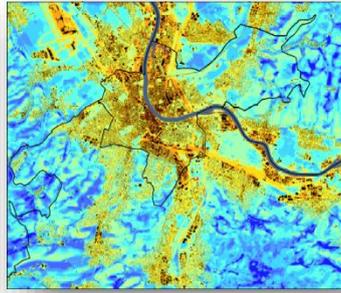


# Stadtklimaanalyse Kanton Basel-Stadt 2019



## Grundlagen, Methoden, Ergebnisse



Lufthygieneamt beider Basel

Lufthygieneamt beider Basel  
Rheinstrasse 29  
4410 Liestal

Erstellt von:  
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover/Dresden

Stand  
September 2019 (Rev09)





## Impressum

### Auftraggeber

Lufthygieneamt beider Basel

### Autoren

Cornelia Burmeister, Björn Büter, Peter Trute

### Begleitgruppe

Cosimo Todaro (Lufthygieneamt beider Basel, Projektleitung)

Sandra Andris-Ogorka (Lufthygieneamt beider Basel)

Franziska Schwager (Amt für Umwelt und Energie Kanton Basel-Stadt)

Bettina Rahuel (Planungsamt Kanton Basel-Stadt)

Armin Kopf (Stadtgärtnerei Kanton Basel-Stadt)

Catherine Heinzer (Kantons- und Stadtentwicklung Kanton Basel-Stadt)

Martin Huber (Amt für Raumplanung Kanton Basel-Landschaft)

### Projektsteuerung

Andrea von Känel, Leiter Lufthygieneamt beider Basel, WSU

Matthias Nabholz, Leiter Amt für Umwelt und Energie, WSU

Martin Sandtner, Leiter Planungsamt, BVD

Emanuel Trueb, Leiter Stadtgärtnerei, BVD

Lukas Ott, Leiter Kantons- und Stadtentwicklung, PD

### Begleitung UNI Basel, Forschungsgruppe Atmosphärenwissenschaften

Christian Feigenwinter, Andreas Wicki



# Inhaltsverzeichnis

<b><i>Inhaltsverzeichnis</i></b>	<b><i>II</i></b>
<b><i>Abkürzungsverzeichnis</i></b>	<b><i>V</i></b>
<b><i>Glossar</i></b>	<b><i>VI</i></b>
<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>1 Stadtklimatische Untersuchungen</i></b>	<b><i>2</i></b>
1.1 Gewählter Analyseansatz	2
1.2 Bisherige Stadtklimatische Untersuchungen	2
1.3 Luftreinhalteplan Beider Basel	3
<b><i>2 Fachliche Grundlagen</i></b>	<b><i>4</i></b>
2.1 Der Stadtklimaeffekt	4
2.2 Die Rolle des Rheins in der Stadt	9
2.3 Untersuchungsgebiet	11
2.3.1 Klimadaten	12
<b><i>3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse</i></b>	<b><i>15</i></b>
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	15
3.1.1 Grundlagen meso- und mikroskaliger Modelle	15
3.2 Betrachtete Wetterlage	17
3.3 Methode der Zukunftsrechnung Stadtklima 2030	17
3.3.1 Methodische Grundlagen	17
3.3.2 Änderungsstatistik	19
3.4 Eingangsdaten	22
3.4.1 Abgrenzung und Bewertung der klimaökologisch wirksamen Nutzungsstrukturen	25
<b><i>4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter</i></b>	<b><i>26</i></b>
4.1 Nächtliches Temperaturfeld	26
4.1.1 Allgemeines	26
4.1.2 Ergebnisse Temperaturfeld	27
4.2 Kaltluftströmungsfeld	29
4.2.1 Allgemeines	29
4.2.2 Ergebnisse Kaltluftströmungsfeld	29
4.3 Kaltluftvolumenstrom	32
4.3.1 Allgemeines	32
4.3.2 Ergebnisse Kaltluftvolumenstrom	33
4.4 Thermische Belastung am Tage	35
4.4.1 Allgemeines	35
4.4.2 Ergebnisse	36
	<b><i>II</i></b>



<b>5</b>	<b><i>Klimaanalysekarten</i></b>	<b>37</b>
5.1	<b>Vorgehensweise</b>	<b>37</b>
5.2	<b>Nachtsituation</b>	<b>37</b>
5.2.1	Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen	37
5.2.2	Kaltlufteinwirkungsbereich	38
5.2.3	Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen	38
5.3	<b>Tagsituation</b>	<b>39</b>
5.4	<b>Lesehilfe für die Klimaanalysekarten</b>	<b>40</b>
5.4.1	Areal Am Walkeweg	40
5.4.2	Gebiet Volta Nord	41
<b>6</b>	<b><i>Ausblick: Stadtklimatische Maßnahmen</i></b>	<b>42</b>



## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: PRINZIPIKIZZE FLURWIND.....	4
ABBILDUNG 2: PRINZIP DES BERG- TALWINDSYSTEMS ZU UNTERSCHIEDLICHEN ZEITPUNKTEN. QUELLE: SCHÖNWIESE 2013 .....	5
ABBILDUNG 3: VERDEUTLICHUNG DES BERG-/TALWINDSYSTEMS. DAS WINDSYSTEM AM TAG UM 12 UHR ZEIGT DEUTLICH HANGAUFWÄRTS GERICHTETE STRÖMUNG QUELLE: ÜBERSICHTSRECHNUNG IN 250M AUFLÖSUNG MIT FITNACH-3D, GROSS 2018 .....	7
ABBILDUNG 4: STRÖMUNG IN DER NACHT UM 23 UHR MIT TALWÄRTIG GERICHTETER STRÖMUNG. QUELLE: ÜBERSICHTSRECHNUNG IN 250M AUFLÖSUNG MIT FITNACH-3D, GROSS 2018.....	8
ABBILDUNG 4: STRÖMUNG IN DER NACHT UM 23 UHR MIT TALWÄRTIG GERICHTETER STRÖMUNG. QUELLE: ÜBERSICHTSRECHNUNG IN 250M AUFLÖSUNG MIT FITNACH-3D, GROSS 2018.....	8
ABBILDUNG 5: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN GRÖÖZE, TIEFE UND FLUSSABSCHNITT ZUR TÄGLICHEN WASSERTEMPERATUR. QUELLE: ÜBERNOMMEN AUS (CAISSIE 2006, S. 1391).....	9
ABBILDUNG 6: JAHRESGANG 2018 DER WASSERTEMPERATUR DES RHEINS AM PEGEL RHEINBRÜCKE, QUELLE: (ABTEILUNG HYDROLOGIE 2018).....	10
ABBILDUNG 7: ÜBERSICHT ÜBER DAS RECHENGEBIET. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG. ....	11
ABBILDUNG 8: DGM FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET .....	12
ABBILDUNG 9: JAHRESMITTELTEMPERATUREN FÜR DIE STATION BINNINGEN. QUELLE: EXCELTADELLE STADT BASEL. 2018, REITER: D_ JAHR_ TEMP .....	13
ABBILDUNG 10: JAHRESZEITENMITTELWERTE. QUELLE: EXCELTADELLE BASEL-BINNINGEN, (D_ JZEITEN_ TEMP2018).....	14
ABBILDUNG 11: NIEDERSCHLAGSSUMMEN FÜR DIE STATION BASEL-BINNINGEN. QUELLE: BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ .....	14
ABBILDUNG 12: TEMPERATURVERLAUF UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT VERSCHIEDENER LANDNUTZUNGEN.....	16
ABBILDUNG 13: MOMENTAN VERFÜGBARE MODELLÄUFE DER EURO CORDEX INITIATIVE. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG. ....	18
ABBILDUNG 14: VERGLEICH DER ALTEN SZENARIEN (IS92A, SRES) MIT DEN NEUEN RCP SZENARIEN: HISTORISCHE (FÜR DAS 20. JAHRHUNDERT) UND PROJIZIERTE (FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT) VERÄNDERUNG DES GESAMTEN ANTHROPOGENEN STRAHLUNGSANTRIEBS (,RADIATIVE FORCING´ RF IN W/M <sup>2</sup> ) IM VERGLEICH (KLIMANAVIGATOR 2017) .....	19
ABBILDUNG 15: EURO-CORDEX AUSWERTUNG DER TEMPERATURÄNDERUNG FÜR DIE ZUKUNFTSPERIODEN. QUELLE: EIGENE AUSWERTUNGEN, PAVLIK GEO-NET 2018 .....	20
ABBILDUNG 16: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR FÜR DIE STADT BASEL, KLIMASZENARIO RCP 4.5.....	21
ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNGEN DER MONATSMITTELTEMPERATUR FÜR DIE STADT BASEL, KLIMASZENARIO RCP 4.5.....	21
ABBILDUNG 18: ÜBERSICHT ÜBER DIE UNTERSCHIEDLICHEN HÖHENMODELLE IN IHRER UNTERSCHIEDLICHEN AUFLÖSUNG. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG. ....	23
ABBILDUNG 19: AREALENTWICKLUNGEN, DIE IN DIE MODELLSIMULATIONEN EINGEGANGEN SIND. SCHWARZ BESCHRIFTETE AREALE SIND BEREITS ALS BEBAUT IN DER IST-SITUATION EINGEFLOSSEN, ROT BESCHRIFTETE AREALE SIND IN DIE ZUKUNFTSRECHNUNG ALS BEBAUT EINGEFLOSSEN. QUELLE: STADTPLANUNGSAMT BASEL-STADT, EIGENE DARSTELLUNG. ....	24
ABBILDUNG 20: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION .....	25
ABBILDUNG 21: NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BASEL MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSSTRUKTUREN IN DER IST SITUATION .....	27
ABBILDUNG 22: NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BASEL MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSSTRUKTUREN IN DER ZUKUNFTSSITUATION .....	28
ABBILDUNG 23: NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BASEL .....	31
ABBILDUNG 24: PRINZIPIKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM.....	32
ABBILDUNG 25: VERTIKALPROFILE DER KALTLUFT IM TEIL DES INNERSTÄDTISCHEN BIRSIGTAL. ....	34
ABBILDUNG 26: ZUSAMMENSTELLUNG DER INFORMATIONEN AUS DEN KLIMAANALYSEKARTEN FÜR DAS AREAL AM WALKEWEG.....	40
ABBILDUNG 27: ZUSAMMENSTELLUNG DER INFORMATIONEN AUS DEN KLIMAANALYSEKARTEN FÜR DAS GEBIET VOLTA NORD. ....	41

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN FÜR DEN BEWERTUNGSINDEX PET WÄHREND DER TAGESSTUNDEN (NACH VDI 3787, BLATT 2 11/2008). ....	35
TABELLE 2: FLÄCHENANTEILE DER NÄCHTLICHEN ÜBERWÄRMUNG IM SIEDLUNGS- UND GEWERBERAUM FÜR DIE IST-SITUATION UND UNTER KLIMAWANDELBEDINGUNGEN BIS 2030. ....	37



## Abkürzungsverzeichnis

DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
GIS	Geografische Informationssysteme
RGBI	Rot-, Grün-, Blau-, Infrarotkanalige Luftbilder



## Glossar

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

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

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

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

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

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

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

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

**Geostrophischer Wind:** Der geostrophische Wind ist eine Einteilung des Windes nach den antreibenden Kräfteverhältnissen. Der geostrophische Wind oberhalb der Bodenreibungsschicht auf, z.B. besonders stark ausgeprägt als Jetstream. Er wird angetrieben von der Druckgradientkraft (Luftbewegung vom Hoch- zum Tiefdruckgebiet) und abgelenkt durch die Corioliskraft.

**Gewässer:** Tagsüber haben Gewässer einen positiven Effekt auf die Umgebungstemperatur und tragen zur Kühlung der unmittelbaren Umgebung bei. Die Reichweite ist jedoch geringer als die einer Grünfläche und beschränkt sich hauptsächlich auf die Fläche des Wasserkörpers. Nachts haben Wasserflächen keinen kühlenden Effekt, da sie selbst durch die hohe Wärmekapazität (Wärmespeicher) ein höheres Temperaturniveau als die Lufttemperatur aufweisen. Gewässer in Städten sind ruhigkeitsarme Strukturen und sind daher oft Ventilationsbahnen, die je nach Ausrichtung zur Frischluftherneuerung beitragen können.

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



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

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

**Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen und Straßen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen  $\rightarrow$  Kaltluftvolumenstrom durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

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

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

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

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

**Klima:** Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt, was als Normalperiode bezeichnet wird. Das Klima gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet wider. Das Klima an einem Ort wird beschrieben über Mittelwerte, Extremereignisse und Häufigkeiten, etc. pp. (DWD).

**Klimaanalysekarte (KAK):** Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

**Orographisch:** beschreibt das Gelände morphologisch hinsichtlich seiner Hangrichtung und Hangneigung.

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

**Reliefenergie:** Als Reliefenergie wird der Höhenunterschied zwischen höchstem und niedrigstem Punkt eines Gebietes, hier das Untersuchungsgebiet verstanden (Kuttler 2009). Je größer dieser Unterschied, desto höher ist die Reliefenergie.

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



**Strahlungswetterlage** → *Autochthone Wetterlage*

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

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

**Synoptischer Wind:** Synoptische Winde ist eine Einteilung nach der Größenordnung der Luftbewegungen. **Der Begriff** bezeichnet alle Winde bis auf den → *geostrophischen Wind*. Unter synoptischen Winden wird der großräumige Wind verstanden, der über längere Zeiträume anhält.

