiebilanz verursacht (Abb. 2-1). Der Energieverlust sorgt zunächst für eine Abkühlung der Oberfläche und infolgedessen für die Abkühlung der darüber befindlichen Luftmasse. Besonders günstig für solche Abkühlungsprozesse sind:

- Nachtstunden (wegen des Fehlens der solaren Einstrahlung Q_{KW}).
- Geringer Wolkenbedeckungsgrad (wegen des Fehlens der atmosphärischen langwelligeren Gegenstrahlung von Wolken Q_G und der ungehinderten langwelligeren Ausstrahlung der Oberfläche Q_{LW}).
- Hochdruckwetterlagen (wegen der überregional geringen Windgeschwindigkeiten und damit einer höheren Verweilzeit eines Luftpakets über der kaltluftproduzierenden Oberfläche sowie wegen der geringeren bodennahen Turbulenz und daher einer geringeren vertikalen Durchmischung bodennaher Luftschichten).

Die beschriebenen Bedingungen werden auch als „autochthone Wetterlage“ bezeichnet, die Nächte, in denen sich Kaltluftströmungen ausbilden, auch als „Strahlungs Nächte“.

Die höchsten Kaltluftproduktionsraten weisen unversiegelte Freiflächen auf. Bebautes Gebiet hat i.a. ein reduziertes Kaltluftbildungsvermögen, dichte Bebauung und industriell genutzte Flächen können je nach anthropogener Wärmefreisetzung als - relativ - warme Zonen wirken (Abb. 2-2).

In Wäldern bleibt die Luft aufgrund der Verschattung im Bestand tagsüber relativ kühl. Wälder können daher speziell am Abend und zu Beginn der Nacht durchaus nennenswerte Beiträge zu Kaltluftströmungen leisten, vorausgesetzt natürlich, dass die Umgebungsluft außerhalb des Bestandes noch höhere Temperaturen aufweist. Während der Nacht kühlt die Luft i.A. im Bestand weniger ab als über freier Flur, was auf die langwellige Strahlung der Pflanzenbestandteile, die Minderung der Ausstrahlung des Erdbodens in die freie Atmosphäre und den gebremsten Luftaustausch zurückzuführen ist. Später in der Nacht können Wälder daher häufig als relativ warme Zonen (im Vergleich zur Umgebung) identifiziert werden (Abb. 2-2). Die Kaltluftproduktion ist daher in der zweiten Nachthälfte oft geringer als zu Beginn.

Wasser kann sehr viel Wärme speichern, daher ist die Abkühlung von Wasseroberflächen im Verlauf einer Strahlungsnacht äußerst gering. Die Wasseroberflächentemperatur ändert sich gegenüber den Tageswerten kaum. Aus diesem Grund sind stehende Wasseroberflächen später in der Nacht mit am wärmsten.

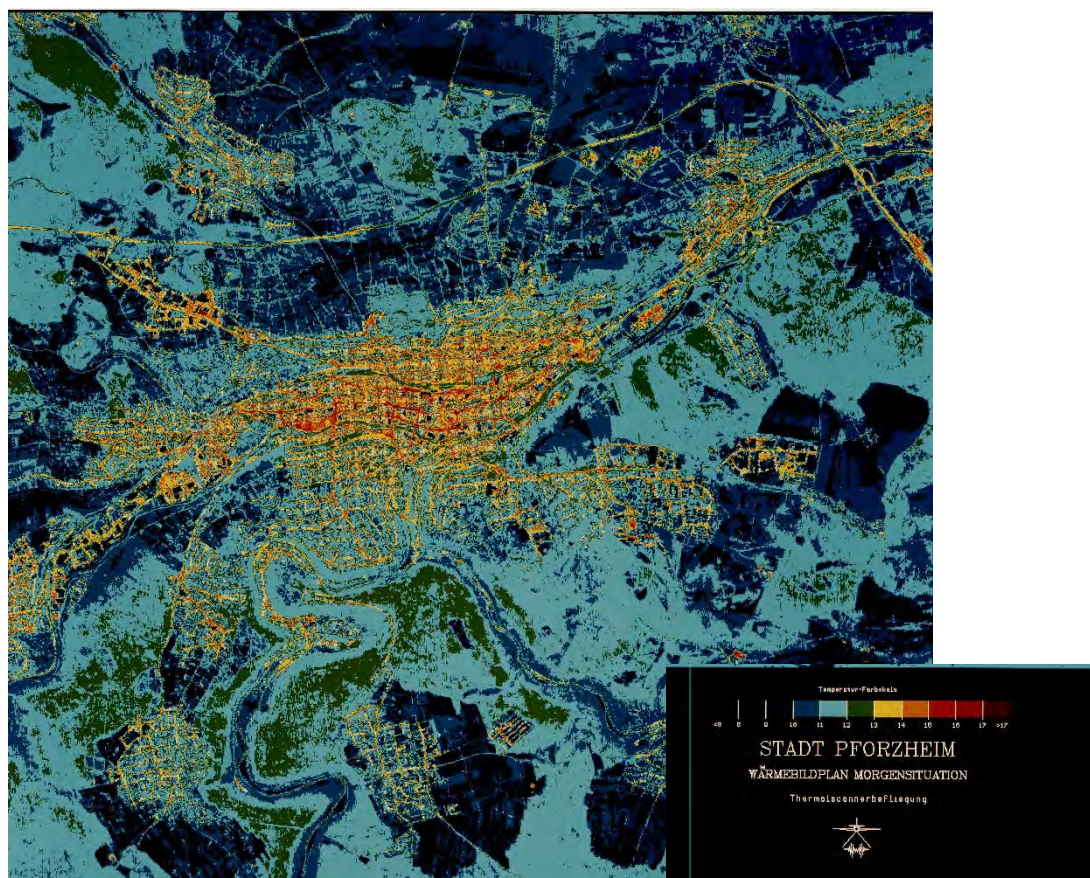


Abb. 2-2: Oberflächentemperaturen gegen Ende einer Strahlungsnacht am Beispiel Pforzheim (/1/).

Eine Kaltluftströmung entsteht dann, wenn sich bodennah gebildete Kaltluft in Bewegung setzt. Dies geschieht vornehmlich an geneigten Hängen, da die Kaltluft eine höhere Dichte besitzt („schwerer ist“) und sich daher geländefolgend in Bewegung setzt. Dieses Stadium wird auch als Kaltluftabfluss bezeichnet.

Die Intensität dieses Prozesses ist von der Hangneigung, dem Dichteunterschied sowie von Bewuchs und Bebauung abhängig. Die hangparallel wirkende Reibungskraft bremst die abfließende Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind bei flachen Hängen mit wenig Höhenunterschied oft instationär, d.h. es kommt vielfach zu "pulsierenden" Kaltluftabflüssen.

Zu Beginn der Nacht sind die lokalen Kaltluftabflüsse meist am intensivsten, da die Abkühlungsrate über freien Flächen am höchsten ist. Später in der Nacht flacht die Abkühlungskurve ab, und es wird lokal weniger schnell Kaltluft gebildet.

Da an einem ausreichend langen geneigten Hang von oben kommend immer mehr Kaltluft in den Abfluss mit einbezogen wird, ist die vertikale Mächtigkeit der Kaltluft im oberen Bereich eines Hanges geringer als am Hangfuß (Abb. 2-3).

Aufgrund ihres Bewegungsimpulses bleibt die Kaltluft nicht einfach am Hangfuß „stehen“, wenn sich dort ebenes Gelände anschließt, sondern kann sich aufgrund ihrer Dynamik noch etwas in die Ebene vorschieben (Abb. 2-3). Dabei verliert sie allerdings fortwährend an Impuls, so dass sie nach einer bestimmten Distanz zum stagnieren kommt („liegen bleibt“).

Idealisierter Kaltluftabfluss an einem Hang mit nachfolgender Ebene

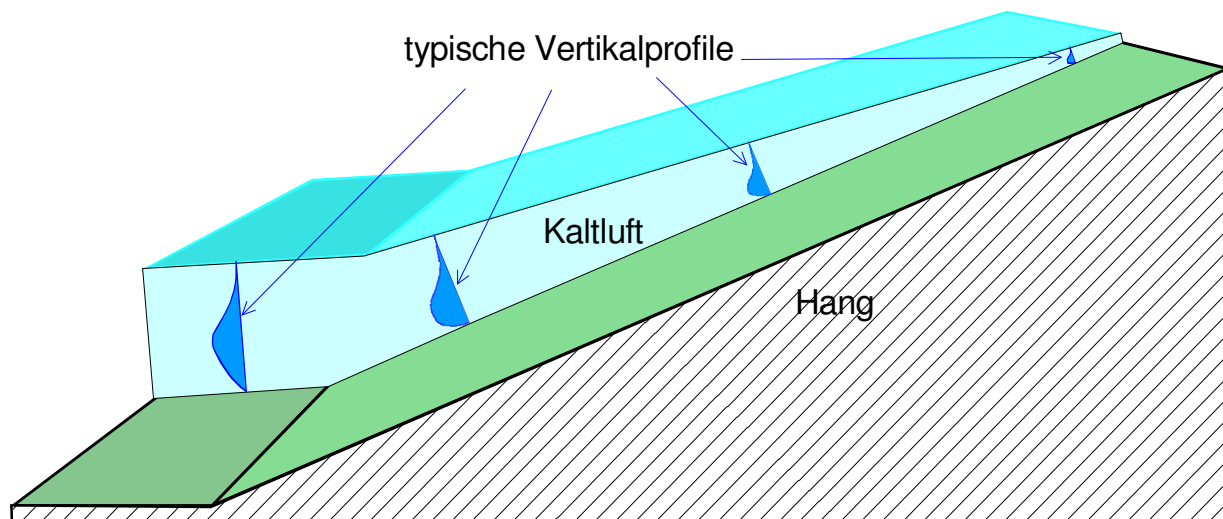


Abb. 2-3: Idealisiertes Schema eines Kaltluftabflusses an einem Hang mit nachfolgender Ebene.

Mehrere solcher hanggebundenen Kaltluftabflüsse schließen sich im orographisch gegliederten Gelände oft zusammen und bilden ein Kaltluftströmungs-System. Aufgrund der Beiträge vieler kaltluftproduzierender Flächen und Hänge können solche Systeme eine z.T. bedeutende vertikale

Mächtigkeit erlangen, die es u.U. sogar gestattet, dass einzelne, niedrige Geländestrukturen vollständig überströmt werden. In von Höhenzügen begrenzten Haupttälern können sich so trotz geringer Neigung der Talsohle eindeutig identifizierbare Kaltluftströmungen einstellen. Tritt ein Kaltluftströmungssystem indes in die Ebene hinaus, so verteilt sich die Kaltluft breitflächig, der Impuls nimmt ab und die Reichweite ist begrenzt.

Diese Systeme bleiben relativ stabil, d.h. sie ändern sich zeitlich nur unwesentlich, man spricht auch von „stationären“ Strömungen. Eine Auswertung später in der Nacht bietet folglich ein Bild des in großen Teilen der Nacht maßgeblichen Belüftungssystems.

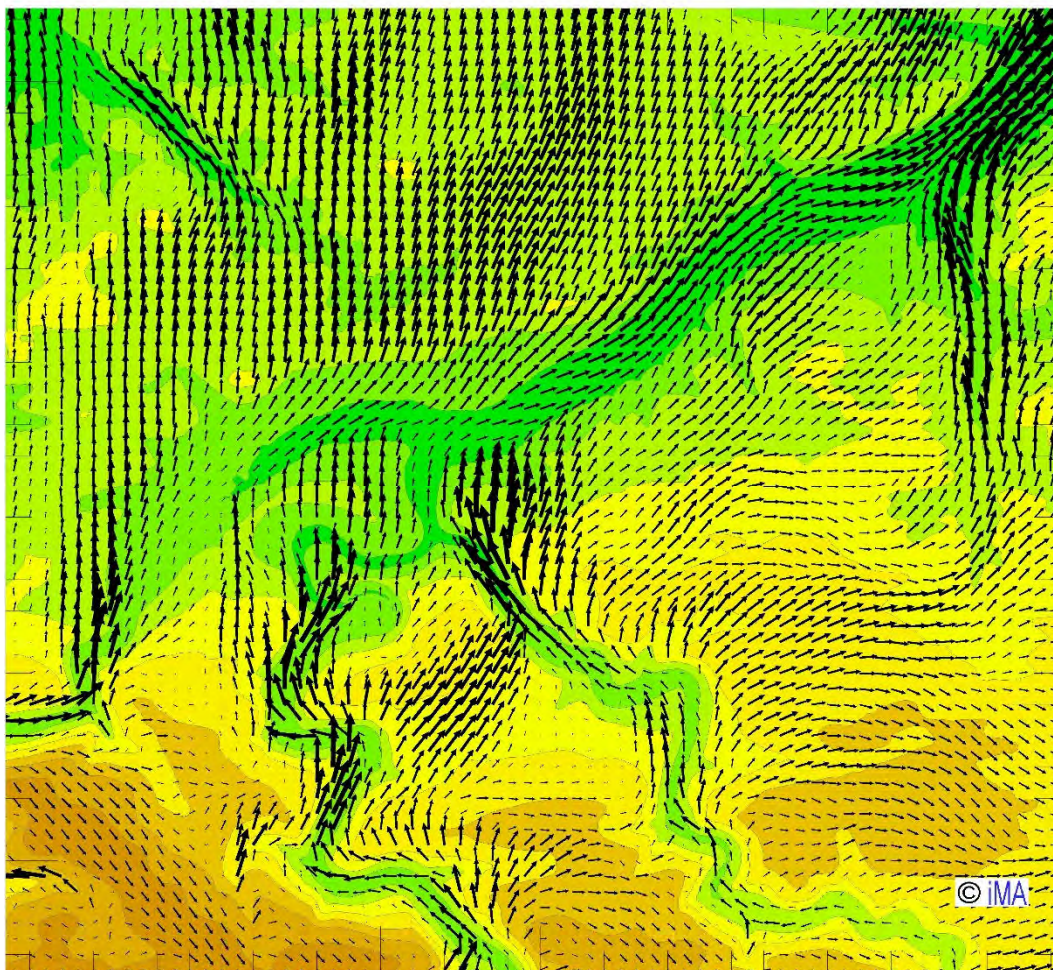


Abb. 2-4: Kaltluftströmungssysteme bedingt durch die Topographie von Tälern und Höhenzügen am Beispiel Pforzheim. Im Süden liegen die Täler von Nagold und Würm, das breitere Enzthal zieht sich von Südwest durch Nordost in der oberen Hälfte der Abbildung.

Der Antrieb von Kaltluftströmungen ist die Druckdifferenz aufgrund von Temperaturdifferenzen, nicht die absolute Temperatur der Luft. Es spielt für die Dynamik und die Struktur der Strömung eine sehr untergeordnete Rolle, ob sich ein Unterschied von 10°C zwischen +30°C und +20°C oder

zwischen +5°C und -5°C einstellt. Aus diesem Grund können sich Kaltluftabflüsse und Kaltluftströmungssysteme unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden. Allerdings kann die human-klimatologische Funktion der Strömungen je nach Jahreszeit stark differieren.

2.4 *Flurwinde*

Auch in der Ebene bildet sich unter den im Abschnitt 2.2 beschriebenen Bedingungen bodennahe Kaltluft. Wegen des Fehlens einer Geländeneigung wäre sie ohne andere Antriebsmechanismen ortsfest, würde allenfalls ein wenig hin- und her verfrachtet. Solche Zustände werden jedoch nur kurzzeitig beobachtet, oft herrscht auch in der Ebene eine signifikante Kaltluftströmungsrichtung vor.

Ursache für Kaltluftströmungen in der Ebene können 4 Mechanismen sein:

- Ein in die Ebene hinein ragendes Kaltluftströmungssystem (s. Abschnitt 2.3).
- Ein übergeordnetes Regionalwindssystem, das sich ebenfalls bevorzugt bei autochthonen Wetterlagen ausbilden kann.
- Das „Mitnehmen durch“ oder das „von oben Durchgreifen“ einer übergeordneten Strömung aufgrund der geringen Schichtdicke der bodennahen Kaltluft.
- Der Antrieb durch horizontale Temperaturunterschiede (*Flurwind*).

Zur Ausbildung eines Flurwindes bedarf es einer größeren, zusammenhängenden Zone mit höheren Temperaturen als im Umland. Dies können größere Siedlungsgebiete, Städte oder auch größere, zusammenhängende Industrieareale sein. Aufgrund geringerer Strömungsgeschwindigkeiten und wegen der Wärmeabgabe aufgeheizter Flächen kommt es zu einer Verlangsamung der nächtlichen Abkühlung (Abb. 2-5). Im Laufe der Nacht bildet sich im Vergleich zum Umland bodennah eine relativ warme Zone aus, die deshalb auch als „Wärmeinsel“ bezeichnet wird.

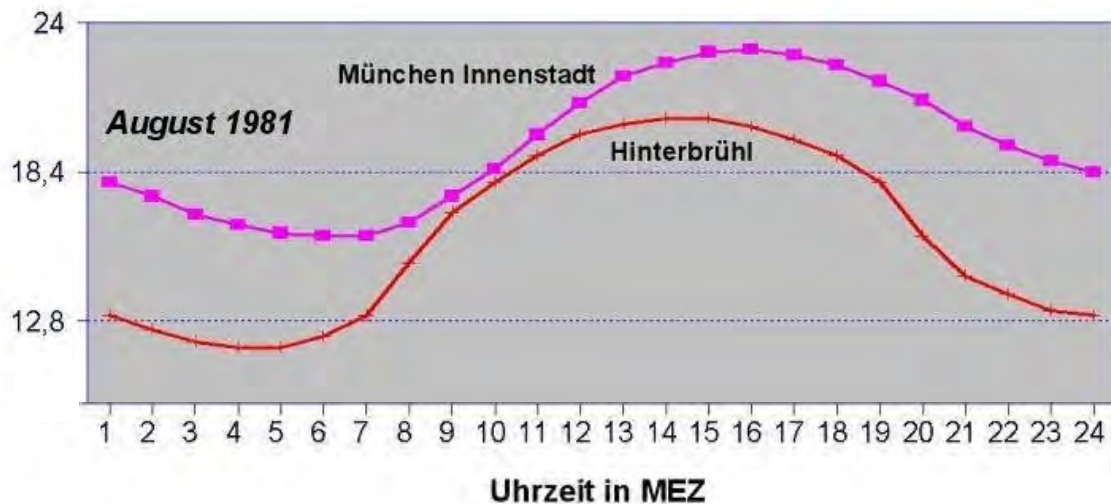


Abb. 2-5: Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen Innenstadt und Umland am Beispiel von München.

Diese relativ wärmere Luft hebt sich mit geringer Geschwindigkeit an, was zur Folge hat, dass kühlere Luft aus der Umgebung nachströmt (Abb. 2-6). Dieses Nachströmen wird als Flurwind bezeichnet. Er bildet insbesondere für Großstädte einen wichtigen Belüftungsmechanismus („Wärmeinsel“).

Die bodennahe Eindringtiefe der Strömung in einen bebauten Bereich ist allerdings aufgrund der i.a. relativ schwachen Dynamik der Flurwinde und wegen der gebäudeinduzierten Bremswirkung begrenzt. Wenn die bodennahe Kaltluftschicht deutlich mächtiger ist als die Bebauungshöhe, so findet der größte Teil des Belüftungsmechanismus durch Flurwinde eher im Überdachniveau statt.

Diese Belüftungsfunktion der Flurwinde macht deutlich, weshalb der Begriff „Wärmeinsel“ u.U. irreführend sein kann – es handelt sich dabei nicht zwingend um einen abgeschotteten „Insel“-Bereich, der sich immer weiter und unabhängig von seiner Umgebung aufheizt, sondern der zunächst erforderlich ist, um ein Flurwindsystem anzutreiben, das seinerseits mit seinem Transport kühlerer Luft in die wärmere Zone hinein für eine Belüftung und eine Temperatur-Angleichung sorgt.

Der Antrieb von Flurwinden ist auch hier die (horizontale) Temperatur*differenz*, nicht die absolute Temperatur der Luft. Aus diesem Grund können sich Flurwinde unter den o.g. Bedingungen das gesamte Jahr über in ähnlicher Struktur mit nur leicht variierenden Intensitäten ausbilden.

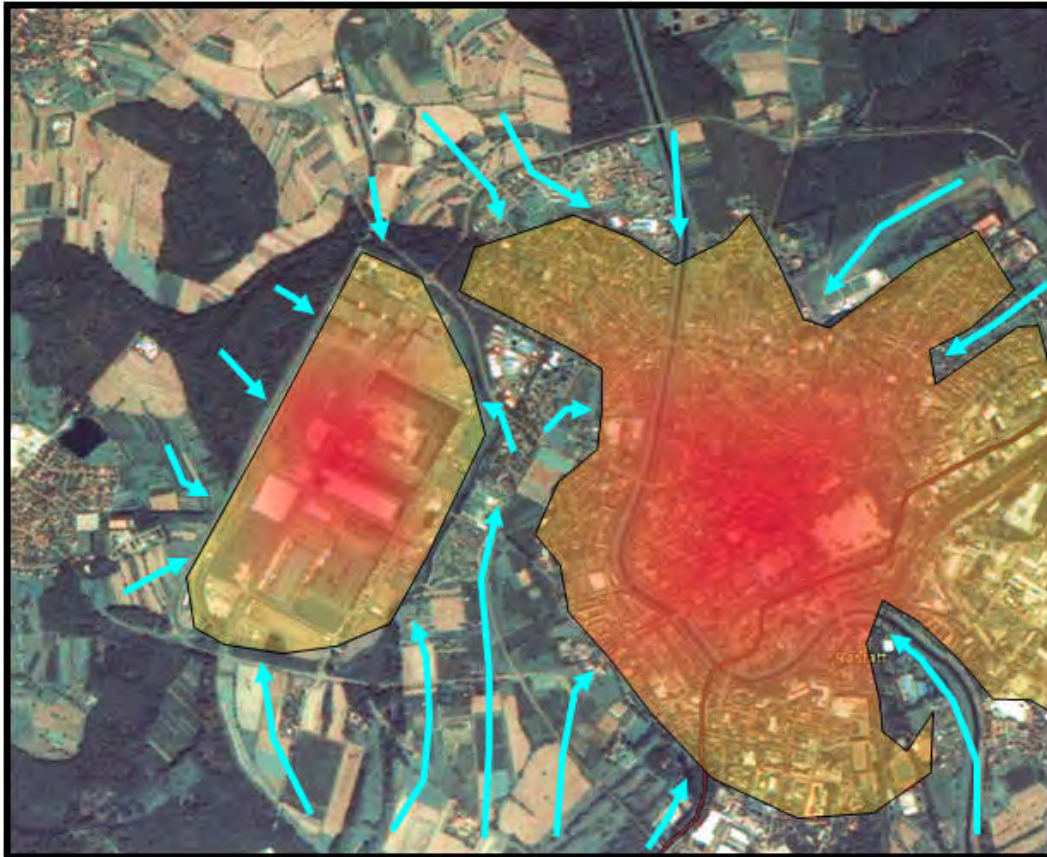


Abb. 2-6: Schematische Darstellung von Flurwinden in der Ebene. Industriegebiet (links) und ausgedehnter urbaner Bereich (rechts).

2.5 *Dreidimensionale Strömungssysteme*

Die Strömungssysteme besitzen oft eine vertikale Mächtigkeit, die ein Vielfaches einer Gebäude- oder Bestandshöhe beträgt. Auf diese Weise können wesentliche Funktionen einer Strömung (Lufttransport, Luftleitbahn) auch im Überdachniveau bzw. oberhalb des Kronenraumes ablaufen. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen zwei Beispiele für die Vertikalstruktur der Strömung und ihre zeitliche Entwicklung (Abb. 2-7, Abb. 2-8).

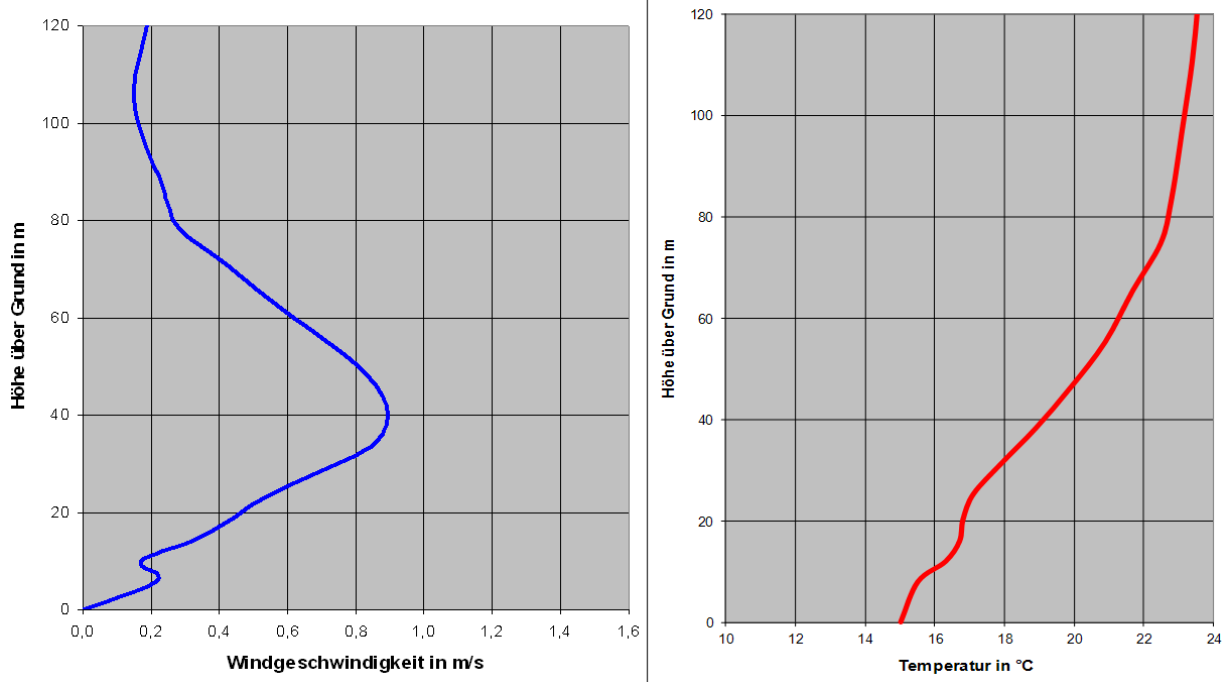


Abb. 2-7: Vertikal-Profile in einer Kaltluftströmung. Links: Windgeschwindigkeit, rechts: Temperatur. Die Kaltluftströmung reicht bis etwa 100 m über Grund, das Maximum liegt in 40 m Höhe

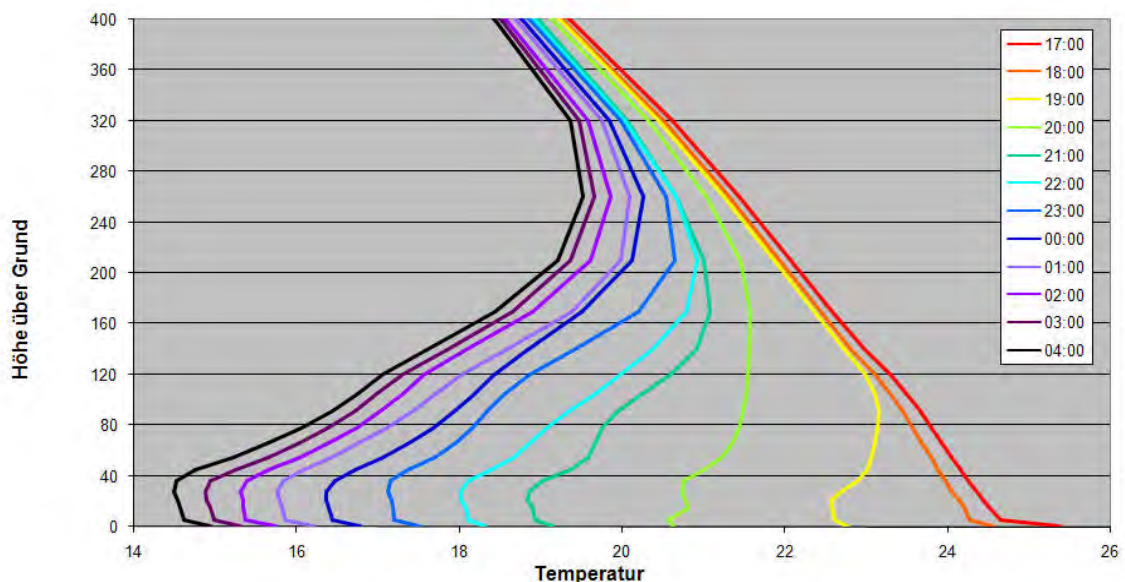


Abb. 2-8: Zeitlicher Verlauf einer Bodeninversion über einem Industriestandort in einem Flusstal. Zu beachten ist: Im Bereich der Industriebebauung ist die Bodentemperatur erhöht, eine Temperaturabnahme setzt erst oberhalb der mittleren Bebauungshöhe (hier ca. 30-40 m) ein. Hier zeigt sich über dem Industriegebiet eine Kaltluftschicht mit einer Mächtigkeit bis 280 m.

2.6 **Anthropogener Wärmestrom**

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, wird die Abkühlung der Erdoberfläche (und damit die Bildung bodennaher Kaltluft) durch eine negative Energiebilanz (= Verlust von Energie) verursacht.

In die bodennahe Energiebilanz gehen grundsätzlich folgende Prozesse ein:

- Bodenwärmestrom (Transport von Wärme zur oder von der Erdoberfläche aufgrund höherer bzw. niedrigerer Temperaturen im Erdboden).
- Latenter Wärmestrom (z.B. Wärmeverlust aufgrund Verdunstung von Wasser).
- Fühlbarer Wärmestrom (Wärmeverlust oder –gewinn wegen des Austausches der Oberfläche mit der darüber liegenden Luft).
- Langwellige Ausstrahlung (Wärmeverlust durch Ausstrahlung von Energie aufgrund der Oberflächentemperatur).
- Kurzwellige Einstrahlung (Wärmegewinn durch Einstrahlung tagsüber bei Sonnenschein).
- Langwellige atmosphärische Gegenstrahlung (Wärmegewinn durch langwellige Strahlung von oben, verursacht z.B. durch Wolken und Wasserdampf in der Atmosphäre).

In Waldbeständen kommen langwellige Strahlungsgewinne durch die Bestandselemente hinzu, wobei tagsüber der kurzwellige Strahlungsgewinn an der Erdoberfläche durch Abschattung und nachts der langwellige Strahlungsverlust durch Ausstrahlung gemindert sind.

In bebauten Bereichen kann ein so genannter anthropogener Wärmestrom hinzukommen. Dieser Wärmestrom beschreibt die Energiezufuhr durch vom Menschen und insbesondere seine Aktivitäten verursachte Energieeinträge (z.B. das Heizen von Gebäuden, Wärmefreisetzung bei industrieller Produktion).

3 Methodik

Messungen in der Natur sind mit vertretbarem Aufwand notwendigerweise Punktmessungen. Für ein flächendeckendes, hoch auflösendes und vor allem 3-dimensionales Bild des Kaltluftgeschehens werden spezielle Kaltluft-Strömungssimulations-Modelle eingesetzt. Sie berechnen die Kaltluftströmung in einem engmaschigen Berechnungsgitter unter Berücksichtigung der Geländeform und der thermischen Eigenschaften der Landoberflächen.

Im vorliegenden Fall wurde das Modell FITNAH zur Berechnung der Kaltluftströmungen im Untersuchungsgebiet eingesetzt.

3.1 *Das prognostische Simulationsmodell FITNAH*

Das Modell FITNAH wird speziell für die Berechnung lokaler Strömungssysteme eingesetzt. Es kann sowohl die dynamische Strömungsbeeinflussung berechnen (wie z.B. die Kanalisierung von Strömungen durch Geländeformen) als auch thermische Strömungen (Kaltluftabflüsse, Hangaufwinde, Berg-Tal-Wind- und Land-See-Wind-Systeme) simulieren.

Die Modellname FITNAH steht für “**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat Sources” (/3/, /4/, /9/, /10/, /11/, /12/).

Die mathematisch formulierten und im Modell numerisch implementierten physikalischen Prozesse ermöglichen es, die Ausbildung von geländebeeinflussten Strömungen sowie die Temperatur- und Verdunstungsabläufe unter Berücksichtigung von Bewuchs und Bebauung realistisch zu berechnen. Das Modell arbeitet mit einem geländefolgenden Koordinatensystem und ist in der Lage, eine ganze Reihe von verschiedenen Landnutzungen mit den jeweils spezifischen Eigenschaften hinsichtlich der Energieumsetzung (z.B. den anthropogenen Wärmestrom, die mittlere Bebauungshöhe usw.) differenziert zu behandeln.

Als so genanntes „nicht-hydrostatisches, prognostisches“ Modell beruht es auf einem voll-dynamischen Strömungskern auf Basis der Gleichungen für alle drei Windkomponenten (Navier-Stokes-Gleichungen für die Komponenten des Windvektors im 3D-Raum, x-, y- und z-Richtung), sowie auf den Bilanzgleichungen für Temperatur, Feuchte und Turbulenzenergie. Diese (miteinander gekoppelten) Gleichungen werden auf einem numerischen dreidimensionalen Gitter in kleinen Zeitschritten gelöst, so dass sich die vielfältigen nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Topographie-Bereichen, vergleichbar der Natur auch, sukzessive einstellen und der von der Natur erzielte Balancezustand zwischen den unterschiedlichen strömungsbeeinflussenden Effekten realistisch berechnet wird.

Das Modell **FITNAH** ist vielfach validiert und ist von zahlreichen Fachbehörden als eines der leistungsfähigsten Instrumente zur Simulation meteorologischer Phänomene im Bereich der Umweltmeteorologie anerkannt.

3.2 *Das Rechengebiet von FITNAH*

Das Rechengebiet oder Berechnungsgebiet von FITNAH wurde so groß gewählt, dass das gesamte Stadtgebiet von Pforzheim und das potentielle Einzugsgebiet von im Stadtgebiet wirksamen Kaltluftströmungen enthalten sind. Dieser zweite Punkt führt zu einer Ausdehnung des Berechnungsgebietes vor allem Richtung Süden mit den Tälern der Nagold und der Würm.

Das Rechengebiet erstreckte sich daher über 16 km in West-Ost- und 15 km in Süd-Nord-Richtung. Die horizontale Auflösung (Maschenweite) der Simulation betrug 25 m. Eine einzelne Rechenfläche hat somit eine Ausdehnung von 25 m x 25 m.

Die vertikalen Abstände des Rechengitters sind bodennah mit 10 m sehr fein aufgelöst. Darüber wurde der Abstand jeweils vergrößert, insgesamt wurden 36 Gitter-Höhen-Niveaus bis in eine Höhe von 6.500 m definiert.

Zusätzlich zu dieser übergreifenden Simulation des Gesamtgebiets wurden in Teilbereichen rechenzeitintensive Simulationen mit einer deutlich höheren horizontalen Auflösung von 10 m durchgeführt. Diese decken weitestgehend die Siedlungsräume im Stadtgebiet ab und gewährleisten eine differenzierte und detaillierte Analyse der Strömungen und klimatischen Funktionen in Pforzheim.

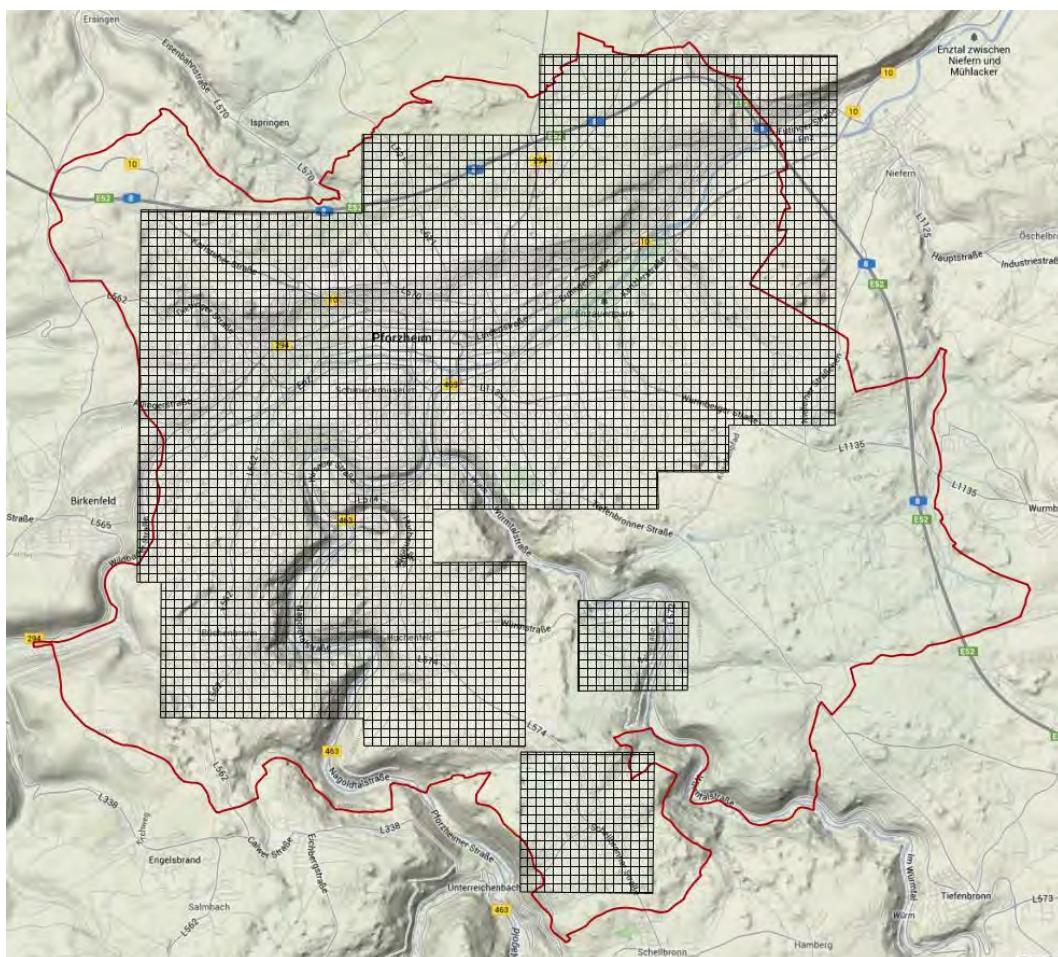


Abb. 3-1: FITNAH-Rechengebiete mit einer Maschenweite von 10 m.

3.3 Eingangsdaten

Grundlage für die Berechnung von FITNAH ist die Bereitstellung von Eingangsdaten der Geländehöhe, der Landnutzung und den meteorologischen Anfangsbedingungen. Auf Basis dieses sog. Anfangszustands berechnet das numerische Modell konsistente ausbalancierte Ergebnisse in ihrem zeitlichen Ablauf während einer Kaltluftnacht.

3.3.1 Orographie

Wesentliche Eingangsgröße für das Modell ist die Geländehöhe im Untersuchungsgebiet. Die damit verbundene Geländeneigung und -struktur ist mitbestimmend für die Ausbildung und Stärke von Strömungssystemen. Entsprechend der gewählten horizontalen Maschenweite steigt der Detailreichtum der aufgelösten Strukturen. Im Falle von Pforzheim wird das Gelände vor allem durch die Hochflächen südlich (Schwarzwaldrandplatten) und nördlich (Kraichgau) der Stadt und die eingeschnittenen Flusstäler geprägt (Abb. 3-2).

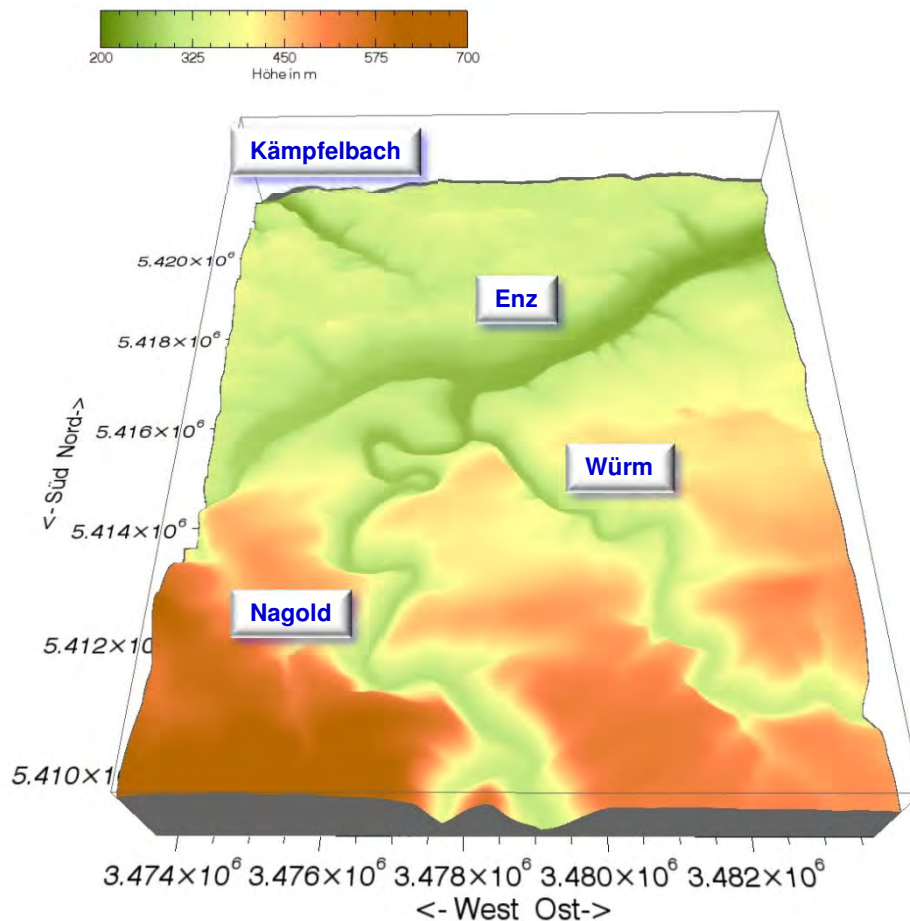


Abb. 3-2: Orographie des FITNAH-Rechengebiets Pforzheim, hier mit Maschenweite 25 m: Geländeform überhöht.

3.3.2 Landnutzung

Die Informationen zur Landnutzung stehen europaweit flächendeckend in Form des CORINE-Katasters zur Verfügung. Diese Daten verfügen aber nur über eine begrenzte Auflösung der lokalen Gegebenheiten. Um die im 25 m bzw. 10 m-Raster auch kleinräumig stark variierenden Nutzungen und Oberflächeneigenschaften realistisch erfassen zu können, wurde die Landnutzung im gesamten Berechnungsgebiet auf Basis von ATKIS-Daten präzisiert, welche die Stadt Pforzheim zur Verfügung stellte.

Dabei wurden jeder Rechenfläche Anteile der modellinternen Landnutzungstypen zugeordnet. Je nach Bebauungstyp und Bestandsart berücksichtigt das Modell unterschiedliche Höhen von Bebauung und Bewuchs. Für die Bebauung wird zudem ein für den Bebauungstyp charakteristischer anthropogener Wärmestrom einbezogen.

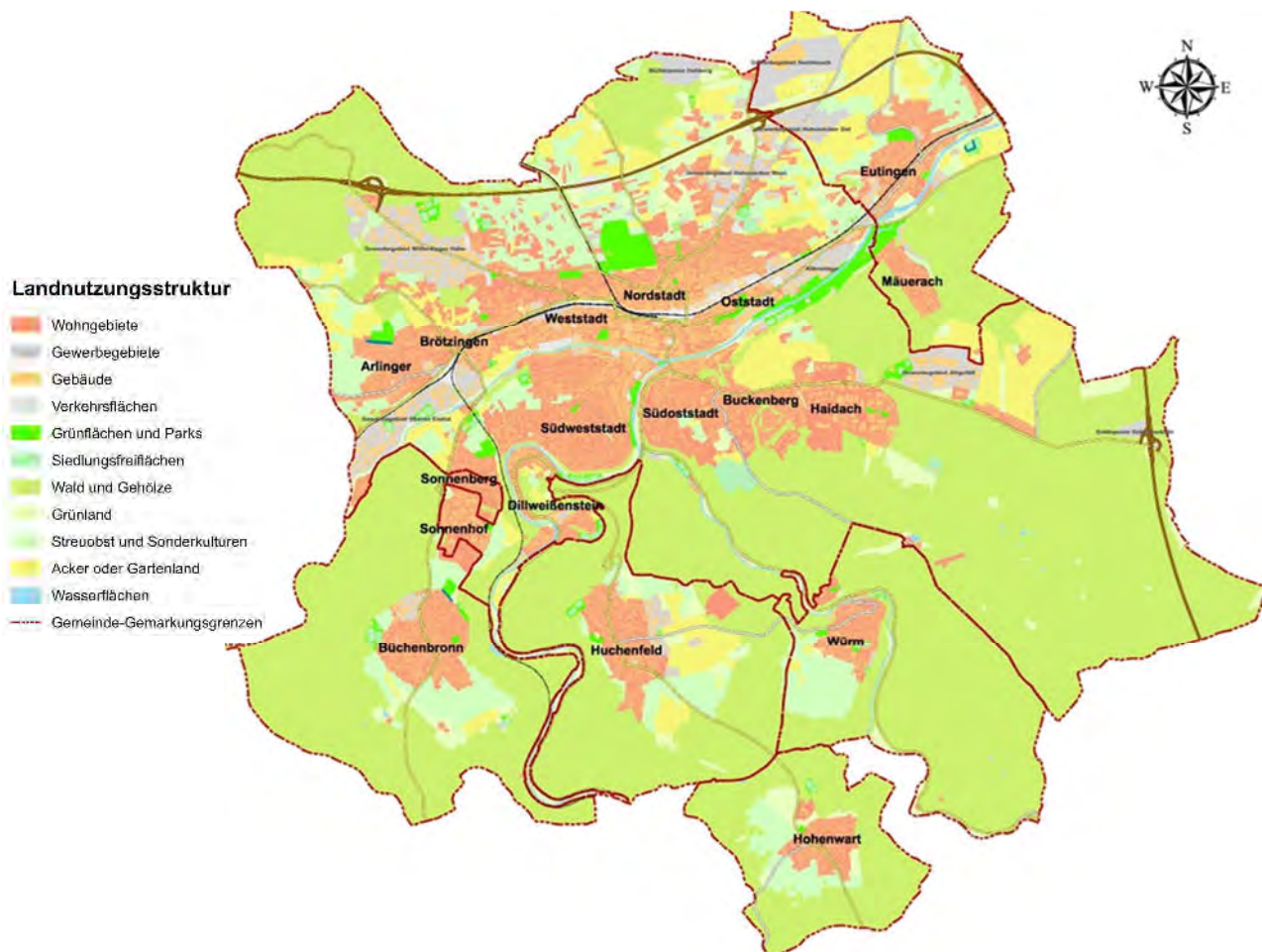


Abb. 3-3: Datengrundlage zur Landnutzung (ATKIS-Daten) im Berechnungsgebiet.

3.3.3 Meteorologische Situation und Anfangszustand

Für die hoch auflösende Simulation im Berechnungsgebiet wurde von einer „autochthonen“ (eigenbürtigen) Wetterlage ausgegangen. Die Luftdruckverteilung weist kaum Druckunterschiede auf (wie es z.B. im Kern von Hochdruckgebieten typischerweise der Fall ist) und es gibt keine übergeordnete bzw. überregionale Strömung. Bei einer austauscharmen Wetterlage herrschen vergleichsweise geringe Windgeschwindigkeiten. Der damit verbundene herabgesetzte Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht kann tagsüber und insbesondere auch nachts zu einer Wärmebelastung in den Siedlungsflächen und damit zu bioklimatischen Belastungen führen. Lokalklimatische Besonderheiten im Untersuchungsgebiet können sich unter diesen Bedingungen gut herausbilden. Typischerweise entwickeln sich in diesen Wetterlagen Kaltluftströmungen und Flurwindssysteme.

Die Simulation wurde für einen typischen Sommertag durchgeführt (01. August), die Sonnenuntergangs- und -aufgangszeiten waren 19:30 und 4:30 (wahre Ortszeit, die Sonne steht dabei um 12:00 im Zenit).

Die Berechnung wurde am Nachmittag gestartet, damit sich die zu berechnenden meteorologischen Größen noch vor dem Beginn der abendlichen Abkühlung in Wechselwirkung mit Geländestrukturen und Landnutzung ausbalanciert und in sich konsistent einstellen können (Einschwingphase).

Das Modell benötigt während der Simulation keine weiteren Eingaben von außen, alle Größen werden in Balance miteinander konsistent und fortwährend modellintern berechnet. Allerdings muss ein Anfangszustand (bezogen auf die Startzeit 15:00 Uhr) für die großräumigen Windverhältnisse (kein überlagernder geostrophischer Wind, stabile Schichtung) und die relative Feuchte (60 %) vorgegeben werden. Um eine optimale Ausbildung der Strukturen zu simulieren, wurde keine Bewölkung angesetzt (Bedeckungsgrad 0/8). Als Starttemperaturen wurden typische Werte eines Sommertags vorgegeben (32°C bodennah). Die Ergebnisse der Simulation repräsentieren damit mittlere sommerliche Verhältnisse.

4 Grundlagen der Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der *Temperatur* erfolgte für die Standardmesshöhe in *2 m über Grund*. Zu beachten ist, dass diese Temperatur im Wald innerhalb des Bestandes und in bebauten Bereichen innerhalb der urbanen Strukturen ebenfalls in 2 m über Grund gilt.

Die *bodennahen Windverhältnisse* stehen stellvertretend für die untersten 10 m des Rechengebietes und wurden in einer Höhe von *5 m über Grund* ausgewiesen. Sie werden in bebautem Gebiet und in Waldbeständen unter Berücksichtigung von deren Hinderniswirkung auf die Strömung berechnet. Da es sich um einen Mittelwert für die Rechen-Teilflächen handelt und zur Mittelbildung der Versiegelungsgrad bzw. die Bestandsdichte mit zu berücksichtigen sind, ist im Bereich dichter Strukturen insbesondere der Mittelwert der Windgeschwindigkeit oft vergleichsweise niedrig.

Der *Wind im Überdachniveau* wird für eine Höhe von 40 bis 50 m über Grund ausgewiesen. Bei Kaltluftströmungen, die eine vertikale Mächtigkeit von 50 m oder mehr erreichen, erfolgt der größte Teil des Lufttransportes im Überdachniveau. Daher ist es wichtig, diese Strömungsverhältnisse zu kennen. In urbanen Zentren und über ausgedehnten Industriegebieten kann diese Strömung aufgrund des Wärmeinsel-Effektes (langsames Aufsteigen wärmerer Luft) selbst im Überdachniveau zum Erliegen kommen.

Die *Volumenströme*, ausgedrückt in m^3/s , wurden als Integral der Strömungsgeschwindigkeit zwischen zwei Höhen, multipliziert mit der horizontalen Maschenweite, berechnet. Die Angabe des Volumenstromes bezieht sich auf die einzelne Zelle und für den Höhenbereich.

Die Volumenströme wurden differenziert ausgewertet für die Höhenniveaus

- 0 m bis 10 m über Grund (bodennahe Volumenströme innerhalb der Landnutzungsstrukturen)
- 0 m bis 50 m über Grund (Gesamt-Volumenstrom vom Boden bis ins Überdachniveau)

Sie werden sowohl als die rechnerisch skalare Größe ausgegeben als auch als vektorielle Information. Während erstere meist klassifiziert und entsprechend der Größe des Wertes eingefärbt werden, können vektorielle Daten als Pfeile dargestellt werden. Die Länge des Pfeiles ist dann ein Maß z.B. für den Volumenstrom und die Pfeilrichtung gibt die Strömungsrichtung an.

Aus Darstellungen (z.B. der Temperatur), die sich auf Mittelwerte über das gesamte Berechnungs-/Stadt-Gebiet beziehen, ist ersichtlich, welche Zonen relativ hohe und welche Zonen relativ niedrige Abweichungen zu den mittleren Verhältnissen aufweisen. Je nach betrachteter Größe lassen sich daraus wertvolle Schlüsse zur Sensibilität bestimmter Zonen gewinnen.

4.1 Humanbiometeorologische Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas

Das physiologische Wärmeempfinden des Menschen wird nicht nur von der Lufttemperatur, sondern von den Einstrahlungsbedingungen (tages- und jahreszeitenabhängige Sonneneinstrahlung, Schattenwurf, langwellige Wärmestrahlung der Gebäude), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchte, der Bekleidung und der Aktivität/Tätigkeit eines Menschen beeinflusst. In der VDI-

Richtlinie 3787 Blatt 2 werden Berechnungsvorschriften für bioklimatische Indizes definiert, die die thermische Situation eines Menschen in seiner Umwelt beschreiben.

In Abb. 4-1 sind die Energieflüsse skizziert, die eine wesentliche Eingangsgröße bei der Bestimmung des physiologischen Wärmeempfindens darstellen.

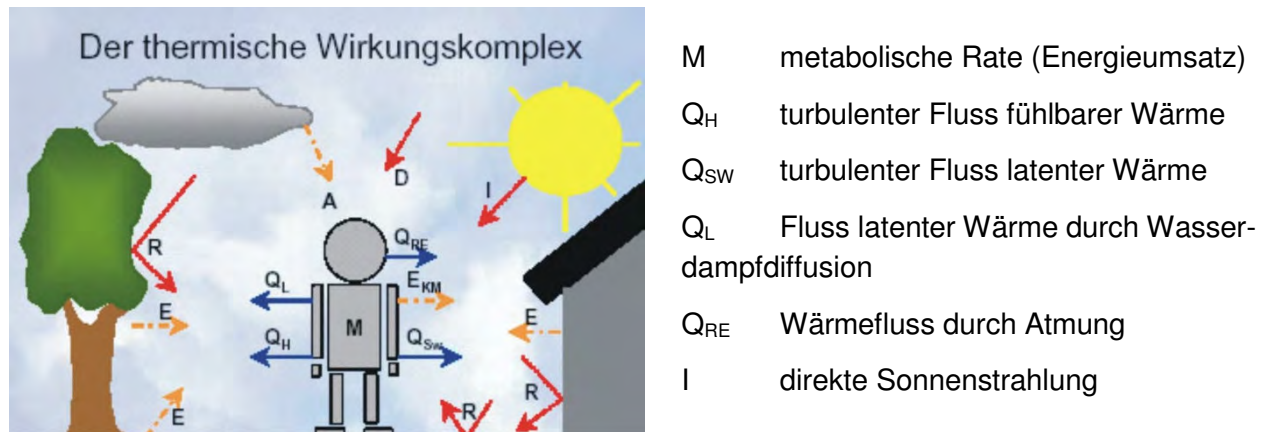


Abb. 4-1: Der Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung (nach VDI 3787 Blatt 2, /15/).

Charakteristisch für das Stadtklima sind Wärmebelastungen bis hin zum Hitzestress. Kältereiz spielt beim Stadtklima vor dem Hintergrund der urbanen Wärmeinsel eine untergeordnete Rolle. Zudem kann auf Kälte oftmals durch persönlichen Schutz (Kleidung) oder durch Aufenthalt in beheizten Räumlichkeiten reagiert werden.

Wärmebelastungen im Freien treten insbesondere tagsüber in den Nachmittagsstunden auf. Aufgrund des Tagesgangs der Lufttemperatur und dem Fehlen der kurzwelligen Einstrahlung (Sonne) sind nächtliche Wärmebelastungen im Freien deutlich geringer.

Bei Perioden mit lang anhaltender Hitze allerdings heizen sich die Gebäude so sehr auf, dass nachts – trotz Lüftens – die Lufttemperatur in den Wohnräumen oftmals deutlich über der Lufttemperatur außen liegt (wie z.B. im Sommer 2003). Dadurch wird vor allem ein erholsamer Schlaf beeinträchtigt.

Beim Vergleich der beiden bioklimatischen Belastungsfaktoren Kältestress und Wärmebelastung ist zu beachten, dass eine Anpassung an extreme Kälte durch geeignete Kleidung und Verhaltensanpassung besser möglich ist als eine Anpassung an Wärmebelastung. Deswegen liegt bei dieser Untersuchung der Fokus auch auf Situationen, in denen Wärmebelastung auftreten kann.

4.1.1 Ermittlung der PMV-Werte

Zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit kann der PMV-Wert (**P**redicted **M**ean **V**ote) herangezogen werden. Er wird detailliert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 beschrieben (/15/). Neben meteorologischen Faktoren hängt der PMV-Wert noch von den personenbezogenen Größen „Bekleidung“ (steuert den Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung) und „Aktivität“ (steuert die metabolische Rate M und den Energieumsatz infolge mechanischer Leistung) ab.

Zur Bestimmung von PMV werden folgende meteorologischen und thermo-physiologischen Parameter benötigt:

- Lufttemperatur T_a in $^{\circ}C$,
- Dampfdruck VP in hPa ,
- Windgeschwindigkeit v in m/s ,
- Mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} in $^{\circ}C$,
- Aktivität des Menschen in W sowie
- Bekleidung des Menschen in clo .

Eine Bewertungsskala ist in Tab. 4-1 dargestellt. Ein Wert von 0 zeigt behagliche Verhältnisse an, d.h. der Temperaturhaushalt ist ausgeglichen. Werte kleiner 0 kennzeichnen eine Kältebelastung, Werte größer 0 eine Wärmebelastung an. Extreme Belastungen treten bei Werten unter -3 bzw. über $+3$ auf.

Tab. 4-1: PMV und thermisches Empfinden

PMV	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe	Biologische Wirkung
-3,5	sehr kalt	Extrem	Kältestress
-2,5	kalt	Stark	
-1,5	kühl	Mäßig	keine
-0,5	leicht kühl	Schwach	
0,0	behaglich	Keine	
0,5	leicht warm	Schwach	Wärmebelastung
1,5	warm	Mäßig	
2,5	heiß	Stark	
3,5	sehr heiß	Extrem	

4.2 Standardisierung (z-Transformation)

Die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung von gemessenen bzw. berechneten Kenngrößen wie der Temperatur unterscheiden sich z.B. aufgrund der lokalen topographischen Bedingungen der untersuchten Gebiete. Um die Beurteilungskriterien untereinander und mit anderen Untersuchungen vergleichbar zu machen, können Parameter in Anlehnung an die VDI 3785 Blatt 1 dimensionslos standardisiert werden. Die hierbei angewandte Methode der z-Transformation verknüpft die Größen mit dem regionalen Wertenniveau des Untersuchungsraums. Die Relationen werden hierbei beibehalten und die Abweichungen der Variablen von den mittleren Verhältnissen herausgestellt.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Beurteilung anhand eines einheitlichen Bewertungsmaßstabs. Werte oberhalb des Durchschnitts werden durch positive Abweichungen > 0 repräsentiert, woraus sich die Bewertung in hoch bis sehr hoch ergibt. Unter dem Durchschnitt liegen negative Abweichungen < 0 mit der Bewertung gering und sehr gering. Für eine bessere Differenzierung wurde in der vorliegenden Untersuchung das Beurteilungsschema auf fünf Kategorien erweitert.

Tab. 4-2: Standardisierte Bewertungskategorien für klimatische Größen.

z-Wert	Kategorie
kleiner -1	1 sehr günstig / sehr gering
-1 bis 0	2 günstig / gering
0 bis 0.5	3 mittel
0.5 bis 1	4 weniger günstig / hoch
größer 1	5 ungünstig / sehr hoch

4.3 Wann liegt eine Belastung vor?

Aufgabe der Flächennutzungsplanung ist die behördenverbindliche Darstellung von Flächen für mögliche zukünftige Nutzungen.

Die Verträglichkeit einer Flächenumnutzung ist auch an den Umweltqualitätszielen zu messen. Hierzu gehört u.a. der Schutz der menschlichen Gesundheit. Daraus ergeben sich für den Bereich Klima und Luft folgende Forderungen:

- Erhalt einer guten Luftqualität (Minimierung von Luftverunreinigungen)
- Erhalt für den menschlichen Organismus zuträglicher klimatischer Bedingungen (Minimierung von bioklimatischen Belastungen)
- Erhaltung und Schaffung einer hohen räumlichen Klimavielfalt (Erhöhung der Lebensqualität)

Um die Auswirkungen einer Flächenumnutzung zu bewerten, wird häufig die Methode der ökologischen Risikoanalyse angewandt. Bei dieser Analyse (Richter, C.-J. et al., 1998) sind drei aggregierte Einflussfaktoren zu betrachten, mit denen eine Beeinträchtigung dargestellt werden kann:

1. Intensität und Häufigkeit der Wirkung
2. Empfindlichkeit der betroffenen Schutzgüter gegenüber einer bestimmten Wirkung eines Vorhabens
3. Wert der Schutzgüter (Bedeutung, Funktionserfüllungsgrad u.a.)

Die *Intensität* dieser Maßnahme hängt dabei von stadtplanerisch beeinflussbaren Parametern wie Bebauungshöhe, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad, Verkehrsaufkommen, Heizkonzepten usw. ab. Die Häufigkeit mit der Auswirkungen zu erwarten sind, hängt z.B. ab von der Zahl belastender Wetterlagen und/oder von der Häufigkeit von Windrichtung die Effekte in das betroffene Gebiet verfrachten.

Der *Wert* des Schutzgutes ist hoch, da es sich in der Regel bei den betroffenen Flächen um besiedelte Bereiche handelt.

Die *Empfindlichkeit* der betroffenen Bereiche auf unerwünschte Auswirkungen hängt bei besiedelten Gebieten im Wesentlichen ab von

- der thermischen Vorbelastung des betroffenen Gebiets

- der Besiedlungsdichte, d.h. der Zahl der betroffenen Menschen sowie ggf. der Bevölkerungszusammensetzung oder Altersstruktur.

Thermisch belastete städtische Gebiete mit hoher Einwohnerdichte sind also erheblich empfindlicher einzustufen als dünn besiedelte Vorstadtbereiche.

Prinzipiell werden in der angewandten Stadtklimatologie thermische Belastungen unterscheiden, so dass drei Belastungskategorien vorkommen:

- Kältebelastung
- Wärmebelastung
- Lufthygienische Belastung

Für die lufthygienische Belastung gibt es Bewertungsmaßstäbe, z.B. die in der 39. BImSchV festgelegten Immissionsgrenzwerte. Auch die thermische Belastung lässt sich anhand der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 bewerten.

Diese Bewertungsverfahren, insbesondere die bioklimatische Bewertung, berücksichtigen jedoch nicht den Raumbezug, den jegliche menschliche Aktivität hat. In den folgenden Tabellen werden typische Aktivitäten und deren Raum- und Zeitbezug aufgezeigt. Ein Merkmal ob eine Belastung erheblich ist, ist die Möglichkeit der Belastung auszuweichen. Weiterhin wird auf Maßnahmen eingegangen, die von Seiten der Stadtplanung möglich sind.

4.3.1 Kältebelastung

Kältebelastung stellen in (mitteleuropäischen) Städten normalerweise kein Problem dar, da Städte im Mittel wärmer sind als das Umland.

Darüber hinaus verbringt der Mensch die meiste Zeit seines Lebens in Innenräumen. Dies ist z.B. bei vielen Berufen oder in der Schule der Fall. Auch die nächtliche Erholungsphase findet überwiegend in Innenräumen statt. Aufenthalte im Freien findet meist in der Freizeit statt oder um Wege (von und zur Arbeit, um Besorgungen zu erledigen, usw.) zurückzulegen.

Einer Kältebelastung kann man in der Regel gut ausweichen. Innenräume werden beheizt, um ein verträgliches Temperaturniveau zu gewährleisten. Beim Aufenthalt im Freien kann durch angepasste Kleidung ebenfalls einer starken Kältebelastung ausgewichen werden.

4.3.2 Wärmebelastung

Prinzipiell können zwei Arten von Wärmebelastung unterschieden werden:

- Nachmittägliche Wärmebelastung (Risikofaktor für empfindliche Menschen)
- Nächtliche Wärmebelastung während Hitzeperioden (mangelnde Erholung im Schlaf)

Analog zur Kältebelastung sind in Tab. 4-3 die jeweiligen Aktivitäten und die Möglichkeit der Belastung auszuweichen, zusammengestellt.

Tab. 4-3: Wärmebelastung und Ausweichmöglichkeit in Abhängigkeit von der Aktivität

Aktivität	Raumbezug	Zeitbezug	Ausweichmöglichkeit	Ziel	Beeinflussbare Parameter (Stadtplanung)
Arbeiten, Schule usw.	überwiegend Innenräume	tags	Bedingt (Kleidung, Klimatisierung)	Ausreichender Luftaustausch, reduzierte Außentemperatur	Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad
Schlafen (körperliche Regeneration)	überwiegend Innenräume	nachts	Nein	Ausreichender Luftaustausch	Lokale Windsysteme erhalten Bebauungsdichte
Freizeit, Erholung	Außenbereich + Innenräume	Tag, frühe Nachtstunden	Ja (Kleidung, Ort)	Klimavielfalt	Kurze Wege zw. Freiflächen, Parks, Waldbereichen, Siedlungsbereichen
Wege	überwiegend Außenbereich	Tag und Nacht	Bedingt	Möglichkeit im Schatten zu gehen	Alleen, Arkaden

Einer Wärmebelastung auszuweichen ist schon schwieriger, da durch die Wahl von Kleidung eine Minderung nur begrenzt möglich ist. Der Aufenthalt in Innenräumen kann im Bedarfsfall durch Klimatisierung der Räume thermisch angenehm gestaltet werden. Dies ist in Büroräumen teilweise auch der Fall. In Wohnräumen ist dies hierzulande nicht üblich. Hier spielt vor allem die Nacht, in der die körperliche Regeneration im Schlaf stattfindet, eine wichtige Rolle. Einer Wärmebelastung kann nämlich in der Regel nicht ausgewichen werden.

Für Innenräume gibt die VDI-Richtlinie keine Bewertungsmaßstäbe an. Optimale Schlaftemperaturen liegen jedoch zwischen 16 und 18°C

Folgende Sachverhalte gelten u.a. für Innenraumtemperaturen:

- Innenraumtemperaturen weisen einen ausgeglicheneren Temperaturtagesgang als die Außenluft auf (Speicherwirkung der Wände).
- Mit zunehmender Dauer einer Hitzeperiode erwärmt sich das Gebäude, so dass die Innen-temperaturen langsam zunehmen.
- Durch Lüftung in den Nachtstunden kann die Innenraumtemperatur deutlich gesenkt werden.

Bei der natürlichen Lüftung ist jedoch entscheidend, dass draußen eine gerichtete Luftbewegung vorhanden ist. Bei *Windstille* findet auch bei geöffneten Fenstern kaum ein Luftaustausch statt.

Ziel muss es folglich sein, den Luftaustausch vor allem nachts zu erhalten, denn dieser sichert eine effiziente Belüftung der Innenräume. Die Durchlüftung von Innenräumen bewirkt einen Abtransport der wärmeren Raumluft. Dadurch kühlen im Lauf der Nacht auch die Wände und Decken etwas ab. Ferner wird ein leichter Luftzug bei Wärmebelastung thermophysiologisch günstig.

4.4 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte zeigt eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes. Dabei gibt sie die Verhältnisse während autochthoner Wetterlagen, also windschwacher austauscharmer Hochdruckwetterlagen wieder. Diese prägen das städtische Mikroklima.

Die Ableitung von räumlich-funktionalen klimatischen Einheiten basiert dabei auf den Ergebnissen von Modellrechnungen (Bioklima, Kaltluftproduktion mit FITNAH). In der Darstellung einer Klimafunktionskarte werden die klimarelevanten Flächen („Klimatope“) hinsichtlich ihres Charakters nach Siedlungsräumen (Wirkungsraum) und nach unbebauten Freiflächen (Ausgleichsräume, z.B. Wiesen, Ackerflächen, Wald) unterschieden. Räumlich getrennte Wirk- und Ausgleichsräume können über Luftleitbahnen, typischerweise unverbaute Gebiete, verbunden sein.

Die Klimafunktionskarte soll die komplexen Zusammenhänge einordnen. Hierzu werden die Wirkungsräume gegliedert nach ihrer bioklimatischen Belastung. Die Bewertung von Vegetations- und sonstigen Freiflächen richtet sich nach ihrem Kaltluftliefervermögen. Die Verbindung der Räume wird durch die Lage von Luftleitbahnen aufgezeigt. Diese drei Informationen sollen als Grundlage bei landschafts- und bauleitplanerischen Fragestellungen dienen.






Im Folgenden werden die Elemente der Klimafunktionskarte näher erläutert.

4.4.1 Siedlungsflächen

Um die bioklimatische Belastung einer Siedlungsfläche zu bewerten, wird der PMV-Index herangezogen (Kap. 4.1). Betrachtet wird hierbei die nächtliche Wärmebelastung, die wie bereits erläutert für die Bevölkerung die größten, nur schlecht vermeidbaren Belastungen nach sich zieht.

Mit dem Modell FITNAH wird eine typische Sommernacht simuliert, bei der kein übergeordneter Luftaustausch und keine Bewölkung vorherrschen. Neben den Eigenschaften der Siedlungsflächen bestimmen in dieser Situation auftretende Kaltluftströmungen die räumliche Verteilung der PMV-Werte. Für nächtliche Situationen gibt es keinen definierten Schwellenwert für eine Belastung. Als Grundlage für die Beurteilung wird der Wertebereich im Untersuchungsraum herangezogen, mit dem die in Kap. 4.2 beschriebene z-Transformation durchgeführt wird. Die Einteilung der Siedlungsräume in günstige oder ungünstige Bereiche orientiert sich daher an der Abweichung von den mittleren Verhältnissen.

Tab. 4-4: Bewertungsschema für die bioklimatische Situation in Siedlungsflächen anhand des z-transformierten PMV-Wertes während einer Sommernacht mit autochthonen Bedingungen.

Bewertung der bioklimatische Situation in Siedlungsflächen	Wertebereich Z	Darstellung in der Klimafunktionskarte
1 sehr günstig	≤ -1	
2 günstig	$-1 < z \leq 0$	
3 mittel	$0 < z \leq 0,5$	
4 weniger günstig	$0,5 < z \leq 1$	
5 ungünstig	> 1	

Anhand des z-Werts lassen sich die Ergebnisse in 5 Kategorien einordnen. Diese orientieren sich am allgemeinen Bewertungsschema der z-Transformation (Tab. 4-2). Hierbei stehen negative Werte für unterdurchschnittliche Belastungen mit sehr günstigen (kleiner -1) bis günstigen (kleiner 0) Bedingungen. Bioklimatische Belastungen liegen bei Werten größer Null vor. Um hier eine bessere Differenzierung zu erreichen, wird der Wertebereich von 0 bis 1 in zwei Unterkategorien gegliedert. Stufe 3 stellt somit Werte im Bereich des Mittelwerts dar und Stufe 4 weniger günstige Verhältnisse. Bei Erreichen von z-Werten größer 1 liegen überdurchschnittliche Wärmebelastungen, also ungünstige human-bioklimatische Bedingungen vor.

Klimatisch günstige Bereiche innerhalb des Siedlungsraums sind oft verknüpft mit einer guten Durchlüftung. An bebauten Gebieten ankommende bodennahe Kaltluftströmungen können, je nach Orographie, Stärke der Strömung und Dichte der Bebauung unterschiedlich weit in die Bebauung eindringen. Die Reichweite von signifikanten Durchlüftungsfunktionen wird in der Karte dargestellt.

4.4.2 Grün- und Freiflächen

Über vegetationsgeprägten Freiflächen kann sich bei einer autochthonen Wetterlage Kaltluft bilden. Bei entsprechender Orientierung fließt diese Kaltluft zunächst hangabwärts, im weiteren Verlauf der Nacht u.U. auch organisiert in größeren zusammenhängenden Strömungssystemen ab. Der Kaltluftvolumenstrom über einer Freifläche, also der Zustrom von Kaltluft aus einem benachbarten Volumen, charakterisiert somit die mikroklimatische Eigenschaft. Auch hier wurde die Bewertung ausgehend von den mittleren Gegebenheiten im Untersuchungsraum kategorisiert. Ein Wert von 100 % entspricht dem mittleren Volumenstrom des Gebiets. Bereiche mit überdurchschnittlichen Kaltluftflüssen zeichnen sich durch Werte von 150 % oder über 200 % aus; hier liegt der Volumenstrom also über dem doppelten der mittleren Bedingungen.

4.4.3 Luftleitbahnen und lokale Kaltluftabflüsse

Die numerische Simulation des gesamten Stadtgebiets gibt Hinweise auf Durchlüftungsbereiche, die in der Klimafunktionskarte abhängig von ihrer Größe und Bedeutung als Luftleitbahnen bzw. lokale Kaltluftabflüsse dargestellt sind. Sie ermöglichen den Luftaustausch zwischen Wirkungs- und Ausgleichsräumen bei autochthonen Wetterlagen.

4.4.3.1 Luftleitbahnen

Manche großräumige Landschaftselemente begünstigen in Siedlungsgebieten den Austausch belasteter Luftmassen gegen frische Luft aus der Umgebung. Sie dürfen nur geringe Rauigkeiten aufweisen. Darüber hinaus müssen sie an Frischluftentstehungsgebiete angeschlossen sein. Unter den Luftleitbahnen sind großräumige Strukturen zu verstehen, die aufgrund ihrer geringen Rauigkeit, ihrer Orientierung relativ zu den Hauptwindrichtungen und – bei geringer Schadstoffbelastung – den Austausch belasteter Luftmassen in Siedlungsgebieten gegen weitgehend frische Luft aus der Umgebung begünstigen. Häufig handelt es sich dabei um Flusstäler oder vernetzte Grünstrukturen, welche die Siedlungsgebiete durchziehen. Während einer windschwachen Hochdruckwetterlage (autochthone Wetterlage) dienen die Luftleitbahnen als potentielle Einströmschneisen für Kaltluftabflüsse oder Flurwinde. Auf der Klimafunktionskarte sind die Luftleitbahnen durch Pfeile ausgewiesen.

4.4.3.2 Lokale Kaltluftabflüsse

Auch kleinräumige Landschaftselemente können durch lokale Kaltluftabflüsse direkt für Luftaustausch im Siedlungsgebiet sorgen. Geringe Bodenrauigkeit und Versiegelungsgrad, ausreichende Länge und Breite sowie ein möglichst geradliniger Verlauf der Strömungsbahnen begünstigen den Abfluss. Als Faustregel für die Breite der Luftleitbahn wird im Handbuch „Stadtklima und Luftreinhaltung“ (5/) eine Mindestbreite von der 10fachen Höhe der Randbebauung genannt, andere Quellen nennen eine Mindestbreite von 50 m und eine Mindestlänge in einer Richtung von 1000 m (7/). Auch Bewuchs, Bebauung und Ausrichtung in Bezug auf die Hauptwindrichtungen entscheiden über die Qualität der lokalen Kaltluftabflüsse und ihre Entwicklung ist in starkem Maße von den jeweiligen Strömungsrichtungen der Wetterlagen abhängig.

Als Beispiele sind Grünflächen mit niedrigem Bewuchs und Wasserflächen zu nennen. Auch mehrgleisige Bahnanlagen und größere Straßen können unter Umständen Kaltluftströme kanalisieren und leiten, wenn die – durch die hohe Versiegelung – freiwerdende Wärme den Strom nicht aufzehrt. Allerdings kann ein hohes Verkehrsaufkommen zu einer Belastung des Kaltluftstroms mit verkehrsbedingten Luftschadstoffen wie z.B. Feinstäuben führen. Ein Kaltluftstrom führt dann zwar zur thermischen Entlastung, belastet die Bevölkerung aber gleichzeitig mit Schadstoffen. Die Eignung von Straßen als Kaltluftleitbahnen ist daher individuell zu prüfen.

4.5 Planungshinweiskarte

Auf der Basis der Klimafunktionskarte wird die Planungshinweiskarte erstellt. Im Gegensatz zur weitgehend wertfreien Darstellung auf der Klimafunktionskarte werden hier die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion und die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung in mehrere Werteklassen eingeteilt. Die Planungshinweiskarte ist also das Resultat einer Bewertung der Klimafunktionen hinsichtlich ihrer bioklimatischen Wirkung. Dies ist die Basis für allgemeine Planungsempfehlungen bzw. Erhaltungs- und Entwicklungsziele, welche ihren Schwerpunkt auf die Sicherung, Entwicklung und ggf. die Wiederherstellung von bioklimatisch bedeutsamen Nutzungen legen.

4.5.1 Siedlungsflächen

Die Siedlungsflächen werden im Rahmen der Planungshinweise mit dem von der Klimafunktionskarte bekannten Schema anhand des z-transformierten PMV-Werts kategorisiert.

Eine Wohnbebauung mit günstigen bioklimatischen Bedingungen ist häufig mit einer geringen Bebauungsdichte und einem hohen Grünanteil verbunden. Kaltluftströmungen wirken hier ebenfalls entlastend. Klimatisch günstige Bereiche innerhalb des Siedlungsraums sind oft verknüpft mit einer guten Durchlüftung. An bebauten Gebieten ankommende bodennahe Kaltluftströmungen können, je nach Orographie, Stärke der Strömung und Dichte der Bebauung unterschiedlich weit in die Bebauung eindringen, sowohl bodennah als auch im Überdach-Niveau. Die Reichweite von signifikanten Durchlüftungsfunktionen wird in der Karte dargestellt. Wenn ein Zustrom von Frischluft aus der Umgebung gewährleistet ist, stellen sich hier Nachverdichtungen i.A. als unproblematisch dar. Dabei sollten aber grundlegende Aspekte bei der Gestaltung der Bebauung (geringe Bebauungshöhen um den Kaltluftstrom im Überdachniveau zu ermöglichen, Orientierung der Strukturen in Strömungsrichtung) und der Begrünung (Erhaltung von zusammenhängenden Grünflächen, um die Durchlüftung der verdichteten Flächen wie auch weiter stadteinwärts gelegener Areale weiter zu gewährleisten) beachtet werden.





Bereiche mit hoher Bebauungsdichte und Versiegelung bei gleichzeitig geringer Durchlüftung zeichnen sich durch ungünstige bioklimatische Bedingungen aus. Die Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren Intensivierung der Nutzung ist hier somit hoch bis sehr hoch. Grün- und Freiflächen sollten daher erhalten und möglichst erweitert und die Versiegelung reduziert werden. Auch lokale Maßnahmen wie die Begrünung von Dächern, Fassaden und Innenhöfen können thermische Belastungen reduzieren. Nachverdichtungen, vor allem in vorhandenen Grünflächen, wirken sich aus stadtklimatologischer Sicht dagegen oft ungünstig aus.

4.5.2 Grün- und Freiflächen

Die Einstufung der Freiflächen (inkl. Wald) hinsichtlich ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion beruht vor allem auf ihrem Bezug zum Siedlungsraum. Grünflächen reduzieren die bioklimatische Belastung in ihrer direkten Umgebung und besitzen, auch wenn sie keine signifikante Belüftungsfunktion aufweisen, eine wichtige Wohlfahrtswirkung für die Bevölkerung, insbesondere in dicht besiedelten Bereichen. Die Bewertung der Freiflächen erfolgt durch ihre Lage in Bezug zum Siedlungsraum (Tab. 4-5). Daher kann auch kleineren, innerstädtischen Grünanlagen eine hohe Bedeutung zukommen, wenn sie für die benachbarten Siedlungsräume entlastend wirken.

Flächen mit hoher Bedeutung weisen gleichzeitig die höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen auf. Ziele sind hier somit die Vernetzung mit anderen Grünflächen und einen Abbau von Hindernissen um einen optimalen Austausch mit der Umgebung zu ermöglichen. Weisen Flächen nur eine geringe Bedeutung auf, liegen sie siedlungsfern oder haben nur eine geringe entlastende Funktion. Folglich liegt hier auch eine reduzierte Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen vor.

Tab. 4-5: Bewertungsschema für die bioklimatische Bedeutung von Grünflächen anhand ihrer Lage zu Siedlungsräumen (SR).

Bewertung der bioklimatische Bedeutung von Grünflächen	Distanz und Kategorie	Darstellung in der Planungshinweiskarte
Hohe Bedeutung	< 500 m zu SR mit ungünstiger bioklimatischer Situation	
Mittlere Bedeutung	< 400 m zu SR mit mittlerer bis weniger günstigen bioklim. Situation	
Geringe Bedeutung	< 200 m zu SR mit günstiger bis sehr günstiger bioklim. Situation	
Nachrangige Bedeutung	sonstige	

Neben ihrer reinen Lage wirken die Grünflächen wesentlich entlastender, wenn sie mit einem Kaltluftstrom verknüpft sind und dieser zu einer Durchlüftung im Siedlungsraum beiträgt. Diese Bereiche sind in der Planungshinweiskarte hervorgehoben. Außerdem werden entsprechende Grün- und Freiflächen mit diesem Merkmal hinsichtlich ihrer bioklimatischen Bedeutung aufgewertet und dementsprechend in die nächst höhere Kategorie eingestuft.

5 Ergebnisse

Den Simulationen wurde eine autochthone Wetterlage (siehe Kap. 3) zugrunde gelegt. In dieser austauscharmen Situation ohne übergeordneten Wind sind die höchsten bioklimatischen Belastungen, aber auch die stärkste Ausbildung lokaler Windsysteme zu erwarten. Die Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen liegt in der Region Pforzheim bei 80 bis 110 Tagen im Jahr (/2/).

Die folgenden Abschnitte stellen zunächst die flächenhaften Ergebnisse der numerischen Simulationen der mittleren Bodentemperatur (2 m über Grund) und die mittleren Strömungsverhältnisse in 0-10 m über Grund sowie in 40-50 m über Grund (Überdachniveau) zu Beginn einer Strahlungsnacht, etwa 2 Stunden nach Sonnenuntergang, vor. Es ist das Stadium, in der die Temperaturen vom Tage her zwar noch relativ hoch, die Abkühlungsraten jedoch am größten und die lokalen Kaltluftströmungen am intensivsten sind.

Die weitere Entwicklung wird anhand von Ergebnissen aus der zweiten Nachthälfte 04 Uhr morgens erläutert. In der zweiten Nachthälfte haben sich in der Regel die Kaltluftströmungssysteme, meist als Zusammenschluss mehrerer Kaltluftströme, etabliert und das Strömungsgeschehen hat nahezu stationäre (d.h. zeitlich nicht mehr signifikant veränderliche) Formen angenommen.

Die Ergebniskarten für das gesamte Stadtgebiet Pforzheim sind für beide Phasen in den Klimaanalysekarten dargestellt.

5.1 *Bodennahes Lufttemperaturfeld*

Das mittlere Temperaturniveau im Untersuchungsraum liegt zu Beginn der Kaltluftsituation bei etwa 23°C. Die Temperaturspanne reicht von unter 20°C bis über 25°C (Abb. 5-1).

Die niedrigsten Temperaturen zeigen sich im Bereich der tief eingeschnittenen Täler des Pfatschbaches, der Würm und der Nagold mit ihren Nebentälern im südlichen Teil des Stadtgebiets. Diese erwärmen sich bereits während des Tages weniger, da die direkte Sonneneinstrahlung durch die Geometrie der engen Talform eingeschränkt wird und in Verbindung mit der meist vorhandenen Vegetation und Wasserverfügbarkeit zu einem geringeren Energieeintrag führt.

Auch die ausgedehnten Waldflächen auf den Hochflächen in diesem Bereich treten als kühlere Bereiche hervor. Vor allem Senken, in denen sich dichtere Kaltluft sammelt, weisen hier niedrige Temperaturen auf. Auffällig sind die Kuppenlagen in diesen Gebieten, die trotz Bewaldung deutlich wärmer als tiefer liegende Bereiche sind.

Die nördlich der Kernstadt gelegenen größeren Freiflächen (z.B. im Gewann „Hintere Warte“) haben sich um etwa 2°C bis 3°C gegenüber der Innenstadt abgekühlt. Als kühlere Bereiche treten auch die Geländeeinschnitte südlich der Enz (z.B. Kanzlerklinge) und die Freifläche des Buckenbergs hervor.

Die höchsten Temperaturen des Stadtgebietes werden in Bereichen mit dichter Bebauung wie dem Innenstadtbereich von Pforzheim sowie in den Gewerbe- und Industriegebieten berechnet. Darin eingebettete kleinere Grünflächen weisen ein ähnliches Niveau auf. Sie können sich nicht so stark abkühlen wie größere zusammenhängende Vegetationsflächen im Umland. In den hochgelegenen Ortsteilen Büchenbronn und Hohenwart herrschen trotz aufgelockerter Bebauungsstruktur relativ hohe Temperaturen. Niedrigere Temperaturen sind dagegen im Westen des Enztals, in Brötzingen

und im Arlinger zu erkennen. Sie liegen im Temperaturniveau unterhalb der Innenstadt, auch die Gewerbegebiete auf dem Talgrund treten hier nicht überdurchschnittlich hervor. Höher gelegene Industriegebiete wie die Wilferdinger Höhe, Hohenäcker oder Altgefäll zeichnen sich dagegen mit hohen Temperaturen deutlich ab.

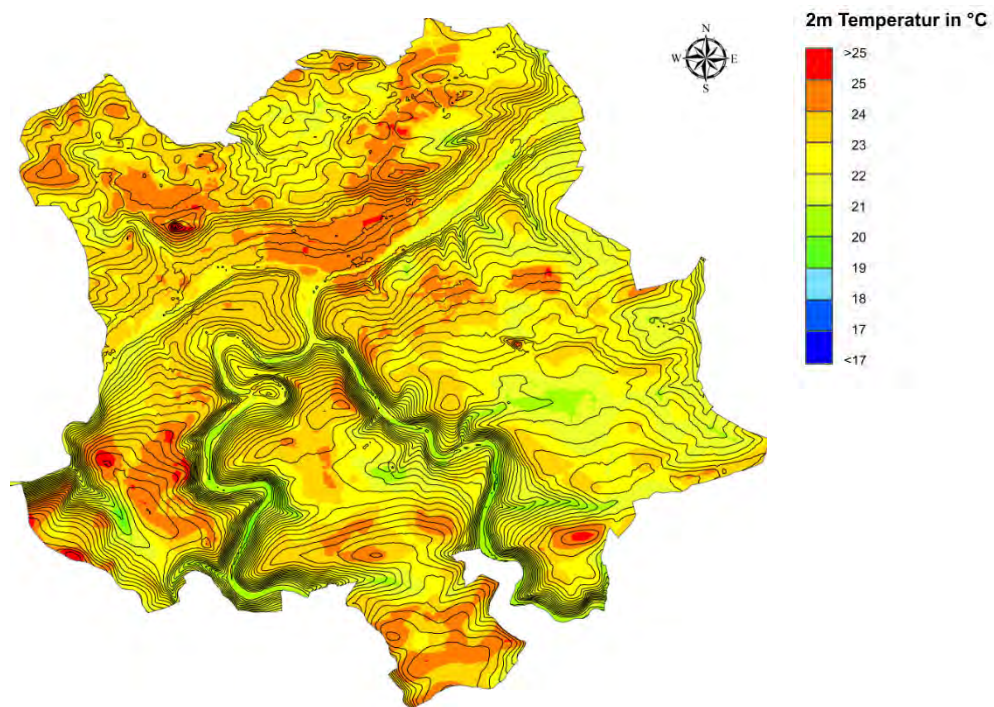


Abb. 5-1: Temperaturverhältnisse 2 m über Grund zu Beginn der Nacht (22:00 Uhr) während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.4.1).

Im weiteren Verlauf der Nacht verringern sich die Temperaturen durch die nächtliche Ausstrahlung. Das allgemeine Temperaturniveau liegt daher in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) deutlich niedriger (Abb. 5-2). Die Freiflächen im östlichen Enztal und im nördlichen Stadtgebiet zeigen Werte von nur noch 18°C und darunter. Auch der westliche Talraum und die dortigen Siedlungsbereiche haben sich deutlich abgekühlt. Ein bis zwei Grad über diesem Temperaturniveau liegt die Innenstadt. Aber auch dort hat sich das Temperaturniveau mit etwa 5°C deutlich gegenüber der ersten Nachthälfte reduziert. Die höchsten Temperaturen werden aber nicht dort, sondern in den Höhenlagen im südlichen Stadtgebiet berechnet. Dies ist zum einen verbunden mit der dortigen Bewaldung; die 2 m-Temperatur gilt hier für den Bestand unterhalb des Kronenraums. Im Waldbestand ist die nächtliche Abkühlung gegenüber Acker- oder Wiesenflächen geringer. Die sichtbare Verknüpfung mit der Höhenlage gibt zum anderen einen Hinweis, dass hierbei die vertikale Temperaturschichtung der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielt. Bei diesen Kaltluftsituationen stellt sich oft eine Bodeninversion ein, d.h. eine Temperaturzunahme mit der Höhe. Eine derartige Zunahme konnte sowohl in den aktuellen Validierungsmessungen (Abb. 8-23) als auch in den Temperaturmessfahrten (Abb. 6-16 aus Bangert, 1993) festgestellt werden.

Ein niedrigeres Temperaturniveau zeigt sich auch in einigen Nebentälern, wie z.B. dem Malschbach in Brötzingen. Auch der Bereich des Buckenbergs kühlt stärker als sein unmittelbares Umfeld ab.

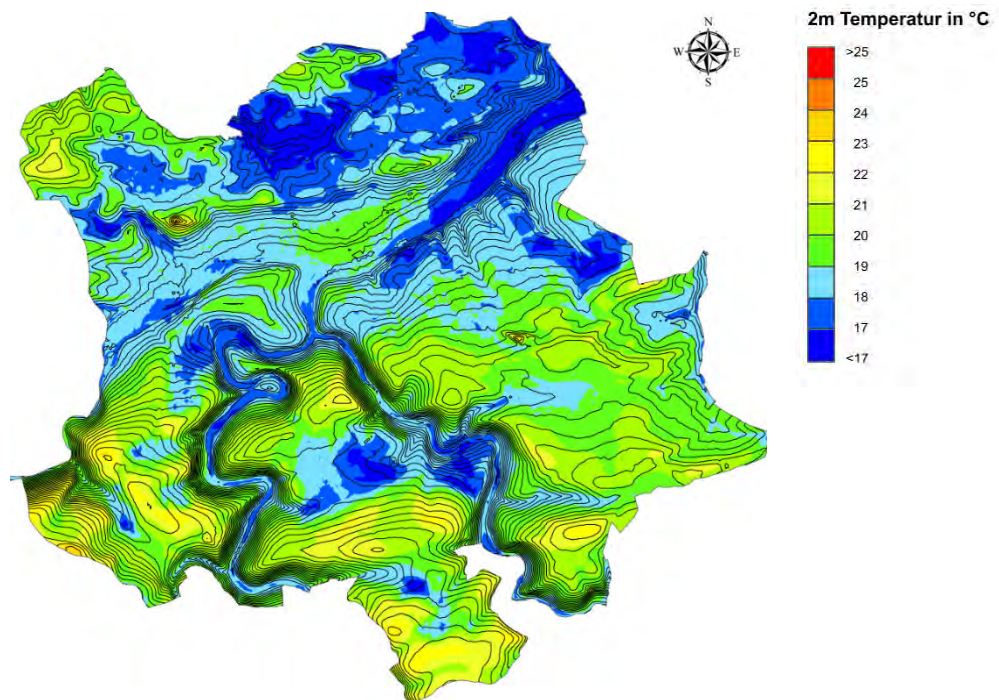


Abb. 5-2: Temperaturverhältnisse 2 m über Grund in der zweiten Nachthälfte (04:00 Uhr) während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.4.2).

5.2 Strömung

5.2.1 Bodennah

Die bodennahen Strömungsverhältnisse zeigen zu Beginn der Kaltluftsituation an vielen Hanglagen lokale Kaltluftabflüsse (Abb. 5-3). Dabei ist sowohl die Richtung als auch die Geschwindigkeit dieser lokalen Kaltluftströmungen heterogen und primär am Gelände orientiert. Ein typisches Beispiel sind die Flächen westlich von Brötzingen und Arlinger, die hangfolgende und in den dortigen Tälern kumulierte Kaltluftabflüsse generieren. Auch an den Hängen der Täler von Würm und Nagold treten hangorientierte Strömungen auf. Nördlich der Kernstadt können südlich des Hohwalds lokale Kaltluftabflüsse identifiziert werden, die Richtung Kämpfelbachtal weisen.

Sehr gut erkennbar ist neben diesen lokalen Strukturen aber auch das verbreitete Auftreten südlicher Strömungen. Eine wesentliche Rolle hierbei spielt die großräumige Geländestruktur, die von Süd nach Nord abfällt (Schwarzwaldrandplatten, Kap. 3.3.1) und im Bereich nach Norden abfallender Hänge einen deutlichen Kaltluftvolumenstrom erzeugt (z.B. der Bereich nördlich von Huchenfeld).

In Muldenlagen kommt die Strömung zum Erliegen, und es entstehen zum Teil ausgedehnte Kaltluftseen, wie im Temperaturfeld erkennbar z.B. im Bereich Seehaus/Lettenbach.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten und damit verbunden größten Kaltluftvolumenströme finden sich auf exponierten Freiflächen wie südlich von Büchenbronn, Huchenfeld und Würm sowie westlich von Hohenwart. Auch die östlich des Gewerbegebiets Altgefäll liegenden Ackerflächen zeigen einen überdurchschnittlichen Volumenstrom. Diese Kaltluftabflüsse können aufgrund der begrenzten Flächen nicht nur durch die lokale Kaltluftproduktion entstehen, vielmehr spielt hier, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, auch die Strömung in höheren Niveaus eine große Rolle.

Eine kräftige bodennahe Kaltluftströmung hat sich auch im Bereich des Zusammenflusses von Nagold und Würm ausgebildet, die entlang der Nagold über den Stadtgarten und angrenzende Grünflächen bis hin zur Innenstadt reicht.

Direkt über dem Boden zeigen sich im Modell über den zusammenhängenden städtischen Baustrukturen der Siedlungsgebiete keine markanten Strömungen mehr. Hier sorgen die Baukörper und die vielen Rauigkeitselemente als Strömungshindernisse dafür, dass sich keine eindeutige, gerichtete Kaltluftströmung mehr ausbildet oder durchsetzt. Der erwähnte Zustrom aus dem Nagoldtal/Würmtal kommt daher in der Innenstadt zum Erliegen. In den Genuss direkter bodennahe Kaltluftzufuhr aus dem Umland kommen daher in der Regel nur die Stadt- und Siedlungsränder.

Im Bereich der Kernstadt gibt es neben den bereits erwähnten Strömungen im Nagoldtal und westlich Arlinger bedeutende Kaltluftströmungen an den Südhängen des westlichen (Brötzingen Waldwiesen, Bohrain) und des östlichen Enztals (Buckenberg). Im Westen werden diese Strömungen in Richtung des Enztals umgeleitet und reichen im Bereich der Enz relativ weit in das dicht bebaute Gebiet hinein. Im Osten, beginnend mit dem Buckenberg, ist eine solche Umleitung weniger ausgeprägt.

Von den zumeist bebauten Nordhängen des Enztals reichen nur selten Kaltluftströmungen in das Stadtgebiet, eine Ausnahme bildet hier im Westen das Malschbachtal bei Brötzingen. Im Osten finden sich Strömungen erst wieder beim Wartberg und in der Höhe von Eutingen.

In der zweiten Nachthälfte zeigen sich üblicherweise größere zusammenhängende Strömungssysteme, während die Bedeutung lokaler Strukturen zurückgeht. Im Stadtgebiet von Pforzheim tritt dieses Schema nicht hervor – die grundlegende Struktur der Strömung ändert sich von Beginn zum Ende der Nacht hin nur wenig (Abb. 5-4). Die starke Gliederung des Geländes und der Nutzung fördert somit gleich zu Beginn der Kaltluftentwicklung eine Struktur des Strömungssystems, das während der ganzen Nacht weitgehend unverändert bleibt.

Bei genauerer Betrachtung zeigen sich lokal dennoch wichtige Unterschiede. Der Kaltluftvolumenstrom über Freiflächen in der Südhälfte des Stadtgebiets steigt im nächtlichen Verlauf an. Dies ist weniger der lokalen Kaltluftproduktion Vorort geschuldet, sondern hier greifen zunehmende Kaltluftströmungen aus höheren Niveaus nach unten durch.

An den Südhängen des östlichen Enztals zeigen sich in der ersten Nachthälfte lokale Kaltluftabflüsse. Diese kommen später fast vollständig zum Erliegen. Die bewaldeten Hänge kühlen im Nachtverlauf weniger stark ab als Freiflächen, dementsprechend wird der Antrieb für Kaltluftströme

aufgebraucht. Ausnahmen bilden der Buckenberg sowie das Mäuerachtal, durch das aufgrund seiner Anbindung an die Strömung im Bereich des Altgefälls weiter Kaltluft strömt.

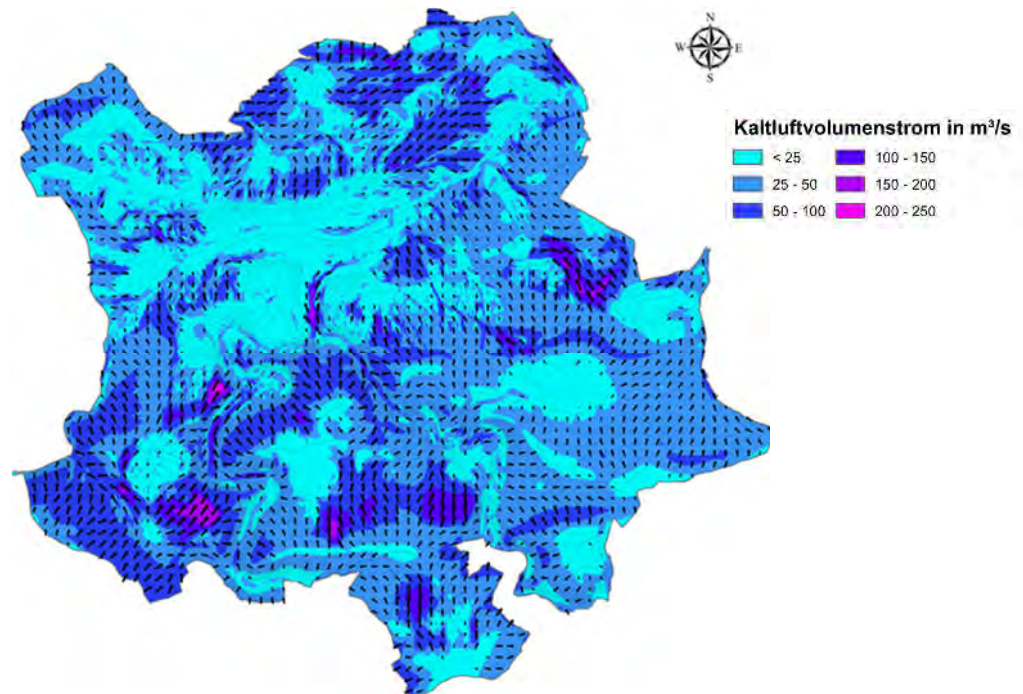


Abb. 5-3: Bodennaher Kaltluftvolumenstrom (Farbe) und Strömungsrichtung/-stärke (Windpfeile) zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.5.1).

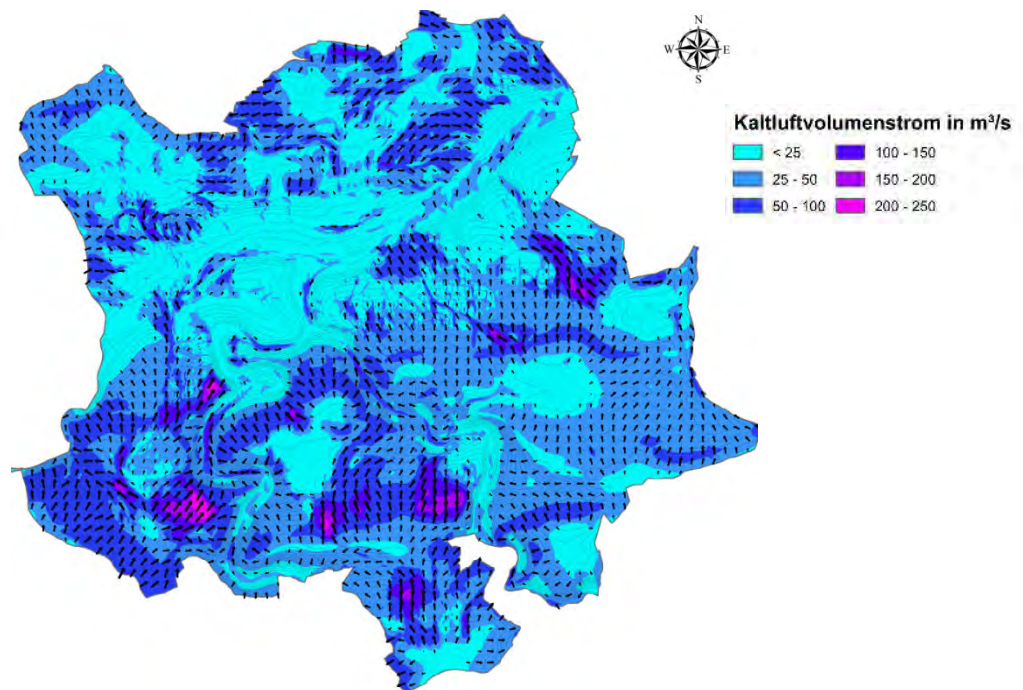


Abb. 5-4: Bodennaher Kaltluftvolumenstrom (Farbe) und Strömungsrichtung/-stärke (Windpfeile) zu Ende der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.5.2).

5.2.2 Überdach-Niveau

In der dicht bebauten Innenstadt mit nur kleinen Grün- oder Freiflächen ist eine Kaltluftproduktion kaum möglich. Allerdings ist auch in dicht bebauten Siedlungsarealen eine Kaltluftzufuhr nicht völlig ausgeschlossen. Falls ein Kaltluftstrom aus dem Umland eine entsprechende vertikale Mächtigkeit ausgebildet hat, kann sich die Strömung durchaus im Überdachniveau fortsetzen.

Im Überdach-Niveau spiegelt sich in Pforzheim die grundsätzliche Südrichtung der Strömung wieder (Abb. 5-5 und Abb. 5-6). Im Süden noch stark beeinflusst durch die Orographie, herrscht über den Hochflächen im Norden homogener südlicher bis südwestlicher Wind.

Vor allem für die Kernstadt interessant ist die konstante Durchströmung des Enztals im Überdachniveau, die auch im Bereich der Innenstadt nicht zum Erliegen kommt. Im Westen wird diese Strömung vor allem aus dem Enztal (nur teilweise in den Karten sichtbar da außerhalb des Stadtgebiets) gespeist. Auch aus den Gewannen Brötzingen Waldwiesen und Bohrain bekommt die Innenstadt weitere Frischluft, trotzdem schwächt sich aufgrund der Blockbebauung der Kaltluftstrom erkennbar ab. Der Kaltluftvolumenstrom aus dem Nagoldtal wird durch das Mäandrieren des Talverlaufs bei Dillweißstein stark gebremst, trägt aber zu der Überströmung im Bereich der Südweststadt bei. Wieder verstärkt wird die Strömung durch den markanten Zustrom aus dem Würm- und im weiteren Verlauf dem Nagoldtal. Hier wird deutlich, dass der in der bodennahen Strömung ersichtliche Kaltluftvolumenstrom im unteren Nagoldtal (dies wurde auch durch die Windmessungen auf dem Kupferdächle durch Bangert 1993 ermittelt) mit der Strömung im Überdachniveau in direktem Zusammenhang steht. Ähnliches gilt für den Bereich des Buckenbergs, wo die Strömung aufgrund der geringen Rauigkeit nach unten durchgreifen kann und ebenfalls zur Durchströmung des Enztals beiträgt.

Auch später in der Nacht zeigt sich – wie zuvor auch schon im bodennahen Strömungsfeld – dass sich die wesentlichen Strukturen kaum ändern. In höher gelegenen Bereichen ist eine leichte Intensivierung zu erkennen, während im Talraum der Enz geringere Volumenströme auftreten. Der Talraum füllt sich im Verlauf der Nacht mit Kaltluft, so dass sich die Dynamik der Strömung dort abschwächt.

Grundsätzlich wird eine Belüftungsfunktionalität im Über-Dach-Niveau berechnet, die stellenweise, bei entsprechend niedriger Rauigkeit der Oberfläche, bis in Bodennähe durchgreifen kann.

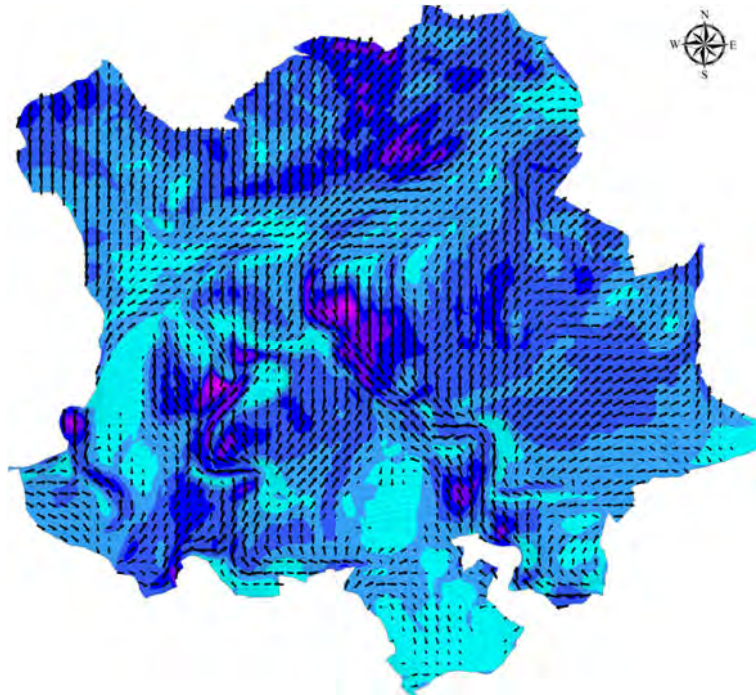


Abb. 5-5: Kaltluftvolumenstrom im Überdachniveau (Farbe) und Strömungsrichtung/-stärke (Windpfeile) zu Beginn der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.6.1).

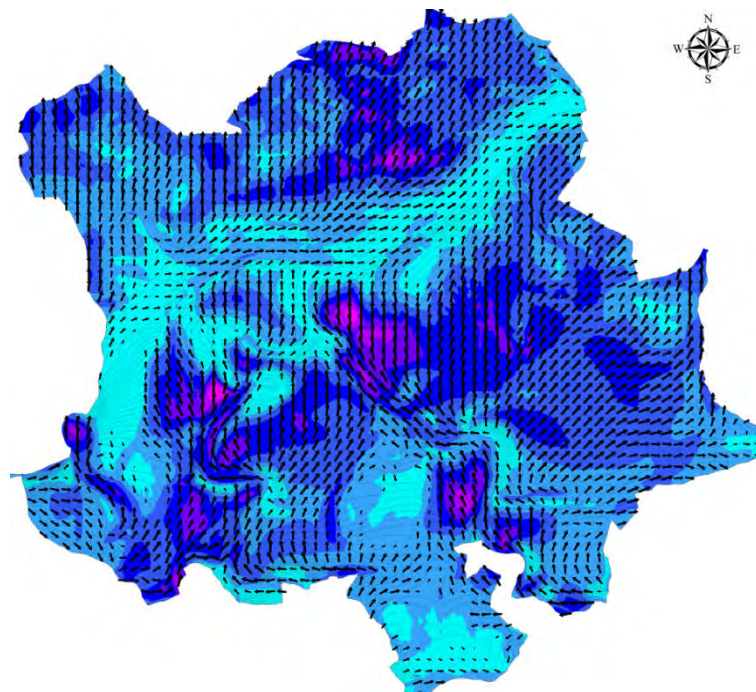


Abb. 5-6: Kaltluftvolumenstrom im Überdachniveau (Farbe) und Strömungsrichtung/-stärke (Windpfeile) zu Ende der Nacht während einer typischen autochthonen Wetterlage (Karte 1.6.2).

5.3 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte zeigt eine flächendeckende Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes. Die Ableitung von räumlich-funktionalen klimatischen Einheiten basiert dabei auf einer gemeinsamen Betrachtung der vorhandenen Klimafaktoren aus den Ergebnissen der FITNAH-Modellrechnungen (Durchlüftung, Bioklima, Kaltluftproduktion). Dabei wird zwischen den Wirkungsräumen (Siedlungen) und Ausgleichsräumen (Freiflächen) unterschieden, die wiederum durch Luftleitbahnen verknüpft sein können (Kap. 4.4).

Der Siedlungsraum wird auf Basis des PMV in verschiedene Belastungsstufen eingeordnet. Die günstigsten Werte liegen allgemein am südlichen Stadtrand (Abb. 5-7). Dort kann die Kaltluftströmung, begünstigt durch die oft lockere Bebauung meist relativ weit in den bebauten Bereich eindringen. Die Reichweite hängt hierbei neben den Eigenschaften der Gebäudestruktur vor allem von der Intensität des am Stadtrand ankommenden Kaltluftvolumenstroms ab. Dieser definiert die Wirksamkeit von Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltlufttransportvermögens.

Da grundsätzlich eine südliche Strömung vorherrscht, sind hier auch die entsprechenden Lagen wie z.B. das südliche Haidach begünstigt. Auch der Zustrom in den Tälern entlastet die Bereiche z.B. des westlichen Enztals oder große Teile der Südwest- und Südoststadt. Die nördlich gelegenen Stadtränder weisen, da dort kaum lokale Kaltluftflüsse in Richtung der Bebauung auftreten, meist weniger günstige Bedingungen auf. Als bioklimatisch ungünstige Bereiche zeichnen sich außerdem die dicht bebaute Innenstadt, die Nordstadt und Gewerbegebiete wie das Altgefäll oder die Wilferdinger Höhe ab. Letztere verbinden ebenfalls hohe Versiegelung mit einer dichten Bebauung.