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

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



## Zusammenfassung

Die Ergebnisse bestätigen die Klimaanalyse der Region Basel aus dem Jahr 1998. Der Vorteil in der neuen Modellierung liegt eindeutig in der höheren Auflösung und der modellgestützten Simulation, so dass sich räumliche Muster der Wärmebelastung auf Blockebene eindeutig identifizieren lassen. Das verwendete 10 m x 10 m-Raster entspricht einem mikroskaligen Ansatz und erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Zusammen mit der kleinräumigen Erfassung von Grünstrukturen samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld getroffen werden. Der Blick in die Zukunft, der sowohl einen mittleren Klimawandeleffekt von 1,2 Kelvin Temperaturzunahme bis 2030 berücksichtigt und eine angenommene Stadtentwicklung, erlaubt es, die Gebiete zu identifizieren, die in Zukunft von einer stärkeren Wärmebelastung betroffen sein werden. Dem kann (und muss) bereits jetzt durch geeignete Maßnahmen im Umbau begegnet werden.

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation berechnet. Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel). Die Klimaanalysekarten spiegeln die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das gesamte Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulichen die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeinseleffekt (bis zu 7 K höhere Temperaturen im Stadtkern in der Zukunftsrechnung), bilden die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Flurwinde) und identifizieren für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftleitbahnbereiche.

In der Nacht treten belastete Siedlungsflächen insbesondere in der Innenstadt auf, wo das vorhandene hohe Bauvolumen die tagsüber als Wärme gespeicherte Strahlung wieder abgibt. Am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität von hoch versiegelten Quartieren und Gewerbegebieten zu stark durchgrünten Quartieren erkennbar. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine mittlere Belastung, Gewerbeflächen sowie der Straßenraum dagegen oftmals ungünstige bioklimatische Bedingungen.

Aus den bisherigen Ergebnissen der Stadtklimaanalyse kann festgehalten werden, dass es in Basel thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt, deren bioklimatische Situation mindestens erhalten, möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden sollte. Die Versorgung der Innenstadt mit Kaltluft in der Nacht ist bereits jetzt schon durch die Talbebauungen deutlich eingeschränkt und gewissen Gebieten z.B. Birstal degradiert. Eine ausreichende Belüftung ist nicht nur dafür da die thermische Belastung zu mildern, sondern kann sich auch positiv auf die in diesem Gutachten nicht näher betrachtete Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen, was jedoch durch die historisch gewachsene Bebauungsstruktur in Basel sehr schwierig wird.



# 1 Stadtklimatische Untersuchungen

## 1.1 GEWÄHLTER ANALYSEANSATZ

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der Raumplanung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch auf die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Aus dem Jahr 1998 existiert eine grenzüberschreitende Klimaanalyse der Region Basel (KABA), die zusammen mit den Kantonsverwaltungen Basel-Stadt und Basel-Landschaft sowie dem Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung der Basler Universität erarbeitet worden ist. In der Klimaanalyse erfolgte die Erarbeitung der Klimaanalysekarten mithilfe eines weiterentwickelten Klimatopansatzes. Der Auftrag an die Geo-Net Umweltconsulting GmbH liefert nun eine hochaufgelöste gebäudescharfe 10 m-Modellierung für den Agglomerationsraum Basel und berücksichtigt dabei bereits aktuelle Bauvorhaben als auch individuelle Grünstrukturen wie Bäume im Stadtgebiet mit ihren Strukturhöhen (Kap. 3 und 4). Die mit dem Modell FITNAH durchgeführte umgesetzte Klimaanalyse ist methodisch aktueller und liefert eine den heutigen Ansprüchen besser entsprechende höhere Auflösung um kommende Planungsprozesse bewältigen zu können. Allerdings betrachtet die mit diesem Gutachten vorliegende Klimaanalyse die thermische Belastung im Sommer für die Ist-Situation und unter Klimawandelbedingungen.

Diese erlaubt eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht anstelle des bisher verwendeten Klimatop-Ansatzes. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Klimaanalysekarten; Kap. 5).

Der vorliegende Bericht stellt die Stadtklimaanalyse dar und geht auf die Methodik der Modellrechnung ein.

## 1.2 BISHERIGE STADTKLIMATISCHE UNTERSUCHUNGEN

Wie bereits oben kurz erwähnt liegt eine Klimaanalyse der Region Basel für die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft vor (Fehrenbach 1998). Die Arbeiten stammen aus dem Jahren 1995 bis 1998 und beruhen auf einen weiterentwickelten Klimatopansatz, der neben der Landnutzung auch die Durchlüftungssituation berücksichtigte und in 10 unterschiedliche Arealtypen mündete. Für das gesamte Jahr wird neben der thermischen Situation auch die lufthygienische Situation erfasst.

Da die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft betrachtet wurden, ist der Großteil der Flächen land- als auch forstwirtschaftlich geprägt und nur die Stadt Basel sowie die Agglomerationen von dichten Bebauungsstrukturen gekennzeichnet. Als Ergebnis zeigte die KABA für die Stadt Basel auf, dass in weiten Teilen des Stadtgebiets eine reduzierte Durchlüftung durch die dichte Bebauung zu verzeichnen ist, was sich besonders in den verdichteten Bereichen in einer Verschlechterung der thermischen und lufthygienischen Situation bemerkbar macht. Vor allem die lufthygienische Situation ist als kritisch bei auftretenden Inversionswetterlagen im Winter und Sommer bei hohen Lufttemperaturen einzustufen.



Das Projekt REKLIP (**RE**gio-**KL**ima-**P**rojekt), welches ein Zusammenschluss aus Instituten der „Oberrheinischen Universitäten“ ist, hatte sich zum Ziel gesetzt, die geographisch zwar eine Einheit bildende, aber durch Landesgrenzen in drei politische Bereiche aufgeteilte Region des Oberrheingrabs nach einheitlichen Gesichtspunkten klimatisch zu analysieren (Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt REKLIP 1995, Startseite). Das Projekt untersuchte die komplette Bandbreite der klimatologischen Verhältnisse wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Nebel, Niederschlag, Wind, Sonnenscheindauer, Gradtagzahlen und Bioklimas. Dies wurde anhand von Satellitenbilder als auch Messungen durchgeführt. Auf die einzelnen Ergebnisse soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Ausgesuchte Erkenntnisse fließen an geeigneter thematischer Stelle im Bericht ein.

### 1.3 LUFTREINHALTEPLAN BEIDER BASEL

Das Lufthygieneamt beider Basel (LHA) erarbeitet in regelmäßigen Abständen 1990, 2010 und 2016 Luftreinhaltepläne (Lufthygieneamt beider Basel 2016). Die aktuellen Immissionskarten stammen vom Ingenieurbüro Lohmeyer und betrachten beide Kantonsgebiete (Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG 2016). Die größten Belastungen treten in der Randbebauung an den hoch frequentierten Hauptverkehrsstraßen in Basel-Stadt auf. So beziffert das Gutachten, dass ca. 30 % der Bevölkerungen in Basel-Stadt erhöhten Stickstoffoxidkonzentrationen von mehr als  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ausgesetzt sind. Bei der Feinstaubbelastung mit PM 10 mit mehr als  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sind hauptsächlich Anwohner in der Umgebung der innerstädtischen Autobahnen betroffen. Hier wird die betroffene Bevölkerung auf ca. 11 % in Basel-Stadt beziffert.