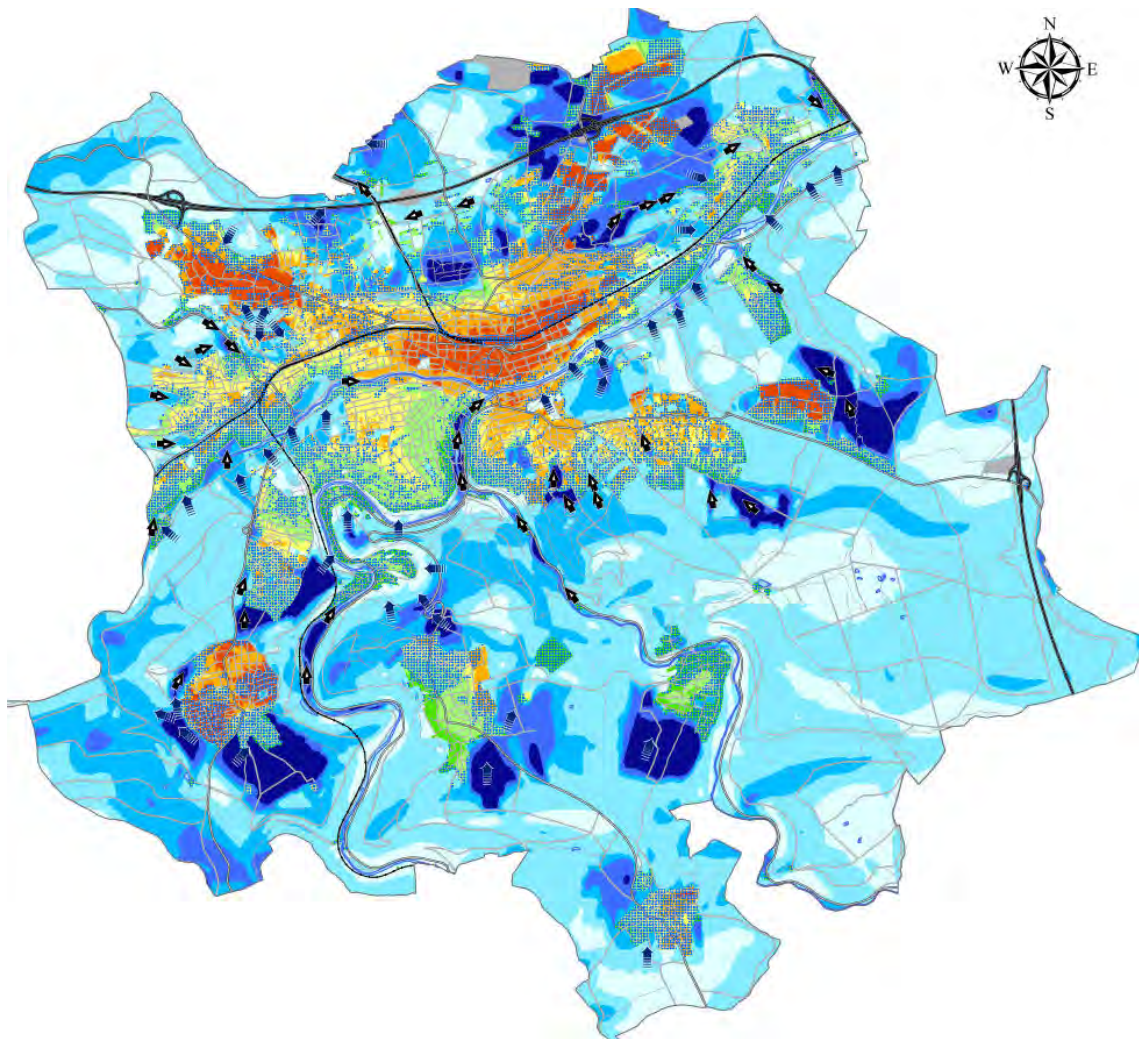
Von den südlich gelegenen Stadtteilen weist Würm die günstigsten Bedingungen auf. Hier wirken lockere Bebauungsstruktur und die gute Durchlüftung des kräftigen Kaltluftstroms zusammen. In den südlich gelegenen Stadtgebieten finden sich auch die stärksten Kaltluftströme, vorzugsweise über Acker- und Wiesenflächen. Diese begünstigen die Frischluftversorgung der dort angrenzenden Siedlungsräume.

Ungünstige Bedingungen finden sich dagegen in großen Teilen von Büchenbronn. Dies spiegelt die bereits in der bodennahen Temperaturkarte festgestellten höheren Temperaturen wider, die sich teilweise in den höher gelegenen Stadtteilen finden. Auf dieses Phänomen wird in Kap. 6.2.5 eingegangen.

Förderlich für den Luftaustausch sind Luftleitbahnen. Sie verknüpfen idealerweise den Ausgleichsraum mit dem bioklimatisch belasteten Wirkungsraum. Die Effektivität von Kaltluftleitbahnen ist eng verknüpft mit der Bebauungsstruktur und dem Vegetationsanteil der Flächen. Als wichtige Luftleitbahn sind besonders das Würmtal und die untere Nagold hervorzuheben, welche den Luftaustausch in der bioklimatisch ungünstigen südlichen Innenstadt fördert. Auch die westlichen Stadtteile Arlinger und Brötzingen werden durch Luftleitbahnen entlastet. Die kräftige Kaltluftströmung im Bereich des Altgefälls setzt sich in der Mäuerackklinge fort. Diese – ein Zusammenspiel von lokalen Kaltluftabflüssen und der Strömung im Überdach-Niveau – sorgt im östlichen Enztal für überwiegend günstige bioklimatische Bedingungen. Entlastung erfährt das dort gelegene Eutingen auch durch Luftleitbahnen im Bereich des Rennbachs und des Eutinger Friedhofs.

Die bereits erwähnten lokalen Kaltluftabflüsse weisen zwar verglichen mit den Luftleitbahnen oft nur einen mittleren Kaltluftvolumenstrom auf, können aber trotzdem für angrenzende Siedlungsräume eine wichtige Funktion einnehmen. Dies ist z.B. an den Hängen des westlichen Enztals der Fall. Auch der Buckenberg mit seinen Ackerflächen produziert Kaltluft, welche die nahegelegenen Bereiche an der Enz entlastet.

Kleinere Parks oder Grünflächen in der Stadt können aufgrund ihrer begrenzten Fläche oft nur wenig auskühlen und bilden daher meist nur geringe Kaltluftvolumenströme, zumal sie aufgrund ihrer in die Bebauung eingebetteten Lage meist nicht an Luftleitbahnen angebunden sind. Unabhängig davon nehmen solche Grünflächen aber eine wichtige Wohlfahrtsfunktion insbesondere an Sommertagen mit hoher Wärmebelastung wahr. Beschattung durch Vegetation und idealerweise kühlende Wasserflächen können die Grünflächen zu Komfortinseln in der Innenstadt werden lassen. Diese sind bedeutende Erholungsflächen, vor allem aus gesundheitlicher Sicht, für dicht besiedelte Areale.



Bodennahe Kaltluftströmungen

- <50%
- 50%
- 100% = Mittelwert im Berechnungsgebiet
- 150%
- 200%
- Hauptströmungsrichtung lokaler Kaltluftabflüsse mit Belüftungsfunktion der Siedlungsgebiete
- Luftleitbahn für Kaltluftströmungen

Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen

- sehr günstig
- günstig
- mittel
- weniger günstig
- ungünstig
- Gute Durchlüftung im Siedlungsbereich

Abb. 5-7: Klimafunktionskarte für das Stadtgebiet Pforzheim (Karte 1.7).

5.4 Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte (Abb. 5-8) bewertet die Klimafunktionen hinsichtlich ihrer bioklimatischen Wirkung. Grün- und Freiflächen werden hierbei nicht nur anhand ihres nominellen Beitrags zum Kaltlufttransport, sondern auch aufgrund ihrer allgemeinen Wohlfahrtswirkung für belastete Siedlungsräume bewertet.

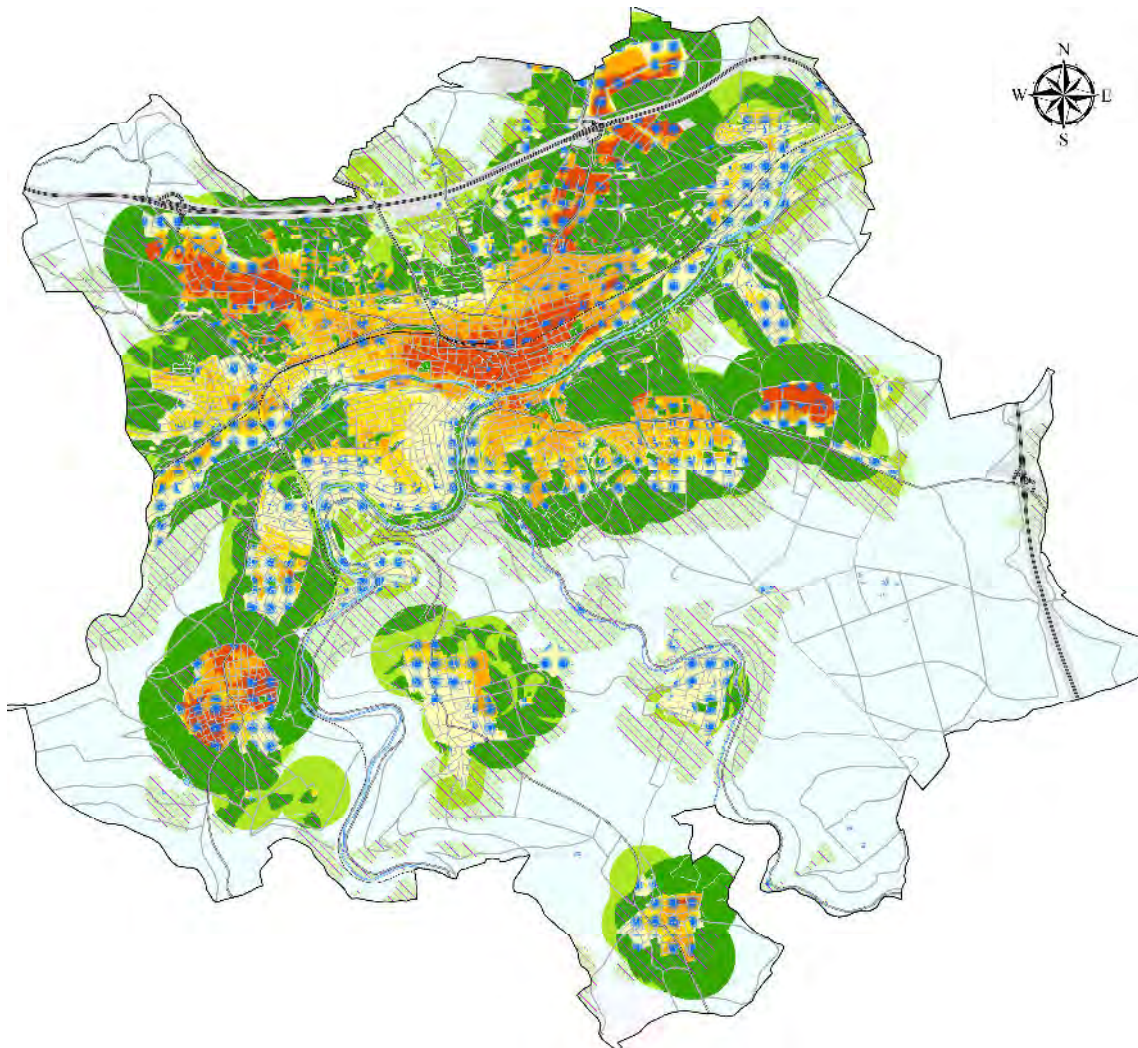
Die höchste bioklimatische Bedeutung haben daher Freiflächen, die bioklimatisch belasteten Gebieten zugeordnet sind. Diese finden sich vor allem im Umfeld der Innenstadt und dicht bebauter Gewerbegebiete. Da insbesondere Grünflächen, welche mit ihrem Kaltluftstrom zur Durchlüftung beitragen, eine wichtige Entlastungsfunktion einnehmen, fallen auch viele Flächen südlich der Ränder der Siedlungsräume sowie nördlich orientierte Talhänge in diese Kategorie.

Auf der Basis der Planungshinweiskarte können für die verschiedenen Kategorien von Frei- und Siedlungsflächen, für die Luftleitbahnen und Kaltluftabflüsse allgemeine Planungsempfehlungen und Erhaltungs- bzw. Entwicklungsziele angegeben werden, die in Tab. 5-1 zusammengestellt sind.

Tab. 5-1: Planungsempfehlungen und Erhaltungs- bzw. Entwicklungsziele für die auf der Planungshinweiskarte dargestellten Kategorien von Frei- und Siedlungsflächen

	Planungsempfehlung / Entwicklungsziel
Freiflächen	
hohe klimatisch-bioklimatische Bedeutung und Ausgleichsfunktion	im Außenbereich: großräumiger Erhalt, Bebauung und Versiegelung nur in Ausnahmefällen und unter Beachtung klimatisch-lufthygienischer Vorgaben im Innenbereich: Erhalt und Ausbau, Entsiegelung vorsehen, abwechslungsreiche Pflanzstrukturen anstreben, Vernetzung einzelner Grünflächen
mittlere klimatisch-bioklimatische Bedeutung und Ausgleichsfunktion	im Außenbereich: großräumiger Erhalt, Bebauung und Versiegelung nur in geringem Umfang und unter Erhalt des Siedlungsbezuges im Innenbereich: Erhalt, keine weitere Versiegelung, abwechslungsreiche Pflanzstrukturen anstreben, Vernetzung einzelner Grünflächen
geringe klimatisch-bioklimatische Bedeutung und Ausgleichsfunktion	maßvolle Bebauung möglich, klimatische Gegebenheiten berücksichtigen (Luftleitbahnen, Hauptwindrichtungen, Gebäudestruktur)
nachrangige-bioklimatische Bedeutung und Ausgleichsfunktion	Vegetationsflächen ohne signifikanten Einfluss auf den Siedlungsraum

	Planungsempfehlung / Entwicklungsziel
Siedlungsflächen	
ungünstige bioklimatische Situation	<p>Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung und Siedlungserweiterung</p> <p>bei lockerer Bebauung: günstige Siedlungsstrukturen erhalten, möglichst keine Siedlungsverdichtung zulassen, vorhandene Luftleitbahnen erhalten bzw. ausbauen</p> <p>bei verdichteter Bebauung: keine weitere Versiegelung zulassen, Erhöhung des Vegetationsanteils, Blockinnenhofentkernung und -begrünung, Dach- und Fassadenbegrünung</p>
weniger günstige bioklimatische Situation	<p>hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung und Siedlungserweiterung</p> <p>Verdichtung nicht weiter erhöhen, Grün- und Freiflächen erhalten, Versiegelung reduzieren, Dach- und Fassadenbegrünung</p>
mittlere bioklimatische Situation	<p>mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung und Siedlungserweiterung</p> <p>maßvolle Nachverdichtung möglich, Neuversiegelung durch Dach- und Fassadenbegrünung sowie Begrünung von Straßenräumen und Blockinnenhöfen ausgleichen, Reduktion vorhandener bzw. weitest gehende Vermeidung zusätzlicher Emissionen</p>
Günstige bis sehr günstige bioklimatische Situation	<p>geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung und Siedlungserweiterung</p> <p>Siedlungsverdichtung und -erweiterung möglich, bei Neuplanungen geringen Flächenverbrauch, energieoptimierte Bauweise und umweltfreundliche Infrastruktur (Energieversorgung, Verkehrsanbindung) anstreben</p>
Belüftungsfunktion	
Regionale Luftleitbahn	<p>Erhalt, keine Bebauung und Versiegelung, Schadstoffeinträge vermeiden, keine flächigen Aufforstungen, niedrige lineare Gehölzstrukturen oder kleine Baumgruppen sind vertretbar</p>
Lokale Luftleitbahn	<p>Erhalt, Ausbau durch Rücknahme bzw. Auflockerung der Randbebauung anstreben, keine flächigen Aufforstungen, niedrige lineare Gehölzstrukturen oder kleine Baumgruppen sind vertretbar</p>



Bioklimatische Bedeutung der Grünflächen

- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Klimaaktive Vegetationsflächen mit direktem Bezug zu klimatisch belasteten Siedlungsräumen, hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen (Versiegelung, Behinderung des Luftaustauschs)
- Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Vegetationsflächen mit Bezug zu Siedlungsräumen mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen, geringere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen, Luftaustausch mit der Umgebung erhalten.
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Vegetationsflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete bzw. Zuordnung zu bioklimatisch günstigen Siedlungsflächen. Relativ stabil gegenüber begrenzten Nutzungsänderungen.
- Nachrangige Bedeutung für Siedlungsräume**
Vegetationsflächen ohne nennenswerten Einfluss auf Siedlungsgebiete.
- Belüftungsfunktion für Siedlungsbereiche**

Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen

- günstig bis sehr günstig**
Siedlungsräume mit geringer bioklimatischer Belastung und guter Durchlüftung. Geringere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimatischer Aspekte (Orientierung von Baukörper, Bauhöhen).
- mittel**
Siedlungsräume mit mittlerer bioklimatischer Belastung. Geringere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimatischer Aspekte (Orientierung von Baukörper, Bauhöhen).
- weniger günstig**
Siedlungsräume mit wenig günstiger bioklimatischer Belastung. Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Aufwertung durch Erhöhung des Vegetationsanteils, Entsiegelung, Verbesserung der Durchlüftung empfehlenswert.
- ungünstig**
Siedlungsräume mit hoher bioklimatischer Belastung. Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Aufwertung durch Erhöhung des Vegetationsanteils, Entsiegelung, Verbesserung der Durchlüftung empfehlenswert.
- Gute Durchlüftung im Siedlungsbereich**

Abb. 5-8: Planungshinweiskarte für das Stadtgebiet Pforzheim (Karte 1.8).

6 Modellvalidierung

Im Rahmen der Untersuchung wurden neben rechnergestützten Simulationen der Kaltluftströmungen auch eine Intensiv-Messkampagne meteorologischer Größen durchgeführt. Ziel dieser temporären Messungen war die Erfassung der realen thermisch-dynamischen Prozesse während einer druckgradient- und damit windschwachen Wetterlage (Hochdruckwetterlage). Dadurch sollte ein Datensatz ermittelt werden, anhand dessen die Ergebnisse der Simulation verifiziert werden können. Darüber hinaus lagen aus vorangegangenen Untersuchungen bereits Datensätze vor, die ebenfalls herangezogen wurden.

Die Messkampagne wurde am Abend des 22. Juli bis in die frühen Morgenstunden des 23. Juli 2013 vorgenommen. Im Folgenden werden die verschiedenen Messungen erläutert und im Vergleich zu den Modellergebnissen dargestellt.

6.1 Messungen

6.1.1 Meteorologische Randbedingungen während der Intensivmesskampagne

Zur Untersuchung von Kaltluftströmungen ist es erforderlich, dass sie sich ungestört von überregionalen Randbedingungen wie großen Luftdruckgegensätzen (= starker Wind) entwickeln können. Die Kaltluftströmungen sollten sich nur durch die Ausstrahlung (d.h. wolkenfreier Himmel negative Strahlungsbilanz) und durch das gegliederte Gelände entwickeln (vgl. Abb. 2-3).

Eine solche Wetterlage ohne übergeordneten Wind und ohne Bewölkung, die die Ausstrahlung am Boden stören könnte, tritt zumeist bei ausgeprägten Hochdruck-Wetterlagen (autochthonen Wetterlagen) auf.

Hochdruck-Wetterlagen sind gekennzeichnet durch einen ausgeprägten Tagesgang der meisten meteorologischen Elemente wie Strahlung, Temperatur (hohe Temperaturen am Tag und niedrige Temperaturen in der Nacht), relative und absolute Luftfeuchte bei insgesamt geringer bis keiner Bewölkung.

Durch lokale Temperaturunterschiede (unterschiedlich starke negative Strahlungsbilanz) entstehen Ausgleichsströmungen wie ein Hangabwind, ein Flurwind, ein Berg-Tal-Windsystem oder eine Land-See-Wind-Zirkulation. Nachts bilden sich häufig flache Bodeninversionen und in Mulden kommt es zur Bildung von Kaltluftseen, die u.U. zu einer unerwarteten Frostgefährdung im Frühjahr und im Herbst führen können.

Die Wetterlage in der Messnacht ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die Sonne ging am Messtag um 21:18 Uhr Ortszeit unter und am Folgetag um 05:45 Uhr auf.

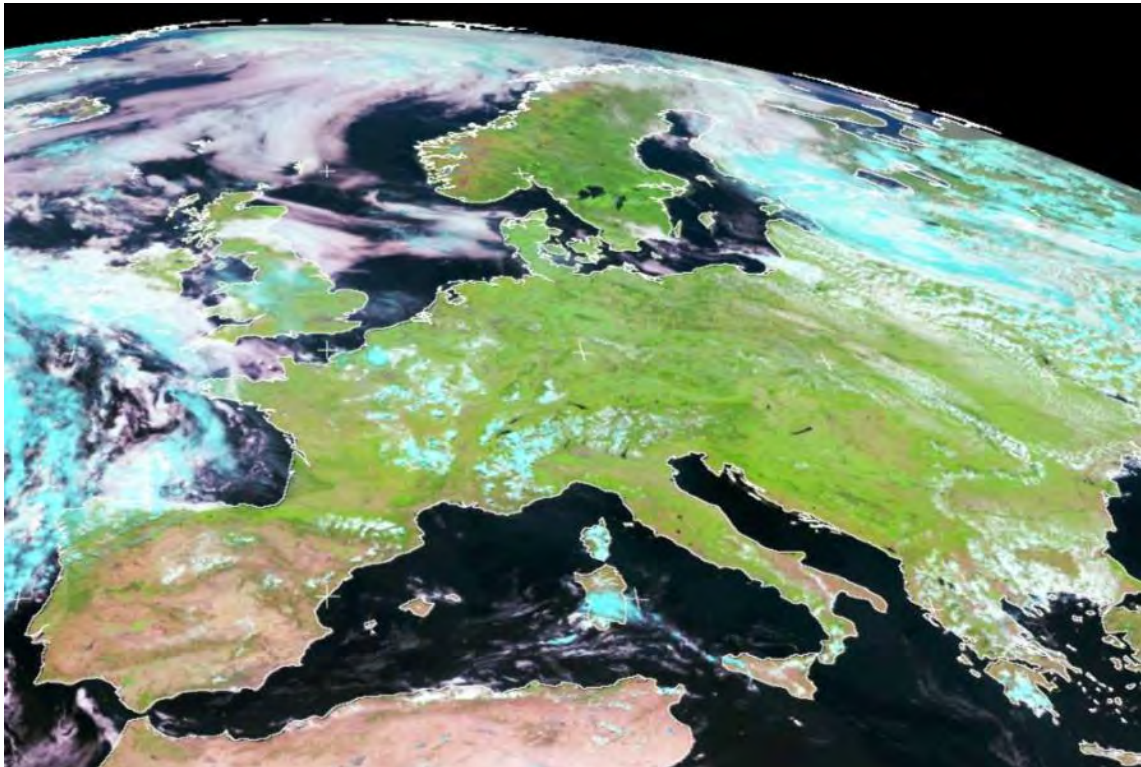


Abb. 6-1: Satellitenbild von Europa vom 23.07.2013 12:00 Uhr (UTC) NEODAAS (Dundee Satellite Receiving Station).

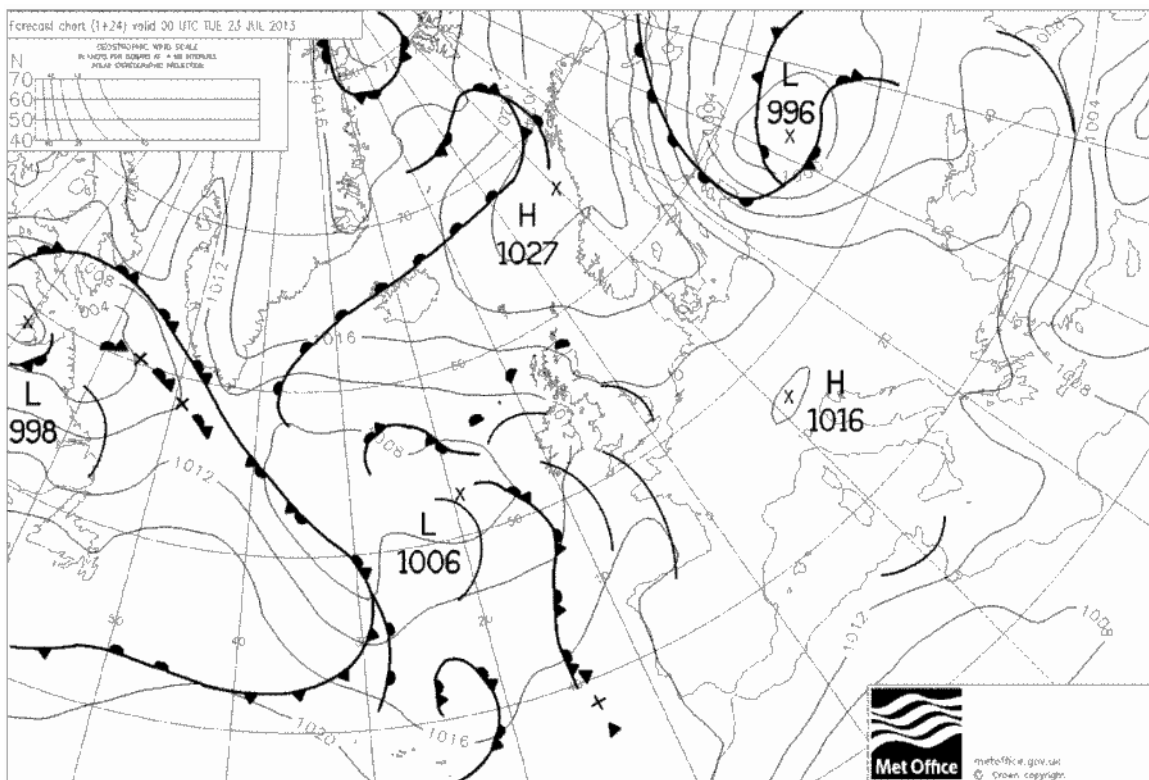


Abb. 6-2: Wetterkartenanalyse vom 23.07.2013 00:00 Uhr (UTC).

Wie das Satellitenbild und die Wetterkarte zeigen herrschten zum Zeitpunkt der Messungen geringe Luftdruckgegensätze. Eine Hochdruckzone erstreckte sich von Skandinavien und Russland bis nach Spanien.

Über dem Untersuchungsgebiet befindet sich keine zusammenhängende Bewölkung und einzelne niedrige Wolkenfelder sind nur über Frankreich und den südlichen Alpen zu erkennen.

Tagsüber herrschten Temperaturen über 30°C. Es gab eine amtliche Hitzewarnung des DWD für die Stadt Pforzheim.

6.1.2 Punktuelle kontinuierliche Temperaturmessungen

Mittels Temperatursensoren wurde in der Messnacht an mehreren Stellen im Stadtgebiet der Temperaturverlauf aufgezeichnet und ausgewertet. Durch die geringe Baugröße waren die Geräte fast überall platzierbar. Die Geräte eignen sich u.a. zur Bewertung der Grünflächen und zur Registrierung des Abkühlverhaltens in einzelnen Bereichen der Stadt. An einer Messstelle ging der Fühler verlustig.

Messgröße	Temperatur
Zeitliche Erfassung	kontinuierlich
Räumliche Erfassung	punktuell
Messhöhe	Je nach Anbringhöhe

Abb. 6-3 veranschaulicht typische nächtliche Temperaturverläufe während einer autochthonen Wetterlage. Nach den hohen Temperaturen am Ende des Tages¹ findet eine rasche Abkühlung statt. Es zeigt sich nach Sonnenuntergang eine deutliche Temperaturdifferenz zwischen offenem Feld (blau) und der Innenstadtbebauung (rot), die während der Nacht weitgehend konstant bleibt. Der größte Temperaturunterschied beträgt bei den untersuchten Standorten maximal etwa 7 K in der ersten Nachthälfte und ca. 6 K in der zweiten (Abb. 6-4). Der Temperaturunterschied hängt dabei vom Nutzungstyp der Stadt ab; gegenüber dem Park in der Weststadt sind die Temperaturunterschiede schwächer ausgeprägt.

¹ Die eingesetzten mobilen Temperaturmessgeräte sind nicht strahlungsgeschützt. Fällt direkte Sonnenstrahlung darauf, liegt die registrierte Temperatur u.U. deutlich höher als die tatsächliche Lufttemperatur. Daher wird hier nur die Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang ausgewertet.

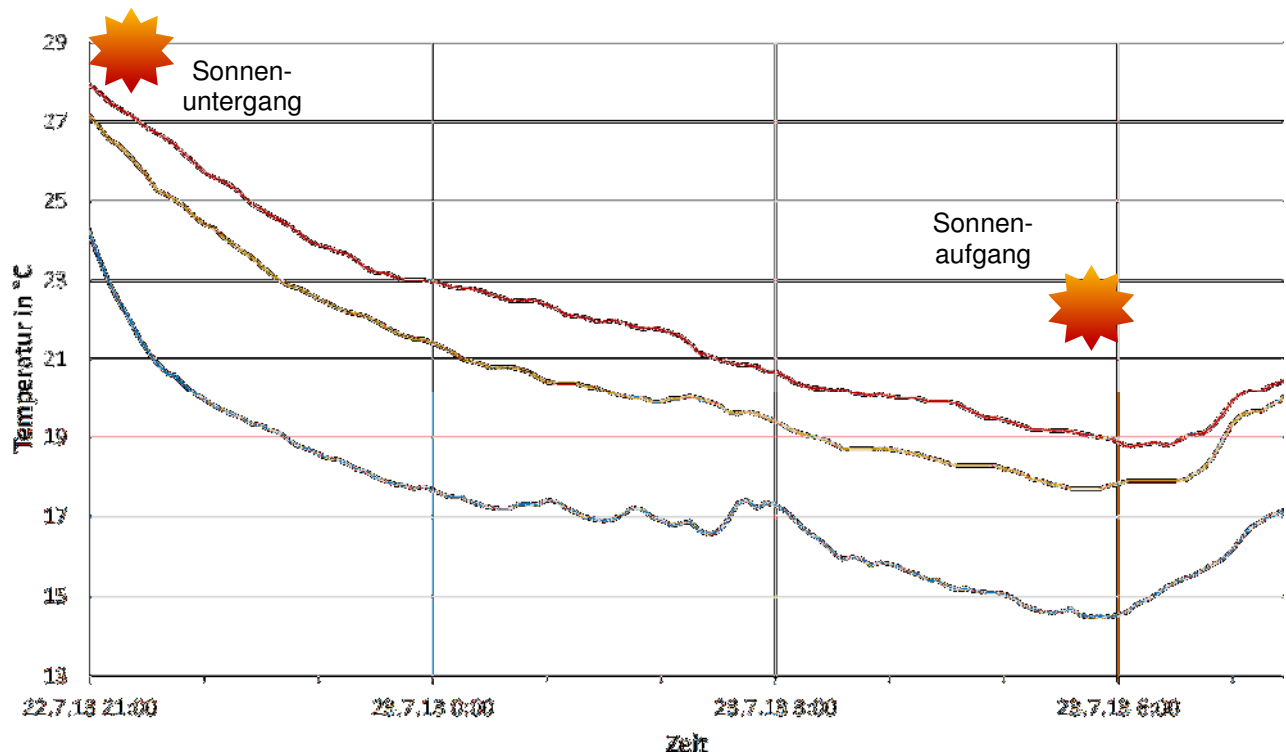


Abb. 6-3: Exemplarische Temperaturverläufe in der Messnacht zwischen 21:00 Uhr und 07:30 Uhr des Folgetags. Rot: Innenstadt, Gelb: Weststadtpark, Blau: Umland (Buckenberg).

Betrachtet man alle registrierten Temperaturverläufe während der Messnacht, ergibt sich eine deutliche Gruppierung. Das niedrigste Temperaturniveau findet sich im Umland der bebauten Areale (Abb. 6-5, blaue und gelbe Markierung). Das Temperaturniveau innerhalb der städtischen Bereiche liegt höher, weist aber eine merkliche Differenzierung je nach Ort auf (rote Markierung).

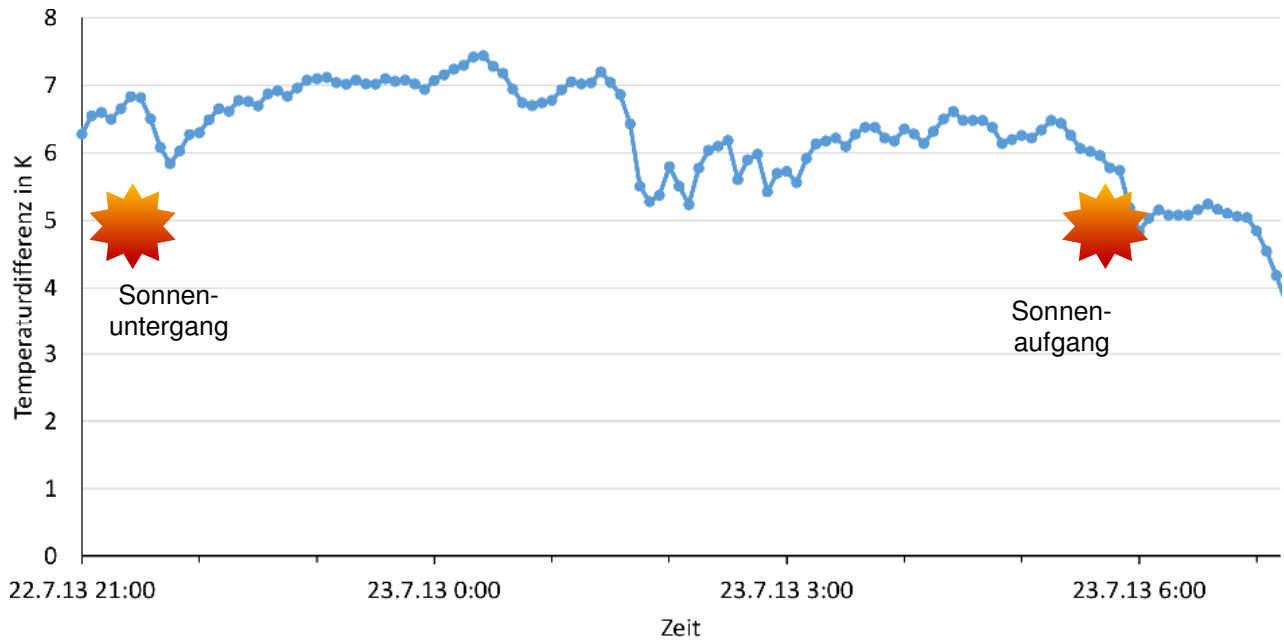


Abb. 6-4: Temperaturdifferenz zwischen Innenstadt und Umgebung (Enzaue) im Verlauf der Messnacht.

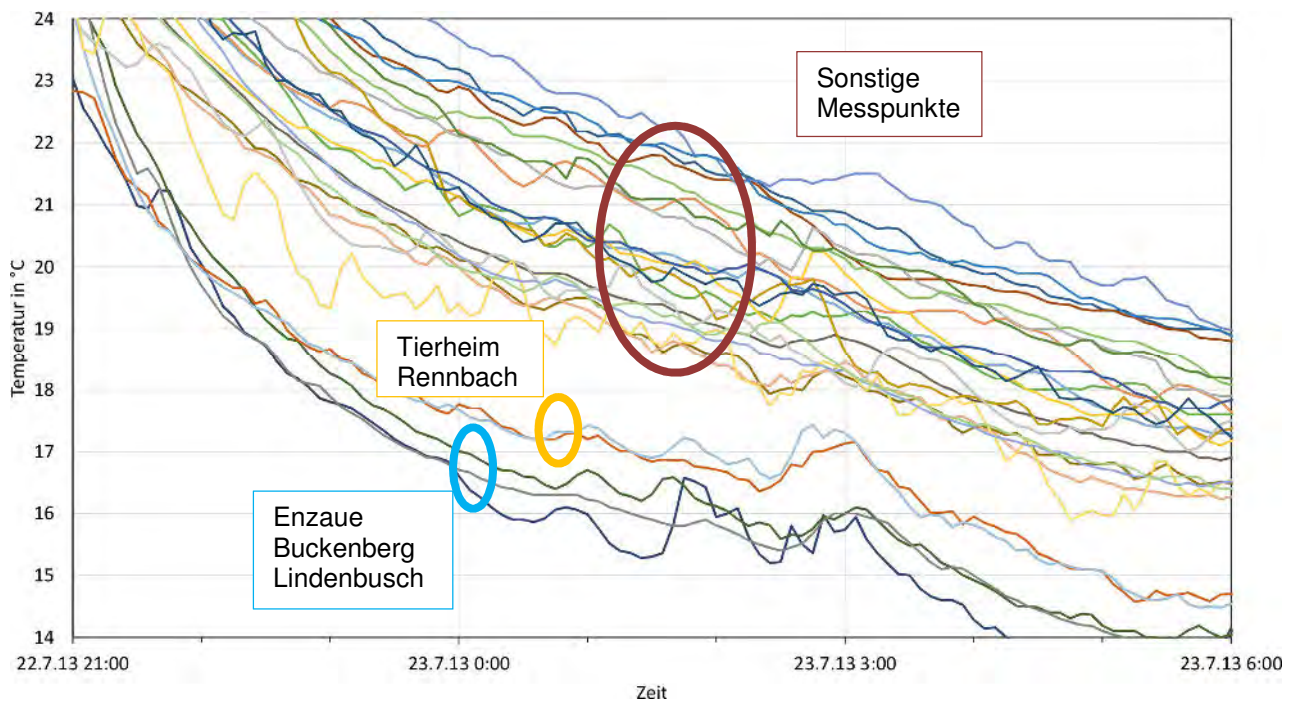


Abb. 6-5: Temperaturverläufe in der Messnacht zwischen 21:00 und 06:00 Uhr.

6.1.3 Temperaturbegehungen

Mittels schnell registrierender Temperatursensoren wurde zusätzlich zu den stationären Temperaturmessungen der horizontale Temperaturverlauf in mehreren Grünflächen im Stadtgebiet aufgezeichnet und ausgewertet. Mit den tragbaren Geräten wurden zu Fuß Transekte durch die Parks begangen. Dadurch ist es möglich, eine differenzierte Temperaturverteilung innerhalb der beprobten Fläche zu ermitteln.

Messgröße	Temperatur, Luftfeuchte
Zeitliche Erfassung	kontinuierlich
Räumliche Erfassung	Kontinuierlich entlang der Begehungsstrecke
Messhöhe	ca. 2 m

6.1.4 Kontinuierliche Windmessung

Neben den im Stadtgebiet verteilten Temperaturmeseinheiten wurde auf der Freifläche Buckenberg eine kontinuierlich aufzeichnende Windmeseinrichtung platziert.

Als Mess-Sensor wurde ein Schalenkreuzanemometer (Windgeschwindigkeit) mit einer Windfahne (Windrichtung) eingesetzt. Der Standort der Windmessung im Bereich Buckenberg kann der folgenden Abbildung entnommen werden (Abb. 6-6).

Die Masthöhe wurde dabei nicht auf die sonst für Windmessungen üblichen 10 m über Grund eingestellt, sondern auf 4,50 m heruntersetzt. Hintergrund dafür war die Überlegung, dass Kaltluftabflüsse vor allem zu Beginn einer Kaltluftsituation nur eine geringe Mächtigkeit aufweisen können, aber bereits Schichtdicken von wenigen Metern an dieser Stelle als relevant angesehen werden können.



Abb. 6-6: Windmessenanlage auf der Freifläche am Buckenberg.

6.1.5 Rauchpatronenversuche

Das Abbrennen von Rauchkörpern vermittelt einen unmittelbaren Eindruck von der Dynamik und der Richtung einer Kaltluftströmung. Die Rauchpatronenversuche wurden fotografisch und vereinzelt filmtechnisch dokumentiert und können der Verifizierung der Modellergebnisse dienen. An den Messpunkten wurden zudem während des Rauchversuchs die Temperatur sowie die Windgeschwindigkeit registriert.

Messgröße	Visualisierung von Windrichtung, -geschwindigkeit, Strömungsdynamik, Temperatur, Luftfeuchte
Zeitliche Erfassung	punktuell
Räumliche Erfassung	punktuell
Messhöhe	bodennah

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen Rauchversuch an der Ecke Römer- / Kaulbachstraße südöstlich des Stadtzentrums vom Pforzheim und nördlich der Teilortschaft Buckenberg.

Der Rauch zieht hier geländefolgend über die Freifläche abwärts ins Enztal. Ursache sind die Dichteunterschiede von durch Ausstrahlung am Boden ausgekühlter bodennaher Luftschichten im Vergleich zu deutlich langsamer auskühlender Luft in größerer Höhe (einige Meter bis Dekameter) oder in gleicher Höhe über der Tallage (Erläuterungen siehe Kap. 2.2/2.3).



Abb. 6-7: Rauchversuch an der Ecke Römer- / Kaulbachstraße.

6.2 Vergleich mit den Modellergebnissen

Beim Vergleich von Messungen mit Modellergebnissen sind einige grundsätzliche Unterschiede zu beachten. Messungen finden immer lokal und punktuell statt. Die Struktur z.B. der Bebauung oder Vegetation kann sehr kleinteilig sein und dies beeinflusst somit auch eine Messung. Zudem finden Messungen wie Rauchversuche nur kurzzeitig statt. Mittlere Verhältnisse über längere Zeiträume als die Dauer der Messung oder des Rauchversuches können somit kaum erfasst werden. Eine Simulation hingegen besitzt immer eine begrenzte Auflösung. Mit einer hochaufgelösten horizontalen Maschenweite von 10 m, wie sie in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurde, können eine Vielzahl von relevanten Strukturen berücksichtigt werden, nicht aber jedes Detail, das eine punktuelle Messung beeinflussen kann. Auch vermitteln die Ergebnisse einen Eindruck von den *mittleren* Verhältnissen z.B. der Strömung, nicht jedoch z.B. ein pulsierendes Abflussverhalten, wie es in der Natur bei Kaltluftströmungen oft vorkommt. Die Simulation wurde für einen *typischen* Sommertag durchgeführt, während der Messung eine bestimmte, in manchen Details vielleicht deutlich von den typischen Verhältnissen abweichende Wetterlage erfasst.

In den folgenden Abschnitten werden Teilbereiche des Untersuchungsgebiets, in dem Messstandorte platziert waren, im Vergleich zu den Modellergebnissen dargestellt und diskutiert.

6.2.1 Östliches Untersuchungsgebiet

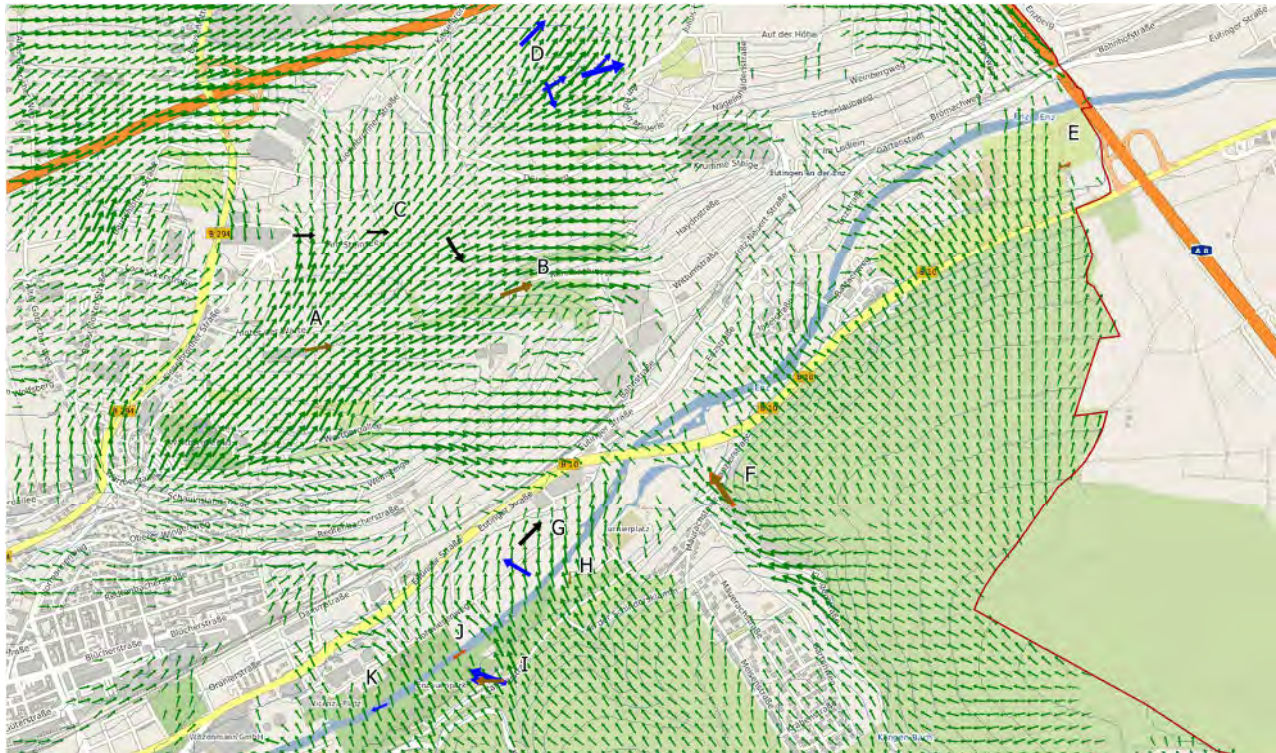


Abb. 6-8: Berechnete Strömung (grüne Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen und Windmessungen (restliche Pfeile).

Im unteren Enztal prognostiziert die FITNAH-Simulation Kaltluftabflüsse aus den Hanglagen im Süden, eine indifferente Strömung im Talgrund und südwestliche Strömungen auf der nördlichen Hochfläche (Abb. 6-8).

Im Bereich des Tierheims (A) und Rennbachwegs (B) wurden bei den Rauchversuchen der Orographie folgende hangabwärts gerichtete Winde festgestellt, was mit den Ergebnissen von FITNAH korrespondiert. Auch die Messungen nördlich des Wasserbehälters (D) bestätigen den dortigen Abfluss in Richtung Autobahn. Weitere Messungen (C, D) zeigen im Gegensatz hierzu eher dem Hang folgende Strömungen, die in Richtung der nördlichen Siedlungsbereiche von Eutingen gerichtet sind. Im Modell stellen

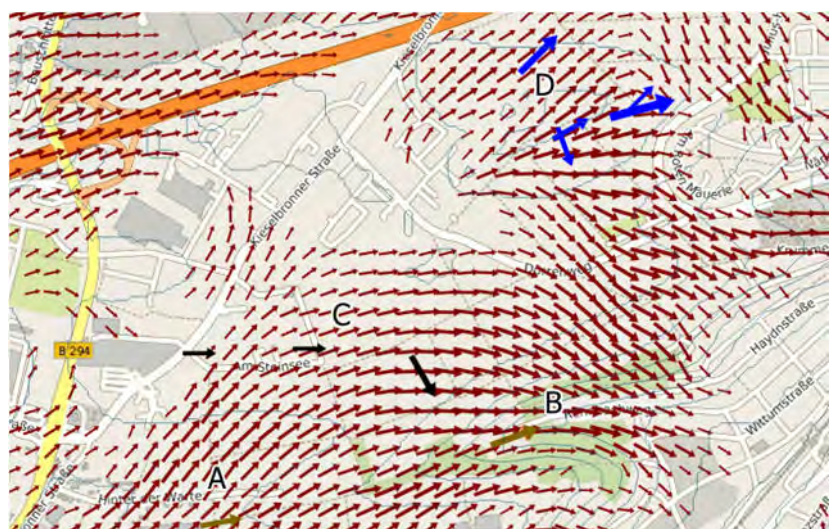


Abb. 6-9: Berechnete Strömung (rote Pfeile) in Bodennähe in der zweiten Nachthälfte und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen und Windmessungen (restliche Pfeile).

sich diese Richtungen in der zweiten Nachthälfte ein (Abb. 6-9). Der Vergleich mit den Messungen zeigt, dass die Flächen oberhalb von Eutingen Kaltluft produzieren, die den Ortsteil belüftet. Zumindest temporär scheint dieser Effekt ein noch größeres Einzugsgebiet zu besitzen als es die mittleren Modellergebnisse zeigen.

Im Bereich des Autobahnanschlusses Pforzheim Ost (E) traten bei den Rauchversuchen nur schwache, talabwärts gerichtete Strömungen auf. Auch das Modell liefert hier nur geringe Windgeschwindigkeiten, die aus dem Bereich der südlich gelegenen Hänge angetrieben werden. Aufgrund der schwachen Strömung sind die auftretenden Richtungsunterschiede zu erwarten.

Die kräftige Strömung aus der Mäuerachklinge (F) gibt das Modell gut wieder. Auch im Bereich des Wasserwerks (I) liegt eine deutliche Strömung vor, die aus der Kanzlerklinge gespeist wird. Unterschiede in der Orientierung der Strömung lassen sich vermutlich auf die lokalen Gegebenheiten wie den Gebäuden und der recht dichten Vegetation vor Ort erklären.

Sehr indifferente Strömungen konnten im Bereich der Enz bzw. Enzauen festgestellt werden (H, J, K). Die Windrichtungen wechselten während der Messungen kurzfristig zwischen talabwärts und talaufwärts, auch Kalmen waren feststellbar. Im Modell werden hier im Mittel talenkrechte Strömungen berechnet, die von den südlich gelegenen Hängen und Klingen gespeist werden. Diese talenkrechte, zusätzlich durch die buschige Vegetation behinderte Strömung ist offensichtlich nicht stabil, sondern pendelt zwischen talauf und talab. Erst jenseitig der Enz dreht die Strömung dann talabwärts ein (G).

6.2.2 Nördliches Untersuchungsgebiet

Im Bereich des Friedhofs wird kein Kaltluftfluss in Richtung der Kernstadt berechnet. Stattdessen wird die Luft dem Gefälle und der übergeordneten Strömung folgend nach Norden in Richtung Wöschbach verfrachtet (Abb. 6-10). Dieses Verhalten zeigt sich auch in den Rauchversuchen. Sowohl zu Beginn als auch Ende der Messnacht wurde eine definierte Strömung aus Richtung Südwest registriert.



Abb. 6-10: Berechnete Strömung (grüne Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen und Windmessungen (restliche Pfeile).

6.2.3 Westliches Untersuchungsgebiet

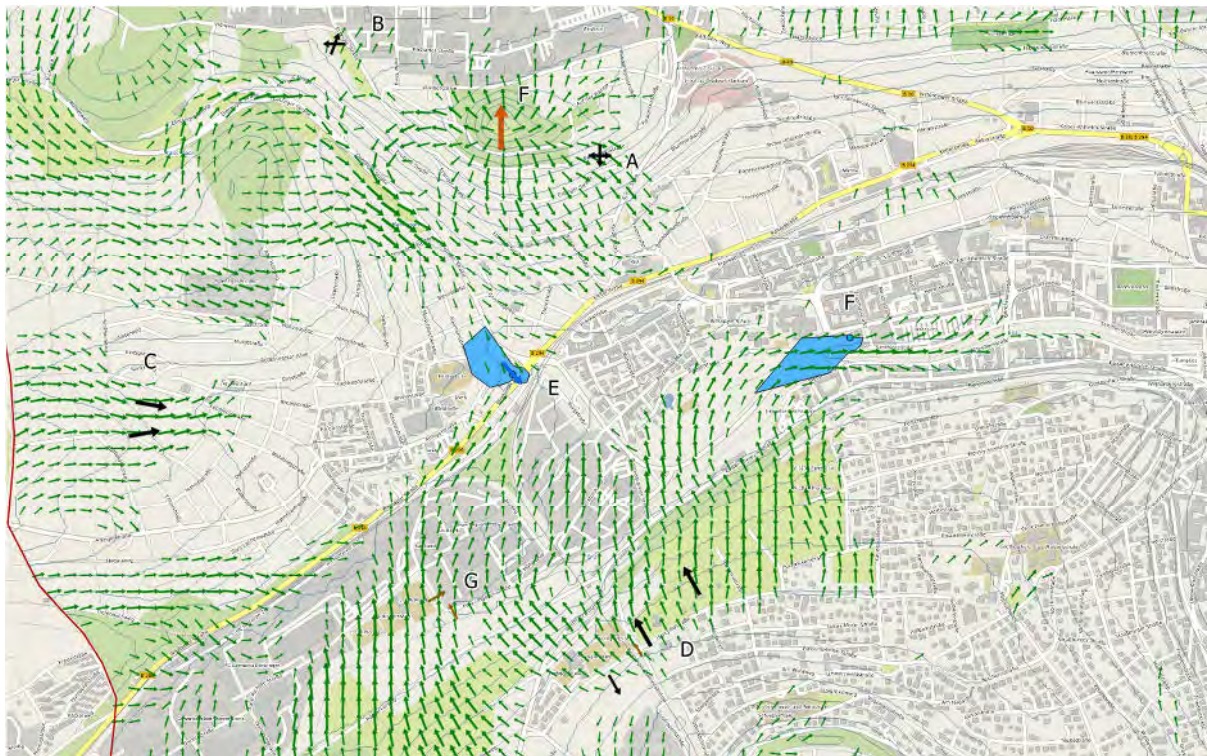


Abb. 6-11: Berechnete Strömung (grüne Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen und Windmessungen (restliche Pfeile). Windrosen der Windrichtungshäufigkeitsverteilung windschwacher Lagen (blau).

Im westlichen Enztal wird ähnlich wie im Osten ein Zustrom von Kaltluft aus den südlichen Hanglagen berechnet (Abb. 6-11). Auch die Hänge im Nordwesten aus dem Malschbachtal tragen laut FITNAH lokal zur Belüftung bei.

Die Hänge des Wallbergs (A) weisen eine deutliche Steigung auf. Dementsprechend berechnet das Modell eine hangabwärts gerichtete Strömung, die bis in die Bebauung reicht. In früheren Messungen wurden an dieser Stelle Rauchversuche durchgeführt, welche keine oder nur eine sehr schwache Strömung zeigten. Aufgrund der starken Verbuschung der Hänge könnte die Strömung unmittelbar über dem Boden in diesem Bereich überschätzt werden.

Im Bereich der Wilferdinger Höhe, welche zum Zeitpunkt der früheren Messungen noch wesentlich weniger dicht bebaut war, wird nur eine schwache Strömung in das Gewerbegebiet berechnet (B), was gut mit den Messungen korrespondiert. Gut wiedergegeben wird auch der Zustrom aus den Feldern westlich des Arlinger (C). Auch der Brötzing Friedhof und besonders das Malschbachtal führen Kaltluftströmungen bis in die Bebauung hinein. Letztere reicht mindestens bis zur B294. Dies bestätigt auch die Windmessung der dortigen Messstation der LUBW (E), die während der ganzen Messnacht nordwestliche Windrichtungen registrierte. Generell zeigen an diesem Standort windschwache Lagen nordwestliche Richtungen, wie die langjährige Windrose dokumentiert.

An den südlichen Hängen des Enztals (Brötzingen Waldwiesen, Bohrain) gibt es Kaltluftabflüsse, wie auch die Rauchversuche zeigen.

An der Hercyniastraße auf der Kuppe ist nur eine sehr schwache, richtungswechselnde Strömung bei den Rauchversuchen festzustellen. Südlich der Straße fällt das Gelände zum Nagoldtal hin ab (Gewann Hasensaul). Rauchversuche wie Strömungssimulation zeigen, besonders in der zweiten Nachthälfte, dass dies bodennah zu hangabwärts gerichteten Kaltluftströmungen führt (Abb. 6-12).

Im Enztal strömt die Kaltluft senkrecht zum Tal in die Bebauung (G). Die Windrichtung am Stadion (1. CFR Pforzheim) wechselte während der Messung auch auf talparallele Richtung, ein Zeichen, dass die Strömung im Überdachniveau, die talab gerichtet ist, hier zeitweise nach unten durchgreift und den relativ flachen Zustrom von den Hängen umlenkt. Im Bereich der Feuerwache (F) ist die Strömung bereits komplett in Talrichtung eingeschwenkt, wie die Schwachwindrose dort deutlich macht.

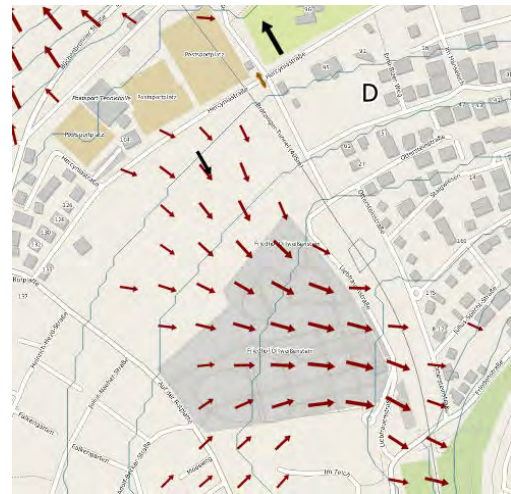


Abb. 6-12: Berechnete Strömung (rote Pfeile) in Bodennähe in der zweiten Nachthälfte und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen (restliche Pfeile).

6.2.4 Südliches Untersuchungsgebiet

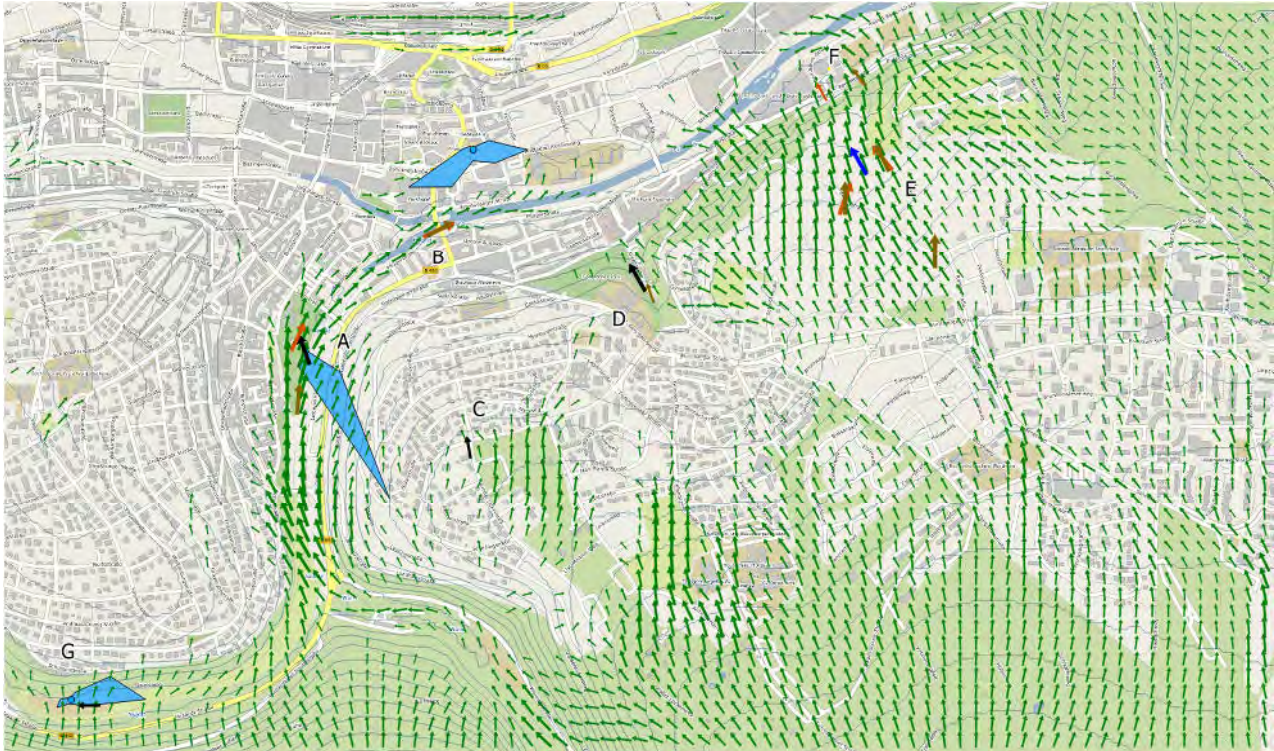


Abb. 6-13: Berechnete Strömung (grüne Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen und Windmessungen (restliche Pfeile). Windrosen der Windrichtungshäufigkeitsverteilung windschwacher Lagen (blau).

Dieser Teil des Untersuchungsgebiets ist durch südliche Strömungen geprägt (Abb. 6-13). Besonders markante Strömungen existieren während der ganzen Nacht im unteren Nagoldtal (A), welche auch von der Simulation gut wiedergegeben werden. Die Reichweite erstreckt sich bis über die Altstädter Brücke (B), auf der Rauchversuche noch einen deutlichen Zustrom nachwiesen.

Im Hegenach (C) findet eine Belüftung über die dortige zentrale Grünfläche statt, was auch Rauchversuche bestätigen. Dieser Bereich wird zukünftig bebaut (Erschließung bereits vollzogen), so dass die Belüpfungsfunktion hier entfällt.

Östlich des Gesellschen Parks (D) zeigten Rauchversuche in der Klingstraße einen Kaltluftstrom in Richtung Tal. Auch hier kann ein Antrieb aus dem Überdach-Niveau angenommen werden, da der Bereich kein zugeordnetes Kaltluftproduktionsbereich aufweist, sondern sich südlich Bebauung anschließt.

Auf der großen Freifläche des Buckenbergs bilden sich während der Nacht Kaltluftabflüsse (E). Dies zeigten sowohl Rauchversuche in diesem Gebiet als auch die dort während der Messnacht installierte Windmessanlage. Der Abfluss erfolgt über die nördlich gelegenen, verbuschten Steilhänge zum Enztal, etwas kanalisiert in der Rinne westlich des Hofguts Buckenberg, hin zu den Sportplätzen an der Enz. Der Rauch, der auf dem Buckenberg freigesetzt wurde, konnte hier während des Versuchs noch leicht identifiziert werden (F) und es wurde verfolgt, wie er in Richtung Enz abzog.

In einer früheren Untersuchung im Bereich der Tennisplätze (G) wurden, damals überraschend, hauptsächlich stromauf gerichtete Windrichtungen festgestellt. FITNAH liefert hier ein Zustrom aus den südlichen Hängen quer zum Talgrund. Wie auch im Enztal führt dies zu einem instabilen Strömungssystem, das keinen Kaltluftabfluss durch das Nagoldtal zulässt. Das Tal liegt hier auch senkrecht zur darüber vorherrschenden Südrichtung, was zusätzlich zu instabilen Verhältnissen mit Tendenz zu Wirbelbildung und ähnlichen Effekten führt. Es ist daher in den Messungen keine talabwärts gerichtete Strömung feststellbar, sondern lokal temporär auch eine talauf gerichtete Strömung möglich

In den Gewannen Lohau und Trudel östlich und südlich des Gewerbegebietes Altgefäll werden kräftige Kaltluftströmungen berechnet (Abb. 6-14). Auch diese werden, bedingt durch die begrenzte Kaltluftproduktionsfläche, stark durch die Über-Dach-Strömung gesteuert. Bei den Rauchversuchen aus einer früheren Untersuchung (DWD, 1979) war das Altgefäll noch weitgehend unbebaut. Das Gewerbegebiet mit seinen massiven Baukörpern beeinflusst das Strömungsfeld deutlich, wie man aus der Umlenkung der Windpfeile erkennen kann. Die Strömung ist daher in ihrer Richtung etwas modifiziert im Vergleich zu den damaligen Rauchversuchen.

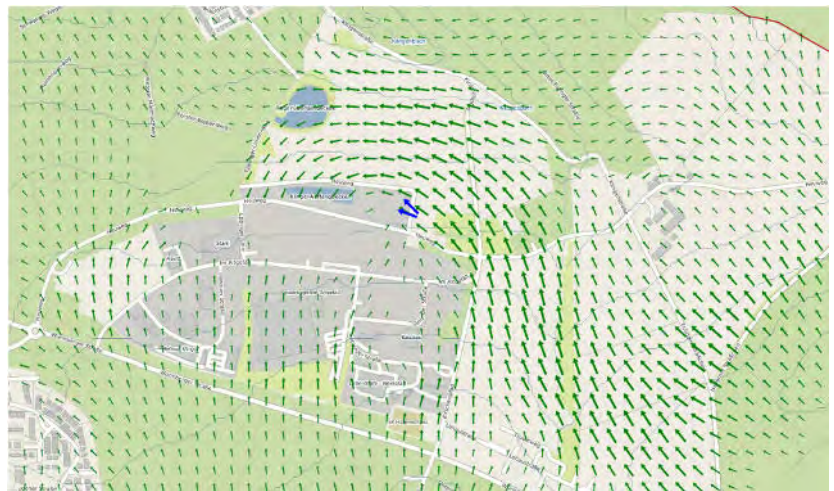


Abb. 6-14: Berechnete Strömung (rote Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen (restliche Pfeile).

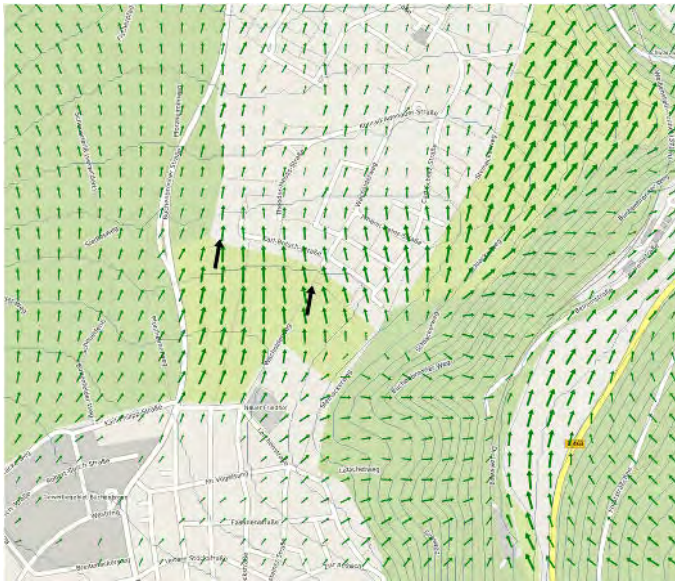


Abb. 6-15: Berechnete Strömung (grüne Pfeile) in Bodennähe zu Beginn der Nacht und Strömungsrichtung abgeleitet aus Rauchversuchen (restliche Pfeile).

Auch die Freiflächen zwischen Sonnenhof und Büchenbronn (Gewann Wachholder) haben sich seit der letzten Untersuchung (Bangert, 1993) deutlich verkleinert. Ihre eigene Kaltluftproduktion ist daher nur noch gering, sie ermöglichen aber weiterhin ein Durchgreifen der kräftigen Strömung im Über-Dach-Niveau und tragen zur Belüftung im Sonnenhof bei (Abb. 6-15).

6.2.5 Südliche Stadtteile

Ein auffälliges Merkmal in den Ergebnissen sind – im Vergleich zur Innenstadt – hohe nächtliche Temperaturen in den höher gelegenen südlichen Stadtteilen. Besonders hervor tritt dies in Büchenbronn, das daher auch sehr hohe bioklimatische Belastungen aufweist, die ähnlich der Innenstadt sind. Eine detaillierte Analyse der dreidimensionalen Modellergebnisse zeigt, dass hierfür eine Bodeninversion (Temperaturzunahme in der Luft mit der Höhe) verantwortlich ist. Die Temperatur steigt im Modell mit der Höhe rasch an, so dass exponierten Höhenlagen in Bereiche allgemeiner höherer Temperatur liegen. Zwar herrscht auch hier eine Südströmung, die aber deutlich wärmer als die bodennahen Kaltluftströme ist.

Im Rahmen der Validierung wurden in den südlichen Stadtteilen keine Temperaturmessungen durchgeführt. Ein Beleg für die Südströmung liefern aber die Messungen im Bereich des Wallbergs. Eine kontinuierliche Messung fand hier etwa 40 Höhenmeter unterhalb des Gipfels statt. Diese zeigte in der Messnacht gegen 04:00 Uhr eine Temperatur um die 20°C und damit einen vergleichbaren Wert zu den zeitgleich registrierten Temperaturen im Innenstadtbereich. Zu dieser Zeit wurde auch eine manuelle Wind- und Temperaturmessung auf dem Gipfel durchgeführt. Dort wurden 21,9°C bei kräftigem Südwind erfasst, mithin also eine deutliche Inversion und die prognostizierte südliche Strömungsrichtung.

Auch in Darstellungen von Temperaturmessfahrten, welche im Rahmen der Klimaanalyse Pforzheim in den Jahren 1992 und 1993 durchgeführt wurden, kann diese Charakteristik festgestellt werden (Abb. 6-16). Die Temperaturdifferenzen zur Innenstadt sind je nach Messfahrt unterschiedlich stark ausgeprägt, kommen aber in mehreren Messungen vor.

Die von FITNAH berechneten, im Vergleich zur dicht bebauten Innenstadt von Pforzheim hohen Temperaturen in Büchenbronn wie auch den anderen hoch gelegenen südlichen Stadtteilen Höhenwart und Teilen von Huchenfeld können folglich als häufig vorkommende Situation eingeschätzt werden. Dies bestätigt auch die in der Klimafunktionskarte ausgewiesenen ungünstigen klimatischen Bedingungen während autochthoner Wetterlagen.

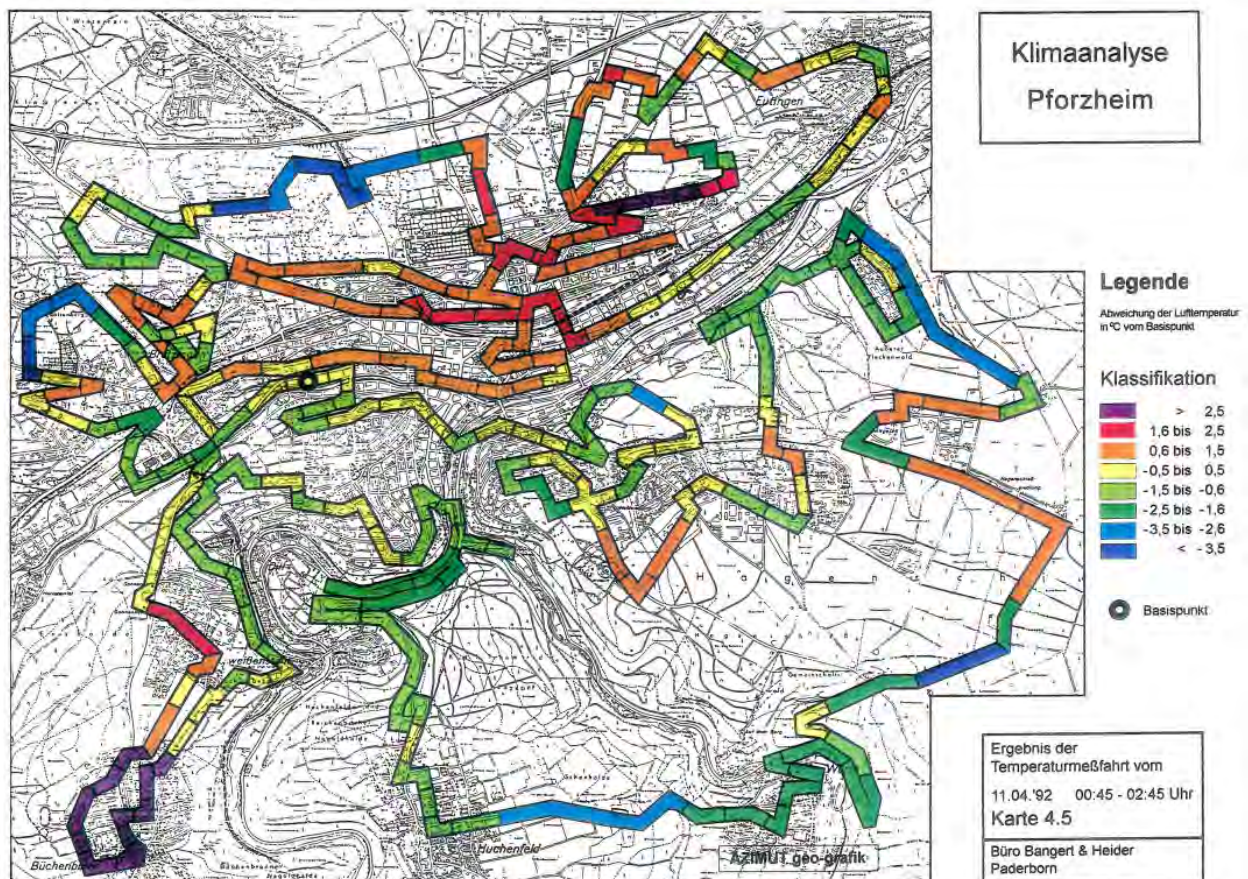


Abb. 6-16: Temperaturmessfahrt im Rahmen der Klimaanalyse Pforzheim, 1993 (/1/). Die Farbskala zeigt die Abweichung der Temperatur gegenüber dem Referenzwert (Messplatz, markiert durch einen Kreis).

6.2.6 Versiegelte Freiflächen

Versiegelte Freiflächen wie Parkplätze oder im Falle von Pforzheim der Messplatz zeigen im Thermalbild hohe Bodentemperaturen. Im Ergebnis der Simulation mit FITNAH ist diese thermische Last weniger stark ausgeprägt.

Versiegelte Freiflächen weisen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und -speicherfähigkeit auf. Sie sind daher in der Lage, einmal aufgenommene Energie über einen langen Zeitraum effektiv wieder abzugeben. Entscheidend hierbei ist, ob diese Energie im Boden auch zur Verfügung steht. Mit FITNAH wird ein typischer Sommertag simuliert. Dauert eine Hitzeperiode real über einen längeren Zeitraum an, kann sich der Boden stärker erwärmen und damit nachts auch mehr Energie abgeben. Dadurch können Thermalbilder, je nach Vorlauf der meteorologischen Bedingungen, hier kräftigere Signale liefern. Zu beachten ist auch, dass bei Thermalbefliegungen die *Oberflächentemperatur* registriert wird, während die hier dargestellten Temperaturkarten auf Basis des Modellergebnisses die Temperatur in 2 m über Grund ausweisen. Gerade Teeroberflächen sind oft direkt an der Oberfläche sehr heiß, während die Temperatur in 2 m Höhe im Vergleich dazu lediglich erhöht ist.

7 Klima-Projektion 2050 für Pforzheim

7.1 Aufgabenstellung

Eine wichtige Frage für künftige regionale und kommunale Entwicklungen sind die zu erwartenden Verhältnisse bei geänderten klimatischen Bedingungen (Klimawandel). Gegenwärtig wird von einem allgemein ansteigenden Temperaturniveau ausgegangen. In den urbanen Ballungsräumen ist damit eine größere Häufigkeit von Tagen mit Hitzestress zu erwarten.

Aus diesem Grund wird der Bedarf an Abkühlung und Belüftung in diesen Gebieten eher wachsen. Entsprechend muss für die Zukunft sichergestellt werden, dass bedeutsame Belüftungsfunktionen erhalten bleiben oder sogar ausgebaut werden.

Eine Bearbeitung dieser Fragestellung soll für das Stadtgebiet von Pforzheim für die Dekade 2050 vorgenommen werden. Grundlage der Bearbeitung ist eine Auswertung derzeit vorhergesagter Klimaänderungen für das Untersuchungsgebiet auf Basis verfügbarer Ergebnisse regionaler Klimamodelle (z.B. COSMO-CLM).

Der maßgebliche Antriebsprozess für belüftungsrelevante Kaltluftströmungen sind die bodennahen Temperaturunterschiede zwischen den Siedlungsgebieten und dem Umland, *nicht* das absolute Temperaturniveau. Ein erwarteter *allgemeiner* Anstieg des Temperaturniveaus unter geänderten Klima-Bedingungen im Jahr 2050 muss daher nicht zwangsläufig zu signifikanten Änderungen der belüftungsrelevanten Strömungssysteme führen.

Hebt sich das bodennahe Temperaturniveau bei Kaltluftwetterlagen in städtischen Gebieten und im Umland parallel um +2°C an, ändert sich an der Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland nichts und die Strömungssysteme bilden sich sowohl strukturell als auch in ihrer Intensität in gleicher Weise wie heute aus.

Eine Anhebung des Temperaturniveaus wird in Stadt und Umland sicherlich nicht exakt gleich sein, nahezu alle bisherigen numerischen Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine Änderung von Intensität, räumlicher Struktur und Reichweite von Kaltluftströmungen unter zukünftigen Klimabedingungen eher gering bleiben wird. Grundsätzliche Veränderungen (wie z.B. das Verschwinden, also ein „Total-Ausfall“ einer belüftungsrelevanten Kaltluftströmung) werden i.A. nicht berechnet.

7.1.1 Das Klimamodell COSMO-CLM

Obwohl der globale Trend zunehmender Temperaturen eindeutig ist, kann sich der Klimawandel regional unterschiedlich stark ausprägen. Regionale Klimaszenarien sind daher grundlegend für die Verfeinerung der Ergebnisse. Wichtiges Hilfsmittel hierbei sind regionale Klimamodelle wie das COSMO-CLM. Hervorgegangen aus einem Modell des Deutschen Wetterdienstes, wird dieses regionale Klimamodell international weiterentwickelt.

Eingebettet in Ergebnisse globaler Modelle (z.B. ECHAM) löst es auch orographische Eigenschaften der Erdoberfläche unterhalb einer Ausdehnung von 50 km auf.

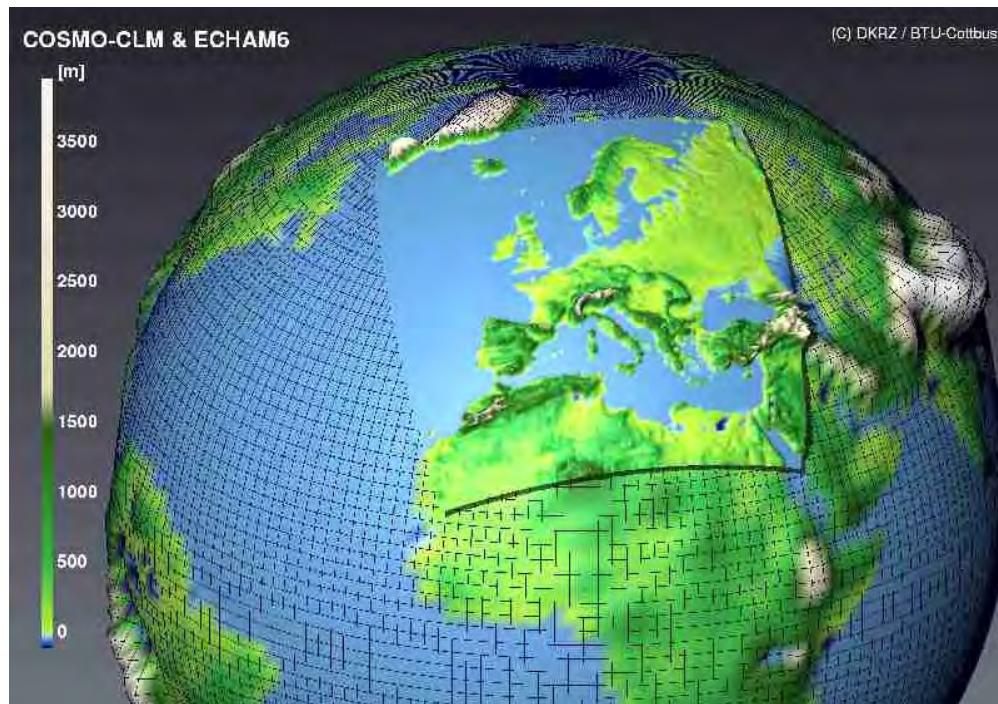


Abb. 7-1: Modellgebiet von COSMO-CLM für Europa, eingebettet in das Gitternetz des globalen Modells ECHAM (aus /10/).

7.1.2 Auswahl des Klimaszenarios

Die Einflussfaktoren auf das globale und regionale Klima sind äußerst komplex. Neben variablen natürlichen Parametern (z.B. die Sonnenaktivität oder Vulkanausbrüche) ist eine wichtige Größe die Änderung der globalen anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen. Diese ist direkt verknüpft mit der wirtschaftlichen Prosperität und den globalen umweltpolitischen Entscheidungen der nächsten Jahrzehnte. Klima-Szenarien können daher nicht als exakte Vorhersagen der zukünftigen Verhältnisse aufgefasst werden, sondern zeigen, basierend auf plausiblen Annahmen, wahrscheinliche Entwicklungen auf.

Für die hier vorliegende Untersuchung wurde das globale Szenario „A1B“ zugrunde gelegt. Es geht auf der globalen Ebene von einem sehr schnellen wirtschaftlichen Wachstum, einem Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des Jahrhunderts und einer ausgeglichenen Nutzung fossiler und regenerativer Energieträger aus. Das Szenario gibt kontinuierlich steigende Treibhausgasemissionen vor und liegt damit im oberen Mittel des Spektrums zur Verfügung stehenden Szenarien.

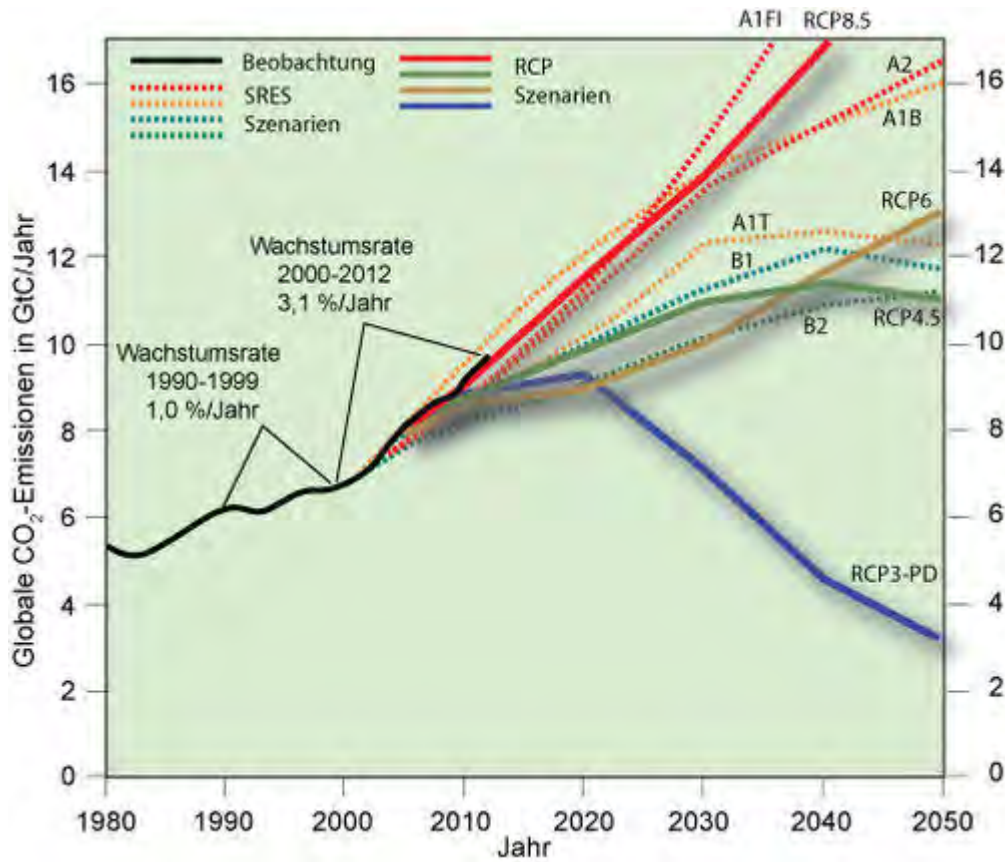


Abb. 7-2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten in verschiedenen Klimaszenarien (aus /11/). Das hier gewählte Szenario ist „A1B“.

7.1.3 Regionale Klimatelemente

Klimatelemente bezeichnen meteorologische Größen, welche das Klima charakterisieren. Hierzu zählen insbesondere die Temperatur, Windverhältnisse und der Niederschlag.

Die Klimatelemente unterliegen den natürlichen wetterbedingten und jahreszeitlichen Schwankungen. Im Verlauf der Temperatur ist z.B. deutlich der Jahresgang sichtbar (Abb. 7-3).

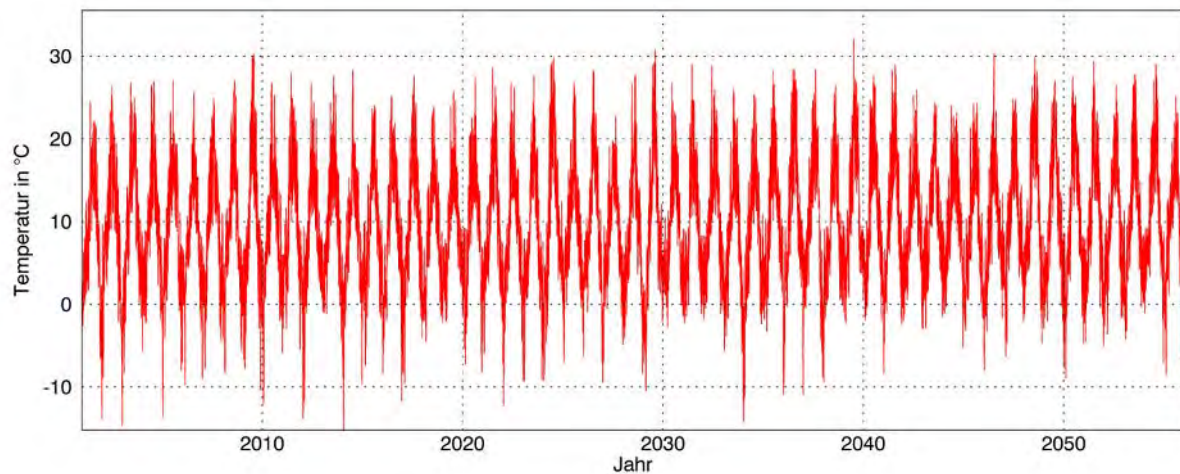


Abb. 7-3: Entwicklung der mittleren Temperaturen bis 2055 für die Region Pforzheim (COSMO-CLM).

Die jahreszeitlichen Schwankungen entfallen bei einer Betrachtung der Jahresmitteltemperatur. Neben der Variabilität verschiedener Jahre wird eine Zunahme der mittleren Temperatur in der Region prognostiziert. Damit setzt sich der Trend der letzten Jahre fort, der sich z.B. auch an lokalen Daten ablesen lässt. Die mittlere Temperatur an der DWD Station Pforzheim zeigt für die Periode 1961-1990 einen Mittelwert von 9,1°C. In den Jahren 1991 bis 2004 stieg die Jahresmitteltemperatur bereits auf 10,1°C².

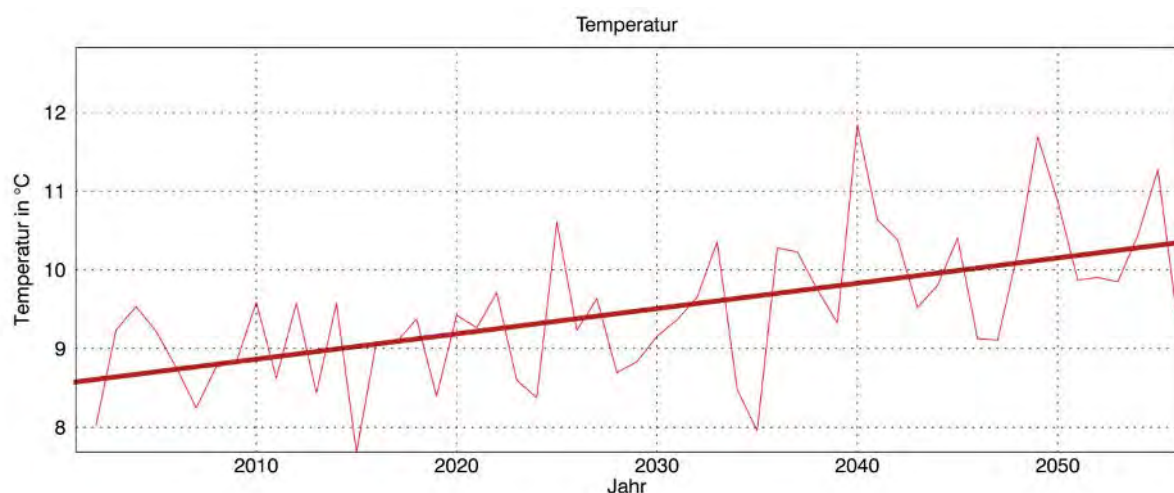


Abb. 7-4: Entwicklung der Jahresmittel-Temperaturen bis 2055 für die Region Pforzheim. Die Gerade zeigt den linearen Trend dieses Zeitraums (COSMO-CLM).

² Die Station Pforzheim-Eutingen wurde 2005 nach Ispringen verlegt.

Dies beeinflusst auch weitere auf der Temperatur basierende Kenngrößen. Die Zahl der Sommertage als auch der Tropennächte scheint langfristig zuzunehmen. Gerade bei den Tropennächten (nächtliche Minimumtemperatur > 20°C) variiert die Zahl jedoch stark von Jahr zu Jahr.

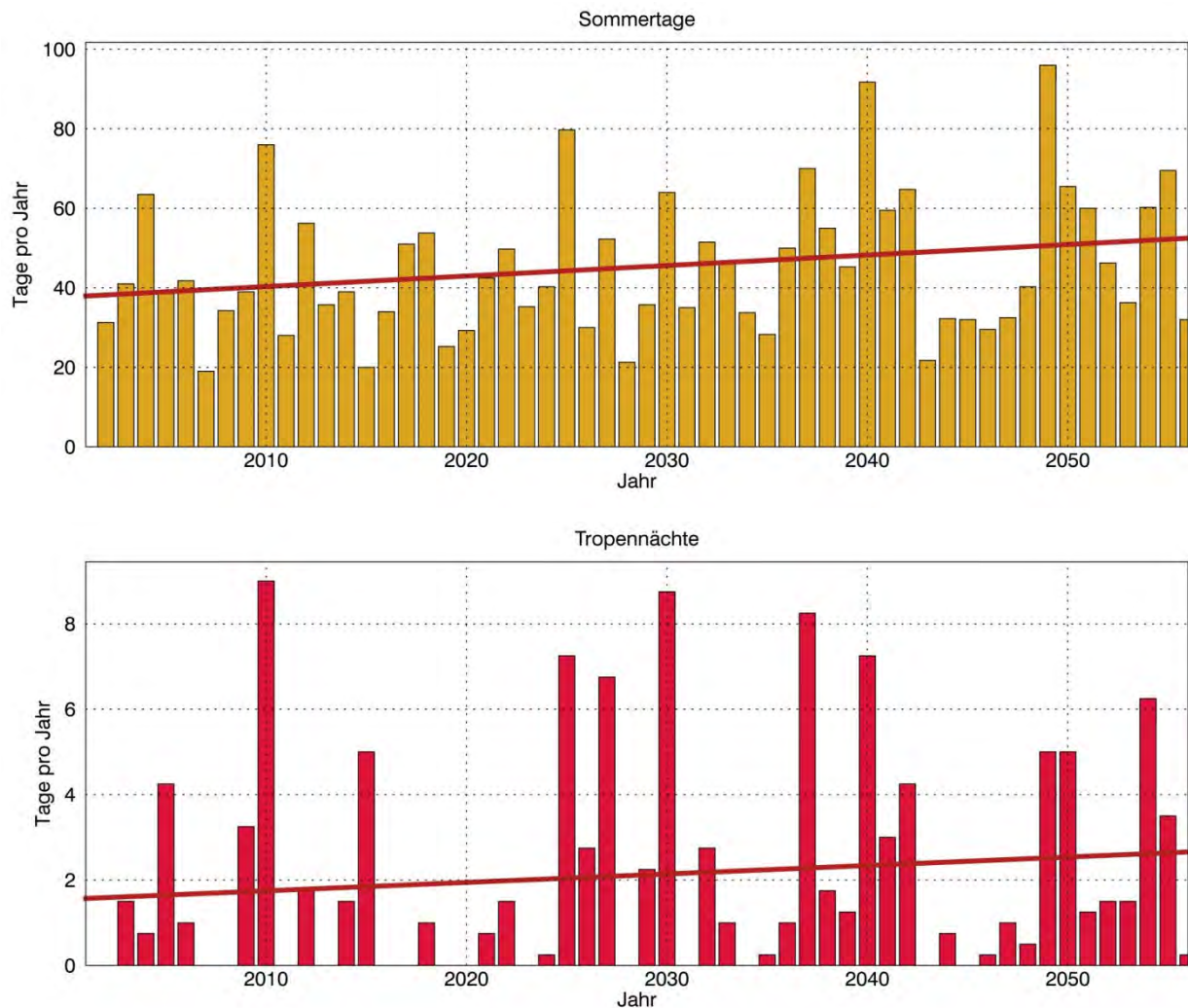


Abb. 7-5: Entwicklung der Anzahl von Sommertagen (oben) und Tropennächten (unten) bis 2055 für die Region Pforzheim. Die Geraden zeigen den linearen Trend dieses Zeitraums (COSMO-CLM).

7.2 Die „Quader-Methode“ zur Klimaprojektion

Regionale Klimamodelle lösen die mit dem Klima zusammenhängenden Prozesse wesentlich höher auf als globale Modelle. Aber auch dieser Modelltypus kann nicht beliebig verfeinert werden. Das hier mit einer typischen Auflösung von 10 km bis 20 km angewandte Modell löst die Region Pforzheim beispielsweise mit lediglich 4 Gitterzellen auf (Abb. 7-6).

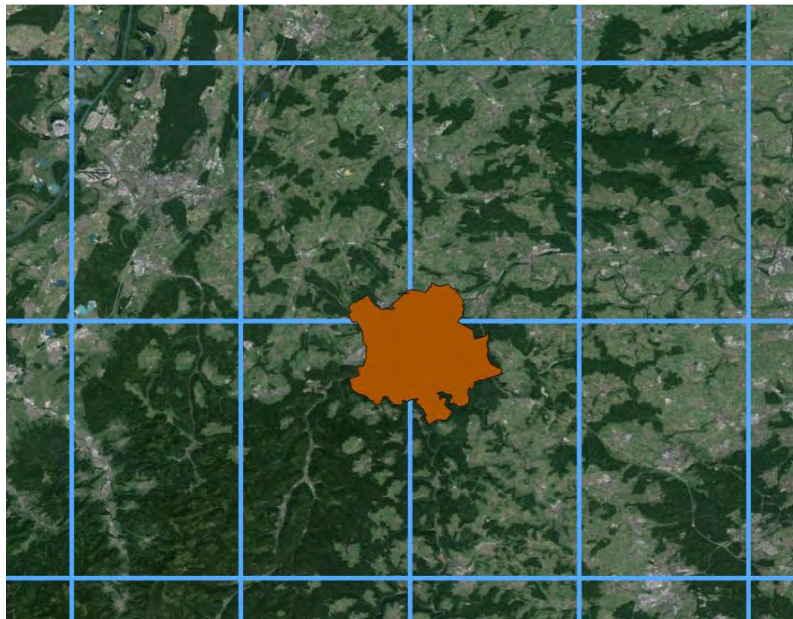


Abb. 7-6: Lage des Stadtgebiets Pforzheim im Modellgitter des regionalen Klimamodells (blau).

Die im vorigen Abschnitt aufgeführten Klimaelemente, die aus diesen Informationen abgeleitet wurden, geben daher nur eine grobe Übersicht über die zu erwartenden zukünftigen Verhältnisse.

Tatsächlich unterscheidet sich die Entwicklung aber stark je nach Landschaftstypus - bewaldete Gebiete oder Wasserflächen erfahren andere Temperaturverläufe als innerstädtische Gebiete.

Die kleinräumige Simulation mehrerer Jahrzehnte für ein Gebiet wie Pforzheim ist aufgrund des extremen Rechenaufwands - selbst mit den derzeit leistungsfähigsten Computern - nicht durchführbar. Die so genannte „Quadermethode“ stellt ein Verfahren dar, das die Anforderungen an die Klimasimulationen technisch handhabbar werden lässt, und trotzdem in hoher Auflösung z.B. die zukünftige Wärmebelastung ermittelt.

Die Quader-Methode zur Bearbeitung der Klimaprojektion kann wie folgt beschrieben werden (/22/):

Aus den Daten der Zieldekade 2046 bis 2055 werden zu festgelegten Terminen die mit dem Klimamodell für die Zielregion ermittelten Werte der Temperatur, der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit ausgewertet. Das Auftreten wärmebelastender Wetterlagen wird von diesen drei Klimaelementen wesentlich bestimmt.

Die Werte-Tripel können in einem dreidimensionalen Zustands- oder Ereignisraum eingetragen werden und bilden dort eine Punktwolke. Anschaulich ist dies projiziert auf 2 Dimensionen für die Temperatur und die Windgeschwindigkeit in der folgenden Abb. 7-7 dargestellt.

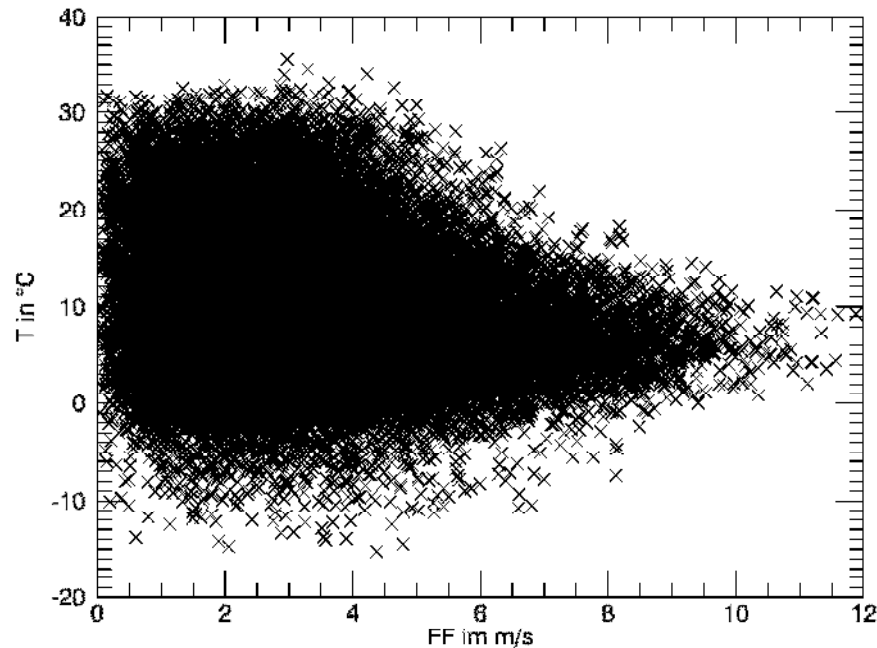


Abb. 7-7: Exemplarische 2D-Projektion der Werte-Tripel (s. Text) aus dem Projektionsjahr 2050. T = Temperatur in 2 m, FF = Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund. Die Wolke enthält 8760 Werte für jede Stunde des Jahres.

Für die hier zu untersuchenden Belüftungssysteme und die Beurteilung einer möglichen Zunahme der Tageshitze bzw. Abnahme nächtlicher Abkühlung bei den Kaltluft-Situationen muss nicht der gesamte Wertebereich untersucht werden.

Unterhalb einer für die Zielregion berechneten Temperatur von 15°C wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu Situationen mit Hitzestress oder Tropennächten kommen (/22/). Aus diesem Grund wird der im Rahmen dieses Projektes aufgespannte Zustands- oder Ereignisraum auf der Temperatur-Achse durch die 15°C einerseits und die höchsten im Datensatz auftretende Temperatur von 35°C andererseits begrenzt.

Oberhalb einer Windgeschwindigkeit in der Zielregion von 3 m/s werden die hier zu betrachtenden belüftungsrelevanten Kaltluftströmungssysteme von der übergeordneten Grundströmung so dominiert, dass sie nur noch für sehr geringe Modifikationen des Windfeldes sorgen können und keine eigenständige Strukturen mehr herausbilden (DWD). Aus diesem Grund wird der im Rahmen dieses Projektes aufgespannte Zustands- oder Ereignisraum auf der Windgeschwindigkeits-Achse durch die übergeordnete Windgeschwindigkeit Null (reines Kaltluftströmungssystem, übergeordnete Strömung abgekoppelt) einerseits und einer Grenzgeschwindigkeit von 3 m/s andererseits begrenzt.

Das korrespondierende Spektrum der relativen Feuchte (wichtiger Faktor bei der Wärmeempfindung) reicht für diese Situationen in der Zielregion von 31% Luftfeuchte bis 100% Luftfeuchte.

Die folgende Abb. 7-8 zeigt den sich für die hier zu untersuchenden belüftungsrelevanten Kaltluftströmungen in der Klimaprojektion 2050 ergebenden Zustandsraum.

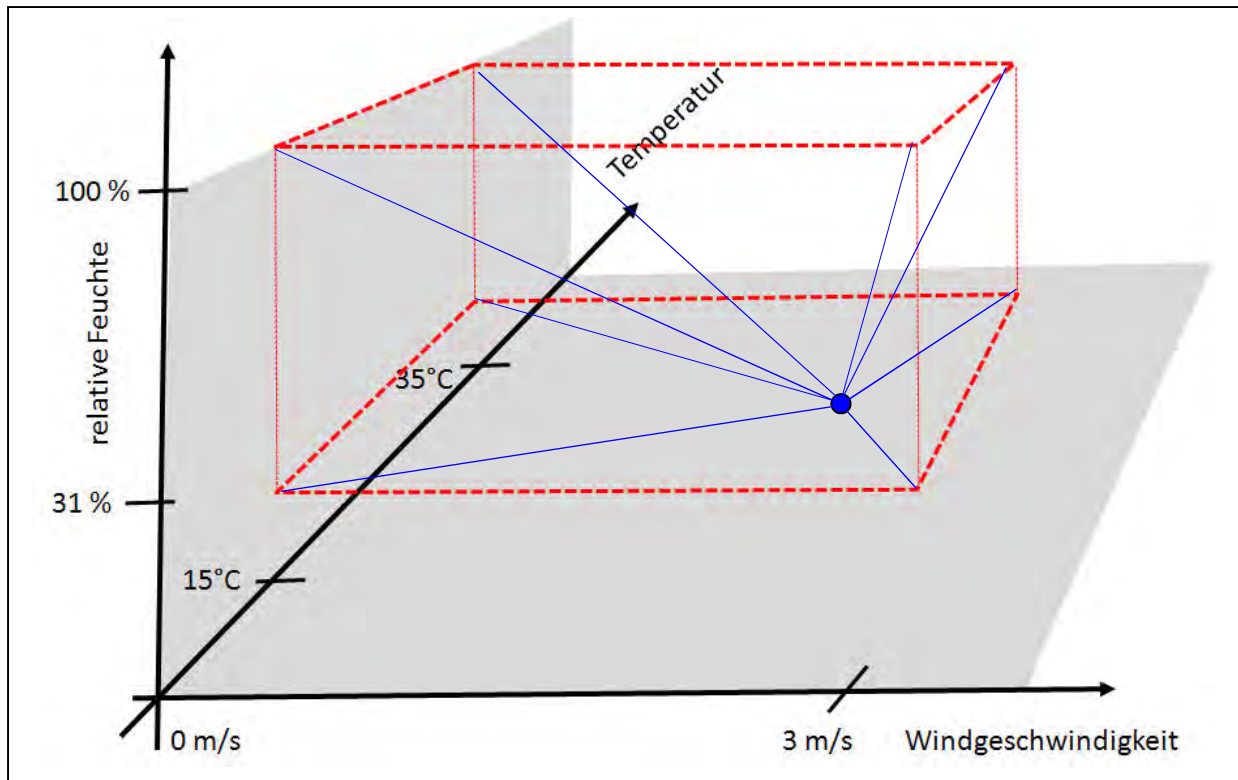


Abb. 7-8: Skizze des Zustands- oder Ereignisraumes (Quader-Methode, DWD) für die vorliegende Untersuchung. Erläuterung s. Text.

Die Quadermethode sieht vor, dass für die 8 Eckpunkte hoch auflösende FITNAH-Simulationen durchgeführt werden. Auf diese Weise wird ein individueller Zustandsraum für jede 50 m x 50 m große FITNAH-Rechenfläche ermittelt.

Bei der Quader-Methode nutzt man nun eine Verfahrensweise der gewichteten 3D-Interpolation.

Die Auswertung der Jahreszeitreihe der Klimaprojektion 2050 führt für jeden betrachteten Termin zu einem (blauen) Punkt im roten Quader des Zustandsraumes (Abb. 7-8).

Von diesem Punkt lassen sich rechnerisch Distanzen zu jedem der 8 Eckpunkte bestimmen (blaue Linien in Abb. 7-8). Diese Distanzen bestimmen zu jedem Zeitpunkt 8 Faktoren, die das Gewicht jedes der 8 Eckpunkte für den Zielpunkt bestimmen.

Zur Auswertung im hoch auflösenden FITNAH-Gitter wird nun für jeden betrachteten Termin und für jede 50 m x 50 m große FITNAH-Rechenfläche der terminbezogene Zielwert bestimmt, in dem die Ergebnisse der 8 Simulationen des Quaders für diese Rechenfläche mit den zuvor bestimmten Wichtungsfaktoren gewichtet gemittelt werden.

7.3 FITNAH-Modellgebiet für die Klimaprojektion 2050 Pforzheim

Auf Basis der Vor-Untersuchung (Abschnitt 2.5) wurde das FITNAH-Modellgebiet für die 8 Simulationen (Quader-Ecken) der Klimaprojektion 2050 für den Raum Pforzheim als ein Rechteck mit 16 km Erstreckung in West-Ost-Richtung und 15 km Ausdehnung in Süd-Nord-Richtung festgelegt (Abb. 7-9). Die Auflösung beträgt 50 m, das Gebiet besteht somit aus $320 \times 300 = 96.000$ horizontalen Rechenflächen.

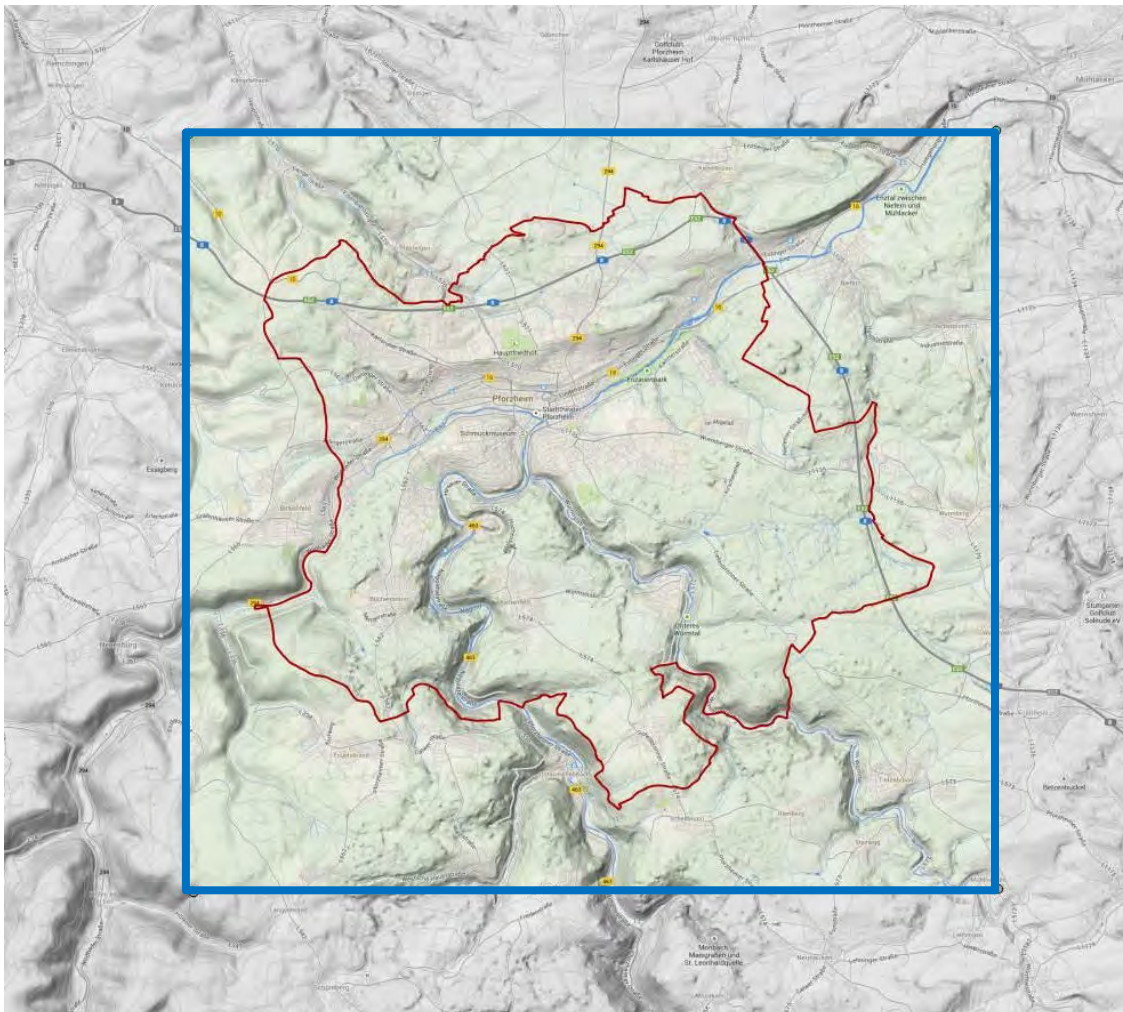


Abb. 7-9: FITNAH-Modellgebiet für die Klimaprojektion 2050 Pforzheim.

7.4 Ergebnisse

Global und auch regional wird derzeit ein Klimawandel erwartet. Veränderungen der Klimaelemente wirken auf Natur und Umwelt, aber auch mittel- und unmittelbar auf die Menschen ein.

Die Ergebnisse regionaler Klimamodelle weisen auf eine Zunahme der Wärmebelastung hin. Mit Hilfe des Modells FITNAH wurden die Ergebnisse der regionalen Ebene bis hinunter auf die lokalen Gegebenheiten angepasst, so dass die unterschiedliche Einflüsse des Klimawandels auf Gebiete eher ländlicher und eher urbaner Prägung aufgezeigt werden können.