Die Luftreinhaltung bleibt ein wichtiges Thema, dem sich die Stadt Basel gesondert widmet - entsprechend ist die Luftreinhaltung nicht Bestandteil dieser Stadtklimaanalyse, da sie den Rahmen der Arbeiten sprengen würde. Die der Stadtklimaanalyse zugrunde gelegte untersuchte idealtypische Wetterlage (autochthone windschwache Wetterlage) ist für die Bestimmung der Hitzebelastung gedacht und stellt für die Stickstoffoxidkonzentrationen und Feinstaubbelastungen eine Situation im Jahresgang dar, einen worst case, da aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten die Luftschadstoffe nicht abtransportiert und vermischt (verdünnt) werden. Zu den einzelnen vorherrschenden meteorologischen Windverhältnissen, die über das gesamte Jahr unterschiedlich häufig auftreten, sind umfangreiche Analysen nötig, die die einzelnen Wettersituationen abbilden so wie es im Lohmeyer-Gutachten durchgeführt wurde.

Im Maßnahmenblatt P1: Verringerung der Wärmebelastung und Verbesserung der Durchlüftung im Siedlungsgebiet (Lufthygieneamt beider Basel 2016, 17f) wird empfohlen, die bestehende Klimaanalyse aus dem Jahr 1998 durch eine höher aufgelöste modellgestützte Aktualisierung zu ersetzen. Daraus leitet sich der Auftrag zur Erstellung der Klimaanalyse ab.

## 2 Fachliche Grundlagen

### 2.1 DER STADTKLIMAEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als *Städtische Wärmeinsel* bezeichnet (Oke et al. 2017).

Solch belastenden Situationen entstehen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt (autochthone Wetterlagen). Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die Ausgleichsströmungen hervorrufen (Flurwinde; *Abbildung 1*).

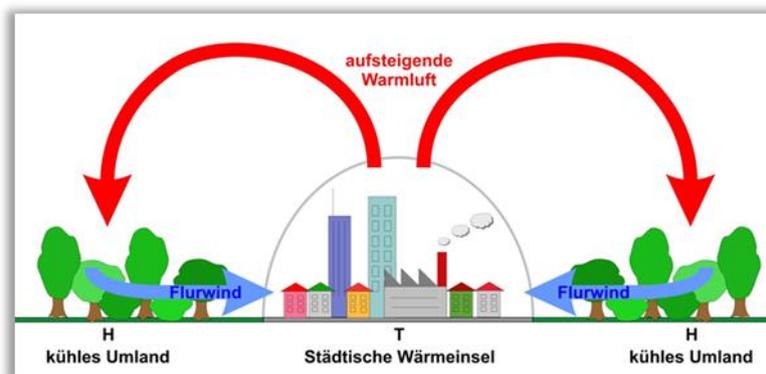


Abbildung 1: Prinzipskizze Flurwind

Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen in Form eines bodennahen Zuströmens von Luft aus dem Umland über gering bebauete Flächen hin zum Stadtgebiet auf. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, sodass die Ausgleichsströmungen am Tage weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren als in der Nacht. Während der Tagsituation führen sie aufgrund eines meist ähnlichen Temperaturniveaus im Umland nicht zum Abbau von Wärmebelastungen in den Siedlungsflächen, tragen aber zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht und damit zur Verdünnung von Luftschadstoffen bei.

In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen dagegen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld. Während der nächtlichen Abkühlung fließt kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und ggf. innerstädtischen Grün- bzw. Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der bodennahe Zustrom mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse erfolgen, insb. über sogenannten Kaltluftleitbahnen.



Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme, kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo<sup>1</sup>, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012; Malberg 1985; Oke et al. 2017). Aufgrund der starken Versiegelung und geringeren Wasserverfügbarkeit ist der Energieverbrauch zur Verdunstung herabgesetzt, sodass der latente Wärmestrom in der Stadt geringer, der fühlbare Wärmetransport dagegen höher ausfällt. Beide Aspekte haben höhere Temperaturen des Stadtgebiets im Vergleich zum Umland zur Folge (Schönwiese 2013), sodass deren Bevölkerung einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

Verkehr, Industrie und Heizungen bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009). Vor allem bei windschwachen Hochdruckwetterlagen ist das oftmals ein Problem in der Stadt. Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insb. da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

Der Einfluss der angrenzenden Gebirge Schweizer Jura, Vogesen und Schwarzwald im Raum Basel ist bei Hochdruckwetterlagen durch ein Berg-Talwindssystem sichtbar, welches zu einem tagesperiodischen richtungswechselnden lokalen Windsystem führt. Abbildung 2 veranschaulicht das Fließgeschehen zu unterschiedlichen Tageszeiten über die unterschiedlichen Pfeilrichtungen. Täler werden am Tage schneller erwärmt als flache Gebiete, da ein geringeres Luftvolumen vorhanden ist. Daher steigt vermehrt warme Luft über den Tälern auf. Am Boden herrscht dann geringerer Luftdruck und es entsteht ein Hitzetief, welches bodennahe Luft ansaugt und zu Ausgleichsströmungen führt. Daher kommt es tagsüber zu hangaufwärts gerichteten Luftströmungen (siehe Abbildung 2, Prinzipskizze ab 10 Uhr bis 19 Uhr).

In der Nacht dreht sich dieses System: Es strömt die kalte schwere frische Luft von den Hängen ins Tal (siehe Abbildung 3, Prinzipskizze ab 20 Uhr bis 8 Uhr). Die Hänge und Hochlagen kühlen aufgrund der stärkeren Ausstrahlung schneller aus als die Luft über den Tälern (in gleicher Höhe). Es herrscht ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen den Hanglagen und der Talsohle bzw. dem vorgelagerten Gebiet. Häufig kommt es in den Talsohlen zur Bildung von Kaltluftseen (Oke et al. (2017).