Die folgenden Ergebnisse für die Entwicklung 2050 beziehen sich auf den Zeitraum der Dekade 2046 bis 2055. Sie zeigen anhand der die Wärmebelastung beschreibenden Klimaelemente die zu erwartende Entwicklung.

7.4.1 Häufigkeit von Sommertagen

Tage, an denen eine Höchsttemperatur von 25°C erreicht oder überschritten wird, werden in der Meteorologie als Sommertag bezeichnet.

Nach der Klimaprojektion mit FITNAH tritt eine räumliche Differenzierung im Auftreten von Sommertagen im Untersuchungsgebiet deutlich hervor. Hierbei spielen vor allem zwei Faktoren eine Rolle:

Wichtiger natürlicher Faktor ist die Lage eines Gebiets. Tallagen weisen gegenüber Hochflächen i.A. verringerte mittlere Windgeschwindigkeiten und einen geringeren Luftaustausch mit der Umgebung auf. Auch nach Süden hin orientierte Talhänge neigen zu höheren Temperaturen, da sie eine höhere Einstrahlung empfangen als waagrechte Flächen. Dämpfende Effekte durch natürliche Wasserflächen spielen aufgrund ihrer geringen Größe in der Region nur eine untergeordnete, sehr lokale Rolle.

Weiterer maßgebender Faktor für die Temperaturverteilung ist die Landnutzung. Land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen unterscheiden sich deutlich von bebauten Arealen. Dieser Unterschied entsteht durch die verschiedene Energiebilanz der Erdoberfläche. Diese wird unter anderem gesteuert von der Versiegelung, die wiederum die Albedo und die Wasserverfügbarkeit bestimmen. Auch anthropogene Wärmefreisetzungen und der Luftaustausch unterscheiden sich.

In Abb. 7-10 sind die Ergebnisse des Zeitraums 2001 bis 2010 und 2046 bis 2055 dargestellt. Es wird deutlich, dass vor allem in der Innenstadt von Pforzheim die Kombination aus Tallage und Bebauung zu einer hohen Anzahl von Sommertagen führt. Diese liegt bei einem Anteil von etwa 50 Tagen pro Jahr. Für die Dekade 2050 wird eine Zunahme gegenüber den heutigen Verhältnissen prognostiziert. In bebauten Gebieten liegt diese Zunahme bei im Mittel 8 bis 9 Tagen. Als Maximalwerte werden 65 Tage bestimmt. Dies liegt in der Größenordnung des heutigen Klimas in der Oberrheinebene, wo z.B. Karlsruhe ein langjähriges Mittel von 68 Sommertagen aufweist.

Allgemein weisen dicht überbaute Siedlungsflächen eine höhere Anzahl von Temperaturen über 25°C auf als locker bebaute Areale. Allerdings sind kleinräumigere Siedlungsflächen wie kleine Ortschaften oder Dörfer, die i.a. kleinere Baukörper und höhere Vegetationsanteile in der Einzel- und Reihenhausbebauung aufweisen, absolut gesehen geringer von der Zunahme betroffen als größere zusammenhängende Strukturen.

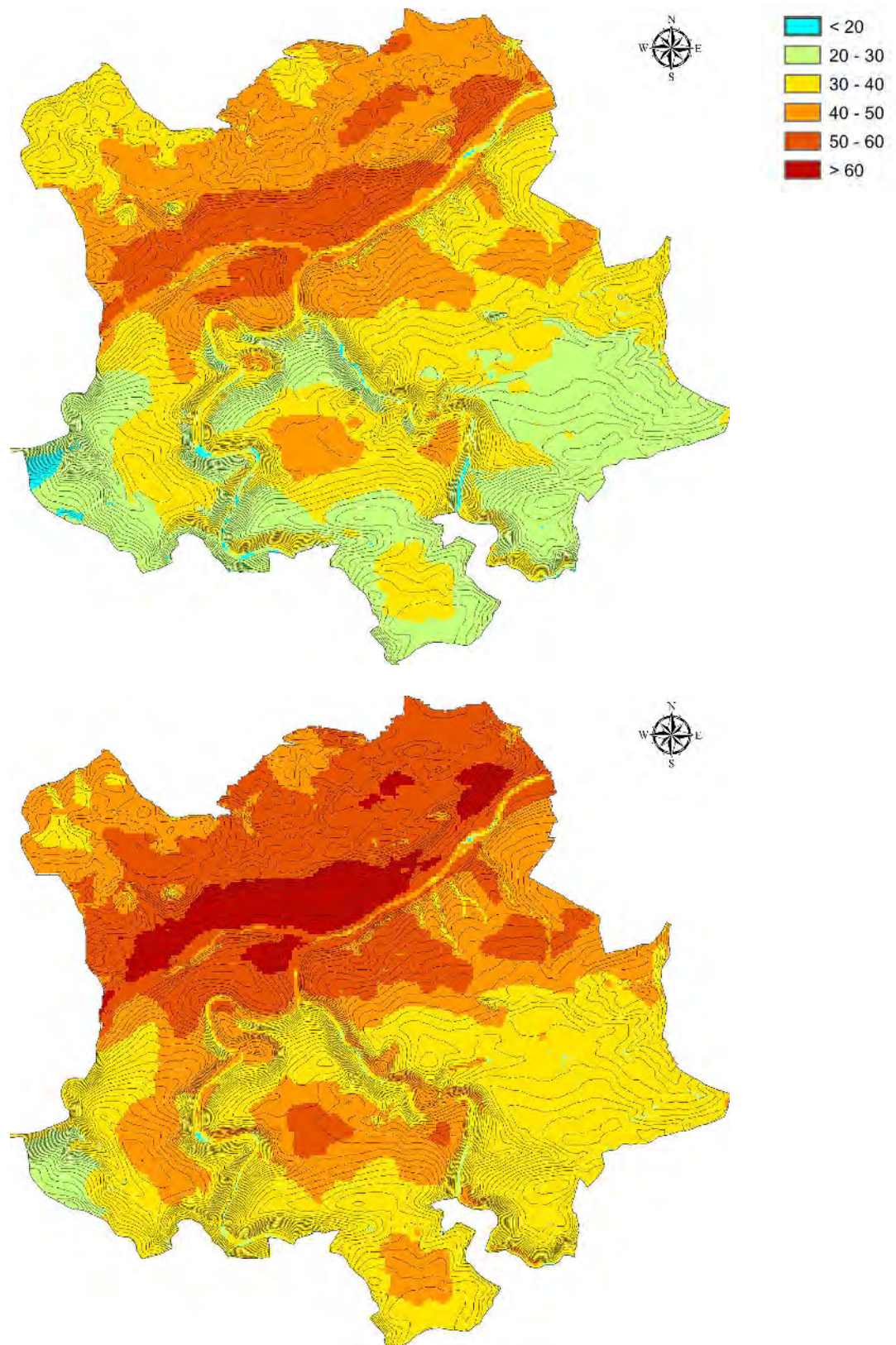


Abb. 7-10: Verteilung der Anzahl von Sommertagen in der Dekade 2001 bis 2010 (oben) und 2046 bis 2055 (unten) für das Stadtgebiet Pforzheim.

7.4.2 Häufigkeit von heißen Tagen

Tage, an den die Temperaturen über 30 °C steigen, werden heiße Tage (früher auch Tropentage) genannt. Heiße Tage stellen eine besondere physiologische Belastung der Bevölkerung dar.

Ihre Verteilung wird durch die gleichen Faktoren wie bei den Sommertagen gesteuert. Wie Abb. 7-11 zeigt, ist das Auftreten heißer Tage stark an bebaute Areale geknüpft. In der Innenstadt von Pforzheim liegt die Häufigkeit bei 10 bis 12 Tagen, in höher gelegenen Ortsteilen bei 6 bis 10 Tagen im Jahr. In Waldgebieten oder über bewachsenen Freiflächen treten sie dagegen relativ selten auf. Die Vegetation dämpft hier die Temperaturzunahme während des Tages deutlich ab. Insbesondere die Randgebiete von bebauten Siedlungsbereichen profitieren von dieser Temperaturdämpfung.

In der Zukunft ist mit einer Zunahme des Auftretens heißer Tage zu rechnen. Die mit dem Modell FITNAH modellierten Unterschiede in den Nutzungsstrukturen bilden sich deutlich in den Ergebnissen ab. Im gesamten Stadtgebiet kommt es zu einer Zunahme der zu erwartenden Hitzetage. Insbesondere der dicht bebaute Stadtkern und die im Tal gelegenen bebauten Gebiete sind hierbei betroffen. Die prognostizierten Spitzenwerte liegen bei 18 heißen Tagen pro Jahr (zum Vergleich: langjähriges Mittel Karlsruhe 1981-2010 ca. 21 Tage). Mit einer erheblichen Zunahme der Wärmebelastung der Bevölkerung ist daher zu rechnen.

Im südlichen Teil des Stadtgebiets, im dem die zusammenhängenden bebauten Gebiete deutlich kleiner sind, nimmt die Häufigkeit zwar ebenfalls zu, die absoluten Werte bleiben aber unterhalb des heutigen Auftretens im Stadtzentrum.

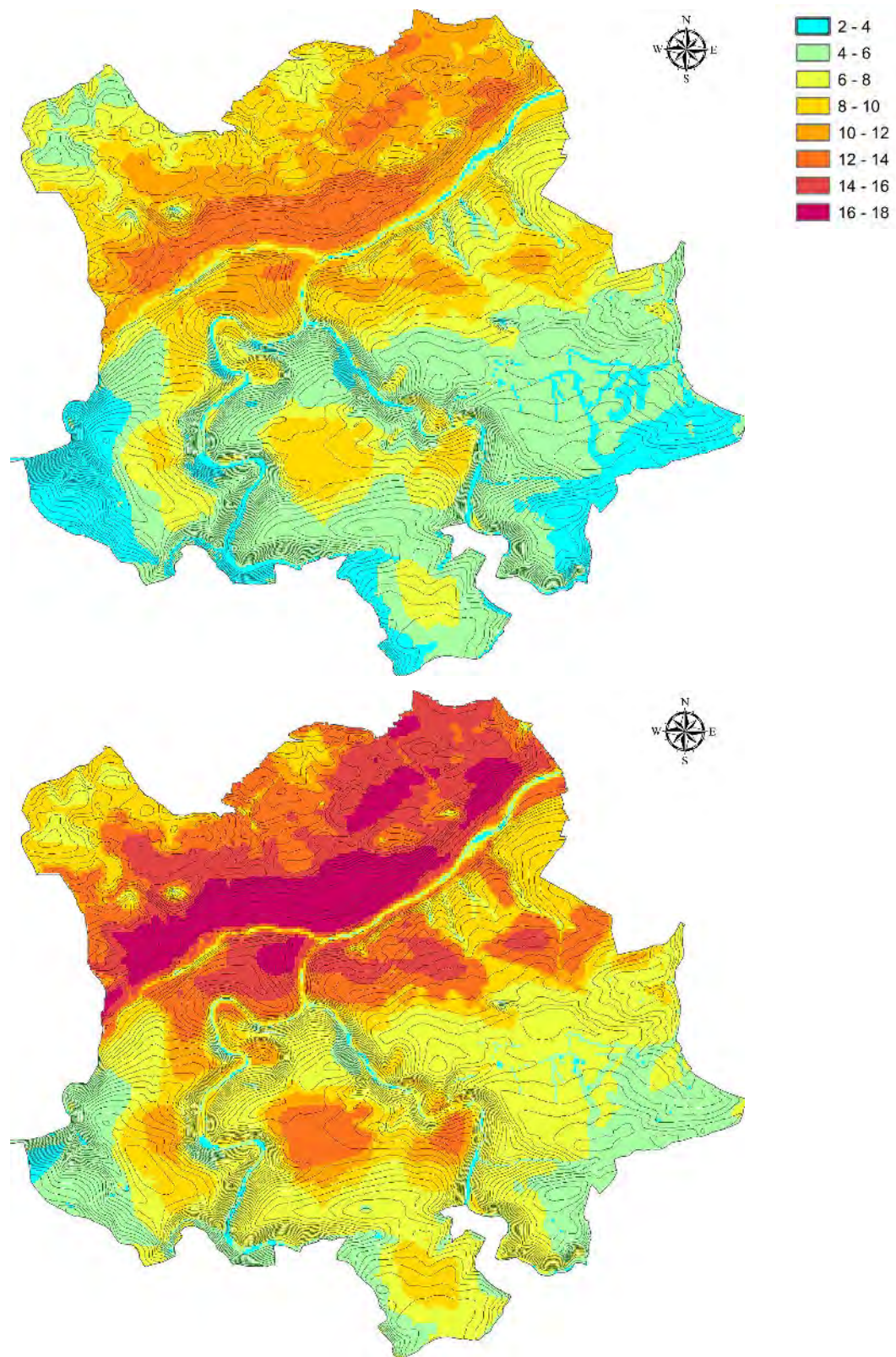


Abb. 7-11: Verteilung der Anzahl von heißen Tagen in der Dekade 2001 bis 2010 (oben) und 2046 bis 2055 (unten) für das Stadtgebiet Pforzheim.

7.4.3 Häufigkeit von Tropennächten

In einer Tropennacht fallen die Temperaturen im Minimum nicht unter 20°C. Die nächtliche Erholungsphase und damit das Wohlbefinden werden bei hohen Temperaturen beeinträchtigt.

Tropennächte treten auch in Süddeutschland relativ selten auf. Auch unterscheidet sich die Häufigkeit ihres Auftretens stark von Jahr zu Jahr. Zur besseren Übersichtlichkeit wird daher in den folgenden Abbildungen die Häufigkeit von Tropennächten nur in bebauten Arealen dargestellt.

Im Stadtgebiet liegt die mittlere Häufigkeit von Tropennächten bei etwa 1 bis 2 pro Jahr. Die Verteilung ist eng verknüpft mit den lokalen Kaltluftsystemen in der Region, die ja insbesondere in der Nacht eine Frischluftzufuhr ermöglichen können oder auch nicht.

In der Zukunft ist mit einer Zunahme des Auftretens von Tropennächten auf 2 bis 3 pro Jahr zu rechnen. Aufgrund der hohen Variabilität dieser Größe reicht der Schwankungsbereich auch zwischen 2046 und 2055 von Jahren ohne eine Tropennacht bis zu Jahren mit mehreren warmen Nächten. Auch wenn der Mittelwert der Häufigkeit also nur wenig zunimmt, kann die Belastung in einzelnen Jahre hohe Werte erreichen.

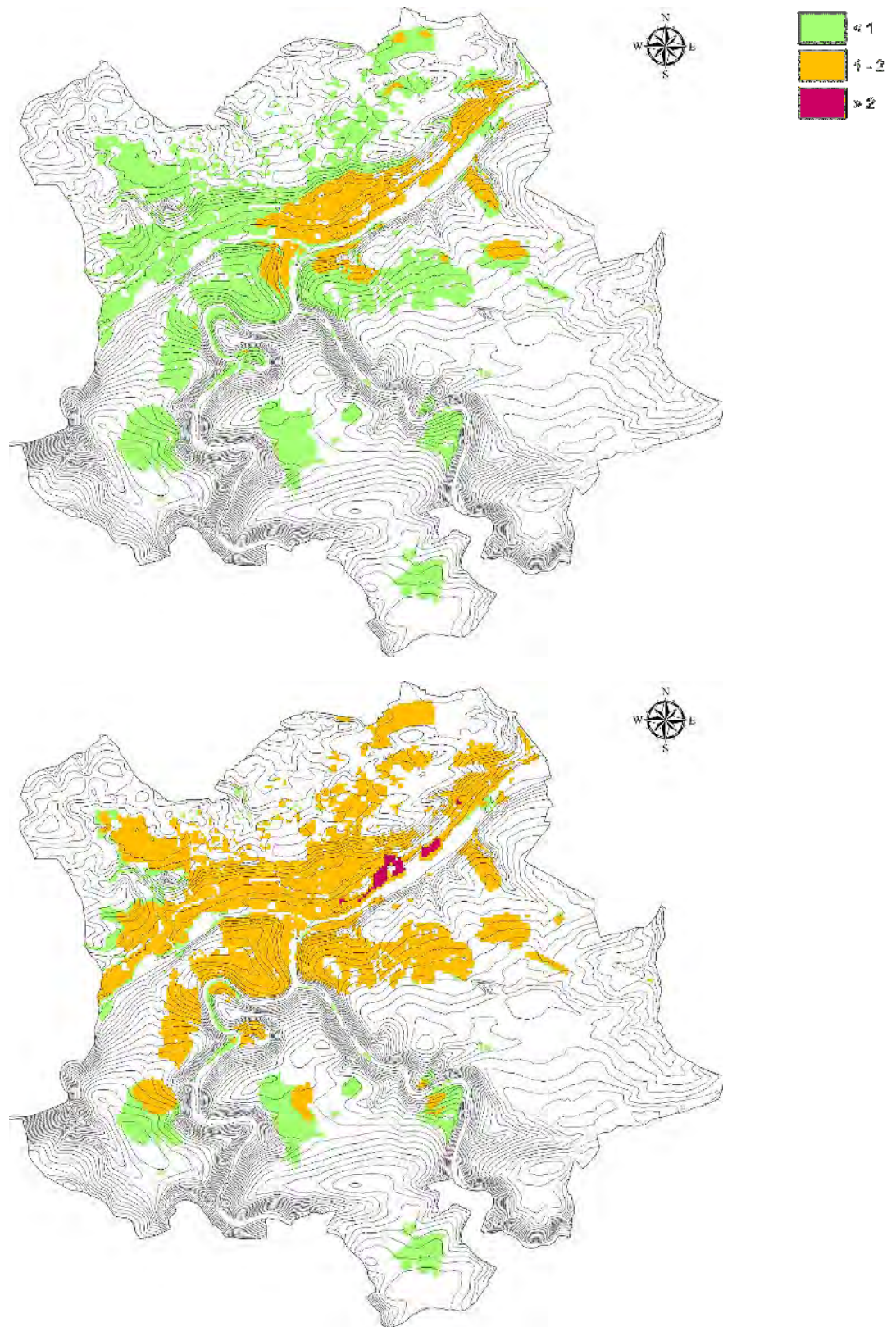


Abb. 7-12: Verteilung der Anzahl von Tropennächten in der Dekade 2001 bis 2010 (oben) und 2046 bis 2055 (unten) für das Stadtgebiet Pforzheim.

8 Grünflächen

Ein „ideales Stadtklima“ bietet den Stadtbewohnern eine möglichst große Vielfalt an städtischen Mikroklimaten unter Vermeidung von Extremen (/6/). Grünflächen bieten neben einer Reihe anderer Maßnahmen wie Fassadenbegrünung oder Straßenbäumen die Möglichkeit, das Stadtklima positiv zu beeinflussen. Vegetationsbestandene Flächen verändern die Strahlungs- und Wärmebilanz der Erdoberfläche (Kap. 2) gegenüber der bebauten Umgebung. Insbesondere Bäume und Sträucher sorgen tagsüber bei Sonneneinstrahlung für Schatten und reduzieren den fühlbaren Wärmestrom, welcher die Luft primär erwärmt. Auch die Speicherung von Wärme ist gegenüber der Bebauung deutlich reduziert. Über offenen, grasbestandenen Parkflächen kann nachts eine effektive Abkühlung stattfinden. Da Grünflächen i.A. eine geringere Temperatur als die umgebende Bebauung aufweisen, können daraus Ausgleichsströmungen entstehen, die sog. Parkwinde. Derartige Phänomene stellen sich allerdings erst bei sehr ausgedehnten Flächen ein.

Neben diesen klimatischen Effekten trägt die Vegetation auch zur Lufthygiene bei. Reduzierte Windgeschwindigkeiten in Verbindung mit großen Blattoberflächen bewirken eine Filterung von luftgetragenen Stäuben und verkehrsbedingten Schadstoffen.

Im Stadtgebiet von Pforzheim gibt es verschiedene Grünflächen wie Parks oder Friedhöfe (Abb. 8-1). Sie unterscheiden sich durch ihre Lage, Größe und Bepflanzung (Tab. 8-1). Diese Eigenschaften sind maßgeblich für ihre klimatischen Eigenschaften auf der Parkfläche selbst und vor allem für ihre Umgebung. Daneben hat auch die direkt an die Grünflächen anschließende Bebauungsform und -dichte maßgeblichen Einfluss auf die Eindringtiefe positiver Wirkungen.



Abb. 8-1: Grünflächen im Stadtgebiet Pforzheim.

Tab. 8-1: Übersicht über die Grünflächen im Stadtgebiet Pforzheim.

Name	Typ	Fläche ha
1 Stadtpark	Parkanlage	4,7
2 Engelpark	Parkanlage	66,2
3 Kallherdpark	Parkanlage	2,5
4 Bencklerpark	Parkanlage	1,5
5 Oststadtpark-Alten-Friedhof	Parkanlage	6,1
6 Gemäldepark	Parkanlage	4,2
7 Weststadtpark	Parkanlage	1,7
8 Markgrafenanlage	Westenbasschenpark	0,7
9 Kornatolsitz	Westenbasschenpark	0,3
10 Pfälzerplatz	Westenbasschenpark	0,2
11 Arlingsschule	Westenbasschenpark	0,4
12 Hauptfriedhof	Friedhof	36,5
13 Friedhof Cöll-Weidenstein	Friedhof	4,2
14 Friedhof Brötzingen	Friedhof	5,6
15 Wallberg	Stadtrandgrünanlage	11,9
16 Haselanlage	Stadtrandgrünanlage	2,3
17 Markgrafenanlage	Stadtrandgrünanlage	6,6
18 Wildergrundpark	Parkanlage, geplant	0,6

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Grünflächen der Stadt Pforzheim, die klimatischen Bedingungen und ihre Eigenschaften in Bezug auf ihre Umgebung eingegangen.

8.1 Parkanlagen

8.1.1 Enzaupark

Der Enzaupark ist die mit Abstand größte Grünfläche im Stadtgebiet. Hervorgegangen aus der Landesgartenschau 1992, ist der Park ein beliebtes Naherholungsgebiet mit mehreren Spielplätzen und Sportmöglichkeiten. Der Park zieht sich über etwa 1,4 km entlang der Enz, ist aber nur 200 m bis 350 m breit. Als eigenständiges Kaltluftproduktionsgebiet ist er aufgrund seiner Lage am talauswärtigen Standrand sowie der geringen Geländeneigung und des hohen Gehölzanteils nur von untergeordneter Bedeutung. Der Park ermöglicht jedoch der Strömung aus den südlichen Talhängen (z.B. aus den Bereichen Buckenberg, Mäuerach, Kanzlerklinge siehe Kap. 5.2.1) teilweise bis über die Enz hinaus in die dortigen Siedlungsgebiete zu gelangen (Abb. 8-2). Davon können die an den Park grenzenden Teile der Oststadt und des westlichen Eutingens profitieren. Die Kaltluft überströmt dabei die Kanzlerstraße. Bei hohem Verkehrsaufkommen wäre hier eine Anreicherung der Luft mit verkehrsbedingten Schadstoffen möglich.

Durch die große Ausdehnung, den Kühlungseffekt der Enz und den beständigen Kaltluftzufluss ist der Enzaupark deutlich kühler als die umgebende Bebauung. Dies zeigt auch der während der Messnacht aufgenommene Temperaturverlauf (Abb. 8-3). Im Vergleich zur Innenstadt liegen die Temperaturen im westlichen Teil im Bereich des Wasserwerks 2 K bis 4 K, im östlichen Teil im Bereich der Enzaue sogar 5 K bis 7 K niedriger. Die mehrheitlich offene Wiesenfläche kann in Verbindung mit dem kräftigen Kaltluftstrom aus dem Mäuerachtal noch stärker abkühlen. In der zweiten Nachthälfte schwächt sich der Zufluss an Kaltluft von den Talhängen - bis auf das Mäuerachtal - ab (Kap. 5.2.1). Dies wird an der sich abschwächenden Temperaturdifferenz zur Stadt deutlich.

Temperaturdifferenzen stellen einen Antrieb für lokale Ausgleichsströmungen dar. Direkt an den Park angrenzende Wohngebiete können daher auch in den Bereichen, die nicht direkt im Bereich der Kaltluftströme aus den Talhängen des Enztals liegen, entlastet werden.

Neben den günstigen Eigenschaften für nächtliche Belastungssituationen ist der Park aufgrund seiner Ausdehnung, der bereits bestehenden Infrastruktur und der Klimavielfalt von großer Bedeutung für die Naherholung der Bevölkerung. Insbesondere an Tagen mit hoher Wärmebelastung kommt dem Park eine hohe Ausgleichsfunktion zu.

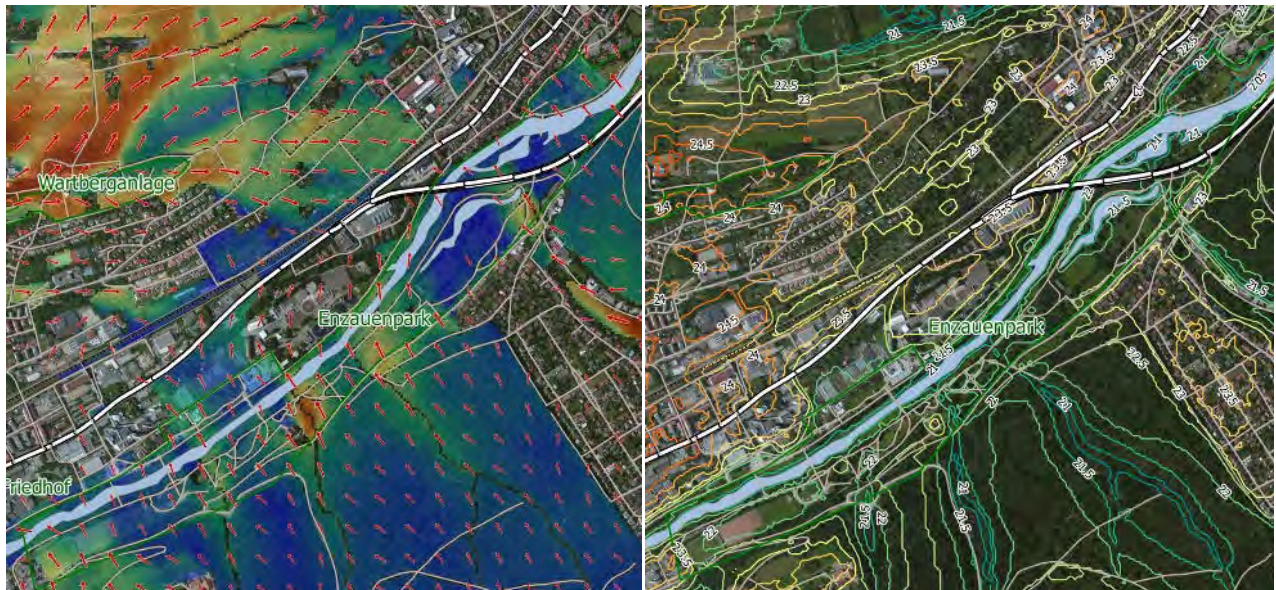


Abb. 8-2: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich des Enzaueparks zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot).

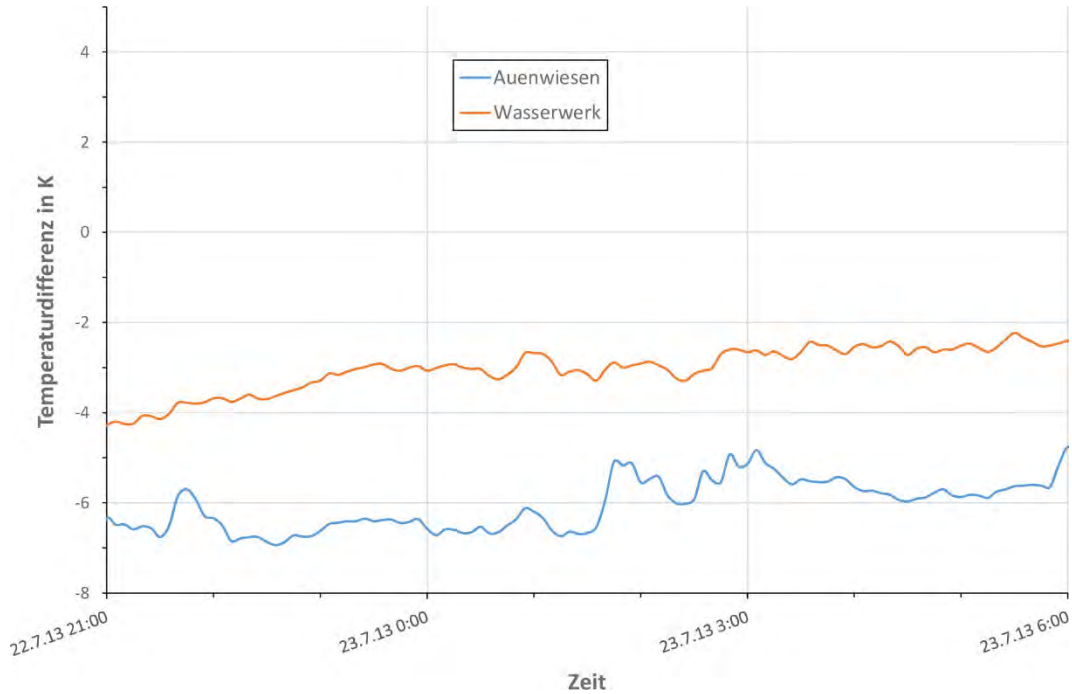


Abb. 8-3: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen im Enzauepark und der Innenstadt während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang.

8.1.2 Stadtgarten und Kallhardtanlage

Stadtgarten und Kallhardtanlage liegen im unteren Nagoldtal, direkt hinter dem Zusammenfluss mit der Würm. Obwohl das Tal hier schmal ist, bildet sich bis in Bodennähe ein kräftiger Kaltluftstrom aus (Abb. 8-4), der eine wesentliche Belüftungsfunktion für die nördlich gelegenen Bereiche bis hin zur Innenstadt aufweist (Kap. 5.2.1). Wie die Strömungspfeile verdeutlichen, kann sich eine starke Strömung nur im Bereich der Enz und der Grünanlagen einstellen. In der Wohnbebauung, insbesondere bei geschlossener Blockrandbebauung, kommt die Strömung sehr schnell zum Erliegen. Diese Durchlüftungsstruktur findet sich auch im Temperaturfeld wieder. Der Stadtgarten und die Kallhardtanlage sind im Vergleich zur städtischen Bebauung deutlich kühler (Abb. 8-4, Abb. 8-5). Im südlichen Teil der Bleichstraße kann die Strömung noch eindringen, dementsprechend sind die Temperaturen hier geringer als weiter nördlich. Auch die Temperaturbegehung bestätigt diesen Sachverhalt. Zwischen der Wohnbebauung westlich der Grünflächen herrschen annähernd die gleichen Temperaturen wie im südlichen Stadtgarten. In seinem nördlichen Teil schwächt sich die Strömung ab, die Temperatur steigt zu seinem Rand hin kontinuierlich an. Der Bereich der Wohnbebauung hier ist signifikant wärmer als am Beginn der Begehung in der Scheuernbergstraße.

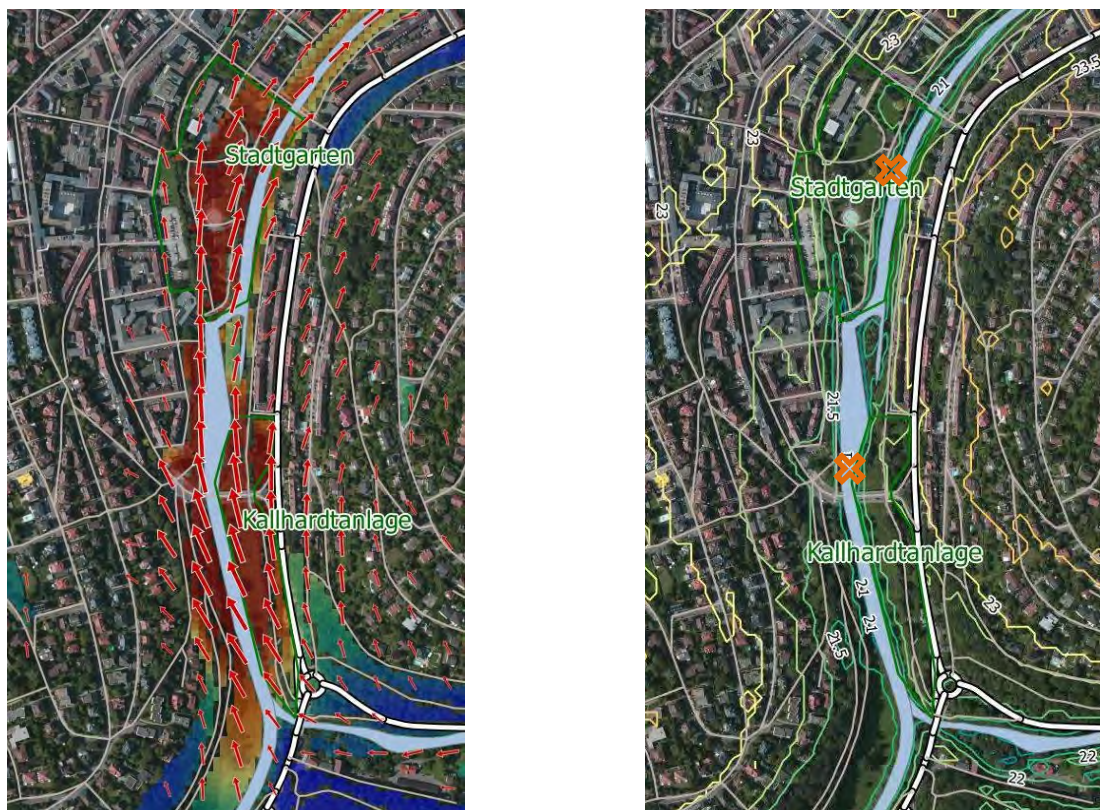


Abb. 8-4: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich des Stadtgartens und der Kallhardtanlage zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-5.

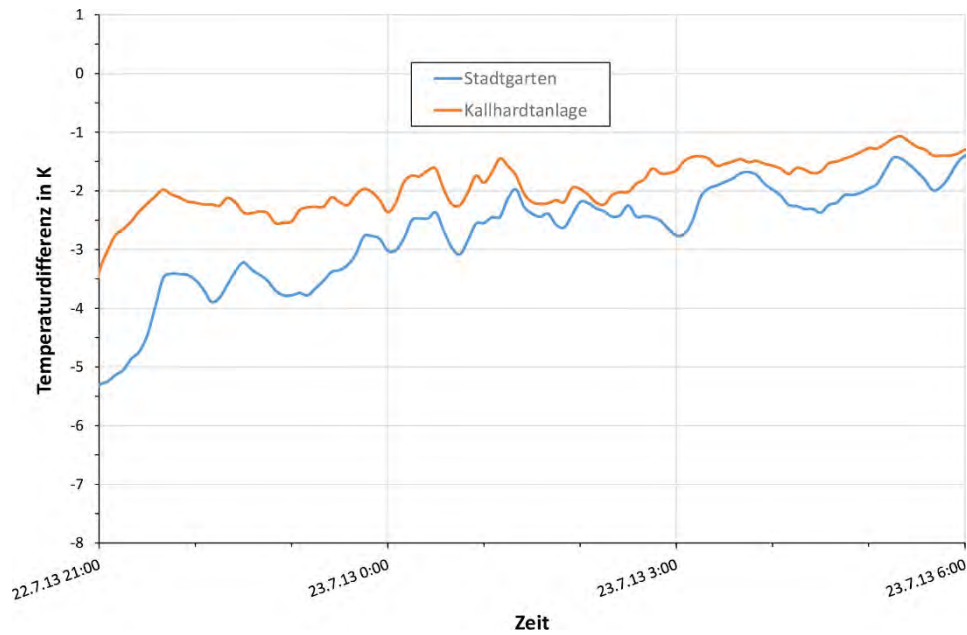


Abb. 8-5: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen im Stadtgarten bzw. Kallhardtanlage und der Innenstadt während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang. Die niedrigere gemessene Temperatur im Stadtgarten ist im geringeren Abstand des Sensors zur Wasserfläche der Enz begründet.

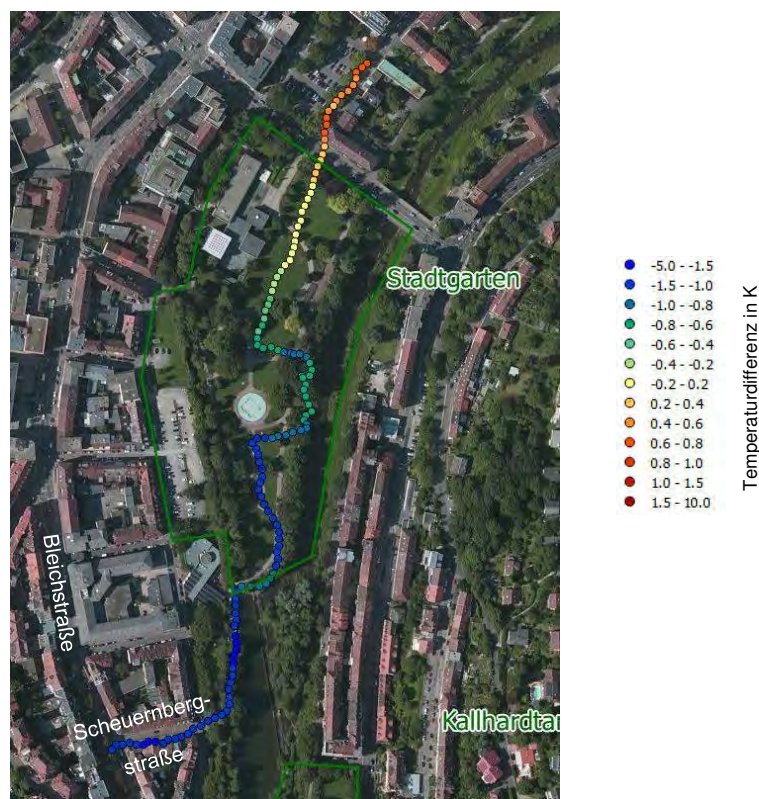


Abb. 8-6: Temperaturbegehung des Stadtgartens und seines Umfelds in der Messnacht. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zum nördlichen Parkbereich.

In klimatischer Hinsicht weisen beide Parkanlagen somit eine hohe Relevanz auf. Sie begünstigen mit ihrer Struktur der Kaltluftströmung ein Eindringen bis weit in das Stadtgebiet hinein. Direkt angrenzende bebaute Flächen sind kühler als z.B. die Innenstadt und damit weniger klimatisch belastet.

8.1.3 Oststadtpark – Alter Friedhof

Der Oststadtpark ist die zentrale Grünfläche im Osten der Stadt. Im Vergleich mit den anderen Grünflächen liegt seine Größe von rund 6 ha im oberen Mittelfeld, er ist aber gleichzeitig der größte vollständig von Bebauung umgebene Park. Die Bundesstraße B10 teilt die Grünanlage in die Bereiche Alter Friedhof und Oststadtpark. Der östliche Teil des Alten Friedhofs (Bereich des Bebauungsplanes "Ehemalige Stadtgärtnerei") besteht weitgehend aus Rasenflächen, während die westliche Hälfte wie auch der größte Teil des Oststadtparks von Bäumen bestanden ist. Darüber hinaus befindet sich auf dem Gelände eine Kindertagesstätte.

Da der Park vollständig von Bebauung umgeben ist, besteht keine direkte Anbindung an die Kaltluftsysteme des Umlands. Da aber der Stadtbereich im Überdach-Niveau während der Nacht durchströmt wird, kann diese Strömung besonders auf den Freiflächen im östlichen Teil Bodennähe erreichen (Abb. 8-7). Dies begünstigt die nächtliche Abkühlung in diesem Bereich, so dass ein leichtes Temperaturgefälle zur umgebenden Wohnbebauung entsteht.



Abb. 8-7: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich des Oststadtparks – Alter Friedhof zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot).

Die Messungen zeigen, dass dieser Temperaturunterschied vor allem in der ersten Nachthälfte unter Umständen noch stärker ausgeprägt sein kann als vom Modell berechnet (Abb. 8-8). Wie erwartet sind die Temperaturen auf den Rasenflächen etwa 1 K niedriger als im Baumbestand. Dort ist sowohl die Durchlüftung als auch die Abstrahlung durch die Baumkronen eingeschränkt, so dass die Abkühlung weniger effektiv stattfinden kann.

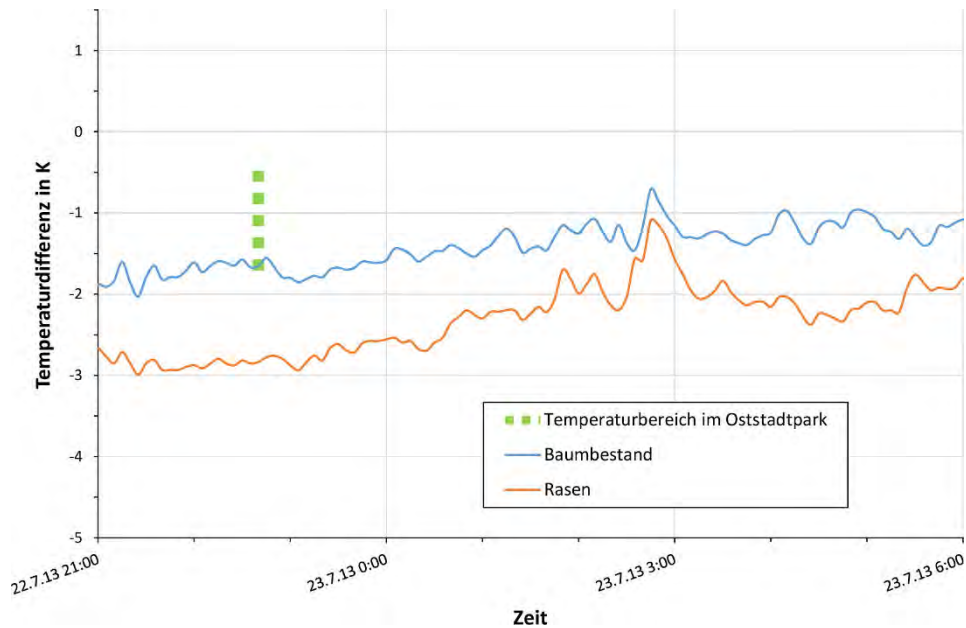


Abb. 8-8: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen Alter Friedhof im Bereich des Baumbestands bzw. der Rasenfläche und der östlichen Wohnbebauung während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang. Die grüne Linie kennzeichnet den während der Begehung aufgezeichneten Temperaturbereich im Oststadtpark (Abb. 8-9).

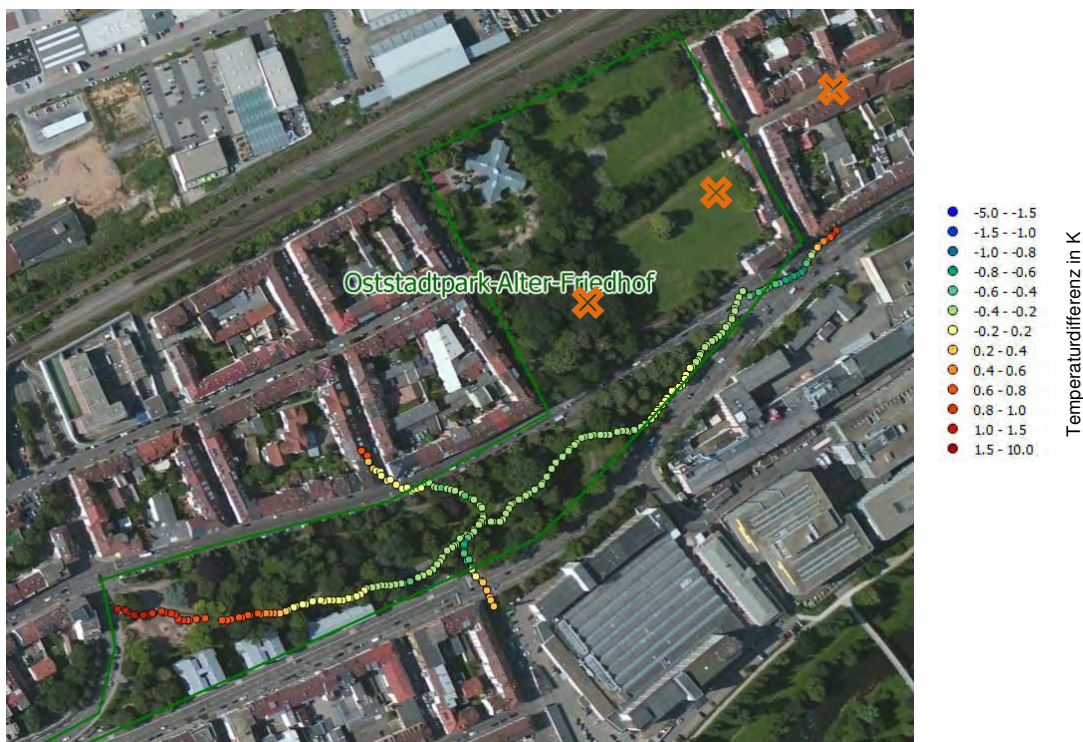


Abb. 8-9: Temperaturbegehung des Oststadtparks und seines Umfelds in der Messnacht. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zum Parkrand. Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-8.

Im Oststadtpark, der weitgehend von Bäumen bestanden ist, liegen die Temperaturen im Parkinnern auf ähnlichem Niveau wie im Bereich Alter Friedhof (Abb. 8-9). Zu den Rändern hin nimmt die Temperatur aber schnell zu. Vor allem im westlichsten Teil, der von der nahegelegenen Bebauung von der Überdach-Belüftung abgeschnitten ist, liegen die Temperaturen auf ähnlichem Niveau wie in der Bebauung.

Die Temperaturmessungen bestätigen, dass die Reichweite positiver klimatischer Einflüsse des Parks in die Wohnbebauung weitestgehend auf die erste angrenzende Häuserzeile beschränkt ist. Im vorliegenden Fall wird dieser Effekt durch die geschlossene Blockrandbebauung zum Park hin verstärkt, die einen, durch die vorhandenen Temperaturunterschiede durchaus möglichen, lokalen Luftaustausch stark einschränken. Eine Verbesserung könnte durch eine offenere Baustruktur erreicht werden.

Der Oststadtpark-Alter Friedhof liefert auch einen wichtigen Beitrag zur Klimavielfalt. Die angrenzenden Wohnquartiere weisen ein ungünstiges Bioklima auf, der Park stellt somit einen wertvollen Naherholungsbereich dar. Eine Bepflanzung mit solitären schattenspendenden Großbäumen kann diesen Effekt noch verstärken.

Falls im Zuge zukünftiger Entwicklungen möglich, wäre eine Anbindung an den nahe gelegenen Enzaupark (Kanzlersteg) sinnvoll, um einen größeren, vernetzten Erholungsraum zu schaffen. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Vernetzung von sonst solitären Parkflächen die Klimawirkung des einzelnen Parkareals gesteigert werden kann.

8.1.4 Parks mittlerer Größe

Im Stadtgebiet Pforzheim liegen mehrere Grünflächen mit Größen zwischen etwa 1 ha und 4 ha. Hierzu zählen der Weststadtpark, der Benckiserpark und der Gesellsche Park. Aufgrund ihrer geringen Größe sowie dem überwiegenden Baumbestand sind keine großen Freiflächen vorhanden. Eine Anbindung an die übergeordnete Strömung oder gar eine selbstständige Kaltluftbildung sind daher nur eingeschränkt möglich.

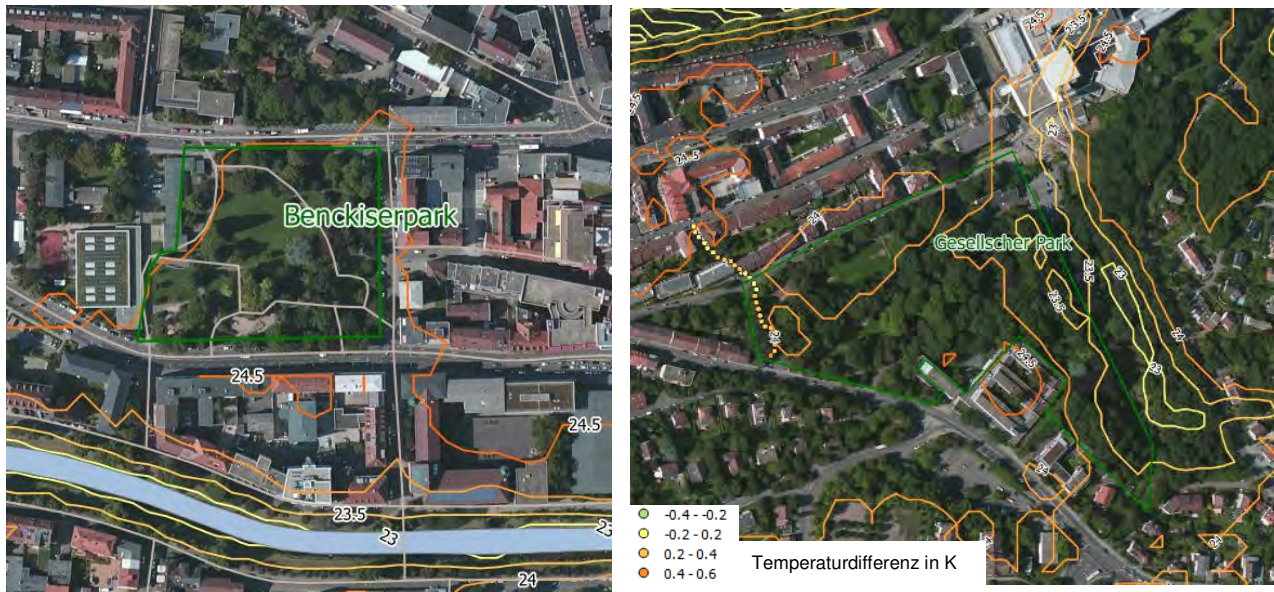


Abb. 8-10: Temperaturverhältnisse im Bereich des Benckiserparks (links) und des Gesellschen Parks (rechts) zu Beginn der Nacht. Rechts ist zusätzlich die Temperaturbegehung in der Messnacht dargestellt (Punkte). Die Farben zeigen die Temperaturdifferenz zum Parkrand an.

Durch die Lage und umgebende Bebauung des Benckiserparks fehlt eine Anbindung an Kaltluftströme aus dem Umland. Das nächtliche Temperaturniveau liegt daher nur wenig unterhalb der umgebenden Bebauung (Abb. 8-10, links). Wie die Temperaturbegehung belegt, ist die Situation am Gesellschen Park (Abb. 8-10, rechts) ähnlich. An seinem Ostrand schließt sich jedoch die Klingstraße an. Dort wurde ein relevanter Kaltluftabfluss festgestellt (Kap. 6.2.4), welcher sich auch im Temperaturfeld widerspiegelt. Der Ostteil ist somit kühler als der Westteil der Grünfläche.

Der Weststadtpark weist einen gemischten Bestand aus Bäumen und Rasenflächen auf, ist allerdings auch teilweise bebaut. Die im Modell prognostizierte Temperaturdifferenz von etwa 0,5 K ist in den realen Messungen mit 1 K bis 1,5 K stärker ausgeprägt (Abb. 8-11). Durch die lockere Randbebauung um den Park liegt die Reichweite der Abkühlung bis etwa zur zweiten Häuserreihe.

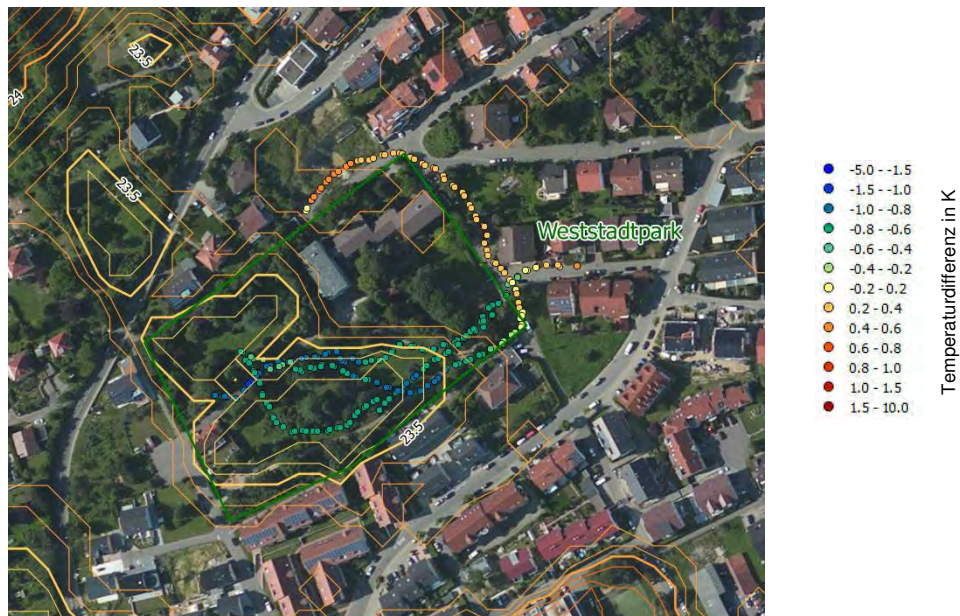


Abb. 8-11: Temperaturverhältnisse im Bereich des Weststadtarks zu Beginn der Nacht. Zusätzlich ist die Temperaturbegehung in der Messnacht dargestellt (Punkte). Die Farben zeigen die Temperaturdifferenz zum Parkrand an.

Am Stadtrand liegen die Friedhöfe Brötzingen und Dill-Weißenstein. Der Friedhof Brötzingen liegt am südlichen Hang des Kaltenbergs. Dieser Bereich zeichnet sich durch einen relevanten Kaltluftstrom aus, welcher den Stadtteil Brötzingen klimatisch entlastet. Da in diesem Bereich auch keine belasteten Verkehrswege liegen, kann hier Frischluft bis in die Bebauung eindringen. Der Friedhof weist zwar einen höheren Anteil an Bäumen im Vergleich zu den westlich gelegenen Streuobstwiesen auf, ist aber noch licht genug um den Durchfluss der Kaltluft zu erlauben.

Die gemessene Temperaturdifferenz zur Wohnbebauung ist im vorliegenden Fall positiv, die Temperaturmessung im Friedhof ergibt also etwas höhere Werte als an der Matthäus-Kirche. Dies ist vor allem durch die Positionierung des Messfühlers bedingt. Die Messfühler konnten auf den Friedhöfen, wie auch im Friedhof Dill-Weißenstein, nur an vorhandenen Bäumen angebracht werden. Unter Baumkronen ist die Abstrahlung geringer und damit die Temperatur höher, wie auch die Messung am Alten Friedhof belegt (Kap. 8.1.3). Zieht man die dortige Temperaturdifferenz von etwa 1 K zur Freifläche heran, so ergeben sich ähnliche Temperaturniveaus im Friedhof und der Wohnbebauung. Dies belegt die gute Durchlüftung in diesem Bereich von Pforzheim. Das Friedhofsgelände hat daher eine wichtige Klimafunktion für Brötzingen.