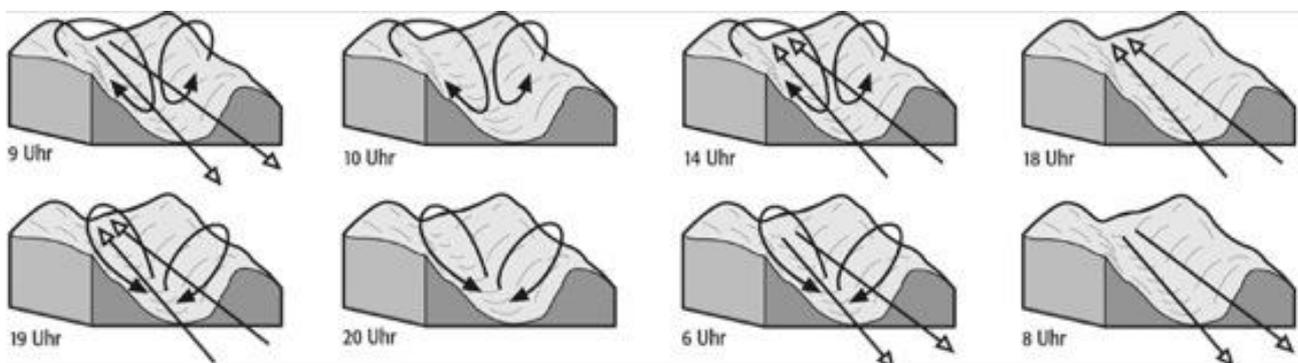


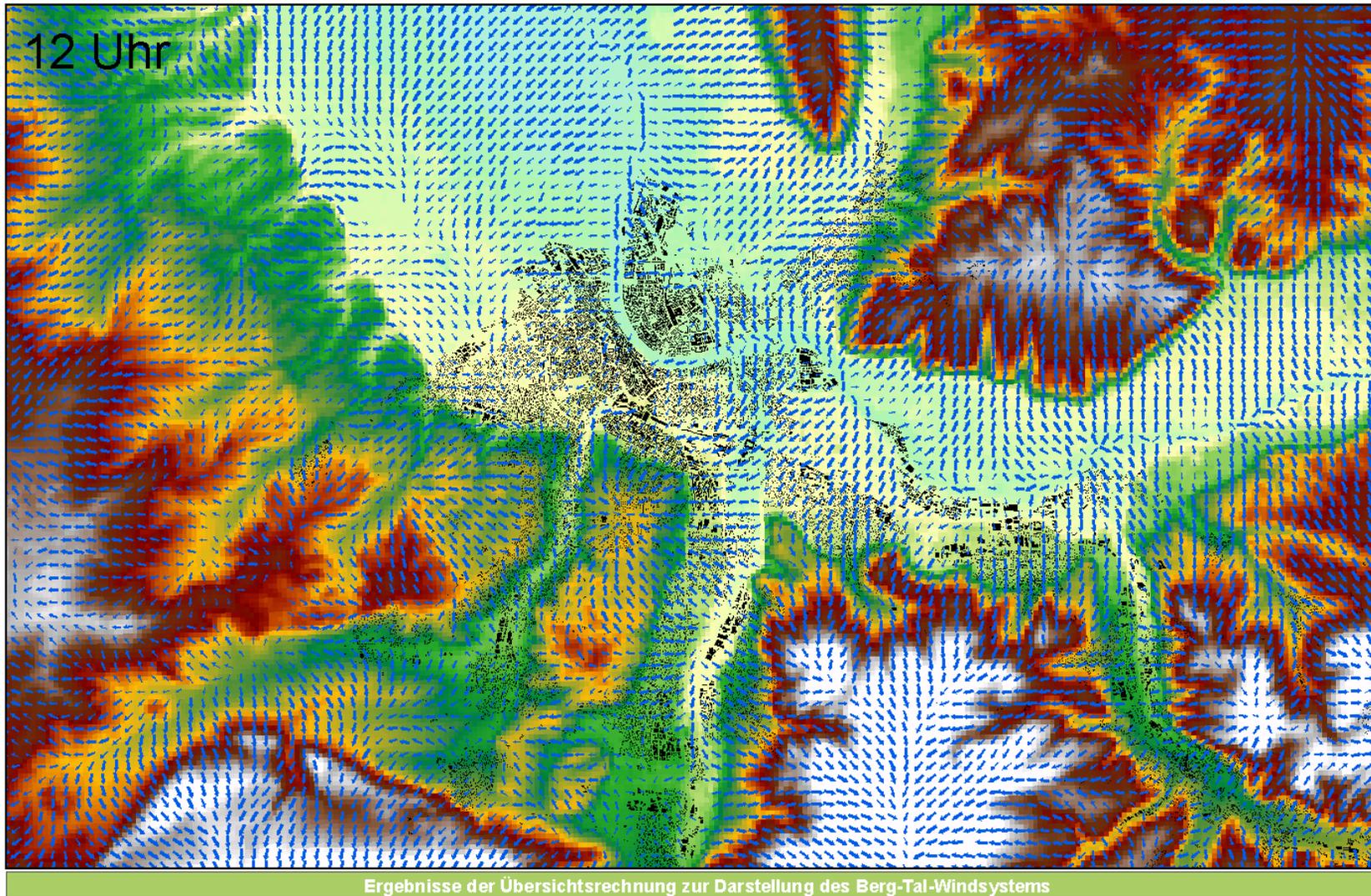
Abbildung 2: Prinzip des Berg-Talwindsystems zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Quelle: Schönwiese 2013

<sup>1</sup> Rückstrahlvermögen einer Oberfläche



In der Abbildung 3 ist das Ergebnis der Übersichtsmodellierung mit FITNAH im 250 x 250m Raster dargestellt, in der die gerichtete Strömung (siehe blaue Pfeile) einmal um 12 Uhr tagsüber und ein anderes Mal um 23 Uhr in der Nacht zu sehen ist. Anhand der Abbildung kann man deutlich das hangaufwärtsgerichtete bodennahe Strömungssystem erkennen indem die Strömungspfeile in der Windrichtung hangaufwärts weisen (für die Abbildung 12 Uhr). In der Nacht ist die Strömung dann zum Tal ausgerichtet und versorgt die Täler mit kühler, frischer Luft (siehe Abbildung 5).

Das KABA-Projekt aus dem Jahr 1998 hatte für die Stadt Basel bereits festgestellt, dass durch die starke Bebauung größtenteils in ihrer klimaökologischen Funktion gestörte Kaltluftleitbahnen zu finden sind. Das betrifft v.a. die Lange Erlen im Wiesental und die Gemeinde Münchenstein im Birstal. In dem Gutachten wird auch festgehalten, dass die Stadt Basel von dieser kritischen Durchlüftungssituation großflächig und nicht nur in ihren Kernbereichen betroffen ist (Arbeitsgemeinschaft Klimaanalyse der Region Basel & Fehrenbach, 1998, S. 55ff). Daher ist davon aus zu gehen, dass sich zwar das Berg-/Talwindssystem ausbildet, jedoch aufgrund der dichten Bebauung, vor allem in den Tälern und im Hangbereich es zur Abbremsung und damit eingeschränkter Belüftung bzw. Kühlung in der Nacht kommt.



Windgeschwindigkeit um 12 Uhr in [m/s]

- ↑ 0,1 - 0,2    ↑ 0,3 - 0,5    ↑ > 1,0
- ↑ 0,2 - 0,3    ↑ 0,5 - 1,0

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH  
Große Pfahlstraße 5 a  
30161 Hannover  
Internet: www.geo-net.de

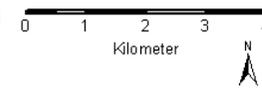
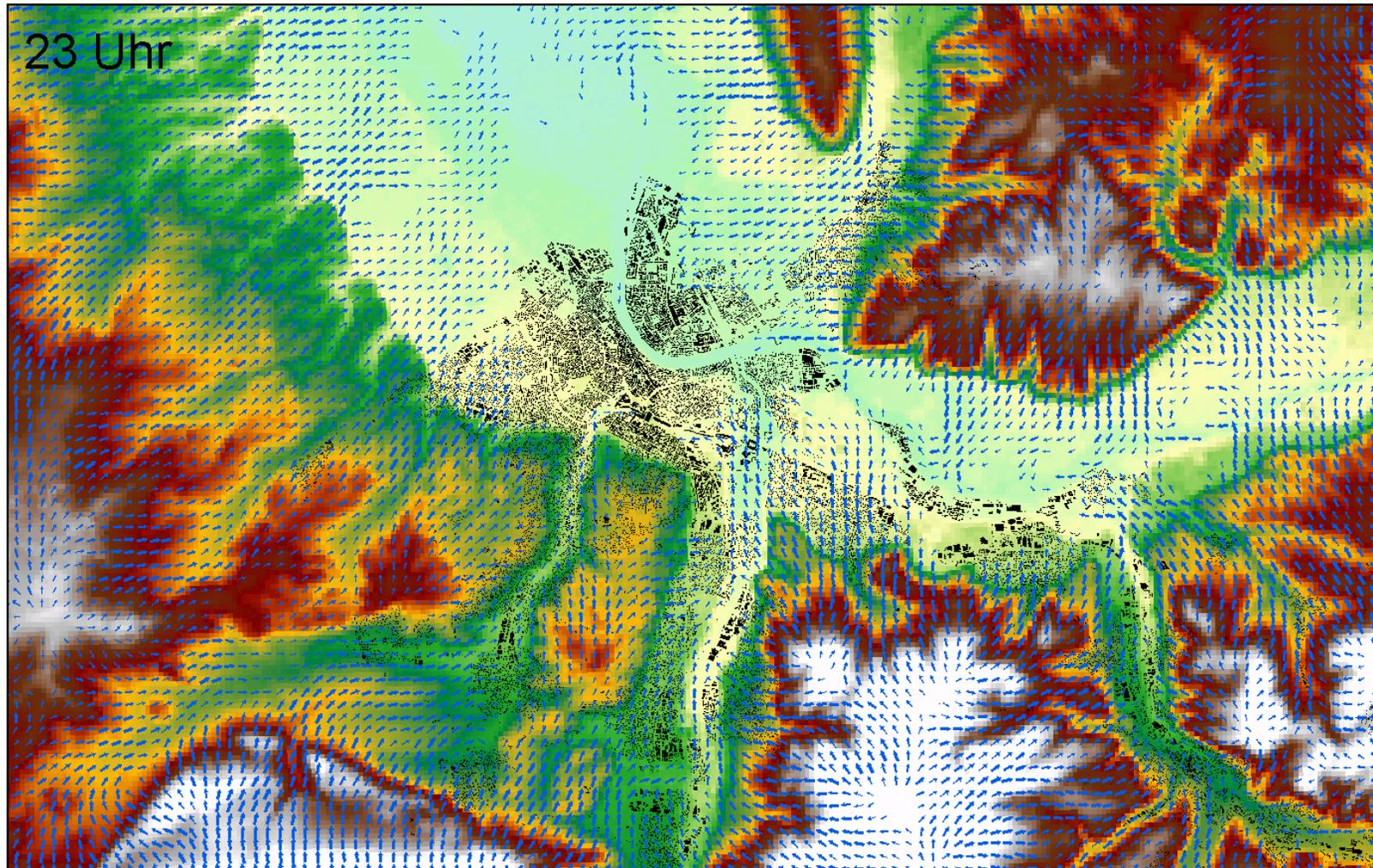


Abbildung 3: Verdeutlichung des Berg-/Talwindsystems. Das Windsystem am Tag um 12 Uhr zeigt deutlich hangaufwärts gerichtete Strömung Quelle: Übersichtsrechnung in 250m Auflösung mit Fitnach-3D, Groß 2018



23 Uhr

Ergebnisse der Übersichtsrechnung zur Darstellung des Berg-Tal-Windsystems

Windgeschwindigkeit um 23 Uhr in [m/s]

- ↑ 0,1 - 0,2    ↑ 0,3 - 0,5    ↑ > 1,0
- ↑ 0,2 - 0,3    ↑ 0,5 - 1,0

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH  
Große Pfahlstraße 5 a  
30161 Hannover  
Internet: www.geo-net.de

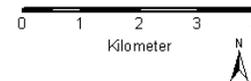


Abbildung 4: Strömung in der Nacht um 23 Uhr mit talwärtig gerichteter Strömung. Quelle: Übersichtsrechnung in 250m Auflösung mit Fitnach-3D, Groß 2018.

## 2.2 DIE ROLLE DES RHEINS IN DER STADT

Die Wirkungen des Rheins auf das Stadtklima können hauptsächlich durch die Entwicklung der Wassertemperaturen beschrieben werden. Der Wärmeaustausch findet zwischen der Lufttemperatur und der Wassertemperatur an der Wasseroberfläche statt. Die Wassertemperatur hängt von der Entfernung zur Mündung, Ordnung und Breite des Flusses und meteorologische Gegebenheiten wie Sonneneinstrahlung, der langwelligen Wärmestrahlung und der Verdunstung ab. Diese Prozesse zusammen resultieren in der Wassertemperatur, die am Tag und innerhalb des Jahres schwankt.

Flüsse werden im Längsverlauf immer wärmer je weiter sie von der Quelle entfernt sind (natürlicher Temperaturgradient, Lozàn und Maier 2008, 296ff). Je breiter und damit mehr Wasservolumen der Fluss besitzt, desto geringer ist die Wassererwärmung. Die Abbildung 6 verdeutlicht diesen Zusammenhang gut.