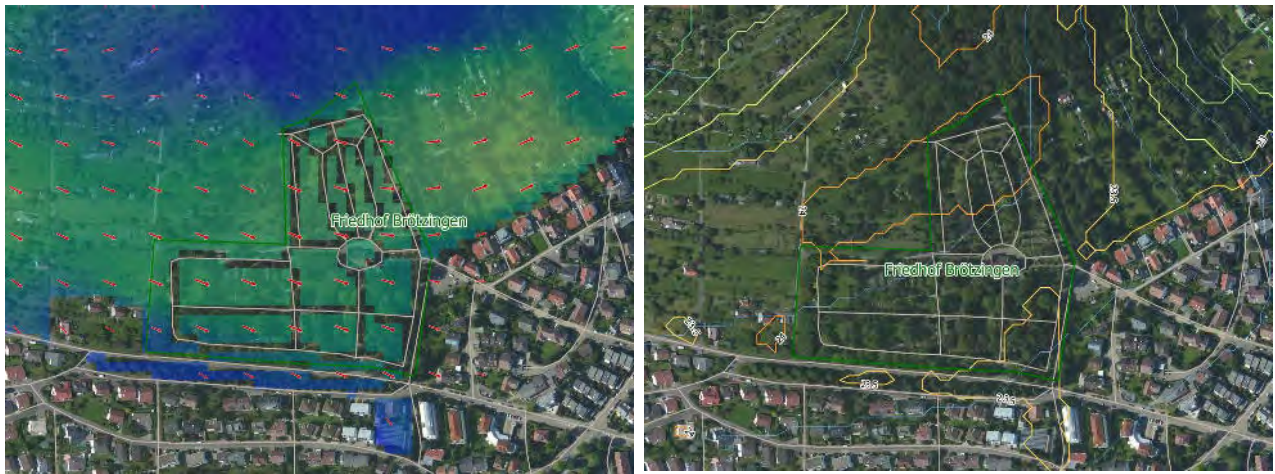


Abb. 8-12: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich des Friedhofs Brötzingen zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot).

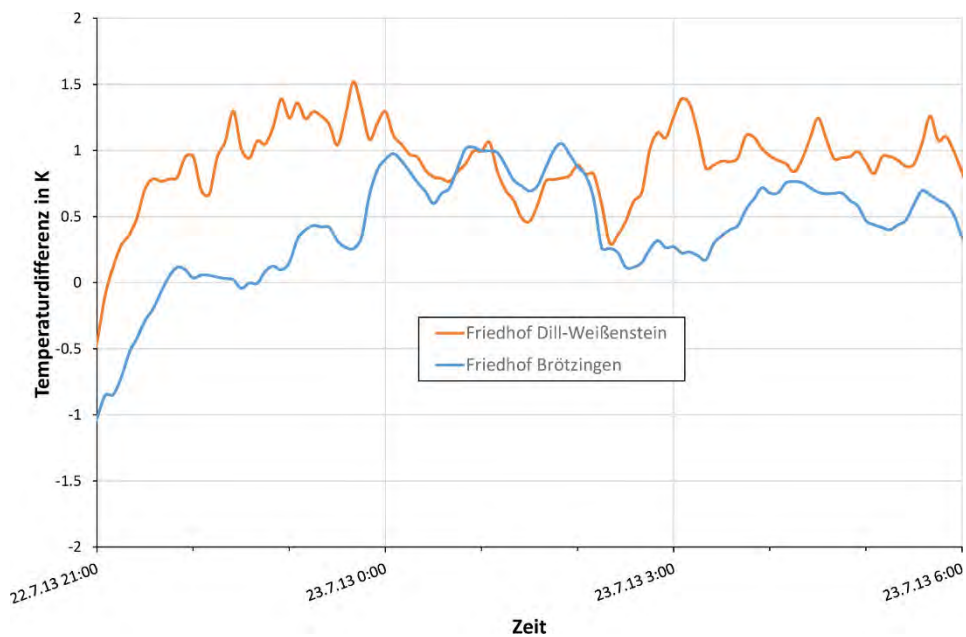


Abb. 8-13: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen Friedhof Brötzingen im Bereich des Baumbestands und Wohnbebauung in Brötzingen während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang. Die orange Linie zeigt den Unterschied zwischen dem Friedhof Dill-Weißenstein und der südlich gelegenen Wohnbebauung.



Abb. 8-14: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich des Friedhofs Dill-Weißenstein zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot).

Der Friedhof Dill-Weißenstein ist im Unterschied zu Brötzingen nicht an ein Kaltluftsystem angebunden. Die nördlich gelegenen Freiflächen produzieren Kaltluft, die in Verbindung mit der Strömung im Nagoldtal zu einer schwachen Strömung in Richtung der südlich angrenzenden Wohnbebauung führt. Der Einfluss des Friedhofs ist daher nur gering, die Temperaturen liegen – bezieht man die Lage des Sensors im Baumbestand in Betracht - auf einem ähnlichen Niveau (Abb. 8-13). Dieser Bereich von Dill-Weißenstein zeigt im Vergleich zu anderen Stadtteilen nur eine geringe bis mittlere bioklimatische Belastung, was vor allem auf den Einfluss des Nagoldtals zurückzuführen ist.

Parks der hier definierten mittleren Größe haben vor allem dann eine nennenswerte bioklimatische Wirkung, wenn sie an ein Kaltluftsystem aus dem Umland angebunden sind (Bsp. Friedhof Brötzingen). Je mehr Freiflächen sie aufweisen, desto besser erfolgt eine nächtliche Abkühlung. Diese kann bei offener Randbebauung das nahe Umfeld entlasten (Bsp. Weststadtpark). Je größer der Baumanteil, so geringer die Anbindung an Strömungssysteme und umso geschlossener die Randbebauung, desto weniger können sich lokale Temperaturunterschiede ausbilden und in die Umgebung wirken.

Neben der bioklimatischen Wirkung der Grünflächen vor allem während nächtlicher Situationen mit Wärmebelastung weisen die Parks natürlich auch andere positive Effekte auf. Sie erhöhen die Klimavielfalt, bieten mit ihrem Baumbestand schattige Bereiche und kühlen tagsüber, bei ausreichend zur Verfügung stehender Wasserversorgung, effektiv die Luft. Dies entlastet vor allem die Bevölkerung in der dicht besiedelten, hochgradig versiegelten Innenstadt, welche fußläufig Naherholungsbereiche aufsuchen kann und die meistens keine eigenen Gärten zur Verfügung haben. Diese Aspekte stehen vor allem beim Benckiser Park und Gesellschen Park im Vordergrund.

8.1.5 Westentaschenparks

Westentaschenparks oder englisch „pocket parks“ bezeichnen kleine, gärtnerisch gestaltete Flächen. In Pforzheim liegt ihre Größe typischerweise bei etwa 0,5 ha. Ihre geringe Größe lässt im Allgemeinen keine Anbindung an übergeordnete Strömungssysteme oder eigenständige Kaltluftproduktion zu.

Ein typischer Westentaschenpark stellt der Konradplatz dar. Der Temperaturunterschied zur Wohnbebauung, die den Park ringsum einschließt, liegt bei weniger als 0,5 K.

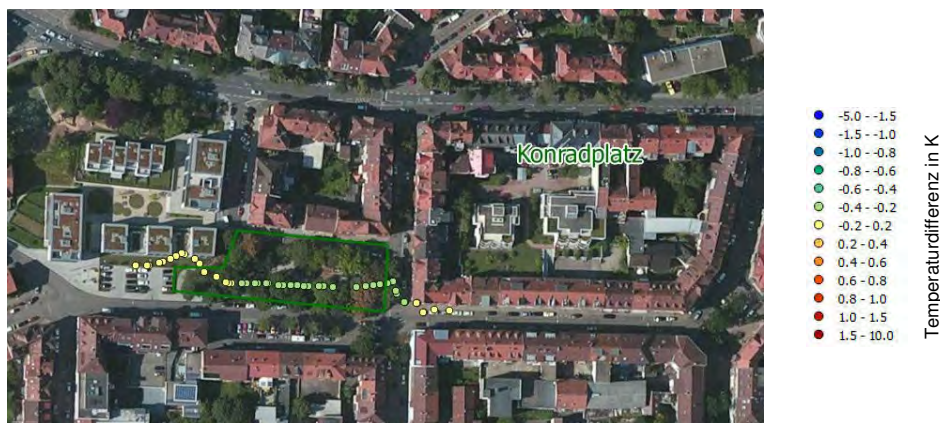


Abb. 8-15: Temperaturbegehung des Konradplatzes und seines Umfelds in der Messnacht. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zum Bereich der Wohnbebauung.

Derartige Parks weisen daher i.a. keine Funktion auf nächtliche bioklimatische Belastungssituationen auf. Analog zu den mittelgroßen Parks können sie aber einen wichtigen Beitrag zur Klimavielfalt in hoch verdichteten Bereich liefern. Insbesondere im Hinblick auf die zu erwartende Klimaerwärmung (Kap. 7) besitzen diese kleinen Parks daher für die Bevölkerung eine besondere Relevanz als Ausgleichs- und Erholungsflächen (siehe auch Kap. 9.1.1).

Anders als der Konradplatz, liefert die Markgrafenanlage aufgrund ihrer Lage mit großer Hangneigung und aufgelockerter Bebauung im Umfeld trotz ihrer geringen Größe einen Beitrag zur Belüftung ihrer unmittelbaren Umgebung. Dies wird möglich, weil sich südlich eine weitere Grünfläche anschließt, so dass sich ein kleiner Kaltluftstrom aus der Fläche heraus entwickeln kann. Die Temperaturen sind etwa 1 K bis 1,5 K niedriger als am südlich gelegenen Talgrund.

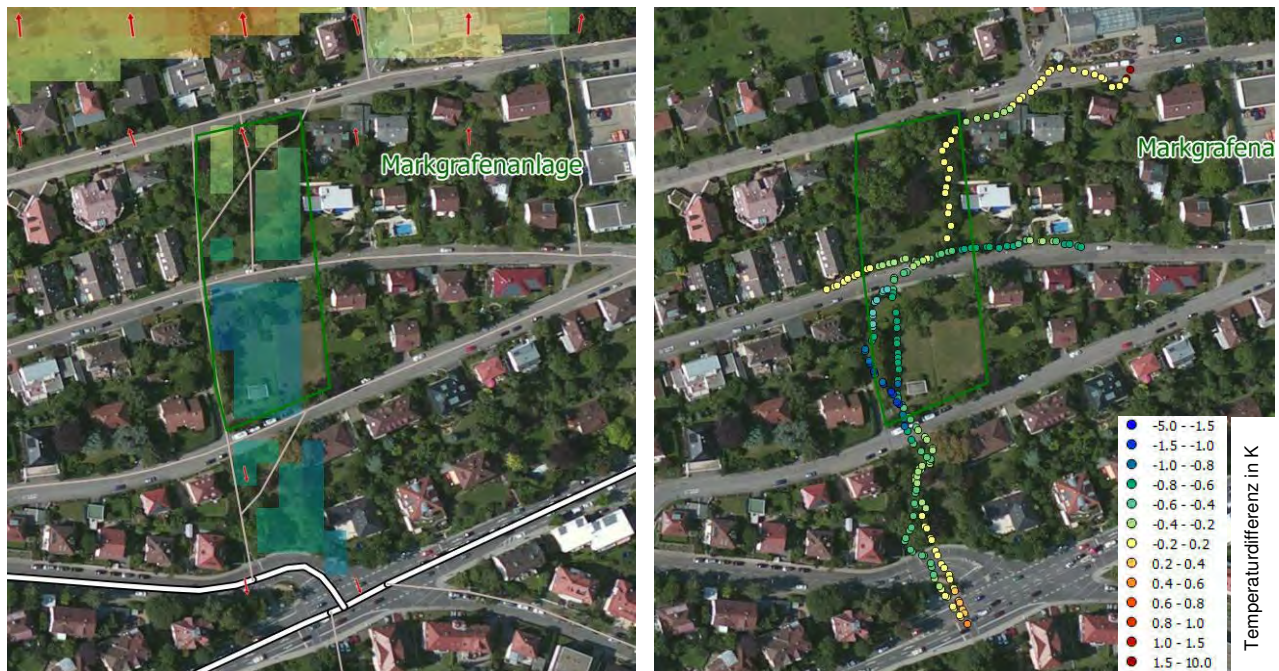


Abb. 8-16: Strömungsverhältnisse im Bereich der Markgrafenanlage zu Beginn der Nacht. In der linken Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Daneben ist die Temperaturbegehung in der Messnacht dargestellt (Punkte, rechts). Die Farben zeigen die Temperaturdifferenz zum Parkrand an.

8.1.6 Parks auf den nördlichen Randhöhen

Im Norden schließen sich an das Enztal etwa 100 m höher gelegene, leicht wellige Hochflächen an (Abb. 8-17). Im Bereich des Übergangs vom Talrand auf die Hochflächen (in der Abbildung mit Wolfsbergallee gekennzeichnet) liegen drei städtische Grünflächen: Hachelanlage, Hauptfriedhof und Wartberganlage. Trotz ihrer unterschiedlichen Größe weisen sie sehr ähnliche klimatische Charakteristika auf, bedingt durch ihre besondere Lage in Verbindung mit den übergeordneten Strömungsverhältnissen.

Aufgrund der in den Höhenlagen vorherrschenden südlichen Strömungsrichtung und der nach Norden abfallende Hangneigung stellen die Hochflächen nördlich von Pforzheim kein Kaltluftreservoir für die Innenstadt dar. Die Luft strömt ab der Talkante Richtung Norden ab (Abb. 8-19). Die Temperatur steigt aufgrund der großräumigen Temperaturschichtung mit zunehmender Höhe an (Inversion), so dass auch dieser Effekt eine effiziente Kaltluftbildung behindert.

Die Grünanlagen, die in diesem Bereich liegen, können daher der Stadt keine Kaltluft aus dem Hinterland zuführen. Allenfalls geringe Volumina auf den Flächen selbst gebildeter Kaltluft können in Richtung Enztal einsickern (Abb. 8-19). Die Temperaturdifferenz zur angrenzenden Bebauung liegt im Mittel bei 0,5 K. Diese Werte zeigen sich sowohl bei der durchgeführten Temperaturbegehung (Abb. 8-20) als auch bei der Dauermessung (Abb. 8-21).

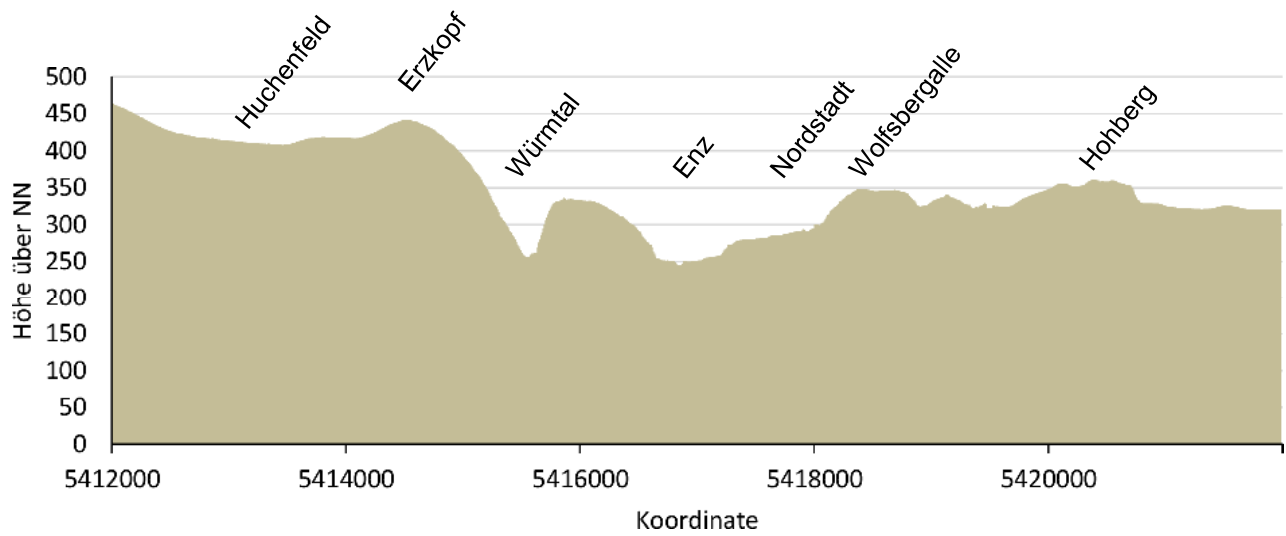


Abb. 8-17: Höhenrelief im Bereich Pforzheim von Süd (links im Bild) nach Nord (rechts).

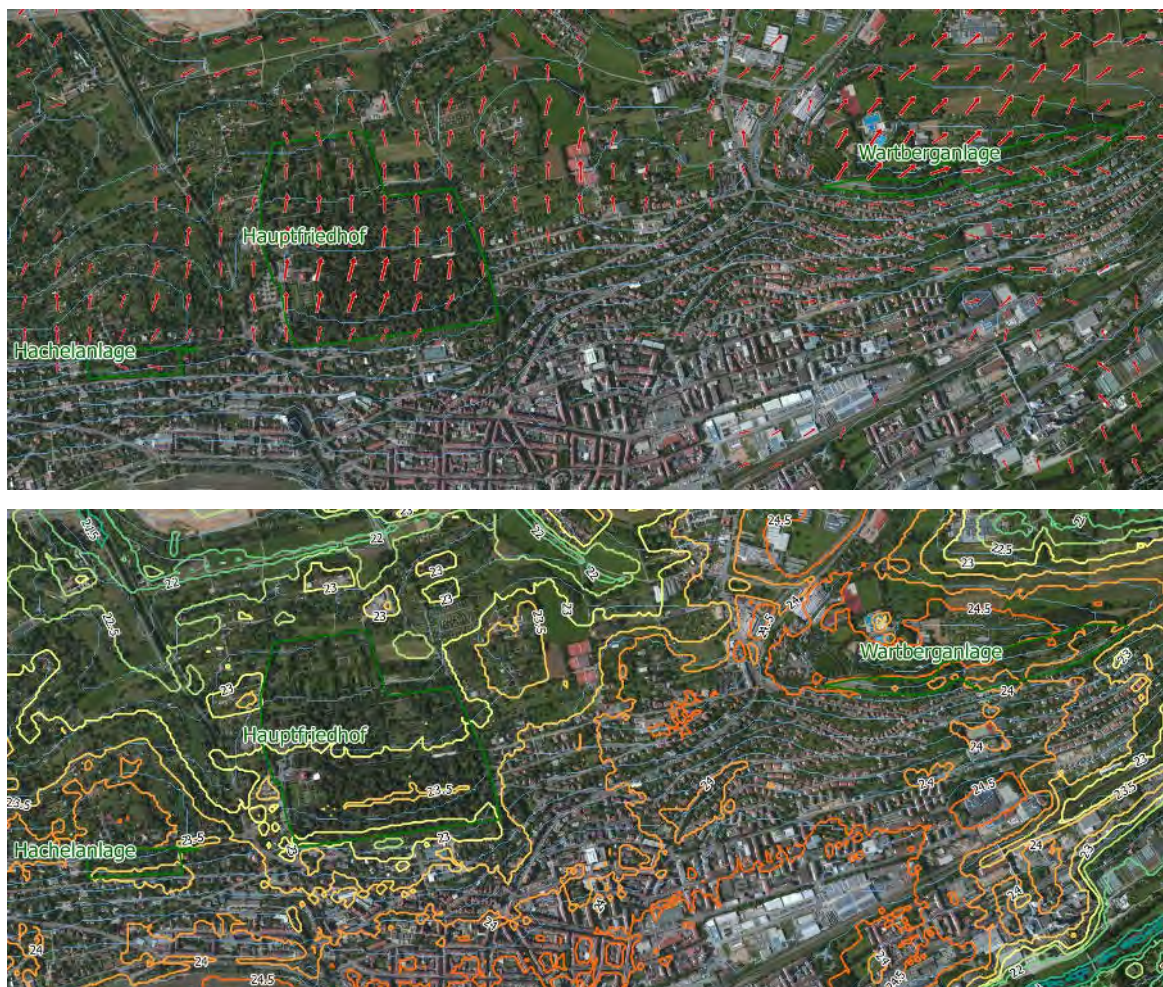


Abb. 8-18: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich nördlich des Enztals zu Beginn der Nacht.



Abb. 8-19: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich der Hachelanlage zu Beginn der Nacht. In der Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-21.

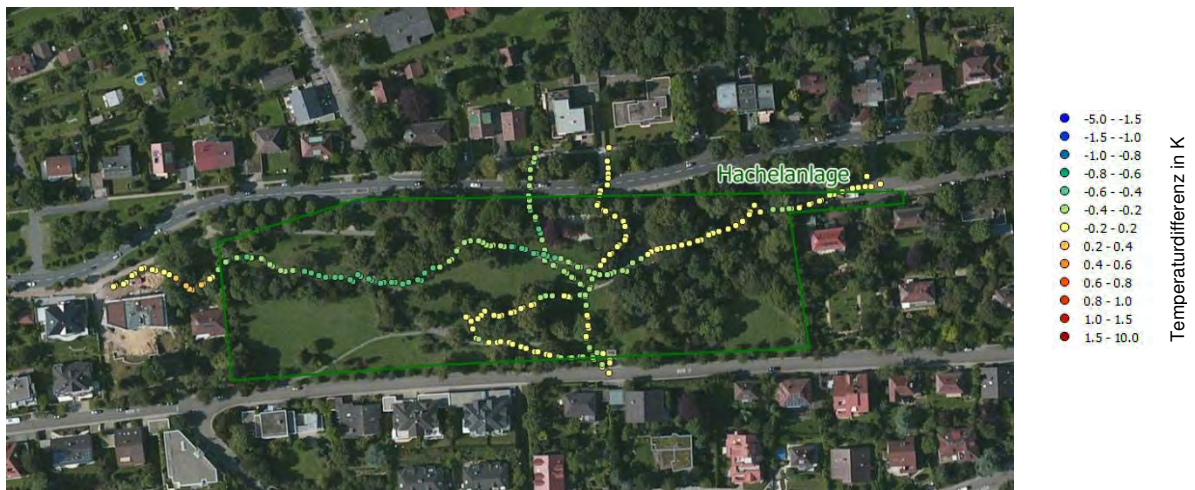


Abb. 8-20: Temperaturbegehung der Hachelanlage und ihres Umfelds in der Messnacht. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zum Bereich der südlich angrenzenden Wohnbebauung.

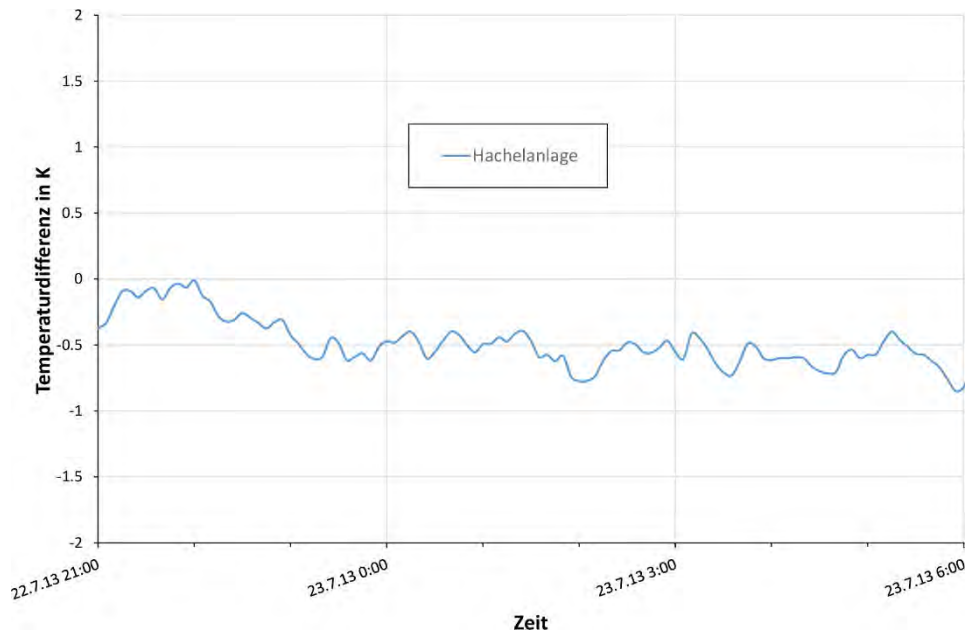


Abb. 8-21: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen in der Hachelanlage und der südlich angrenzenden Wohnbebauung während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang.

Die positive Wirkung der Parkanlagen auf den nördlichen Randhöhen des Enztals entfaltet sich insgesamt weniger in nächtlichen Situationen, sondern vielmehr bei Wärmebelastungen während des Tages. Die Parkanlagen erhöhen die Klimavielfalt, bieten mit ihrem Baumbestand schattige Bereiche und kühlen tagsüber, bei ausreichend zur Verfügung stehender Wasserversorgung, effektiv die Luft. Dies entlastet vor allem die Bevölkerung im dicht besiedelten, hochgradig versiegelten Innenstadtbereich, welche fußläufig Naherholungsbereiche aufsuchen kann.

8.1.7 Wallberg

Zwischen dem Stadtteil Brötzingen und der Weststadt erhebt sich am Nordrand des Enztals der Wallberg bis auf 417 m über NN. Der obere Bereich ist waldbestanden, an den Hängen Richtung Enztal liegen einzelne Wohnhäuser und Kleingärten mit hohem Flächenanteil an Büschen und Bäumen.

Die Struktur der berechneten als auch gemessenen Temperaturen weist im Falle des Wallbergs Besonderheiten gegenüber dem restlichen Untersuchungsflächen auf. Auf dem Wallberg steigt die Temperatur merklich mit der Höhe an (Inversion). Der Temperaturunterschied beträgt vom Gipfel des Wallbergs bis zur Wohnbebauung Brötzingen bzw. Weststadt etwa 3 K (Abb. 8-23). Der größte Temperaturanstieg findet im oberen Teil des Bergs statt, wie am Temperaturverlauf der Messung „Auf der Wanne“ festgestellt werden kann. In den ersten Stunden nach Sonnenuntergang ist es auf dem Wallberg wärmer als in den Wohngebieten Brötzingens, erst ab Mitternacht ist es kühler. Die dortige lokale Freifläche weist dann geringere Temperaturen als die Bebauung auf. Im Bereich der oberen 50 m des Bergs bleibt es hingegen während der Nacht wärmer als in der darunter liegenden Wohnbebauung. Das Modell berechnet Kaltluftabflüsse rund um den Wallberg, auch nach Süden

in Richtung Enztal. Wie Messungen zeigen (Kap. 6.2.3), ist der hohe Vegetationsanteil an den Hängen Ursache dafür, dass die Kaltluftproduktion in diesem Bereich durch das Modell etwas überschätzt wird. Der Temperaturverlauf in der Vegetation im Bereich der Ersinger Straße zeigt ebenfalls konstante Bedingungen im Verlauf der Messnacht.

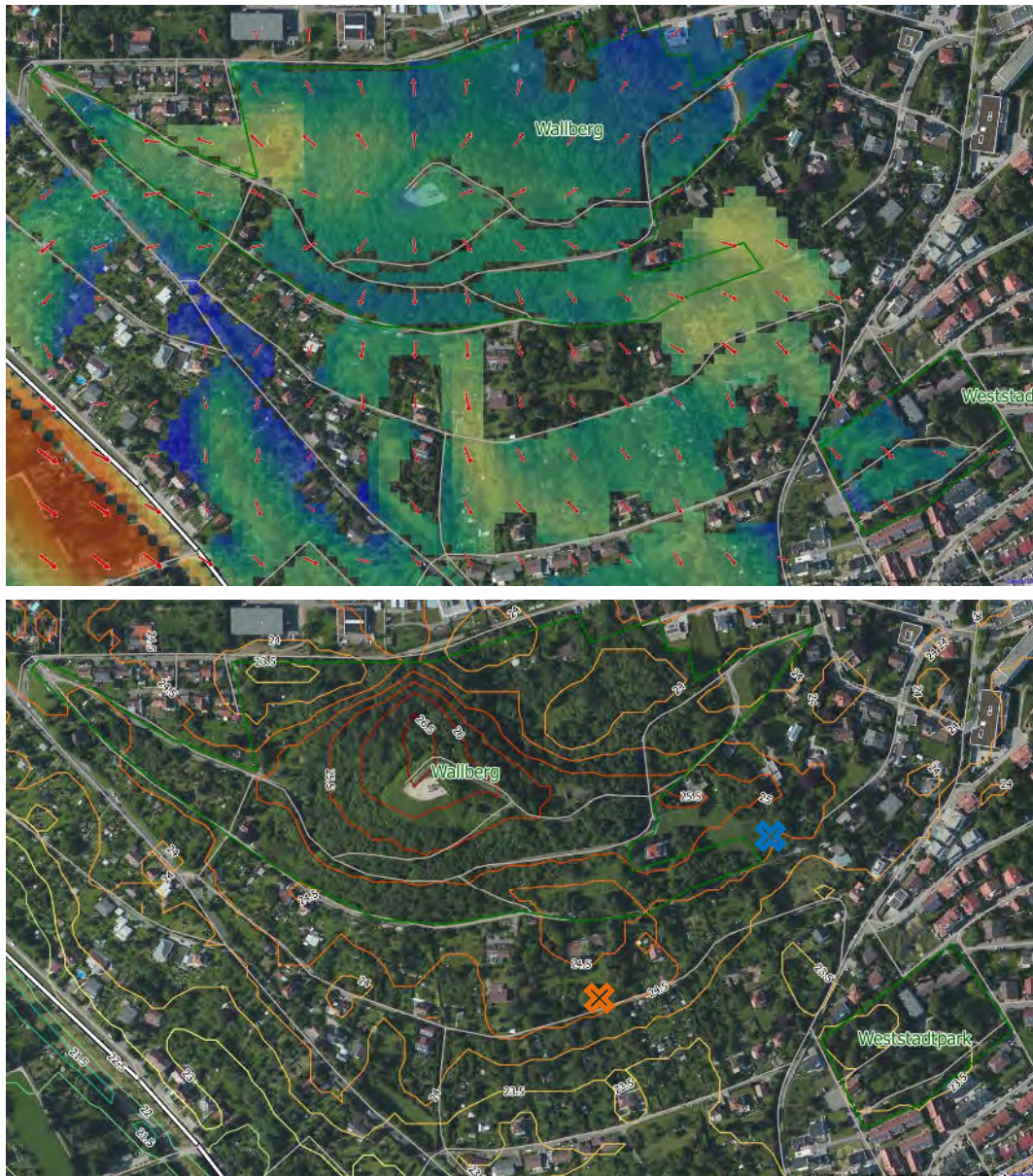


Abb. 8-22: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich Wallberg zu Beginn der Nacht. In der oberen Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-23.

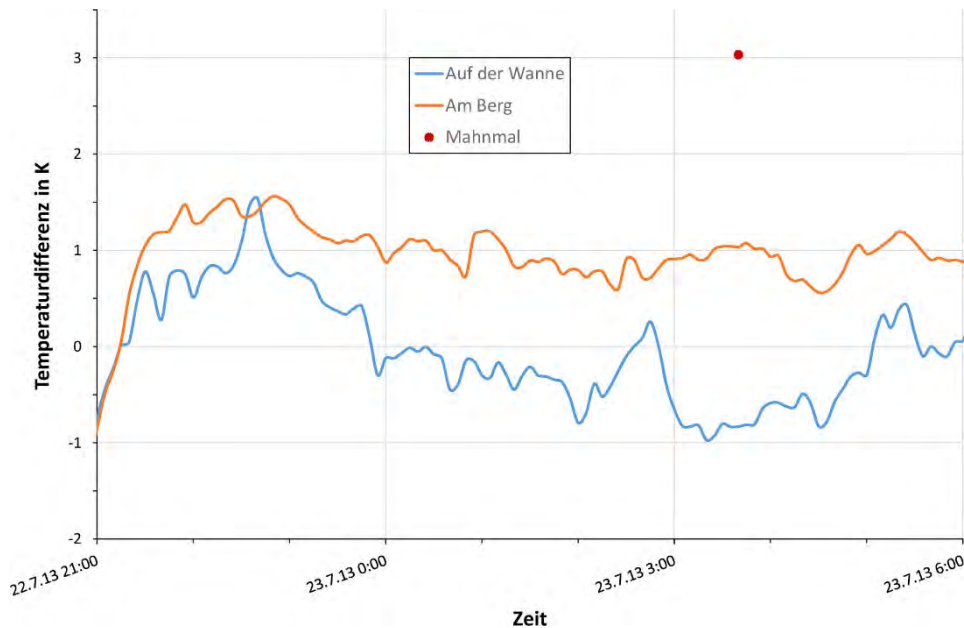


Abb. 8-23: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen auf dem Wallberg und der Wohnbebauung in Brötzingen während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang. Der rote Punkt markiert eine Einzelmessung auf dem Gipfel.

Insgesamt zeigt das Modell somit relevante Kaltluftabflüsse aus dem Bereich des Wallbergs, die real aufgrund der dichten Vegetation an den Hängen aber von geringerer Bedeutung sind als berechnet. Die allgemein positiven Aspekte von Grünanlagen, die in den vorigen Kapiteln angeführt wurden, gelten natürlich auch für den Wallberg. Dies insbesondere auch deshalb, weil er in Verbindung mit den privaten Grünanlagen an den tiefergelegenen Hängen eine große zusammenhängende Grünfläche darstellt.

8.2 Buckenberg

Der Buckenberg bildet eine geneigte Hochfläche südlich und oberhalb des Enztals. Durch die landwirtschaftliche Nutzung ist die Fläche fähig, Kaltluft zu bilden (Abb. 8-24). So entwickeln sich hier Kaltluftströmungen aus Süden und Temperaturen deutlich unterhalb des Niveaus in der Stadt (Abb. 8-25). Die höheren Temperaturen an der Messung „Hofgut“ zeigen den Einfluss der dortigen Vegetation auf das Strahlungsverhalten der Erdoberfläche. Auch kann man den nicht kontinuierlichen, sondern stoßweisen Abfluss von Kaltluft an den gemessenen Temperaturschwankungen nachvollziehen. Phasen mit niedrigerer Temperatur, die mit einem aktiven Abfluss verbunden sind, wechseln sich ab mit leicht höheren Temperaturen, die auf eine verminderte Strömung hindeuten.

Die große Freifläche des Buckenbergs bildet somit während der Nacht Kaltluftabflüsse. Der intensivste Abfluss, sowohl bezüglich Mächtigkeit als auch Geschwindigkeit, wurde zu Beginn der Nacht gemessen. Die erreichten Geschwindigkeiten lagen hier über 2 m/s. Im weiteren Verlauf stabilisiert sich die Kaltluftbildung auf niedrigerem Niveau. Dabei ist aber zu beachten, dass die registrierten pulsierenden Kaltluftabflüsse mindestens eine Mächtigkeit von > 4,50 m hatten. Strömungsgeschwindigkeiten, die unterhalb der Anlaufschwelle des Messgeräts liegen, machen einen Großteil

des nächtlichen Messzeitraums aus, insbesondere in der zweiten Nachthälfte. Wie die Rauchversuche zeigten, waren flachere Kaltluftströme vorhanden, die allerdings, aufgrund der geringen vertikalen Mächtigkeit, nicht in der Windmessung detektiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Untersuchungsbereich überwiegend nicht an ein übergeordnetes Kaltluftabflusssystem mit kontinuierlichem thermisch bedingtem Ausgleichswind angeschlossen ist, sondern nur solitär Kaltluft produziert.

Der Abfluss erfolgt über die nördlich gelegenen, verbuschten Hänge zum Enztal, etwas kanalisiert in der Rinne westlich des Hofguts Buckenberg, hin zu den Sportplätzen an der Enz. Der Rauch, der auf dem Buckenberg freigesetzt wurde, konnte dort später während des Versuchs deutlich wahrgenommen und beobachtet werden, wie er Richtung Enz zog (Kap. 6.2.4).

Phasenweise können in der Messung östliche Windrichtungen festgestellt werden. Kurzzeitig scheint sich der Kaltluftabfluss daher stärker Richtung Westen zu orientieren (Bereich Klinikum).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Freiflächen des Buckenbergs während autchthoner Wetterlagen lokale Kaltluft produzieren. Die intensivste Phase tritt kurz nach Sonnenuntergang und abgeschwächt in den Stunden danach auf. Die Kaltluft fließt zumeist in Richtung Sportplätze an der Enz ab, kurzzeitig auch weiter westlich, und führt zu einer Belüftung der dort angrenzenden Bebauung. In der Klimafunktionskarte wurde der Buckenberg somit als lokales Kaltluftproduktionsgebiet mit den entsprechenden Kaltluftflüssen ausgewiesen (Abb. 8-27).



Abb. 8-24: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich Buckenberg zu Beginn der Nacht. In der oberen Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-23.

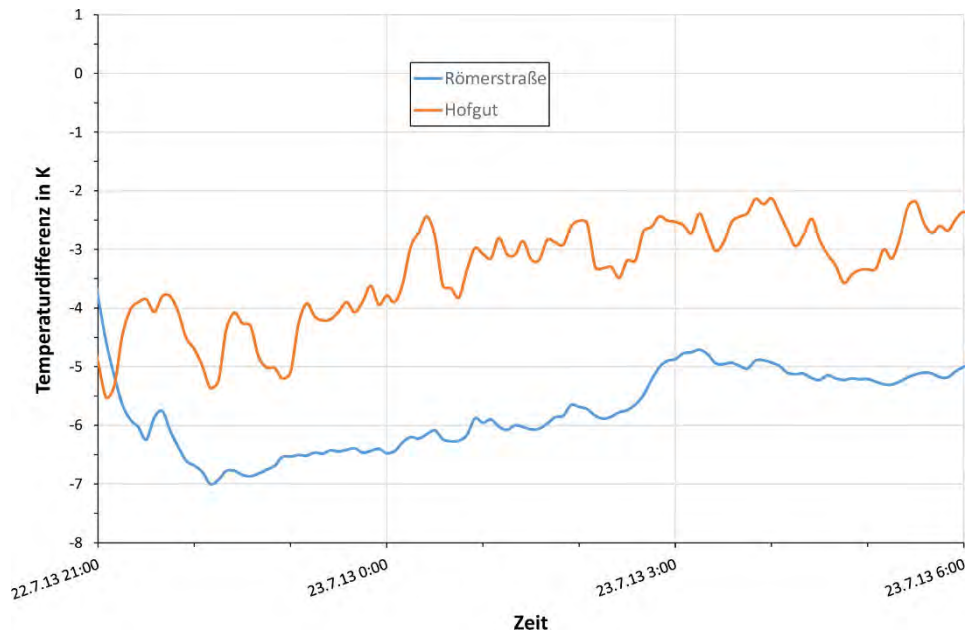


Abb. 8-25: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen den Messungen auf dem Buckenberg und der Innenstadt während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang.

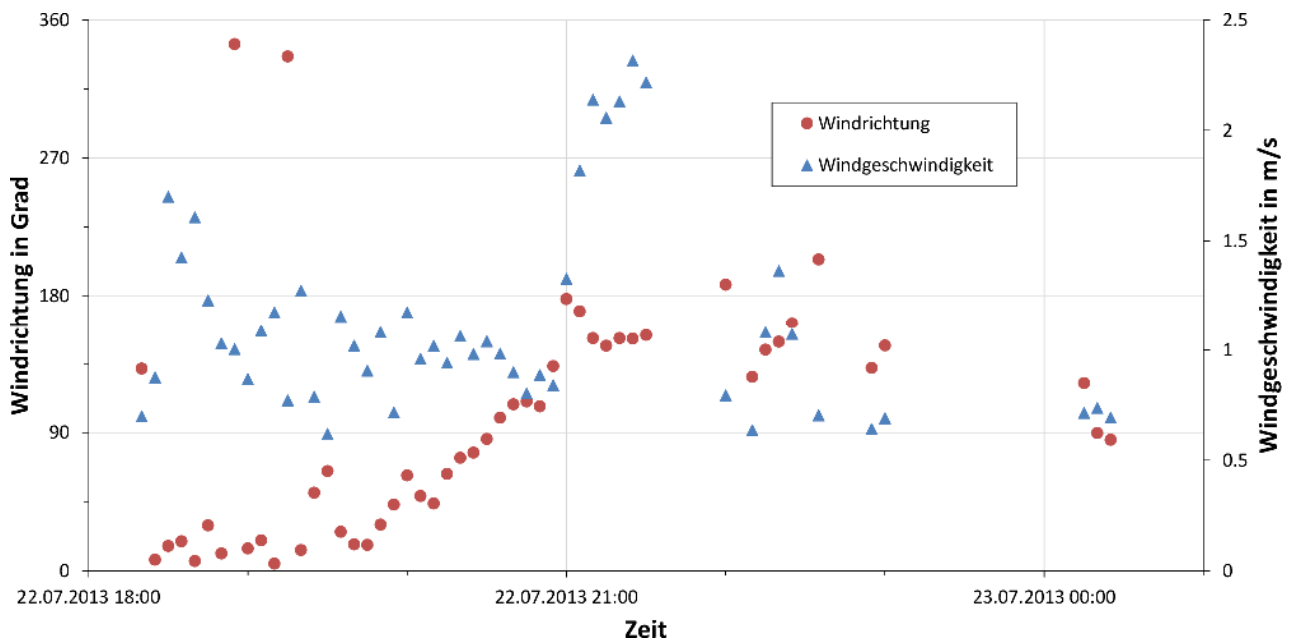


Abb. 8-26: Verlauf der Windrichtung und Windgeschwindigkeit der Messungen auf dem Buckenberg während der Messnacht.

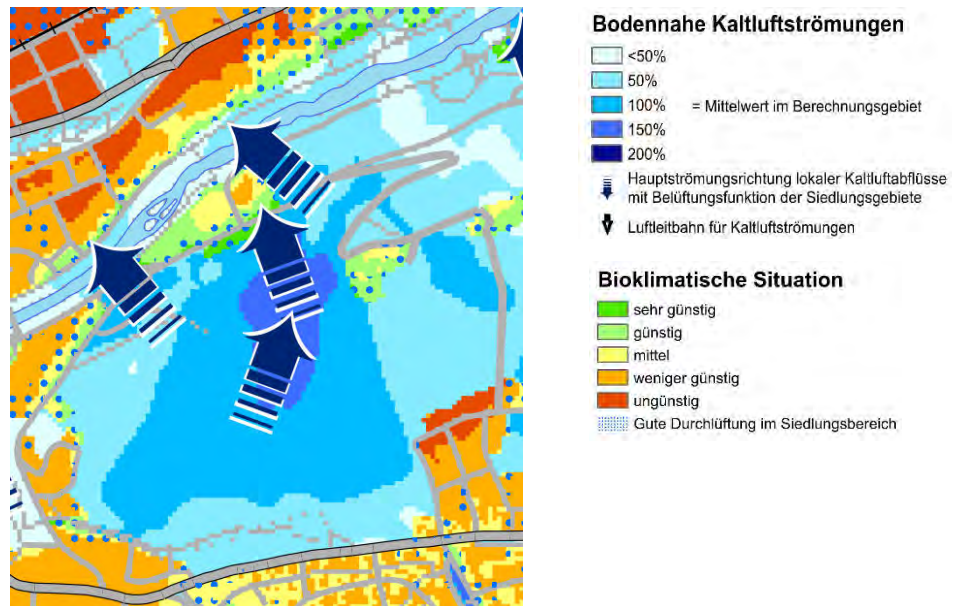


Abb. 8-27: Auszug aus der Klimafunktionskarte für den Bereich Buckenberg.

8.3 Rennbach

Der Bereich Rennbach liegt auf den Hochflächen nördlich des Wartbergs. Das Tal öffnet sich Richtung Osten hin zum Rennbachweg im Stadtteil Eutingen. Der Bereich ist weitgehend landwirtschaftlich genutzt mit Äckern, Wiesen und meist lockerer Baumbepflanzung.

Auf den Hochflächen nördlich des Enztals herrscht wie bereits mehrfach geschildert in der Nacht vorwiegend eine südwestliche Strömung vor. Dem Gelände des Rennbachtals folgend, orientiert sich die Windrichtung hier lokal mehr aus West (Abb. 8-28). Wie dem Temperaturfeld zu entnehmen, bildet sich auf den Freiflächen Kaltluft, die in Richtung des Rennbachwegs in Eutingen abfließt. Auch die relativ dichte Vegetation in diesem Bereich verhindert dieses Abfließen nicht, wie die durchgeführten Rauchversuche belegen (Kap. 6.2.1).

Die Temperaturmessungen zeigen annähernd gleiche Temperaturen am Tierheim wie am Rennbachweg (Abb. 8-29, blaue Kurve). Dies bedeutet, dass während der gesamten Nacht die Kaltluft kontinuierlich und ungehindert am Rennbachweg ankommt und dort maßgeblich zur Belüftung beiträgt. Das Temperaturniveau ist auch dadurch wesentlich niedriger als in der Innenstadt (Abb. 8-29, orange Kurve).

Der Bereich Rennbach liefert damit einen wesentlichen Beitrag für eine bioklimatisch günstige Einstufung dieses Bereiches von Eutingen.

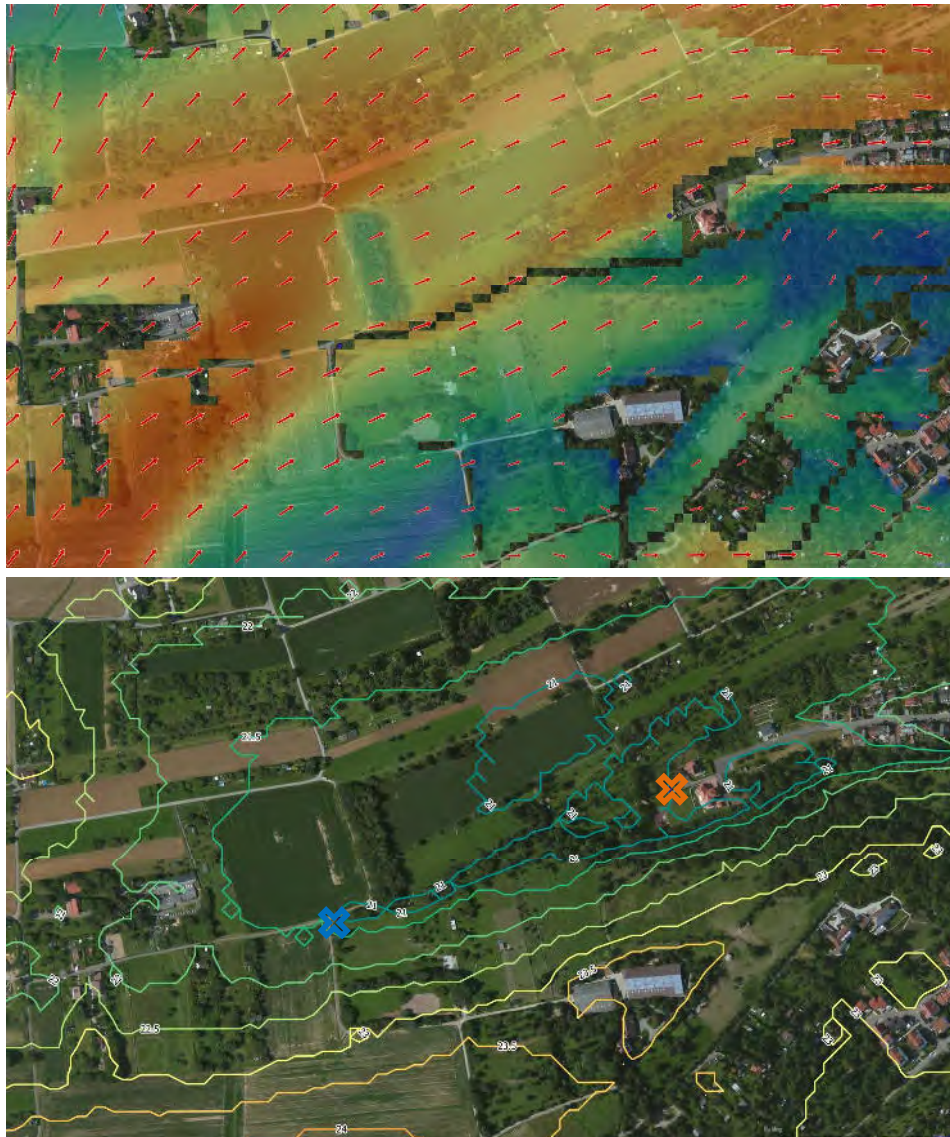


Abb. 8-28: Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Bereich Rennbach zu Beginn der Nacht. In der oberen Abbildung ist neben den Strömungspfeilen die Intensität des Kaltluftvolumenstroms dargestellt (zunehmende Intensität von blau über grün zu rot). Die Kreuze kennzeichnen die Standorte der Temperaturmessungen von Abb. 8-29.

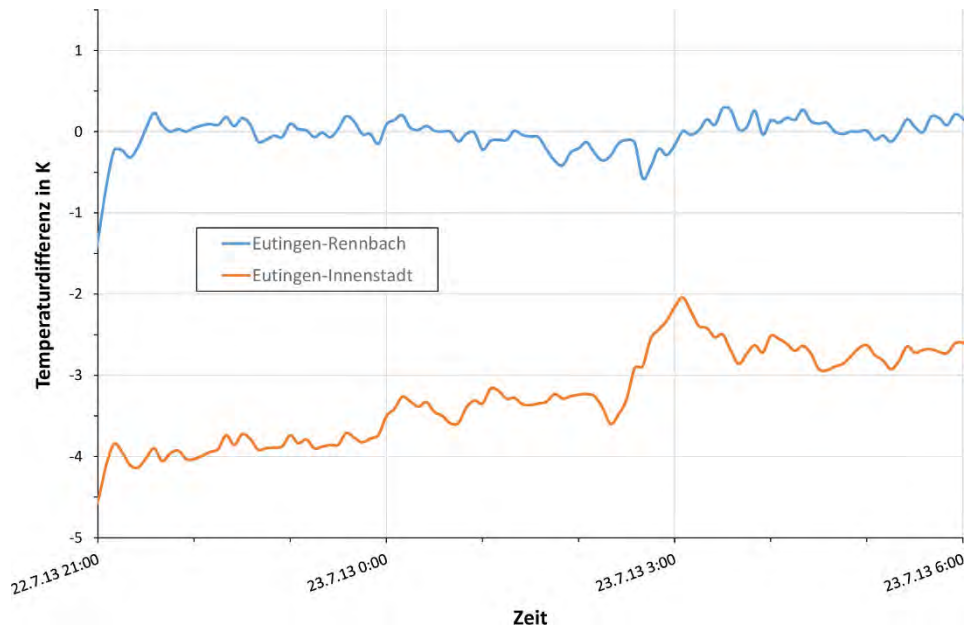


Abb. 8-29: Verlauf der Temperaturdifferenz (blaue Kurve) zwischen den Messungen in Eutingen (Rennbachweg) und dem Bereich Rennbach (Tierheim) während der Messnacht zwischen Sonnenuntergang und -aufgang. Die orange Kurve zeigt die Differenz der Messung Eutingen (Rennbachweg) im Vergleich zur Innenstadt.

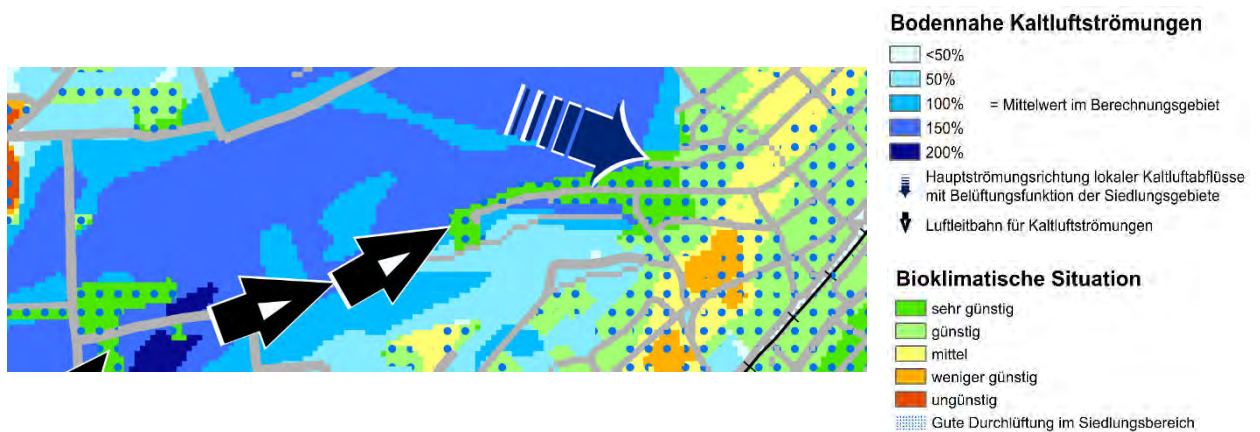


Abb. 8-30: Auszug aus der Klimafunktionskarte für den Bereich Rennbach/Eutingen.

8.4 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurden die klimatische Situation innerhalb der städtischen Grünflächen und vor allem ihre Wirkung auf die Umgebung untersucht. Bei der Auswertung wurden Auswirkungen während nächtlicher Wärmebelastungen als auch während Tagsituationen zugrunde gelegt.

Die Funktion der Grünflächen während der Nacht ist sehr stark von ihrer Lage und ihrer Größe bestimmt. Der Enzaunepark beispielsweise besitzt zwar eine große Fläche, aufgrund ihrer Form und der Lage am Talgrund kann sich dort aber nur wenig lokale Kaltluft bilden. Umso größer ist die Bedeutung als lufthygienisch belastungsfreier Transportweg für Kaltluft aus dem Umland hinein ins Stadtgebiet. Mehrere Grünflächen in Stadtrandlage weisen diese Charakteristik auf. Parks im Siedlungsbereich sind dagegen nur von mittlerer bis geringer Größe und können nachts kaum für Entlastung sorgen. Neben der bioklimatischen Wirkung der Grünflächen während nächtlicher Situationen mit Wärmebelastung weisen Grünflächen vor allem andere positive Effekte auf. Sie erhöhen die Klimavielfalt, bieten mit ihrem Baumbestand schattige Bereiche und kühlen tagsüber bei ausreichend zur Verfügung stehender Wasserversorgung effektiv die Luft. Dies entlastet vor allem die Bevölkerung im dicht besiedelten, hochgradig versiegelten Innenstadtbereich, welche fußläufig Naherholungsbereiche aufsuchen kann. Diese Aspekte stehen z.B.: beim Benckiser Park und Gesellschaften Park im Vordergrund.

9 Stadtteilbegehungen

Im Stadtgebiet Pforzheim gibt es eine Reihe von Bereichen, welche mittel- oder langfristig städtebaulich weiterentwickelt werden sollen. Hierbei können auch klimatische Betrachtungen eine Rolle spielen. Insbesondere vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels können planerische Strategien und städtebauliche Konzepte bei der Reduzierung der Auswirkungen von klimatischen Extremen helfen. Wirksame Klimaanpassungsstrategien können das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen in Städten auch in Zukunft erhalten.