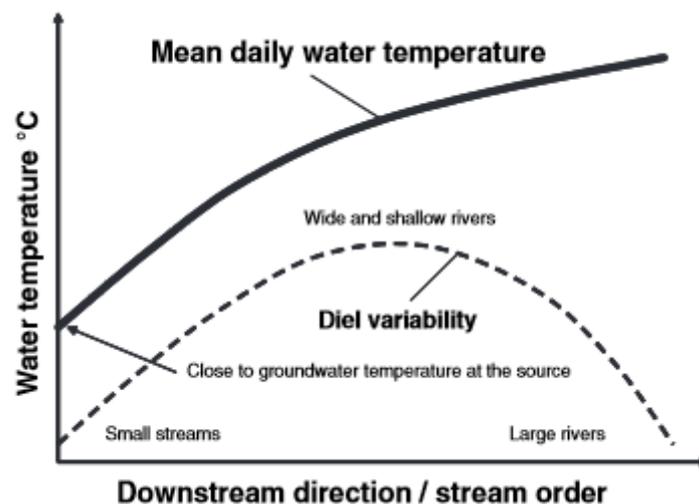


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Größe, Tiefe und Flussabschnitt zur täglichen Wassertemperatur. Quelle: Übernommen aus (CAISSIE 2006, S. 1391)

### Einfluss des Rheins auf das Stadtklima im Sommer

Die Strahlungsenergie der Sonne führt bei Wasser nicht nur zur Erwärmung, sondern auch zur Verdunstung (Evaporation). Die Strahlung dringt je nach Trübheitsgrad tief in den Wasserkörper ein. Bei Fließgewässern wie dem Rhein kommt es durch die Bewegung zu Durchmischungsprozessen, so dass sich das Wasser bis in tiefere Schichten erwärmt. Durch die zeitgleich auftretende Evaporation erwärmt sich das Wasser jedoch weniger schnell als das bei anderen Strukturen der Fall ist wie bspw. Boden oder Gestein. Durch die geringe Temperaturzunahme bei großer Energiezufuhr und geringe Temperaturabnahme bei Abkühlung sind Wasserkörper gute Wärmespeicher (Kuttler 2009). Dementsprechend sind die Temperaturextreme im Wasser geringer und treten zeitlich verzögert auf. Für den Austausch von Wärme zwischen der Luft- und Wassertemperatur sind v.a. zwei Prozesse wichtig: Evaporation und Kondensation. Der Prozess der Evaporation verbraucht Wärmeenergie und entzieht der unmittelbaren Umgebung somit die Wärme (Oke et al. 2017, 158, 439).

Tagsüber haben Wasserkörper einen positiven Effekt auf den thermischen Komfort (Temperatur) und sind in ihren Temperatureuswirkungseigenschaften vergleichbar zu einer optimal mit Wasser versorgten Grünfläche. Jedoch ist die Reichweite der Temperatureuswirkung durch die Wasserfläche geringer als die einer Grünfläche und beschränkt sich hauptsächlich auf die Fläche des Wasserkörpers. Nachts haben Wasserflächen keinen kühlenden Effekt, da sie selbst durch die hohe Wärmekapazität (Wärmespeicher) ein höheres Temperaturniveau als die Lufttemperatur aufweisen (Kuttler 2009, S. 271). Der tageszeitliche



Wassertemperaturgang schwankt kaum. Bei der Erwärmung des Gewässers im Sommer gilt es noch zu beachten, welchen Wasserstand der Fluss aufweist. Niedrigwasserstand führt zu einer stärkeren Erwärmung des Wasserkörpers.

Für die Stadt Basel bedeutet das, dass der Rhein im Sommer am Tage zur Kühlung der unmittelbar angrenzenden Luftpakete beitragen kann. Chen et al. (2014) haben in ihrer Studie den Kühlungseffekt von Flüssen auf Städte in Taiwan untersucht und kommen zu dem Ergebnis, dass der Kühlungseffekt weitaus geringer ausfällt als in natürlichen Flussgebieten. In den sehr städtisch entwickelten Flussauen haben sie eine Reichweite des Kühlungseffektes von 0 Meter bis 75 Meter anhand der Auswertung des Thermalbandes von Satellitenbildern nachgewiesen.

Da der Rhein im Stadtverlauf eingefasst ist und auch tiefer liegt als die Stadt, die Bebauungsstrukturen auch oftmals mit der langen Blockseite an den Rhein angrenzen, ist der Einfluss des Rheins sehr auf das lokale Mikroklima begrenzt.

Nachts zieht der Rhein die Luftströmung und damit auch einen Teil der Kaltluft an, da er die wärmste Struktur im Stadtgebiet in der Nacht ist. Weil der Rhein der tiefste Punkt im Stadtgebiet ist, wird dieser Prozess noch weiter verstärkt. Die Kaltluft kann auf ihrem Weg zum Rhein die Bebauung kühlen.

Die Abbildung 7 verdeutlicht den Wassertemperaturverlauf innerhalb eines Jahres. Dabei ist sowohl die Mittelkurve der 40-jährigen Messreihe als auch das aktuelle Jahr 2018 aufgetragen. Wie deutlich erkennbar ist, ist die sommerliche Wassertemperatur des Rheins deutlich an die maximale Kurve herangerutscht und übersteigt diese sogar im August mit ca. 26°C. Die Kühlungswirkung des Rheins am Tage ist somit weiter herabgesetzt.

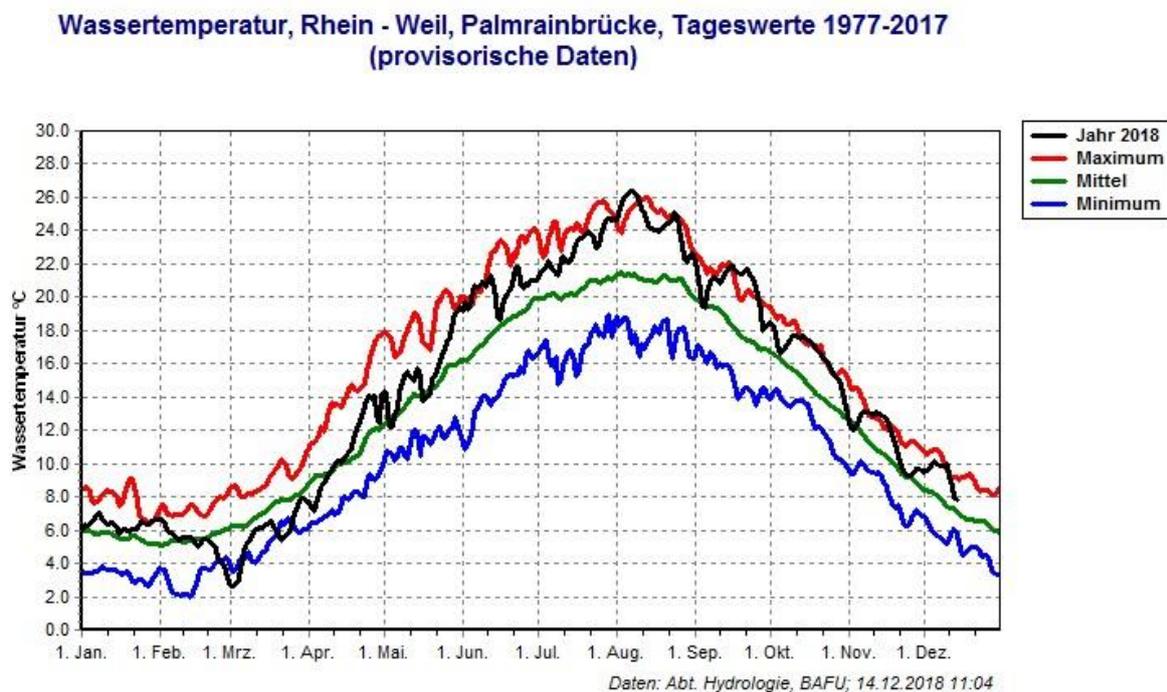


Abbildung 7: Jahresgang 2018 der Wassertemperatur des Rheins am Pegel Rheinbrücke, Quelle: (Abteilung Hydrologie 2018)

**Weitere klimaökologische Funktionen von Fließgewässern**

Gewässer in Städten sind ruhigkeitsarme Strukturen und sind daher oft Ventilationsbahnen. In Abhängigkeit von ihrer Ausrichtung und der Luftströmung, die von Wetterlage und Windrichtung abhängig ist, funktionieren sie besser oder weniger gut bei bestimmten Wetterlagen mit jeweiliger Windrichtung.