Die Stadtteilbegehungen in möglichen Entwicklungsbereichen der Stadt sollten dazu dienen, eine Ideensammlung vor Ort zu ermöglichen. Zwischen den Teilnehmern aus verschiedenen Ämtern der Stadt (Baudezernat, Amt für Stadtplanung, Grünflächen- und Tiefbauamt, Amt für Umweltschutz) sollten Alternativen oder Kompromisse zwischen den unterschiedlichen und bisweilen divergierenden Zielsetzungen diskutiert werden. Zur Vorbereitung wurde für jedes Plangebiet eine Zusammenfassung der Ergebnisse des klimatischen Gutachtens speziell für den jeweiligen Bereich erstellt und bei der Begehung erläutert. In Protokollen wurden die Aspekte von Klima und Stadtplanung festgehalten.

Darüber hinaus werden im Folgenden die Ergebnisse und Rückschlüsse aus den Begehungen aufgeführt. Der Fokus liegt hier ausschließlich auf stadtklimatischen Aspekten, insbesondere vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung. Auf die zahlreichen anderen Faktoren, welche in der Stadtplanung eine wichtige Rolle spielen, wird nicht eingegangen. Anhand von konkreten Beispielen aus den einzelnen Planungsgebieten sollen die wesentlichen Elemente einer stadtklimatischen orientierten Planung herausgearbeitet werden.

Zur Auswertung werden die Berechnungsergebnisse für die autochthonen Wetterlagen herangezogen. Während dieser Wetterlagen entwickeln sich die lokalen Verhältnisse weitgehend unbeeinflusst vom großräumigen Wettergeschehen. Typische Wetterlagen sind sommerliche oder winterliche Hochdrucklagen, die sich bei klarem Himmel tagsüber durch hohe Temperaturen und damit Wärmebelastung auszeichnen. Bei diesen Wetterlagen können sich nachts Kaltluftsysteme entwickeln, die eine wesentliche Rolle bei der Durchlüftung und damit der Entlastung der Bevölkerung spielen.

Wie in den vorigen Kapiteln aufgezeigt, wird auch in der Region Pforzheim ein Klimawandel mit zunehmender Häufigkeit warmer Tage und Nächte erwartet. Mit der Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um ein bis zwei Grad bis zur Mitte des Jahrhunderts geht eine Zunahme der Häufigkeiten extremer Wettersituationen einher. In der Betrachtung zukünftiger Dekaden kann sich die Betrachtung nicht auf ein einzelnes Jahr beschränken – denn die kurzfristigen wetterbedingten jahreszeitlichen und jährlichen Schwankungen sind in ihrer Amplitude deutlich größer als der Effekt des Klimawandels. In Bezug auf die Stadtklimatologie eignen sich daher Kenngrößen wie z.B. die Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl heißer Tage besser zur Beurteilung der zukünftigen Situation. Solche Kenntage lassen beurteilen, in wie weit sich die thermische Belastung der Bevölkerung zukünftig entwickelt. Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass die Sommer immer heißer werden; aber die Dauer von Hitzeperioden kann deutlich zunehmen und die Häufigkeit solcher Phasen ebenfalls.

9.1 *Klimaanpassungsstrategien*

Bevor auf die einzelnen Stadtteilbegehungen eingegangen wird, werden zunächst mögliche Maßnahmen für eine Klimaanpassung diskutiert.

Auf der einen Seite stehen Maßnahmen zur Erreichung von Klimaschutzzielen. Der mittel- und langfristige Umstieg auf die Nutzung erneuerbarer Energie kann hierfür wichtige Beiträge liefern – die Umsetzung dieser Ziele, selbst auf nationaler Ebene, wird den globalen Trend eines merklichen Temperaturanstiegs in den nächsten Jahrzehnten jedoch vermutlich allenfalls geringfügig dämpfen.

Auf kommunaler Ebene liegt die eigentliche Herausforderung daher bei der Erarbeitung und Umsetzung wirksamer Klimaanpassungsstrategien, um die Folgen der Klimaerwärmung abzumildern. Durch ihre Baustruktur sind hierbei insbesondere dicht besiedelte Bereiche besonders anfällig. Im Folgenden wird auf Maßnahmen eingegangen, welche vor allem das Problemfeld der städtischen Wärmeinsel behandeln. Auf lokaler Ebene können die Folgen des Klimawandels minimiert werden, wenn entsprechende Schritte im Rahmen zukünftiger Planungen berücksichtigt und zentraler Bestandteil von Genehmigungsprozessen werden.

An heißen Sommertagen absorbieren die Baumaterialien von Straßen und Gebäuden die Sonnenstrahlung. Dies führt sowohl zu einer Erwärmung der Luft als auch zu einer Speicherung der Wärme im Baukörper. Je höher die Siedlungsdichte, desto höher sind i.A. die Temperaturen im Vergleich zum Umland. Die Belastung findet daher nicht nur tagsüber statt, sondern setzt sich auch nachts fort und belastet den menschlichen Organismus. Ziele sollten hier also sein, zum einen den Wärmeeintrag zu minimieren und andererseits durch Klimavielfalt Ausgleichsbereiche zu schaffen sowie den Abtransport überwärmter Luft wie auch den Zustrom kühlerer Luft aus dem Umland sicherzustellen. Weitere Bereiche, in denen der Klimawandel eine Rolle spielt, sind die Lufthygiene durch

Abgase aus Verkehr, Haushalten und Industrie, zunehmende Starkniederschläge mit Gefahren für die Infrastruktur sowie die Gesundheit der Bevölkerung.

9.1.1 Grünflächen und Versiegelung

Ein wesentlicher Bestandteil einer Anpassung an den Klimawandel kann die Erhöhung des Anteils urbaner Grünflächen an der Stadtfläche sein. Vegetation stellt eine wirksame Maßnahme dar, um die typischen ungünstigen klimatischen Charakteristika urbaner Siedlungsräume abzumildern.

Am Tag bewirkt der Schattenwurf von Bauwerken und Bäumen eine verringerte Einstrahlung. Zusammen mit dem Energieverbrauch durch Evapotranspiration (Verdunstung von Pflanzen, Boden- und Wasserflächen) ist der Anteil der Energie, welche in die Erwärmung der Luft fließt, deutlich geringer. Ein erheblicher Teil der Strahlung wird durch Verdunsten des im Boden und im Bewuchs gespeicherten Wassers umgesetzt. Dieser Anteil ist wesentlich höher als der durch die Schattenwirkung von Gebäuden auf die Temperatur bewirkte Effekt und kann den Temperaturüberschuss bebauter Gebiete wirksam reduzieren. Wichtig in diesem Zusammenhang ist dementsprechend eine ausreichende Wasserversorgung der Grünflächen.

Zudem wird die Bodenversiegelung durch Grünflächen vermindert, was neben dem Strahlungshaushalt auch den Regenwasserabfluss vermindert.

Die aus klimatischer Sicht „ideale“ Grünfläche besteht aus einer Mischung aus Wiese mit Sträuchern und lockerem Baumbestand. Dadurch kann sich nachts Kaltluft bilden und ein Luftaustausch mit der Umgebung stattfinden, sodass sich ein thermischer Ausgleich für die Umgebung entwickelt. Eine klimatische Fernwirkung über die erste angrenzende Häuserreihe hinaus kann dabei aber nur sehr ausgedehnten Grünflächen zukommen, hierbei besitzen die lokalen Gegebenheiten einen entscheidenden Einfluss. Die Wirkung kleinerer Grünflächen beruht auf dem „Platzhaltereffekt“ mit einer Verdrängung anderer stadtklimatisch nachteiliger Nutzungen. Diese können auch in kleinem Maßstab (z.B. Westentaschenparks, Innenhöfe) wichtige Beiträge zur Klimavielfalt in dicht besiedelten Arealen liefern. Darüber hinaus erfüllen sie Aufgaben als lokale Freizeit- und Erholungsräume oder in Form einer Abstandsfunktion zu Gewerbegebieten und Straßen. Gerade in Innenstädten haben nur wenige Einwohner eigene Gärten und sind daher auf öffentliche Plätze angewiesen. Auch der Anteil der Bevölkerung, die aufgrund ihrer eingeschränkten Mobilität nicht auf die weitere Umgebung ausweichen kann, ist hier meist hoch. "Westentaschenparks" spielen daher gerade an heißen Sommertagen eine wichtige Rolle für die Erholung der Bewohner. Es verbessert die Situation in thermisch stark belasteten Gebiete erheblich, wenn die Bewohner innerhalb von 10 Geh-Minuten einen kühlen Platz zur Erholung auf schattigen Wegen aufsuchen können.

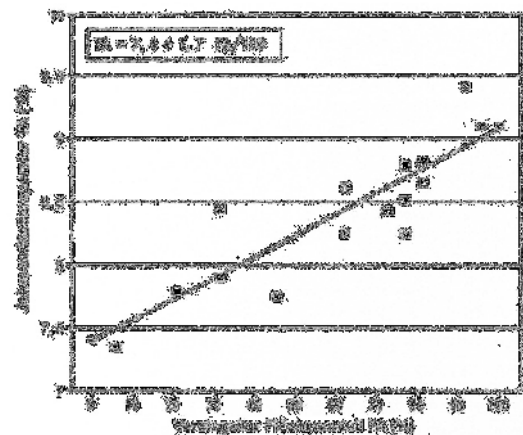


Abb. 9-1: Regressionsbeziehung zwischen Versiegelungsgrad und Temperatur (/18/).

Können eine große Anzahl kleinerer Grünflächen realisiert werden, so trägt ihre Summenwirkung zu einer Verminderung thermischer Belastungen bzw. des Wärmeinsel-Effektes bei, und dies umso mehr, je besser sie vernetzt sind und eine stadträumlich sinnvolle Anordnung aufweisen (/18/).

Im Bereich der Lufthygiene führt die Filterwirkung innerstädtischer Parkanlagen zu geringeren Staubbelastungen (/21/).

9.1.2 Begrünung von Straßenzügen

Die Pflanzung von Bäumen und Sträuchern entlang von Straßen reduziert die Aufheizung an Tagen mit starker Einstrahlung. Überwärmte Stadtstrukturen profitieren von diesem thermischen Ausgleich. Großkronige Bäume schaffen durch ihren Schattenwurf und die Verdunstungskühlung behagliche Aufenthaltsbereiche (/18/).

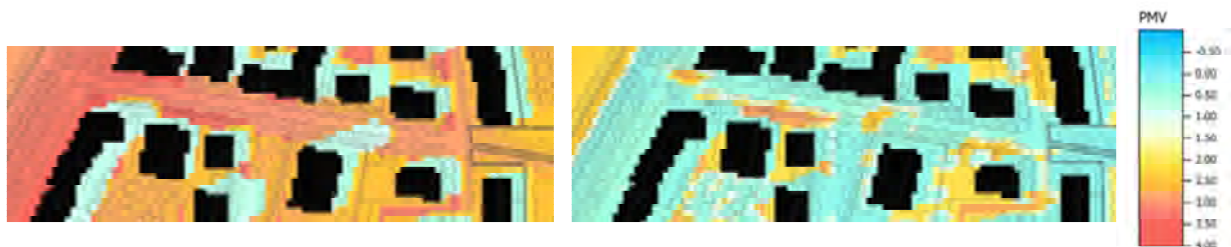


Abb. 9-2: Änderung der thermischen Behaglichkeit (hier als PMV-Wert) durch Straßenbäume. Links ohne, rechts mit Bäumen. Werte kleiner Null (blau) sind behaglich, Werte größer Null (rot) unbehaglich. (/13/).

Bäume können als Strömungshindernisse die Windgeschwindigkeit reduzieren und damit den Abtransport von Schadstoffen beeinflussen. Um eine Anreicherung von Luftschadstoffen zu vermeiden, sollte in stark verkehrlich genutzten Straßen kein geschlossenes Kronendach existieren. Zudem sollten geeignete Baumarten verwendet werden, die sich resistent gegenüber klimatischen Veränderungen gezeigt haben.

Wald- und Pflanzstreifen können unter Umständen Hindernisse für Kaltluftabflüsse bilden. Hier kann ggf. eine Ausdünnung des Bestands Abhilfe schaffen.

9.1.3 Dachbegrünung

Dachbegrünungen können stadtklimatische Defizite beim Feuchtigkeitshaushalt und des thermischen Milieus mindern (/16/). Neben bauphysikalischen Vorteilen bieten Dächer städtische Flächenreserven für die Schaffung von Grünflächen.

Begrünte Dächer mindern durch Blattwerk, Luftpolster und die Verdunstung Temperatur-extreme auf der Dachfläche stark ab. Darunter liegende Räume profitieren durch den Schutz vor sommerlicher Hitze wie auch einer erhöhten Wärmedämmung. Je nach Aufbau der Begrünung kann ein Großteil des Regenwassers gebunden werden und steht zur Verdunstung zur Verfügung. Niederschlag wird zeitverzögert abgegeben. Das Kanalnetz wird so bei starken Niederschlägen entlastet. Auch Photovoltaikanlagen können durch die Kühlungseffekte ihre Stromausbeute erhöhen (/19/).

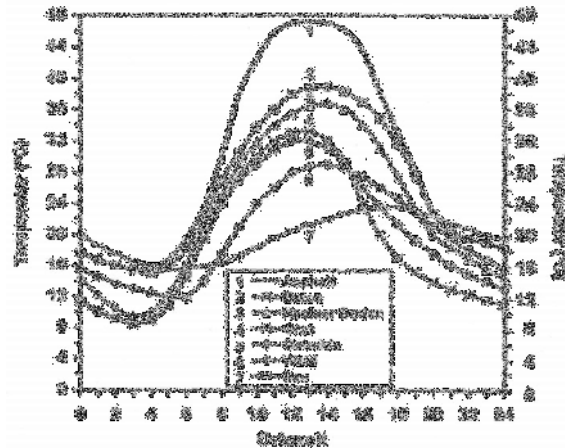


Abb. 9-3: Temperatur verschiedener Oberflächen an einem Sommertag (/18/).

Aufgrund ihres geringen Gewichts ist eine extensive Dachbegrünung auf vielen Dachflächen nachträglich möglich. Eine messbare Fernwirkung kommt begrünten Dachflächen dabei nicht zu, doch lässt sich die Wirkung vieler kleiner Einzelflächen in einer Baustruktur summieren (/18/).

9.1.4 Fassadenbegrünung

Der Vorteil von Kletterpflanzen besteht darin, dass bei Nutzung einer kleinen horizontalen Bodenfläche eine große Menge von Biomasse gebildet wird (/18/). Die sich dabei bildenden Luftpolster verringern den Wärmeverlust der Fassade. Vor allem aber wirkt die Vegetation durch Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlung und der Kühlwirkung durch Verdunstung. Analog zur Dachbegrünung werden dadurch die auftretenden Temperaturextreme an der Fassade vermindert und der Wärmeeintrag in den Baukörper und die Luft verringert. Als positiver Aspekt für die Lufthygiene kann die große Blattoberfläche zu einer Verringerung des Feinstaubgehalts in der Luft führen

Vor allem in engen Straßenschluchten ohne ausreichende Flächen für klassische Begrünung stellt die Fassadenbegrünung daher eine Alternative dar. Bei korrekter Ausführung sind mögliche Schäden von untergeordneter Bedeutung, die Fassade wird im Gegenteil vor Schlagregen geschützt.

Fassadenbegrünungen verbessern die mikroklimatischen Verhältnisse an den Gebäuden selbst und im direkten Straßenumfeld (verringerte Wärmeabstrahlung). Fernwirkungen sind nicht zu erwarten.

9.1.5 Offene Wasserflächen

Wasserflächen wirken ausgleichend auf die Temperatur, da sie nur träge auf Veränderungen reagieren. Ein ausreichendes Volumen vorausgesetzt, können sie so tagsüber und unter Umständen auch nachts einen kühlenden Effekt aufweisen. Oft einfacher als große und tiefe Wasserflächen

können Brunnen mit bewegtem Wasser realisiert werden (Springbrunnen, Wasserzerstäuber). Die dabei erhöhte Verdunstung führt zu einer Abkühlung in der Umgebung.

9.1.6 Kaltluft

Kaltluftströme aus dem unbelasteten Umland können Siedlungsräume nur belüften, wenn sie möglichst ungehindert eindringen können. Hindernisse wie Dämme, Lärmschutzwälle oder -wände, dichte Baumriegel quer zum Talverlauf sind daher ungünstig. Auch bauliche Talverengungen durch größere Gebäude oder geschlossene Siedlungskörper sind zu vermeiden. Über bebauten Gebieten führt die Abgabe von Wärme aus der Bebauung und versiegelten Flächen zur Verminderung von Reichweite und Wirkung des Kaltluftflusses. Ein Teil der Kaltluftströmung kann sich bei ausreichender Mächtigkeit im Überdachniveau fortsetzen. Auf diese Weise kann Frischluft durch turbulente Vermischung noch über eine gewisse Distanz in die Bebauungsstrukturen eingetragen werden. Gleichzeitig wird dabei jedoch der Kaltluftstrom aufgezehrt. Über die Reichweite dieses Mechanismus entscheiden letztlich die Mächtigkeit und die Dynamik der Kaltluftströmung.

Straßenzüge, welche in Strömungsrichtung der Kaltluft verlaufen, können unter Umständen als hindernisfreie Schneisen für den bodennahen Luftaustausch dienen. Dazu muss ein Kaltluftstrom stark genug sein, um die durch die Versiegelung bedingte meist hohe Wärmeabgabe zu überwiegen. Problematisch kann hier aber eine Belastung durch verkehrsbedingte Schadstoffe sein (siehe auch Kap. 4.4.3.2).

9.1.7 Bauwerke

Bei der Planung und Erstellung neuer Gebäude oder ganzer Wohngebiete sollte die Gebäudeausrichtung und -ausführung beachtet werden (/19/). Dadurch kann z.B. der direkte Hitzeeintrag durch die Sonnenstrahlung reduziert werden. Die besonders empfindlichen Schlafräume können so positioniert werden, dass ein möglichst geringer Wärmeeintrag entsteht. Auch die natürlichen Strömungsverhältnisse sollten in die Planung mit einfließen, so dass die Ausrichtung eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung erlaubt. Nachteilig wirken sich auch konventionelle Kühlsysteme aus. Ihr hoher Energieverbrauch führt zur Wärmefreisetzung in meistens schon belasteten Bereichen. Eine Passivkühlung (z.B. Erdwärmetauscher) kann hier eine wirkungsvolle Alternative darstellen.

Auch für bestehende Bebauung kann ein Hitzeschutz durch Hauswand-Verschattung (Vegetation, Verschattungselemente wie Rollos, Sonnensegel, Arkaden) und Dämmung erfolgen. Fassadendämmung dient nicht nur zur Reduzierung des Energieverbrauchs, sondern auch als Hitzeschutz. Sie verhindert Wärmespeicherung und damit die Erwärmung der Umgebung insbesondere nachts. Gegenüber einer Fassadenbegrünung fehlt aber die zusätzliche temperatursenkende Wirkung während des Tages, welche durch die Verdunstung erfolgt. Die Kombination zwischen Fassadenbegrünung und -dämmung ist möglich und sinnvoll.

Moderne Baumaterialien wie Glas oder Stahl geben nachts viel Wärme ab. Natürliche Baustoffe wie Holz speichern weniger Energie und wirken sich daher aus Sicht der Stadtklimatologie günstiger aus.

Auch mit der Farbgebung von Oberflächen kann der Energieeintrag vermindert werden. Helle Farben z.B. auf Dächern oder bei Oberflächen von Plätzen reflektieren einen höheren Anteil der Sonnenstrahlung und mindern daher die Aufheizung der Luft.

9.2 Weststadt

Der Bereich des Sanierungsgebiets Weststadt liegt im Enztal westlich der Kernstadt (Abb. 9-4).

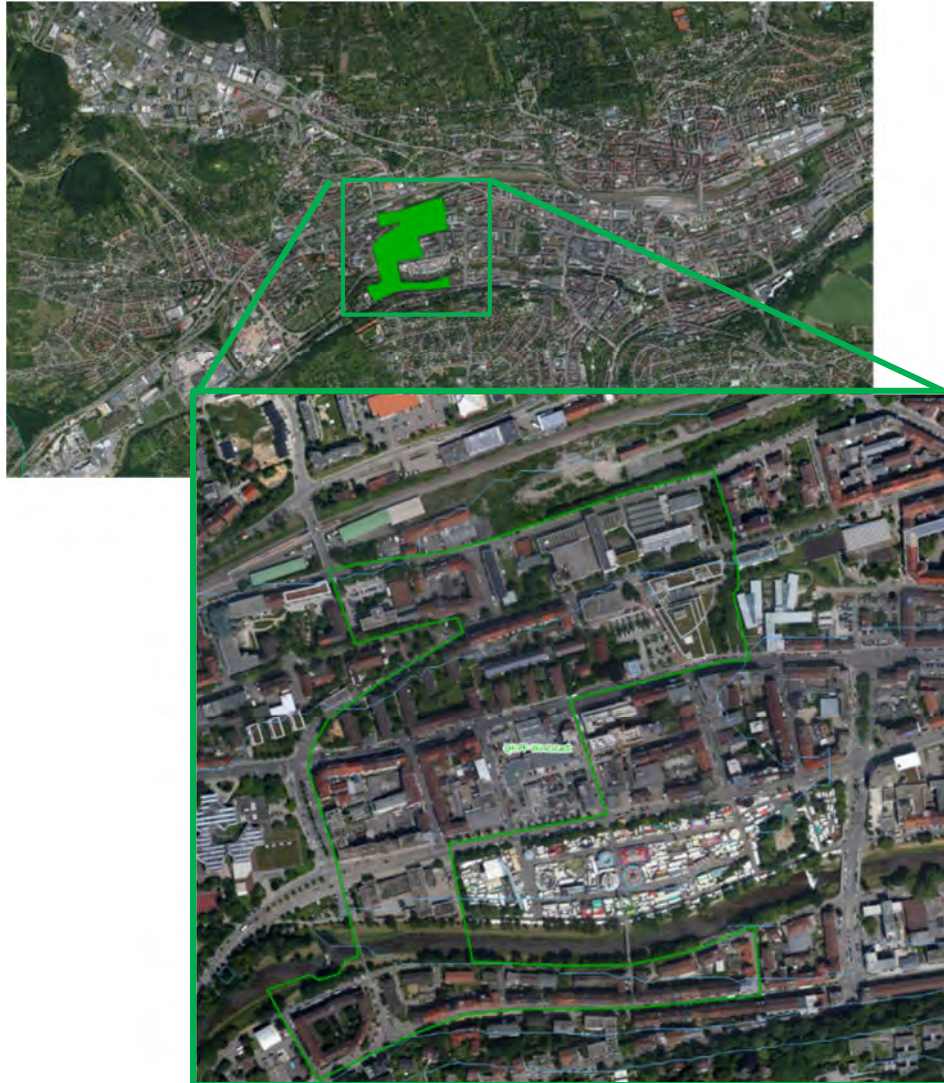


Abb. 9-4: Lage des Untersuchungsgebiets Weststadt und Luftbild des Bereichs.

Hinsichtlich seiner städtebaulichen Prägung in Verbindung mit den stadtklimatologischen Eigenschaften lässt sich das Gebiet in 4 Bereiche untergliedern (Abb. 9-5). Im südlichen Teil 1, südlich der Enz gelegen, findet sich typische Block- bzw. Zeilenrandbebauung. Der Bereich 2 ist stark bebaut durch Wohnhäuser, Autohäuser und ähnliche gewerbliche Nutzungen sowie der Feuerwache. In Bereich 3 finden sich überwiegend mehrgeschossige Wohngebäude, und in Bereich 4 neben diesen auch große, von der Altersstruktur her neuere Gewerbebauten.



Abb. 9-5: Einteilung des Entwicklungsgebiets Weststadt nach der jeweils vorherrschenden Bauungsstruktur. Die Buchstaben kennzeichnen Orte, an denen während der Begehung verschiedene Maßnahmen diskutiert wurden.

Stadtklimatologische Ist-Situation

Die erarbeitete Stadtklimaanalyse erlaubt eine Bewertung der klimatischen Eigenschaften für einzelne kleinräumige Siedlungsbereiche. Für die bewohnten Gebiete sind insbesondere die Wärmebelastung und eine mögliche entlastende Wirkung einer Belüftung wichtig. Der westliche Teil des Enztals wird im Höhenbereich oberhalb der Bebauung bei autochthonen Wetterlagen entlang des Talverlaufs durchströmt, vor allem im Bereich der Enz selbst (Abb. 9-6).

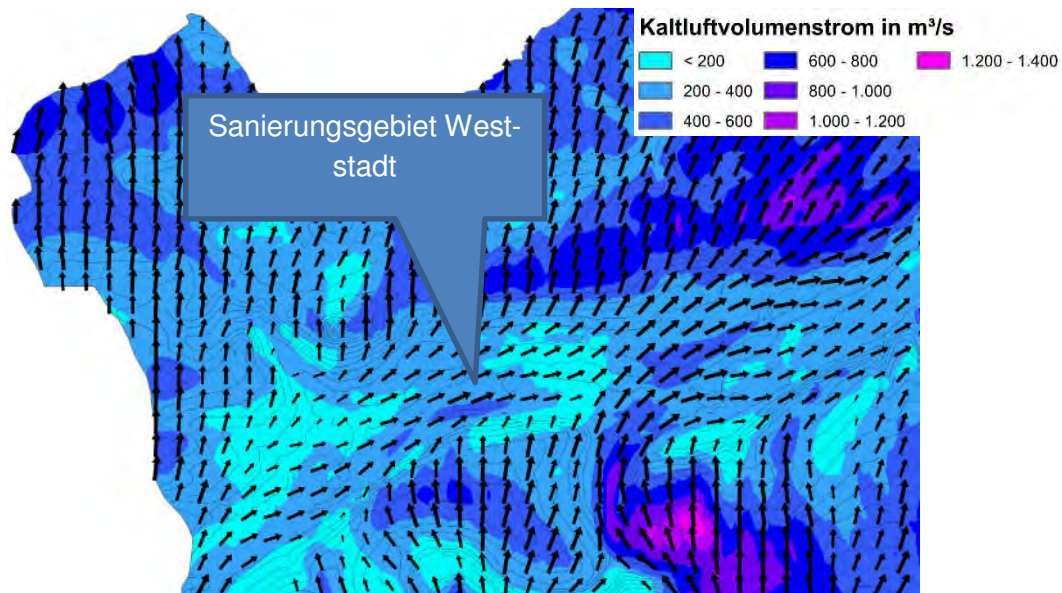


Abb. 9-6: Strömungsrichtung und Kaltluftvolumenstrom während einer mittleren autochthonen Wetterlage um 22 Uhr im Überdach-Niveau im Bereich des Plangebiets.

Bodennah kann die Kaltluftströmung im Bereich des Flusslaufs und der Kleingartensiedlung eindringen (Abb. 9-7). Bei Erreichen der Bebauung wird die Kaltluft rasch aufgezehrt. Hier kann sich insbesondere geschlossene Zeilenbebauung negativ auswirken. Steht sie senkrecht zur Richtung der Kaltluftströmung, stellt sie ein Strömungshindernis dar, welches eine Querlüftung behindert. Die Eindringtiefe der Strömung ist bodennah daher gering. Entlang der Enz, wo nur wenige Hindernisse vorhanden sind, reicht die Kaltluft weiter ins Stadtgebiet hinein. Im Überdachniveau setzt sich die Strömung jedoch fort, so dass auch talabwärts gelegene Bereiche noch profitieren.

Dies spiegelt sich auch in der Temperaturverteilung, hier am Beginn der Nacht dargestellt, wieder. Als kühle Bereiche zeichnen sich die Enz und die daran anschließende Vegetation ebenso wie der Bereich der Kleingärten/Brötlinger Krautgärten ab. Auch die direkt daran angrenzenden Siedlungsgebiete profitieren von dieser Abkühlungsfunktion. Im Bereich des Messplatzes führt die im Tagesverlauf gespeicherte Energie am Abend noch zu einer hohen Wärmeabgabe. Innerhalb der Bebauung ist der kühlende Einfluss sowohl der bodennahen als auch der Überdach-Strömung sichtbar. In Richtung Innenstadt und mit zunehmender Entfernung zur Enz nimmt dieser immer weiter ab.



Abb. 9-7: Strömungsverhältnisse im Sanierungsgebiet Weststadt. Strömung im Überdach-Niveau (oben) und in Bodennähe (unten).

Die bedeutende Funktion des Kaltluftvolumenstromes entlang der Enz wird in der Klimafunktionskarte verdeutlicht. Die direkt angrenzenden Siedlungsgebiete werden durch die ausgeprägte Strömung gut belüftet und weisen eine gute bis mittlere bioklimatische Situation auf.

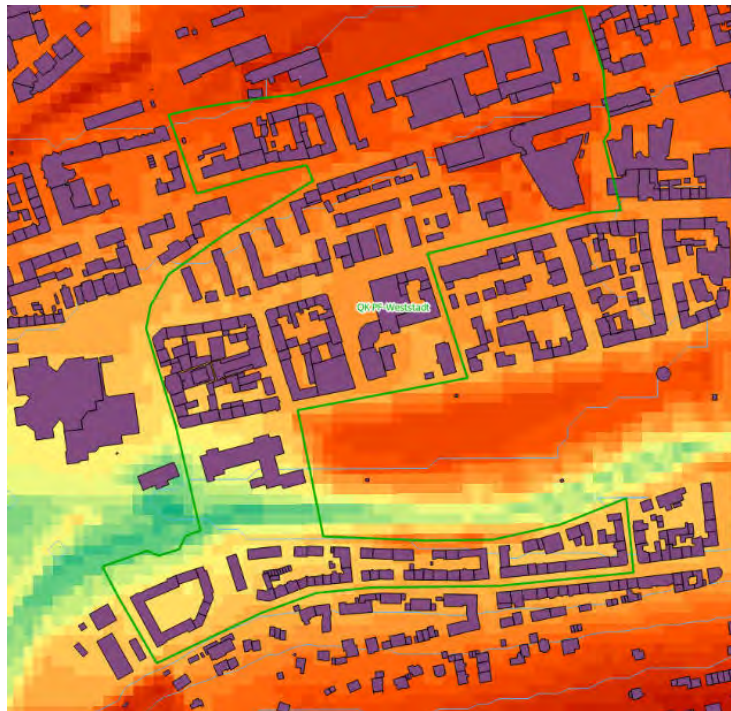


Abb. 9-8: Temperaturverteilung im Bereich des Sanierungsgebiets Weststadt während einer nächtlichen autochthonen Wetterlage. Kühle Temperaturen sind mit Grüntönen, hohe mit roten Farben verbunden.

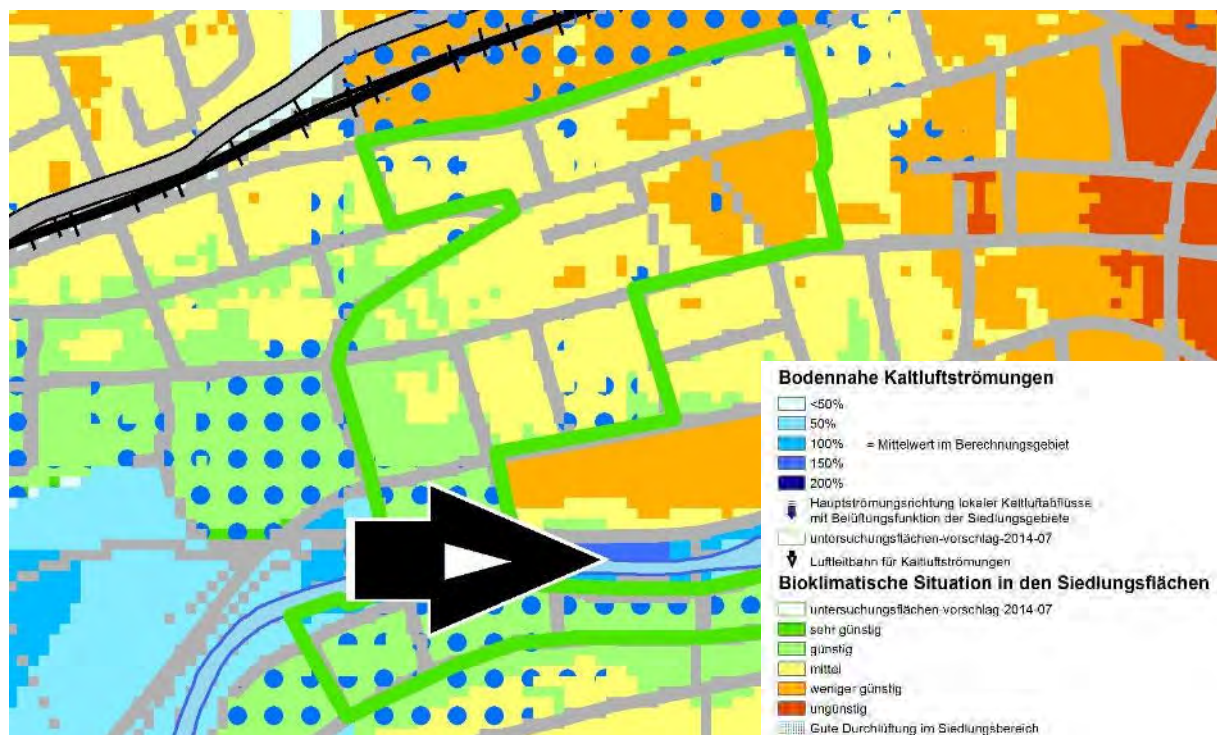


Abb. 9-9: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte im Bereich Weststadt.

Zukünftige Entwicklung

Die Folgen des Klimawandels lassen sich insbesondere an der Entwicklung der Hitzetage erkennen. Innerhalb des Stadtgebiets weisen die bebauten Gebiete nördlich der Enz eine homogene Anzahl von Hitzetagen auf (Abb. 9-10). In Richtung Enz nimmt die Häufigkeit stark ab. Betrachtet man den Zeitraum 2046-2055, so zeigt sich auch hier der Einfluss der Enz und des dort vorhandenen Zustroms an Kaltluft mit einer moderaten Zunahme der Hitzetage. Stärker nimmt die Häufigkeit in einigem Abstand von der Enz zu, in den Bereichen, in denen auch jetzt schon eine hohe Häufigkeit vorhanden ist. Die absolut größten Zunahmen erfolgen im Übergangsbereich, der bisher durch die entlastende Funktion der Belüftung durch die Luftleitbahn entlang der Enz begünstigt ist. Die Reichweite dieser Begünstigung nimmt ab, auch hier steigt die Belastung auf hohe Werte. Besonders in diesen Bereichen sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die Folgen der Erwärmung abzumildern.

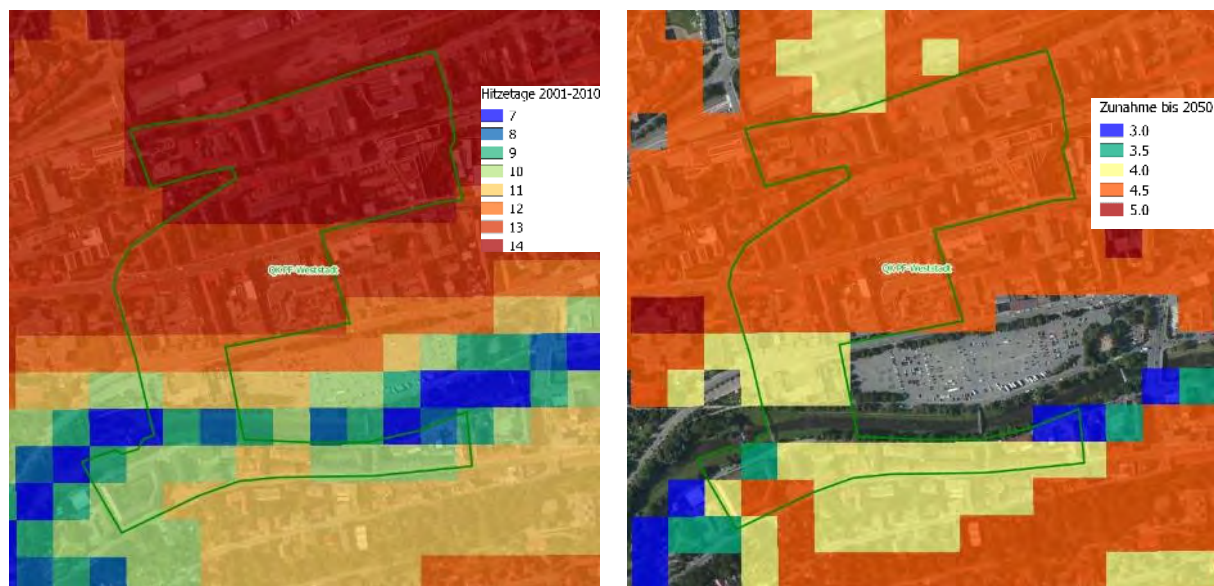


Abb. 9-10: Verteilung der Hitzetage in der Dekade 2001 – 2010 im Plangebiet West (links). Rechts die zu erwartende Zunahme in den Siedlungsbereichen mit Bebauung bis in den Zeitraum 2046-2055.

9.2.1 Teilbereich 1

Im Bereich Hans-Sachs-Straße / Kaiser-Friedrich-Straße wird der Straßenraum saniert (Abb. 9-11, Punkt A in Abb. 9-5). An der Kreuzung wurde der bestehende Straßenraum verkleinert um die Anlegung eines Spielplatzes zu ermöglichen. Die Reduzierung der Bodenversiegelung mit verbesserter Wasserversickerbarkeit und geringerer Wärmeaufnahme ist stadtklimatologisch sinnvoll. Auch die vorgesehene Baumpflanzung am Spielplatz erhöht die Aufenthaltsattraktivität bei Hitzebelastung. Zur weiteren Optimierung hätten im vorliegenden Fall Straßenbäume im Bereich der neu geschaffenen Parkplätze entlang der Hans-Sachs-Straße beigetragen. Durch den Schatten der Baumkronen könnte der Energieeintrag in die weiter versiegelten Flächen deutlich reduziert werden.



Abb. 9-11: Hans-Sachs-Straße.

In der Kaiser-Friedrich-Straße selbst wurden trotz der beschränkten Platzverhältnisse die Pflanzung von Laubbäumen vorgesehen (sichtbar als Baumscheiben in Abb. 9-12). Ihre Positionierung auf der Nordseite der Straße führt zu einer Beschattung der Südfassaden im Sommer. Dadurch heizen sich die Oberflächen weniger auf und geben nachts auch weniger Wärme ab. Insbesondere die Fassaden der Altbestandsgebäude weisen eine hohe mögliche Wärmekapazität auf (im Gegensatz zu wärmeisolierten Fassaden).



Abb. 9-12: Blick auf die Kaiser-Friedrich-Straße in Richtung Osten.

In der Klarastraße wurde ein Stadtteilplatz realisiert (Punkt B in Abb. 9-5). Aus stadtklimatologischer Sicht positiv ist die Verwendung eines hellen Belags mit erhöhtem Rückstrahlvermögen (Albedo), der sich daher unter Sonneneinstrahlung weniger stark aufheizt. Verbesserungsfähig ist die fast vollständige Versiegelung des Platzes. Zusätzlich zu den drei Baumscheiben wäre hier z.B. der Einsatz von Rasengittersteinen möglich gewesen. Eine auch teilweise Rasenfläche vermindert über die Verdunstung die Energieaufnahme und erhöht gleichzeitig die Versickerung.



Abb. 9-13: Stadtteil-Platz Karlastraße.

Der Bereich 1 des Plangebiets grenzt an die Enz an, den Bereich mit den klimatisch günstigsten Bedingungen und einem Kaltluftstrom. Damit die Wohnbebauung von diesem Zufluss und der daraus resultierenden Abkühlung profitieren kann, ist grundsätzlich eine durchbrochene Baustruktur sinnvoll, die im Gegensatz zu geschlossenen Gebäuderiegeln einen horizontalen Luftaustausch ermöglicht. Auch die Entsiegelung und Begrünung von Hinterhöfen, wie hier bereits teilweise umgesetzt, führt zu einer Abmilderung der zukünftigen Temperaturzunahme.



Abb. 9-14: Begrünter Hinterhof, Dachbegrünung auf Garagen und durchbrochene Gebäudestruktur im Bereich Steubenstraße 61-64.

Wenn keine Dachbegrünung möglich ist, kann eine helle Dachdeckung zur Erhöhung der Albedo und Reduzierung des Energieeintrags genutzt werden.

9.2.2 Teilbereich 2 (nördlich Messplatz bis Westliche-Karl-Friedrich-Str.)

Der Teilbereich 2 weist einen deutlich höheren Versiegelungsgrad auf (Abb. 9-15, Punkt C in Abb. 9-5). Dementsprechend ist die klimatische Situation auch ungünstiger als in Teilbereich 1. Mit der Temperaturzunahme in den nächsten Jahrzehnten ist hier auch eine stärkere Zunahme der Belastung zu erwarten. Vor diesem Hintergrund wäre es vorteilhaft, bei Sanierungen Straßenbegrünung wie die Pflanzung von großkronigen Straßenbäumen und Fassadenbegrünung umzusetzen. Insbesondere Straßenbäume könnten zur Beschattung von Fassaden und versiegelten Flächen dienen. Auch der Anteil an begrünten Dächern ist, trotz vieler Flachdächer, in diesem Bereich nur gering.

Ebenfalls ungünstig zu bewerten ist der Trend, Gärten oder kleinere Grünflächen als Steingärten auszuführen. Die Steine führen zu einer deutlich größeren Aufheizung und Wärmespeicherung als eine vergleichbare Rasenfläche, zudem sind die Verdunstung und die damit verbundene Abkühlung stark reduziert.



Abb. 9-15: Versiegelte Flächen im Teilbereich 2, Punkt C. Maystraße (links oben), Hallerstraße (links unten), Parkfläche in der Maystraße (rechts oben), Steingarten (Maystraße).

9.2.3 Teilbereich 3 (nördlich der Westlichen-Karl-Friedrich-Str.)

Günstigere Verhältnisse aus Sicht der Stadtklimatologie herrschen im Teilbereich 3 im Bereich der Westlichen Karl-Friedrich-Straße (Abb. 9-16, Punkt D in Abb. 9-5). Trotz hoher Baudichte wurde zwischen den Gebäuden ausreichend Platz vorgesehen. Dieser wird genutzt um eine möglichst gute Durchgrünung mit einem Wechsel zwischen Rasenflächen und Einzelbäumen zu erreichen. Auch die realisierte Fassadendämmung an den Gebäuden führt zu einer geringeren Wärmespeicherung und damit zu einer reduzierten nächtlichen Wärmeabgabe.



Abb. 9-16: Begrünter Zwischenraum zwischen Wohngebäuden an der Westlichen Karl-Friedrich-Straße, Punkt D.

9.2.4 Teilbereich 4

In diesem Bereich herrschen große Verwaltungsgebäude vor. Die zumeist neueren Gebäude weisen Großteils eine Dachbegrünung auf. Neben den stadtklimatischen Vorteilen ist diese auch energetisch sinnvoll, da sie zu einem geringeren Energieverbrauch in den Gebäuden führen. Auch sind hier an einigen Gebäuden die Fassaden mit Holz verkleidet. Gegenüber den klassischen Putz- und Steinfassaden speichert dieses Material deutlich weniger Wärme und führt dementsprechend auch nachts zu einer geringeren Erwärmung der Umgebung.



Abb. 9-17: Gebäude mit Holzfassade in der Westlichen Karl-Friedrich-Straße.

Bereits außerhalb des Plangebiets, aber stadtklimatologisch interessant ist die Westliche Karl-Friedrich-Straße / Benckiserstraße. Sie stellt ein gutes Beispiel für eine Straßenbegrünung dar. Großkronige Bäume dienen zur Beschattung in der Mitte einer von Nord nach Süd verlaufenden Straße. Die angrenzende Bebauung wird dadurch nicht beeinträchtigt, aber trotzdem eine gute Abschattung erreicht. Ein Grünstreifen zwischen den Fahrstreifen dient zur Versickerung und gleichzeitig zur Bewässerung der Bäume.



Abb. 9-18: Blick auf die Benckiserstraße Richtung Süden.



Abb. 9-19: Parkfläche östlich der Germaniastraße, Punkt E.

Zum Abschluss der Begehung wurde eine innerstädtische Park- bzw. Brachfläche an der Germaniastraße besichtigt, die sich im Zuge einer weiteren städtebaulichen Entwicklung auch für eine kleine Grünfläche eignen könnte (Abb. 9-19, Punkt E in Abb. 9-5). Eine Entsiegelung könnte hier durch eine Verlegung des Parkraums in eine Tiefgarage erfolgen. Die Schaffung von Grünflächen aus Rasen und laubwerfenden Bäumen, idealerweise kombiniert mit offenen Wasserflächen wie Springbrunnen wäre ein Beitrag zur Schaffung von Klimavielfalt zur Minderung der Belastung der anwohnenden Bevölkerung. Zumal in diesem Bereich auch die Hinterhöfe weitgehend versiegelt sind.

9.3 Leopoldstraße / Bleichstraße

Der Bereich Leopoldstraße / Bleichstraße liegt im Enztal und umfasst Teile der Kernstadt wie auch den Stadtgarten mit den angrenzenden Siedlungsgebieten (Abb. 9-20).



Abb. 9-20: Lage des Bereichs Leopoldstraße / Bleichstraße.

Hinsichtlich seiner städtebaulichen Prägung in Verbindung mit den stadtklimatologischen Eigenschaften lässt sich das Gebiet in 4 Bereiche untergliedern (Abb. 9-21). Der nördliche Teil 1 als Bestandteil der Innenstadt, stellt einen stark verdichteten Siedlungsraum dar. Im südlich der Enz gelegenen Teil 2 findet sich vorwiegend Blockrandbebauung, wobei die Innenhöfe in weiten Teilen versiegelt sind. Bereich 3 weist eine ähnliche Baustruktur auf, durch seine Lage unterscheidet er sich aber in seinen klimatischen Bedingungen. In Bereich 4 zwischen Werderstraße und Enz finden sich überwiegend mehrgeschossige Wohngebäude, die Gebäudezeilen sind stellenweise unterbrochen.

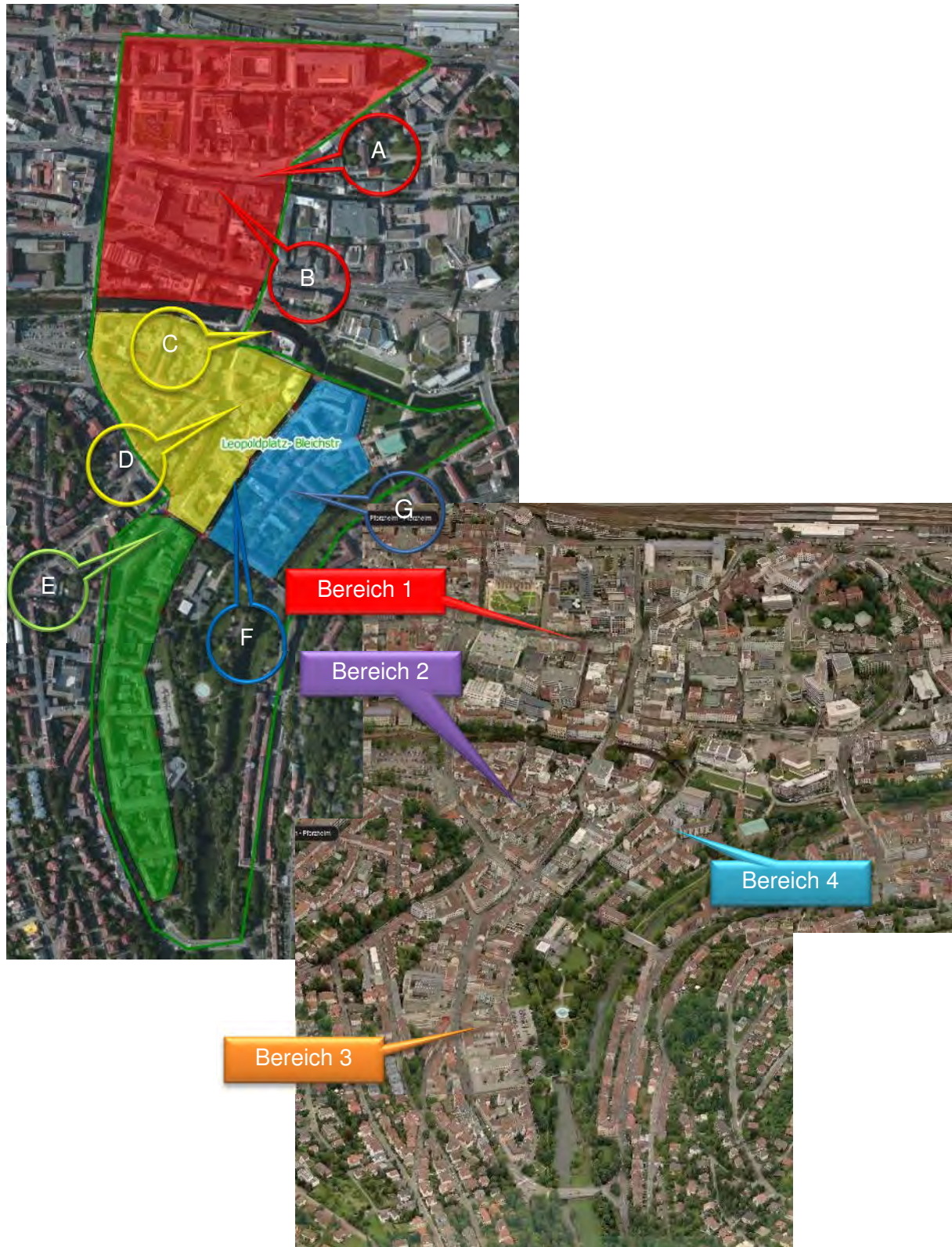


Abb. 9-21: Einteilung des Bereichs Leopoldstraße / Bleichstraße nach der jeweils vorherrschenden Bebauungsstruktur. Die Buchstaben kennzeichnen Orte, an denen während der Begehung verschiedene Maßnahmen diskutiert wurden.

Stadtklimatologische Ist-Situation

Die erarbeitete Stadtklimaanalyse erlaubt eine Bewertung der klimatischen Eigenschaften für einzelne kleinräumige Siedlungsbereiche. Für die bewohnten Gebiete sind insbesondere die Wärmebelastung und eine mögliche entlastende Wirkung einer Belüftung wichtig. Der Unterlauf der Nagold nach Zusammenfluss mit der Würm wird im Höhenbereich oberhalb der Bebauung bei autochthonen Wetterlagen entlang des Talverlaufs kräftig durchströmt, vor allem im Bereich der Nagold selbst (Abb. 9-22).

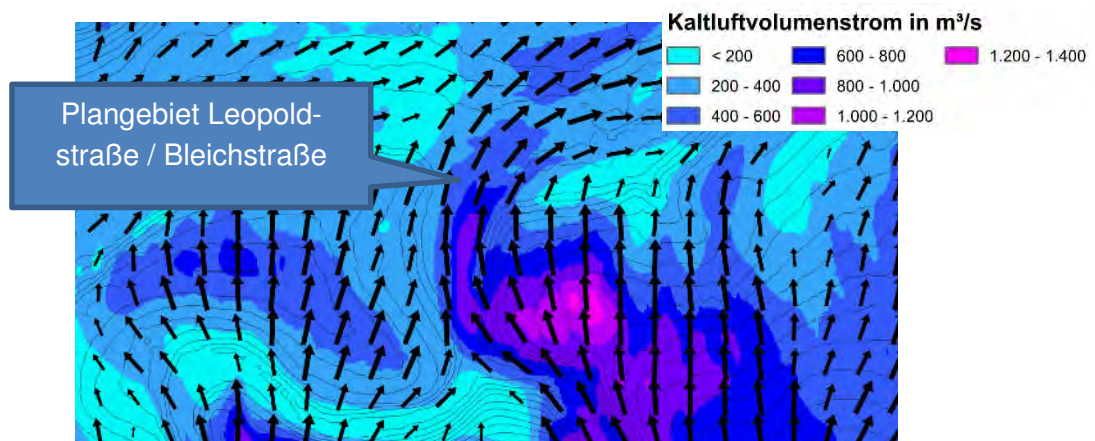


Abb. 9-22: Strömungsrichtung und Kaltluftvolumenstrom während einer mittleren autochthonen Wetterlage um 22 Uhr im Überdach-Niveau im Bereich des Plangebiets.

Bodennah kann die Kaltluftströmung im Bereich des Flusslaufs eindringen (Abb. 9-23). Bei Erreichen der Bebauung wird die Kaltluft gebremst. Aufgrund der Dynamik der Strömung aus dem Nagoldtal kann sie aber relativ weit eindringen. Noch besser könnte diese Lüftungsfunktion im Bereich 4 sein, wenn die Bebauungsstruktur hier stärker parallel zur Nagold orientiert wäre und der Strömung weniger Widerstand entgegensetzen würde. Entlang der Nagold, wo nur wenige Hindernisse vorhanden sind, und im Überdachniveau setzt sich die Strömung jedoch fort, so dass auch talabwärts gelegene Bereiche noch profitieren. Eine relevante Strömung konnte während der Messungen an der Auerbrücke registriert werden (Kap. 6.2.4). Senkrecht zur Strömungsrichtung kann die Kaltluft naturgemäß schwieriger in die Bebauung vordringen, zumal bei der kompakten baulichen Struktur in Bereich 3. Die Nord-Süd-Orientierung der südlichen Bleichstraße und der kräftige Kaltluftstrom kühlen diesen Bereich relativ zum nördlichen Untersuchungsgebiet jedoch merkbar ab. Dies spiegelt sich in der Temperaturverteilung wieder. Als kühle Bereiche zeichnen sich die Nagold und der daran anschließende Stadtgarten ab. Auch die direkt daran angrenzenden Siedlungsgebiete profitieren von dieser Abkühlungsfunktion.

Im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets herrscht eine grundlegend andere Situation vor. Selbst das unmittelbare Umfeld der Enz ist relativ warm, Zeichen dafür dass keine nennenswerte Kaltluft aus Westen diesen Bereich mehr erreicht. Eine Belüftung kann nur aus dem Überdach-Niveau erfolgen, wo eine Strömung vorhanden ist. Aufgrund der dichten Bebauung mit wenig Freiraum kann aber nur ein geringer vertikaler Austausch stattfinden. Dementsprechend liegt das Temperaturniveau hier deutlich höher.

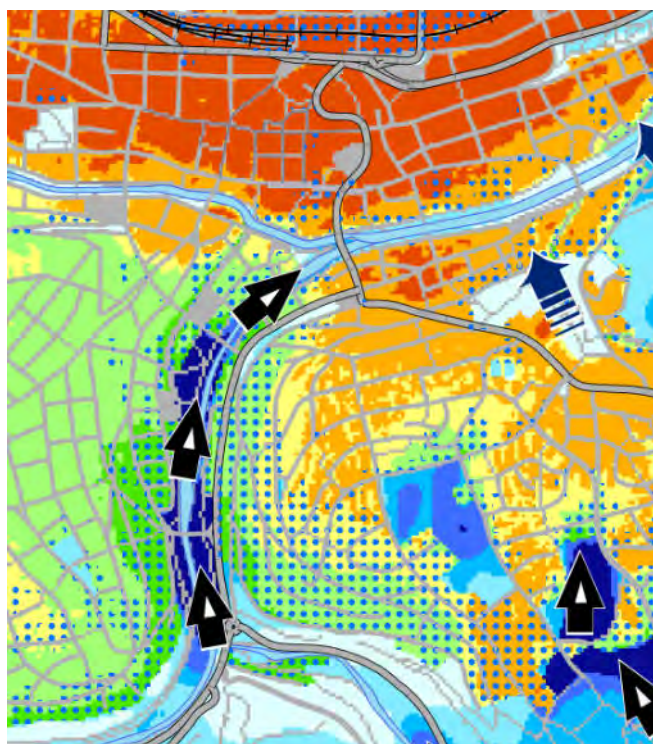


Abb. 9-23: Strömungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet Leopoldstraße. Strömung im Überdach-Niveau (rechts) und in Bodennähe (links).

In der Klimafunktionskarte ist dies anhand des Kaltluftvolumenstroms entlang der Nagold ersichtlich, der eine bedeutende Funktion für die Entlastung der bebauten Gebiete hat. Die direkt angrenzenden Siedlungsgebiete werden dadurch gut belüftet und weisen eine sehr gute bis gute bioklimatische Situation auf. In Bereich 2 wird der Kaltluftstrom aus Süden vollständig aufgezehrt, die bioklimatischen Bedingungen verschieben sich auf mittel bis weniger günstig. Im nördlichsten Teil des Plangebiets herrschen ungünstige Bedingungen vor.



Abb. 9-24: Temperaturverteilung im Bereich Leopoldstraße/Bleichstraße während einer nächtlichen autochthonen Wetterlage. Kühle Temperaturen sind mit Grüntönen, hohe mit roten Farben verbunden.



- Bodennahe Kaltluftströmungen**
- <50%
 - 50%
 - 100% = Mittelwert im Berechnungsgebiet
 - 150%
 - 200%
- Hauptströmungsrichtung lokaler Kaltluftflüsse mit Belüftungsfunktion der Siedlungsgebiete
 untersuchungsflächen-vorschlag-2014-07
 Luftleitbahn für Kaltluftströmungen
- Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen**
- untersuchungsflächen-vorschlag-2014-07
 - sehr günstig
 - günstig
 - mittel
 - weniger günstig
 - ungünstig
 - Gute Durchlüftung im Siedlungsbereich

Abb. 9-25: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte im Bereich Leopoldstraße/Bleichstraße.

Zukünftige Entwicklung

Die Folgen des Klimawandels lassen sich insbesondere an der Entwicklung der Hitzetage erkennen. Begünstigt sind vor allem Bereiche nahe der Enz sowie Areale mit höherem Anteil an Vegetation (Abb. 9-26). Je dichter die Bebauung, desto höher liegt die Wärmebelastung, wie an der Situation in der Innenstadt deutlich wird. Betrachtet man den Zeitraum 2046-2055, so zeigt sich auch hier der Einfluss der Enz mit einer moderaten Zunahme der Hitzetage. Dieser Einfluss ist jedoch sehr begrenzt – in allen bebauten Bereichen ist mit einer deutlichen Zunahme zu rechnen. Auch die heute günstigen Teile 3 und 4 zeigen dann ähnliche Häufigkeiten von Hitzetagen wie die Innenstadt.

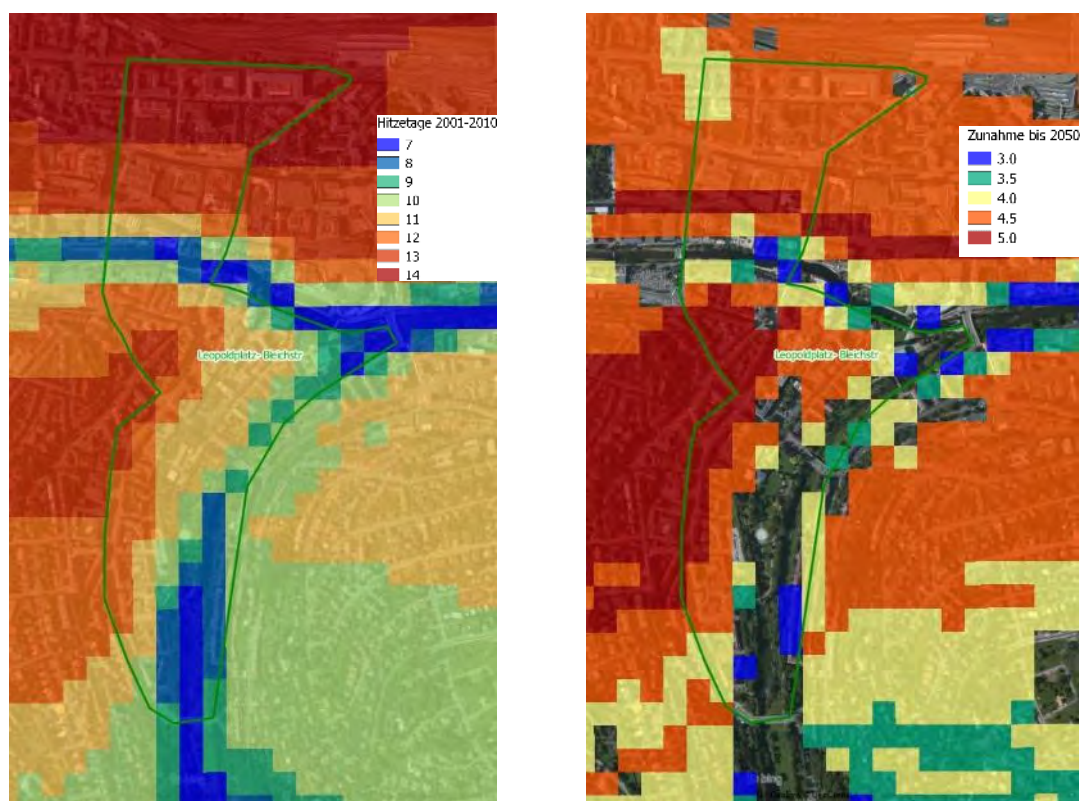


Abb. 9-26: Verteilung der Hitzetage in der Dekade 2001 – 2010 im Untersuchungsgebiet (links). Rechts die zu erwartende Zunahme in den bebauten Siedlungsbereichen bis in den Zeitraum 2046-2055.

9.3.1 Teilbereich 1 (Westliche Innenstadt)

Der Leopoldplatz ist der zentrale Platz im Teilbereich 1 (Abb. 9-27, Punkt A in Abb. 9-21). Er dient als Fußgängerzone mit zahlreichen Geschäften in den anliegenden Gebäuden. Daneben dient er auch als Knotenpunkt sehr vieler Buslinien. Daher wird er von Fußgängern stark frequentiert.

Die umliegenden Gebäude weisen eine große Höhe auf, was den vertikalen Luftaustausch erschwert. Der Platz ist außerdem weitgehend versiegelt. Lediglich auf dem nördlichen Fußgängerweg bietet eine isolierte Lindenreihe Schatten. Bei Hitzeperioden ist auf dem Platz zwangsläufig ein hohes Temperaturniveau zu erwarten. Passanten wählen daher in diesen Fällen meist einen Weg entlang der Südseite des Platzes, wenn am späten Vormittag bis Nachmittag die dortige Bebauung einen Schattenwurf (ähnlich wie im hier gezeigten Luftbild) erzeugt.



Abb. 9-27: Blick auf den Leopoldplatz in Richtung Westen (oben) und Luftbild (unten).

Vor dem oben aufgezeigten Hintergrund der Zunahme der Häufigkeit von Tagen mit starker Hitzebelastung sollte eine Anpassungsstrategie zunächst darauf abzielen, den Energieeintrag in den Platz zu reduzieren. Eine Verbesserung der Belüftungssituation dagegen ist realistischer Weise aufgrund fehlender bodennaher Kaltluftsysteme und vor allem aufgrund der Bestandsbebauung nicht umzusetzen. Zur Minimierung der Sonneneinstrahlung und der daraus resultierenden Aufheizung könnte eine Begrünung des Busfahrraums dienen, ähnlich z.B. der Benckiserstraße (Abb. 9-18). Die Nordseite des Platzes erhält aufgrund der Geometrie die meiste Sonneneinstrahlung. Für Passanten ist dieser Aufenthaltsraum daher in Hitzeperioden kaum attraktiv. Die isolierte Baumreihe kann nicht aus einem Schattenbereich heraus erreicht werden – es würde sich daher anbieten, die Baumreihe in Ost und Westrichtung zu verlängern. Dies würde zudem die Möglichkeit bieten, eine Verknüpfung zur Fußgängerzone östlich der Leopoldstraße herzustellen.

Bei der Bodengestaltung bietet sich eine Teilentsiegelung in Bereichen ohne Fahrbewegungen an. Neben der besseren Versickerfähigkeit für Regenwasser reduziert dies auch die Erwärmung der Luft bei starker Sonneneinstrahlung.

Einen Aufenthaltsanreiz können auch lokal verschattete Bereiche sein, wie sie z.B. durch Schirme bei Gaststätten geschaffen werden. Idealerweise sollten diese dann über eine verschattete Zone erreichbar sein. Alternativ zu einem mechanischen Sonnenschutz bieten sich Pflanz-Karrees an. Diese bieten vor allem den Vorteil eines geringen Flächenverbrauchs bei hohem Nutzwert.



bb. 9-28: Modellversuch „Grünes Zimmer Ludwigsburg“ als Beispiel für ein kleinräumiges Pflanzkarree (aus /17/).

Ein Modellversuch hierzu findet zurzeit in Ludwigsburg statt (Abb. 9-28, /17/).

Auch die Fassaden auf der Nordseite des Platzes tragen zur Umsetzung der Sonnenstrahlung in Wärme bei. Eine Methode um dies zu verringern stellt eine Fassadenbegrünung dar. Alternativ oder ergänzend können Verschattungselemente den Wärmeeintrag reduzieren.

Direkt angrenzend an den Leopoldplatz befindet sich die Schlössle-Galerie. Das Dach bietet ein sehr gutes Beispiel für eine intensive Dachbegrünung (Abb. 9-29). Sie besteht aus einem Wechsel aus Rasenflächen und Büschen, es gibt einen Spielbereich und eine Gastronomie. Die Fläche stellt daher einen abwechslungsreichen Ausgleichsraum z.B. zum Leopoldplatz dar. Es können allerdings keine großkronigen Laubbäume gepflanzt werden



Abb. 9-29: Luftbild der Schlössle-Galerie und Ausschnitt des Geländes mit Spielbereich.

Richtung Süden zweigt vom Leopoldplatz die Baumstraße ab (Abb. 9-30, Punkt B in Abb. 9-21). Sie ist ein typisches Beispiel für eine enge Nebenstraße im dichten Siedlungsbereich einer Innenstadt. Trotz der beengten Platzverhältnisse und der Leitungsinfrastruktur im Untergrund wurde hier

eine Straßenbegrünung realisiert. Hierfür kommen Hochbeete zum Einsatz, die einen ausreichenden Wurzelraum für die kleinkronigen Bäume ermöglichen. Eine Begrünung der Baumscheiben könnte diese Maßnahme weiter verbessern.

Als Oberflächenbelag wurden hier durchgängig Steine verlegt. Aus den schon für den Leopoldplatz genannten Gründen wäre stadtklimatologisch eine Teilentsiegelung vorteilhaft.

Auch eine Fassadenbegrünung könnte hier die Bedingungen im Straßenraum verbessern. Das Bild zeigt links ein Beispiel für eine Fassade, die aufgrund ihrer Struktur hierfür geeignet erscheint.



Abb. 9-30: Blick in die Baumstraße vom Leopoldplatz aus.

Das letzte Beispiel aus dem Teilbereich zeigt einen Hinterhof eines neu errichteten Gebäudes nahe der Enz. Bei Neubauten erscheint es sinnvoll, eine Begrünung des Hinterhofs von vorneherein mit einzuplanen. Den Bewohnern der angrenzenden Gebäude kann ein begrünter Hof deutlich besser als Aufenthalts- und Abkühlungsraum dienen als eine vollständig versiegelte Fläche.



Abb. 9-31: Hinterhof eines Neubaus nahe der Enz.

9.3.2 Teilbereich 2 (Südlich der Enz)

Teilbereich 2 weist ebenfalls einen hohen Versiegelungsgrad auf. Daher stellen kleine Grünflächen wie der Platz an der Rossbrücke einen wichtigen Beitrag zur Klimavielfalt dar (Abb. 9-32, Punkt C in Abb. 9-21). Auch weiter stromabwärts an der Enz liegen Grünflächen wie der Waisenhausplatz und der Lindenplatz. Stadtklimatologisch naheliegend wäre eine Vernetzung der Flächen untereinander, so dass ein größerer Aufenthaltsbereich mit günstigen bioklimatischen Bedingungen entsteht.



Abb. 9-32: Platz an der Rossbrücke, Blick Richtung Innenstadt.

Insbesondere Straßenbäume könnten zur Beschattung von Fassaden und versiegelten Flächen dienen. Ein Beispiel hierfür ist in der nördlichen Bleichstraße zu finden (Abb. 9-33). Die Bäume dienen zur Beschattung in der Mitte einer von Nord nach Süd verlaufenden Straße. Ein Grünstreifen

zwischen den Fahrstreifen dient zur Versickerung und gleichzeitig zur Bewässerung der Bäume. Durch den ausreichenden Grünstreifen ist es möglich, dass sich auch großkronige Laubbäume gesund entwickeln können.



Abb. 9-33: Begrünter Straßenraum in der nördlichen Bleichstraße.

Demgegenüber stellt ein vollständig versiegelter Parkraum eine Fläche dar, die sich während eines heißen Tags stark erwärmt und diese Wärme auch während der Nacht freigibt (Abb. 9-34). Bäume können in solchen Fällen Abhilfe schaffen. Durch ihre Beschattung könnte der Energieeintrag in die asphaltierten Flächen deutlich reduziert werden.



Abb. 9-34: Parkplatz an der Bleichstraße.

9.3.3 Teilbereich 3 (Südliche Bleichstraße – Stadtgarten)

Dieser Teilbereich profitiert durch seine Lage am Stadtgarten vom Kaltluftstrom aus dem Nagoldtal und ist daher trotz seiner Bebauungsstruktur bioklimatisch günstig einzuschätzen. Grundsätzlich könnte eine Auflockerung der geschlossenen Blockrandbebauung dazu dienen, den Austausch weiter zu verbessern. Vor diesem Hintergrund ist es daher zweckmäßig, bestehende Freiflächen, die eine weitgehend hindernisfreie Kaltluftströmung ermöglichen, zu erhalten (Abb. 9-35, Punkt D in Abb. 9-21).



Abb. 9-35: Blick Richtung Süden auf eine Freifläche zwischen Stadtgarten und Kallhardtstraße.

Mit zunehmender Entfernung vom bodennahen Kaltluftstrom steigt auch die Wärmebelastung an. Wie oben aufgezeigt wird auch in Teilbereich 3 die Wärmebelastung zukünftig deutlich zunehmen. Hierbei besonders betroffene, komplett versiegelte Straßenräume (Abb. 9-36, Punkt E in Abb. 9-21) können dabei effektiv durch Straßenbäume entlastet werden, ähnlich dem Bestand in der nördlichen Bleichstraße (Abb. 9-33). Auch Fassadenbegrünung kann hierbei einen Beitrag leisten.



Abb. 9-36: Blick Richtung Süden in die Bleichstraße. Eine Fortsetzung der Baumpflanzung kann hier für thermische Entlastung sorgen.

9.3.4 Teilbereich 4 (Rennfeld)

In Teilbereich 4 findet sich mit dem Goldschmiedeschulplatz ein Beispiel für einen Parkplatz, welcher durch Bäume recht gut beschattet wird (Abb. 9-37, Punkt F in Abb. 9-21). Trotz der hohen Versiegelung kann der Energieeintrag so abgemildert werden. Boden und Luft heizen sich nicht so stark auf wie bei einem vergleichbaren unbeschatteten Parkplatz (Abb. 9-34).



Abb. 9-37: Blick Richtung Norden auf den Parkplatz Goldschmiedeschulplatz.

Ebenfalls gute Beispiele für eine klimaangepasste Bebauung sind in diesem Bereich die Gebäude entlang der Nagold an der Nagoldstraße. Statt einer geschlossenen Blockbebauung ist die Struktur aufgelockert, so dass ein horizontaler Austausch mit dem Kaltluftstrom entlang der Nagold möglich ist. Dazwischen eingebettet sind Grünflächen und durch Bäume beschattete Spielplätze (Abb. 9-38, Punkt G in Abb. 9-21).



Abb. 9-38: Spielplatz bei Gebäuden zwischen Nagold und Rennfeldstraße.

Eine weitere Optimierung bei der Planung hätte die Berücksichtigung der hier herrschenden Strömungsrichtung entlang der Nagold darstellen können. Statt der Orientierung senkrecht zum Strömungsverlauf hätte eine Richtung parallel dazu den Vorteil eines geringeren Widerstands. Die Reichweite der Strömung wäre in diesem Fall größer.

9.4 *Innenstadt Ost*

Der Bereich des Planungsgebiets Innenstadt Ost liegt zwischen dem Bahnhof im Norden und der Enz im Süden (Abb. 9-39).

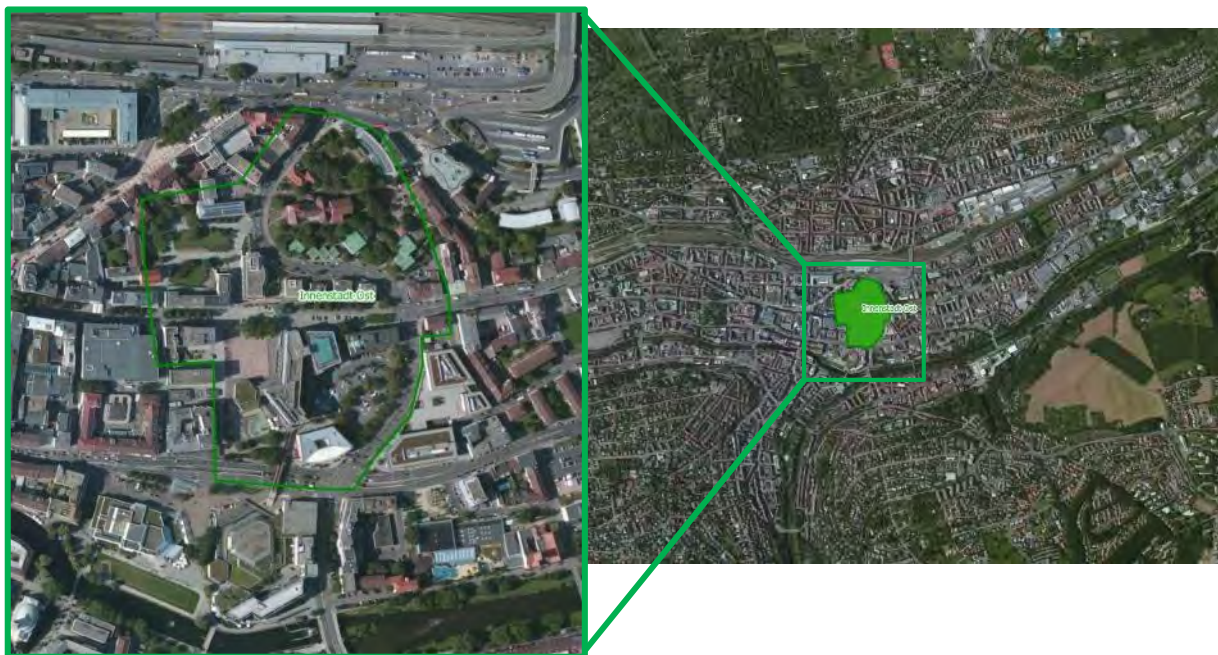


Abb. 9-39: Lage des Entwicklungsgebiets Innenstadt-Ost.

Hinsichtlich seiner städtebaulichen Prägung in Verbindung mit den stadtklimatologischen Eigenschaften lässt sich das Gebiet in 2 Bereiche untergliedern (Abb. 9-40). Im nördlichen Teil 1, finden sich neben der Bebauung die Grünflächen im Blumenhof und rund um die Schlosskirche. Der Bereich 2 ist stark verdichtet durch die mehrgeschossigen Gebäude an der Östlichen Karl-Friedrich-Straße, zu denen verschiedene Geschäfts- und Verwaltungsgebäude sowie die Stadtbibliothek gehören.

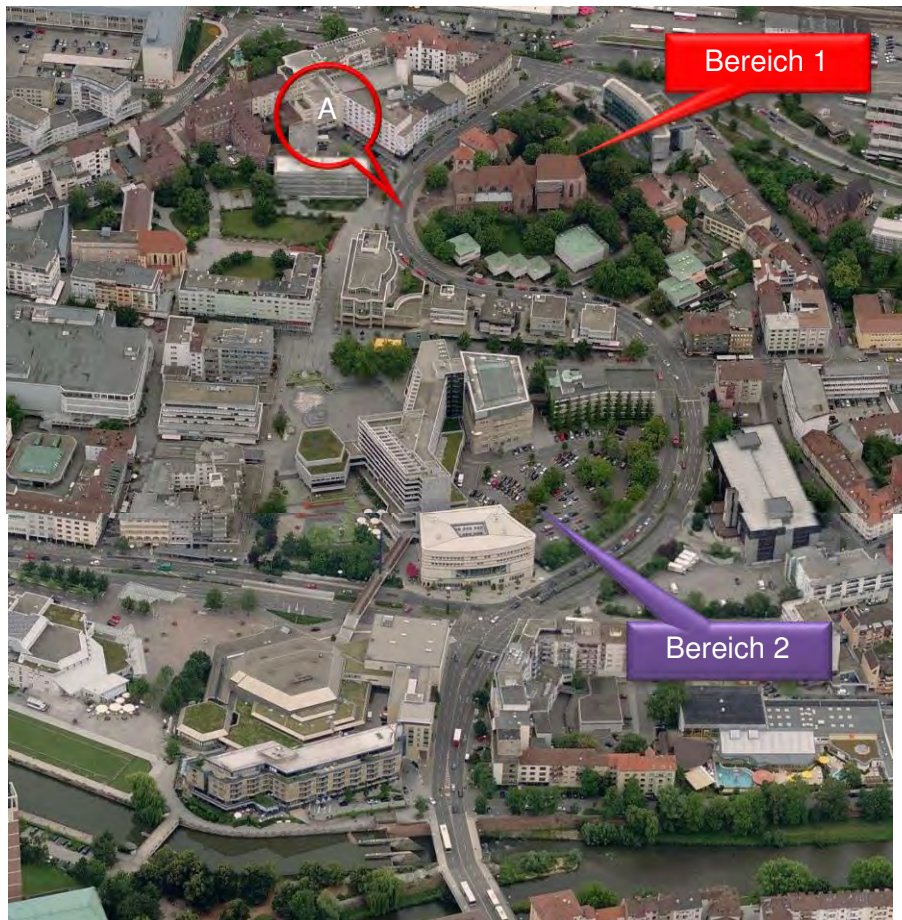


Abb. 9-40: Einteilung des Entwicklungsgebiets Innenstadt-Ost nach der jeweils vorherrschenden Bebauungsstruktur. Die Buchstaben kennzeichnen Orte, an denen während der Begehung verschiedene Maßnahmen diskutiert wurden.

Stadtklimatologische Ist-Situation

Die erarbeitete Stadtklimaanalyse erlaubt eine Bewertung der klimatischen Eigenschaften für einzelne kleinräumige Siedlungsbereiche. Für die bewohnten Gebiete sind insbesondere die Wärmebelastung und eine mögliche entlastende Wirkung einer Belüftung wichtig. Der Unterlauf der Nagold nach Zusammenfluss mit der Würm wird im Höhenbereich oberhalb der Bebauung bei autochthonen Wetterlagen entlang des Talverlaufs kräftig durchströmt (Abb. 9-41). Diese Strömung kann sich in abgeschwächter Form im Enztal fortsetzen, auch im Bereich der Innenstadt Ost (Abb. 9-42).

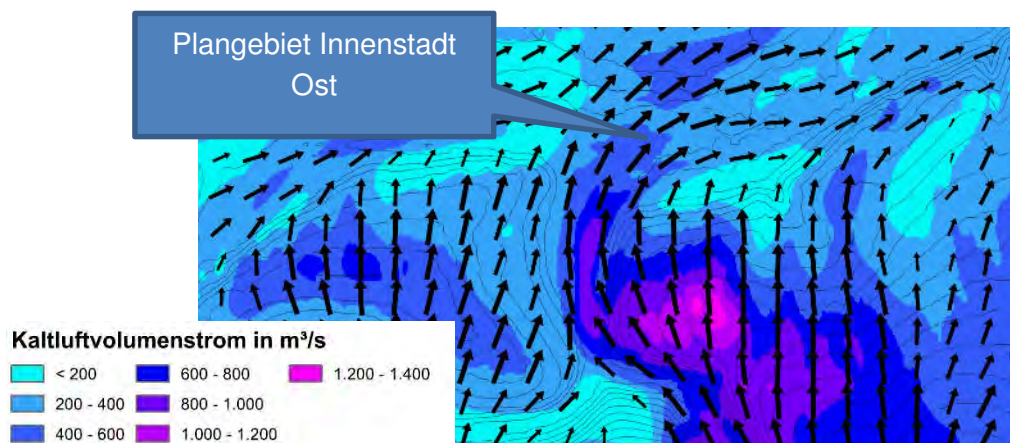


Abb. 9-41: Strömungsrichtung und Kaltluftvolumenstrom während einer mittleren autochthonen Wetterlage um 22 Uhr im Überdach-Niveau im Bereich des Plangebiets.

Bodennah wird die Kaltluftströmung dagegen durch die kompakte Bebauung rasch gebremst und aufgezehrt, so dass hier keine nennenswerte Durchströmung mehr stattfindet.

Auch die Strömung im Überdachniveau kann nur wenig zu einer Belüftung beitragen, da die kompakte Bebauung einen vertikalen Austausch behindert.



Abb. 9-42: Strömungsverhältnisse im Plangebiet Innenstadt Ost. Strömung im Überdach-Niveau.

In der Klimafunktionskarte führt diese Struktur zur Ausweisung ungünstiger bioklimatischer Bedingungen (Abb. 9-43).

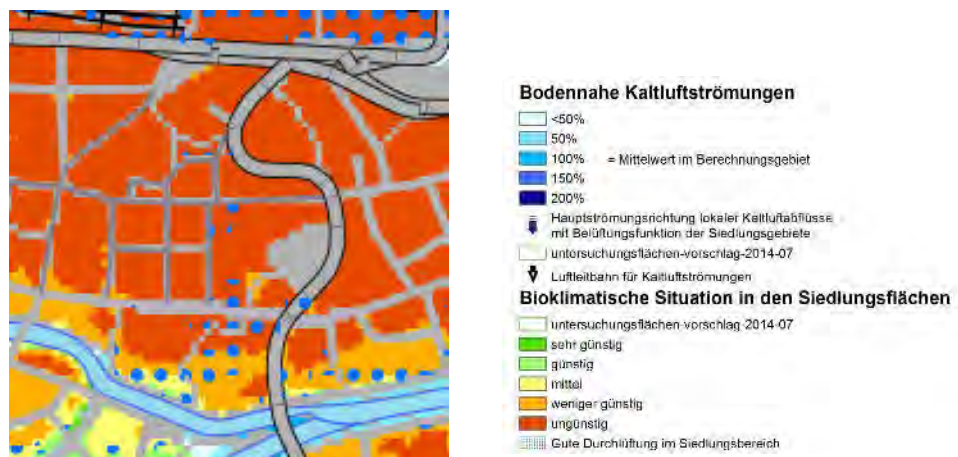


Abb. 9-43: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte im Bereich Innenstadt Ost.

Zukünftige Entwicklung

Die Folgen des Klimawandels lassen sich insbesondere an der Entwicklung der Hitzetage erkennen. Begünstigt sind vor allem Bereiche nahe der Enz (Abb. 9-44). Betrachtet man den Zeitraum 2046-2055, so zeigt sich auch hier der Einfluss der Enz mit einer moderaten Zunahme der Hitzetage. Dieser Einfluss ist jedoch sehr begrenzt, und im gesamten Bereich des Planungsgebiets ist mit einer deutlichen Zunahme zu rechnen.

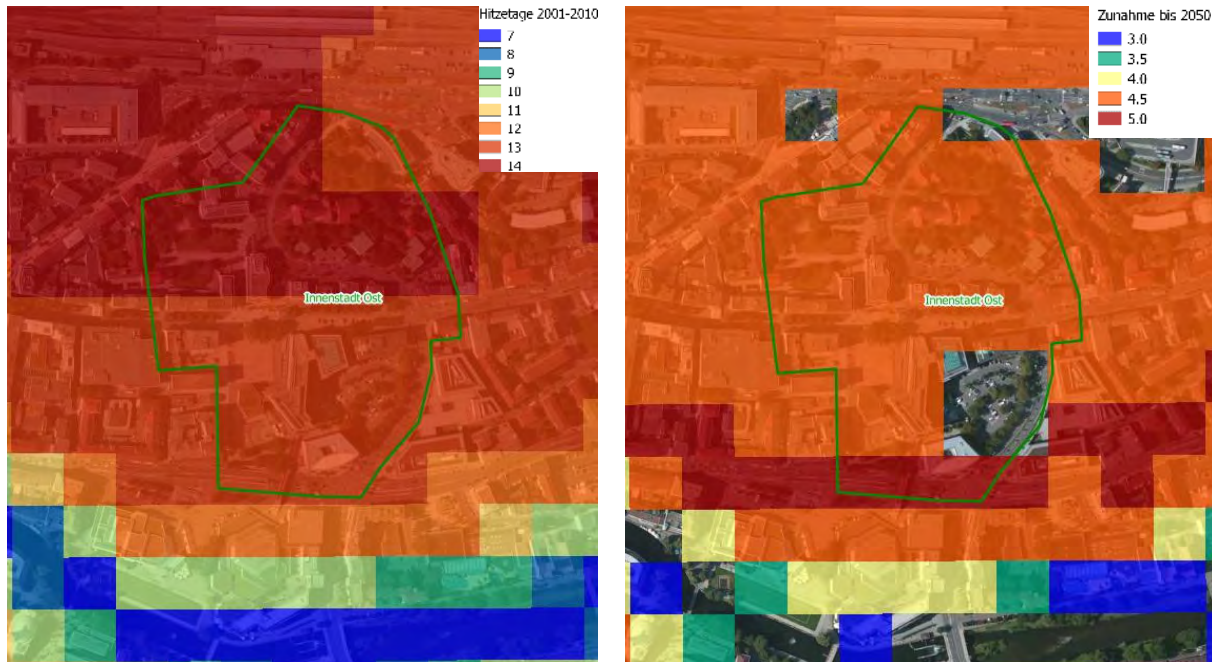


Abb. 9-44: Verteilung der Hitzetage in der Dekade 2001 – 2010 im Plangebiet (links). Rechts die zu erwartende Zunahme in den Siedlungsbereichen bis in den Zeitraum 2046-2055.

Grundsätzlich sind die Bedingungen in der Innenstadt Ost somit vergleichbar mit der beim Plangebiet Leopoldstraße beschriebenen Situation. Zusammengefasst liegen bereits bioklimatisch ungünstige Verhältnisse vor und der Klimawandel führt zu einer weiteren Zunahme.

Im Bereich der Innenstadt Ost liegt aber die besondere Situation vor, dass der Bereich grundlegend neu gestaltet wird. Hierzu zählen auch der Abriss und die Neuerrichtung von Gebäuden. Die Möglichkeiten, unter diesen Voraussetzungen effektive Klimaanpassungsstrategien zu entwickeln, sind bei solchen Rahmenbedingungen deutlich besser als in einem festen Gebäudebestand.

9.4.1 Teilbereich 1 (Blumenhof - Schloßkirche)

Der nördliche Teil 1 des Planungsgebiets umfasst die Grünflächen im Blumenhof und rund um die Schlosskirche und ist daher gut versorgt mit Erholungsflächen. Beide Flächen liegen nah beieinander, sind aber durch die Schloßberg-Straße voneinander getrennt (Abb. 9-45, Punkt A in Abb. 9-40). Im Zuge einer Neugestaltung könnten die beiden Areale besser verknüpft werden. Dies erhöht die Attraktivität einer Nutzung beider zusammenhängender Bereiche und schafft so insgesamt eine bessere Aufenthaltsqualität. Eine Berücksichtigung von Straßenbäumen oder Beschattungselementen in einer Verbindung garantiert die Nutzbarkeit durch Fußgänger auch an heißen Tagen mit hoher Einstrahlung. Im Bereich des Blumenhofs ist ein größerer Teil der Fläche versiegelt (Abb. 9-46), auch dies könnte im Zuge einer Neugestaltung optimiert werden. In stadtklimatologischer Hinsicht sollte der Anteil der Grünflächen in einem Park möglichst groß bzw. die Breite von Wegen möglichst klein sein. Falls Fahrwege notwendig sind, könnten diese durch Rasengittersteine entsiegelt werden. Bei größeren Plätzen bietet sich eine Beschattung durch großkronige Bäume an.



Abb. 9-45: Bestehende Verbindung zwischen Blumenhof (links anschließend) und dem Grünbereich um die Schlosskirche (rechts).



Abb. 9-46: Luftbild mit Blick auf Osten auf den Blumenhof.

9.4.2 Teilbereich 2 (Rathaus – Östliche Karl-Friedrich-Straße)

Der südliche Teil des Planungsgebiets ist demgegenüber vorwiegend versiegelt. Schattende spendende Bäume befinden sich in der Fußgängerzone, am Rathausplatz und am Platz des 23. Februar 1945, die Plätze selbst sind aber weitgehend versiegelt und weisen keine Grünelemente auf.

Bei einer Umgestaltung, die auf eine Anpassung an den Klimawandel mit seinen zunehmenden Belastungssituationen abzielt, ist aus stadtklimatologischer Sicht vor allem die Verbesserung der Durchlüftung relevant. Bodennah könnte dies nur aus Richtung Nagoldtal erfolgen. Aufgrund der Bestandsbebauung zwischen Innenstadt Ost und der Enz kann diese Verbindung nicht hergestellt werden. Im Überdach-Niveau setzt sich der Zustrom aber fort. Um an diesen Strom anzuknüpfen,

ist ein vertikaler Luftaustausch erforderlich. Große Blockbebauung mit engen Straßen und fehlende Freiflächen erschweren diesen Austausch.



Abb. 9-47: Bodennaher Wind 4 Uhr im Bereich Stadthalle-Stadtbibliothek.

Dass ein Zugriff auf die übergeordnete Strömung möglich ist, zeigt ein Beispiel im Bereich Am Waisenhausplatz (Abb. 9-47). Die in Ost-West-Richtung orientierte Straße weist hier eine relativ große Breite auf, und es bildet sich eine Luftströmung, die zu einem Luftaustausch beiträgt.

Neben einem ausreichenden Abstand ist auch die Lage der Baukörper entscheidend. Diese reichen bei innerstädtischen Gebäuden meist über mehrere Stockwerke bei großem Bauvolumen und stellen somit Strömungshindernisse dar. Parallel zur Strömungsrichtung orientierte Strukturen minimieren diese Hinderniswirkung. Im vorliegenden Fall (vgl. Strömungsrichtung in Abb. 9-42) bieten sich südwestliche Achsen an.

Bestehende Innen- und Hinterhöfe lassen sich durch Entsiegelung und Begrünung aufwerten. Im Neubau bietet sich an, eine geschlossene Baustruktur schon in der Planung zu vermeiden. Dies ermöglicht einen horizontalen Austausch, so dass alle Bereiche von zugeführter Luft profitieren können.

An den Gebäuden selbst sollte so weit wie möglich die Umsetzung von Sonnenstrahlung in Wärme vermieden werden. Hierfür bieten sich Maßnahmen wie Fassaden- und Dachbegrünung an.



Abb. 9-48: Beispiel für eine teilweise aufgelockerte Bebauungsstruktur und Einsatz von Dachbegrünung. Rosenberghöfe Stuttgart (/20/).

Im südlichen Teil soll eine bessere Anbindung der Fußgängerzone an die südlich der Zehnthofstraße gelegenen Bereiche z.B. mit CongressCentrum und Theater erfolgen. Möglich wäre hier, diese Verbindungsachse hin zu den Grünbereichen im nördlichen Teil des Planungsgebiets zu erweitern. Durch eine Umsetzung mit beschattenden Bäumen könnte so eine Vernetzung vom Bereich der Schlosskirche bis hin zur Enz erfolgen.

In Abb. 9-49 sind die hier genannten Möglichkeiten zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Bauleitplanung in Form von Beispielen dargestellt.

Quantitative Vergleiche zwischen verschiedenen Bauformen können hieraus nicht abgeleitet werden. Bei Vorlage konkreter Planungen lässt sich das Mikroklima mit Hilfe hochaufgelöster Computermodelle berechnen und dadurch Rückschlüsse auf den Effekt verschiedener Maßnahmen ziehen.

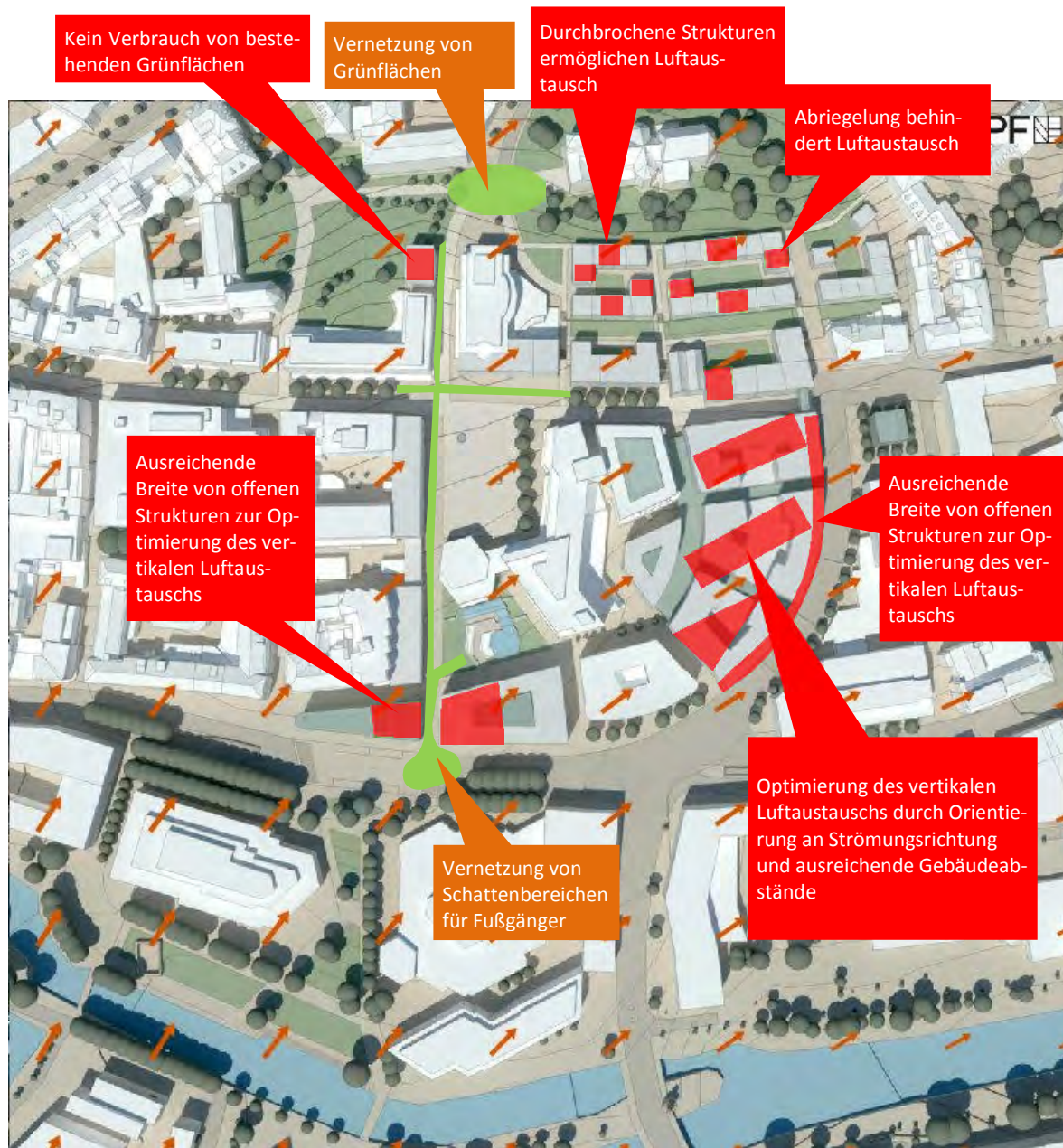


Abb. 9-49: Beispiele für stadtplanerische Optimierungen in Hinsicht auf klimatische Aspekte.

10 Zusammenfassung und Fazit

Für die Stadt Pforzheim wurde die Stadtklimaanalyse aktualisiert und fortgeschrieben. Dazu wurde eine Bestandsaufnahme der klimatischen Situation der Stadt Pforzheim erstellt. Ein wesentliches Ziel dieser Analyse ist die Bewertung der bioklimatischen Wärmebelastung der Bevölkerung. Grundlage der Untersuchung stellt daher eine austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlage dar. Während derartiger Wetterlagen entstehen häufig überdurchschnittliche Wärmebelastungen vor allem in dicht bebauten Siedlungsräumen und damit eine ungünstige bioklimatische Situation für die Bewohner. Die Belüftungssituation durch nächtliche Kaltluftabflüsse aus der Umgebung in die Siedlungsräume spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung basiert auf zwei Säulen. Mit dem Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) wurde eine flächendeckende modellgestützte Analyse der klimaökologischen Funktionen erstellt. Darüber hinaus wurden bei einer solchen Wetterlage Messungen durchgeführt sowie Messungen aus früheren Untersuchungen ausgewertet. Die Messungen stellen eine wichtige Grundlage dar, die berechneten Ergebnisse zu verifizieren.

Aufbauend auf den Grundlagen, welche in die numerische Simulation der Strömung eingehen, wurde die konkrete Umsetzung der Vorgehensweise für das Untersuchungsgebiet Pforzheim erläutert. Im Rahmen der Begriffsbestimmungen wurden die untersuchten Klimatelemente, die Methodik wie auch die projektierten Ziele der Stadtklimaanalyse vorgestellt. Die durchgeführten Messungen erlauben, die Simulationsergebnisse mit den realen Gegebenheiten zu vergleichen. Die Modellergebnisse für Temperaturen, Kaltluftvolumenströme und daraus abgeleiteter Größen wie der bioklimatischen Situation bilden die Basis für das erste zentrale Ergebnis der Analyse: die Klimafunktionskarte. Sie bewertet die Flächen und Nutzungen im Stadtgebiet hinsichtlich ihrer klimatischen Funktion. Hierbei sind der nächtliche Kaltluftaustausch und die städtischen Strukturen mit Bebauung, Grün- und Freiflächen von zentraler Bedeutung.

Die Fortschreibung soll im Vorfeld von Planungen, bei konkreten Bebauungsplanvorhaben und in der Flächennutzungsplanung Anhaltspunkte zur Vorbeugung und Vermeidung möglicher Konflikte geben. Die Grundlage hierfür stellt die Planungshinweiskarte dar. Sie bewertet die Klimafunktionen hinsichtlich ihrer bioklimatischen Wirkung. Freiflächen werden im Hinblick auf ihre klimatische Ausgleichsfunktion und die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung eingestuft. Dies ist die Basis für allgemeine Planungsempfehlungen bzw. Erhaltungs- und Entwicklungsziele, welche ihren Schwerpunkt auf die Sicherung, Entwicklung und ggf. die Wiederherstellung von bioklimatisch bedeutsamen Nutzungen legen.

Auch die Veränderungen im Zuge des Klimawandels stellt die Stadtplanung vor neue Herausforderungen. Die mittels der „Quadermethode“ auf das Stadtgebiet verfeinerte Klimaprojektion zeigt eine deutliche, im Stadtgebiet aber stark differenzierte Zunahme der Wärmebelastung.

Darüber hinaus wurden die Grünflächen im Stadtgebiet einer eingehenden Analyse bezüglich ihrer klimatischen Wirksamkeit unterzogen. Hierbei wurden die Wohlfahrtswirkungen für die Naherholung und die Frischluftversorgung in Abend- bzw. Nachtstunden bei belastenden Wetterlagen als auch ihre Vorteile bei Situationen mit Wärmebelastung während der Tagesstunden beleuchtet. Je nach Lage und Größe können diese Flächen adäquat städtebaulich bewertet werden.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Untersuchung bilden die Stadtteilbegehungen. In ihnen wurde mögliche Entwicklungsbereiche innerhalb der Stadt bezüglich ihrer klimatischen Situation detailliert bewertet und mögliche Optimierungen im Zuge von künftigen städtebaulichen Maßnahmen bewertet.

Die ungünstigsten bioklimatischen Bedingungen finden sich im stark verdichteten Stadtkern von Pforzheim und in der Nordstadt sowie in den großen Gewerbegebieten. Eine wichtige Rolle spielen daher die Luftleitbahnen, die den Zustrom von Kaltluft in die Siedlungsräume ermöglichen. Der Zustrom aus den Tälern der Enz und dem Würmtal und dem unteren Nagoldtal entlastet die Bereiche des westlichen Enztals und große Teile der Südwest- und Südoststadt. Lokale Kaltluftentstehungsgebiete begünstigen an geneigten Hängen den Transport von Kaltluft in die Stadtrandlagen (z. B. Hagenschieß, Buckenberg, Bohrain, Hinter der Warte). Die dort vorherrschende Bebauungsstruktur entscheidet über die Eindringtiefe und damit die Reichweite dieser Entlastungsfunktion im bebauten Bereich. Das Zusammenspiel von Geländestruktur, großräumiger Strömung und der starken Bebauung der Hanglagen führen in der Nordstadt dazu, dass dort kaum lokale Kaltluftflüsse in Richtung der Bebauung auftreten und dementsprechend weniger günstige Bedingungen vorhanden sind. Auch die Innenstadt kann vom Zustrom an den Stadträndern nur wenig profitieren, da die Kaltluftströme im Vorfeld aufgezehrt werden. Ein positives Potential bietet die Strömung, die sich aus den Haupttälern oberhalb der Bebauung fortsetzen kann. Bei optimaler Anordnung von Bebauungs- und Freiflächenstrukturen kann diese Strömung eine entlastende Funktion entfalten.

Die weltweite Klimaerwärmung wird sich auch in Pforzheim auswirken. Die Rechenergebnisse bis zum Jahr 2050 zeigen einen deutlichen Anstieg der Hitzebelastungen. So wird sich z.B. die Zahl von heißen Tagen, an denen die Temperatur über 30°C steigt, in den stark belasteten Bereichen im Mittel von heute 12 auf zukünftig 18 erhöhen. Die Auswirkungen werden für die Stadtbewohner insbesondere bei Extremereignissen (Hitzewellen) verstärkt spürbar. Besonders stark verdichtete Stadteile ohne Anschluss an Frischluftgebiete (z. B. Teile der Innenstadt, der Nordstadt, verschiedene Gewerbegebiete, verschiedene Bereiche in den südlichen Stadtteilen) werden in Zukunft häufiger von thermischen Belastungen betroffen sein.

Da der Trend zur Klimaerwärmung auf lokaler Ebene kaum beeinflusst werden kann, ist aus stadtklimatischer Sicht die gezielte Vorbereitung auf die Folgen des Klimawandels von zentraler Bedeutung. Die negativen Auswirkungen auf die Stadt und ihre Bewohner können so teilweise abgemildert werden. Der klimagerechten Entwicklung innerstädtischer Grün- und Freiflächen kommt dabei eine entscheidende Rolle zu.

Pforzheim sollte für die Zukunft insbesondere drei Aspekte im Rahmen einer Anpassungsstrategie an den Klimawandel berücksichtigen:

- 1) Eine Reduzierung des Strahlungseintrages in die Stadt durch Abschattung wirkt direkt und vorbeugend. Dabei ist vor allem die Tagsituation zu berücksichtigen. Entscheidend wird es sein, den Hitzeeintrag in die Wohn- und Gewerbegebiete zu reduzieren. Kurz- und mittelfristig kann vor allem durch Förderung von städtischem Grün eine deutliche Reduzierung der Strahlungstemperatur und Verbesserung des thermischen Wohlbefindens erreicht werden. Dazu können folgende Maßnahmen dienen:

- Erhalt und Optimierung bestehender Grünanlagen und Schutz vorhandener großkroniger Stadtbäume,
- Schaffung öffentlicher Grünanlagen und Innenhofbegrünung vor allem in Belastungsgebieten,
- Pflanzung großkroniger Bäume in Belastungsbereichen,
- Fassadenbegrünung in Ost-, Süd- und Westausrichtung,
- Dachbegrünung.

2) Die Zufuhr von Frischluft bei austauscharmen Wetterlagen wird im Rahmen der Klimaerwärmung noch wichtiger. In der Nacht wirken die Bergwindsysteme von Enz bzw. Würm und Unterer Nagold sowie der flächenhafte Abfluss von Kaltluft am Hang. Diese heute schon wirksamen Frischluftentstehungsgebiete und Durchlüftungsschneisen sollten in Zukunft erhalten und wenn möglich weiter entwickelt werden. Dieser Aspekt ist im Rahmen der Abwägung bei baulichen Planungen zu berücksichtigen (§1 Abs. 5 BauGB).

3) Bei baulichen Veränderungen sollten vor allem in stark verdichteten Bereiche die klimatischen Auswirkungen beachtet werden. Kritisch sind insbesondere eine Bebauung von Grün- und Freiflächen, die in Bezug und räumlicher Nähe zu belasteten Gebieten stehen. Gerade bei der Neuplanung von Siedlungsgebieten können die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse hinsichtlich Verbesserung der Belüftungssituation und Reduzierung des Strahlungseintrages berücksichtigt werden. Beispielsweise die Innenstadtentwicklung Ost bietet aktuell Chancen, schon in der Planungsphase Auswirkungen der Klimaänderung zu berücksichtigen und durch geeignete Maßnahmen den Strahlungseintrag zu reduzieren sowie die Zufuhr von Frischluft aus den Tälern in die Innenstadt zu verbessern. Hochaufgelöste Modellrechnungen der lokalen Gegebenheiten können in solchen Fällen Hinweise auf mögliche stadtklimatische Optimierungen der Planung geben.

Die angeführten Punkte wurden im Rahmen der Analyse der Grünflächen und der Stadtteilbegehungen detailliert für konkrete Siedlungsräume im Stadtgebiet Pforzheim erarbeitet. Diese Ausarbeitung kann als fundierte Grundlage für planungsbezogene Aussagen dienen.

iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG

Gerlingen, 04.02.2015

„Dieses Dokument ist eine elektronische Kopie und besitzt daher keine Unterschrift. Original-Unterschriften befinden sich auf dem/den gedruckten Exemplar/en.“

Werner-Jürgen Kost Dr. Markus Hasel Dr. Jost Nielinger Stephan Fischer

Literatur

- /1/ **Bangert, H.** (1993): Klimaanalyse Stadt Pforzheim, Abschlussbericht, Paderborn.
- /2/ **Deutscher Wetterdienst** (1979): Amtliches Gutachten über die klimatischen Verhältnisse im Großraum Pforzheim für den Landschaftsrahmenplan des Regionalverbandes Nordschwarzwald, Offenbach am Main.
- /3/ **Groß, G.** (1991): Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle, dargestellt am Beispiel Darmstadt. Teil I: Wind- und Temperaturfelder. Meteorol. Rdsch. 43, 97-112.
- /4/ **Groß, G.** (1993): Numerical Simulations of Canopy Flow. Springer Verlag, Heidelberg, Springer Series in Physical Environment 12, 167 pp.
- /5/ **Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN** (Hrsg.; 1988): Stadtklima und Luftreinhaltung. Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung. Berlin u.a.
- /6/ **Mayer H., 1988:** Workshop „Ideales Stadtklima“, 26.10.1988, München. Mitt. Dt. Meteorol. Ges. 3/89, S. 52-54.
- /7/ **Mayer H., Beckröge W. u. Matzarakis A. 1994:** Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. - In: UVP-report 5/94, S. 265-268.
- /8/ **Meyers** (1987): Meyers kleines Lexikon Meteorologie, Meyers Lexikonverlag.
- /9/ **Nielinger, J.** (1994): Instationäre Ausbreitung von Luftbeimengungen in komplexem Gelände - Numerische Simulationen. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover, 139 S.
- /10/ **Nielinger, J.** (1998): Kopplung numerischer Simulationsmodelle zur Regionalisierung von Ergebnissen globaler Klimaszenarienrechnungen. Dissertation Fachbereich Physik, Universität Hannover. Berichte des Institutes für Meteorologie und Klimatologie Band 57.
- /11/ **Nielinger, J.; Kost, W.-J.** (2001): Simulation of realistic location-related wind distributions with the mesoscale model FITNAH. Meteorol. Zeitschr. 10, No. 4, 235-238.
- /12/ **Nielinger, J.; Kost, W.-J.; Nobel, W.; Müller, K. und Winkelbaur, W.** (2012): Biomonitoring im Rahmen der Ökosystembewertung eines Automobilstandortes. Teil 4: Mikro- und lokalklimatische Untersuchung – Wirkung und Einflussnahme auf das Umfeld. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 72 (2012) Nr. 4, S. 127-130.
- /13/ **iMA Richter & Röckle** (2014): Gutachten zu Klima, Lufthygiene und Windkomfort für den 1. Realisierungsabschnitt Freiam Nord. Gutachten Nr. 12-03-05-FR, Freiburg im Breisgau.
- /14/ **VDI 3785 Bl. 1:** Umweltmeteorologie - Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, VDI Düsseldorf, Dezember 2008, Beuth Verlag, Berlin.
- /15/ **VDI 3787 Bl. 2** Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.

- /16/ **Deutscher Dachgärtner Verband** (2011): Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen, Nutzen – Fördermöglichkeiten – Praxisbeispiele, Hrsg.: Wolfgang Ansel et. al., Verlag Deutscher Dachgärtner Verband e. V. (DDV), Nürtingen.
- /17/ **Weidenbacher, S.; Eisenberg, B.** (2014), EU-Projekt TURAS: Das Grüne Zimmer Ludwigsburg Ein Plus für Stadtklima und Aufenthaltsqualität. Vortrag im Seminar „Stadt 2022: Innenstadtbegrünung als Basis für mehr Umwelt- und Lebensqualität in Zeiten des Klimawandels“, Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden- Württemberg.
- /18/ **Städtebauliche Klimafibel** (2012), Hinweise für die Bauleitplanung, Hrsg.: Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.
- /19/ **Stadt Stuttgart**, Stadtentwicklung, Bauprojekte (2014).
<http://www.stuttgart.de/item/show/488754> (abgerufen am 13. April 2015)
- /20/ **Handbuch Stadtklima**, Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (2011), Hrsg. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- /21/ **LfU** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1987), Materialien zur Grünordnungsplanung Teil 1,
- /22/ **Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M., Mieskes, I; Namyslo, J.; Roos, M.; Sievers, U.; Steigerwald, T.; Turau, H.; Wiendert, U.** (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 50, 167-184, doi: 10.1175/2010JAMC2377.1