## Fazit zur Rolle des Rheins

Der Einfluss des Rheins auf das Basler Stadtklima ist sehr lokal und trägt bei sommerlichen Wetterlagen nicht zu einer Kühlung des Stadtraums bei.

### 2.3 UNTERSUCHUNGSGBIET

Das Gebiet des Kantons Basel-Stadt ist mit 37 km<sup>2</sup> recht klein. Hingegen ist die Bevölkerungsdichte sehr groß: für das Stadtgebiet Basel liegt die Bevölkerungsdichte bei 7740 EW/ km<sup>2</sup>; für den gesamten Kanton Basel-Stadt bei 5540 EW/ km<sup>2</sup>, was auf die eher ländlich geprägten Gemeinden Riehen und Bettingen zurück zu führen ist (Statistisches Amt des Kantons Basel-Stadt 2018), die mit zum Kanton Basel-Stadt gehören. Die Stadt Basel ist zudem hochverdichtet.

Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 543 km<sup>2</sup> auf (ca. 16,3 km x 13,6 km), um die im Umland gelegenen Strukturen in Deutschland, Frankreich und Teile des Kantons Basel-Landschaft mit Einfluss auf das Basler Stadtklima zu erfassen (siehe Abbildung 8).

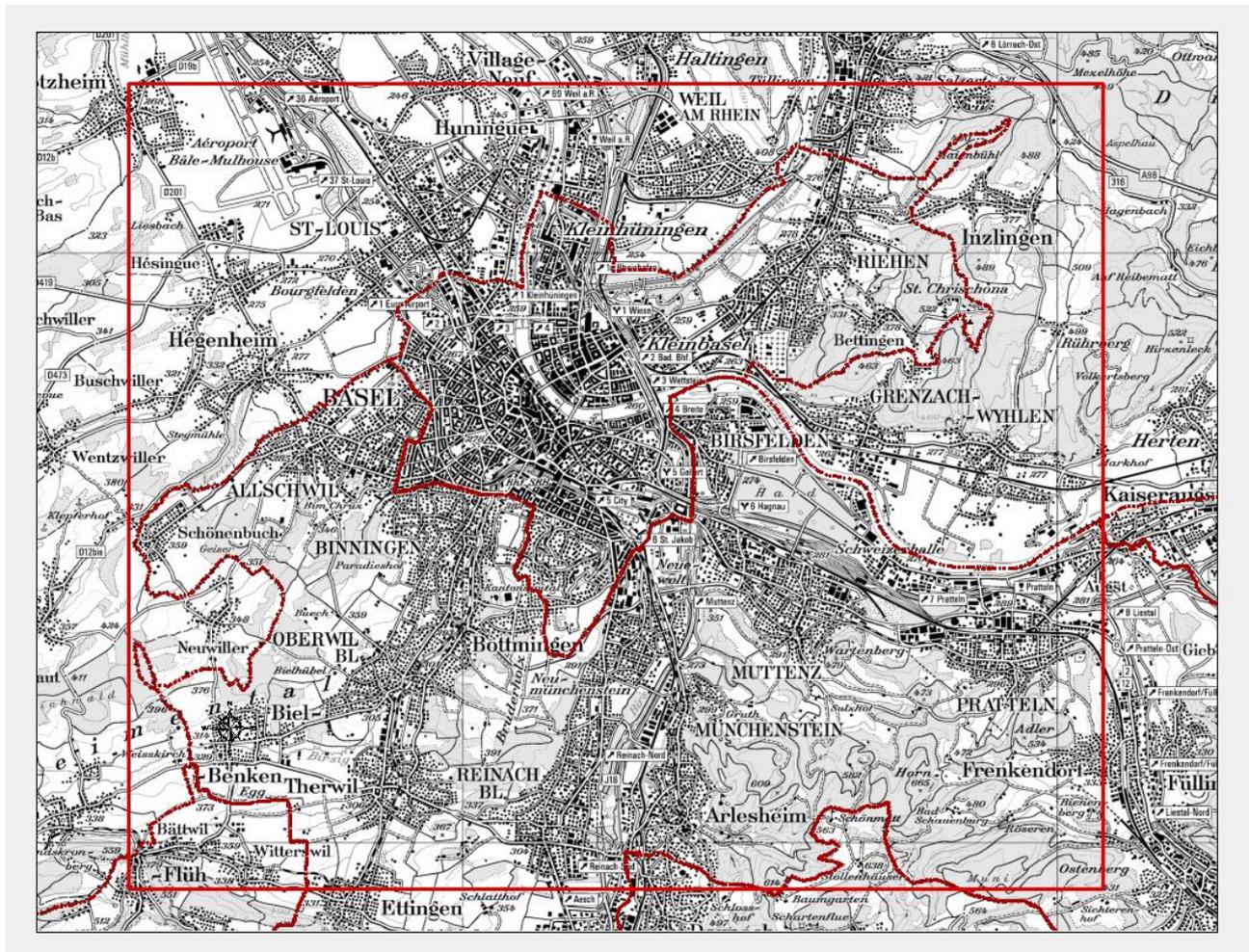


Abbildung 8: Übersicht über das Rechengebiet. Quelle: Eigene Darstellung.

Basel liegt im Vorland des Schweizer Jura. Im Nordosten vom Kanton Basel-Stadt liegt der Schwarzwald und im Nordwesten die Vogesen. Basel wurde am Rhein errichtet. Die Reliefenergie ist im Stadtzentrum selbst nicht sonderlich ausgeprägt, da die Stadt in der hier breiter werdenden Flussaue des Rheins liegt. Weitere Siedlungsteile sind in den Seitentälern des Birsig, der Birs und der Wiese zu finden (siehe Abbildung 9). Die Höhen reichen von 235m bis 705m üNN (siehe Abbildung 9). Im Modellrechengebiet sind die am tiefsten



gelegenen Gebiete im Birstal und im Rheintal zu finden. Die höchsten Erhebungen des Untersuchungsgebietes sind der Dinkelberg mit dem Fernsehturm St. Chrischona im Nordosten und die Erhebungen Hintere Ebene (607m), Horn (647m) und Schauenburgflue (665m), die bereits im Kanton Basellandschaft liegen.

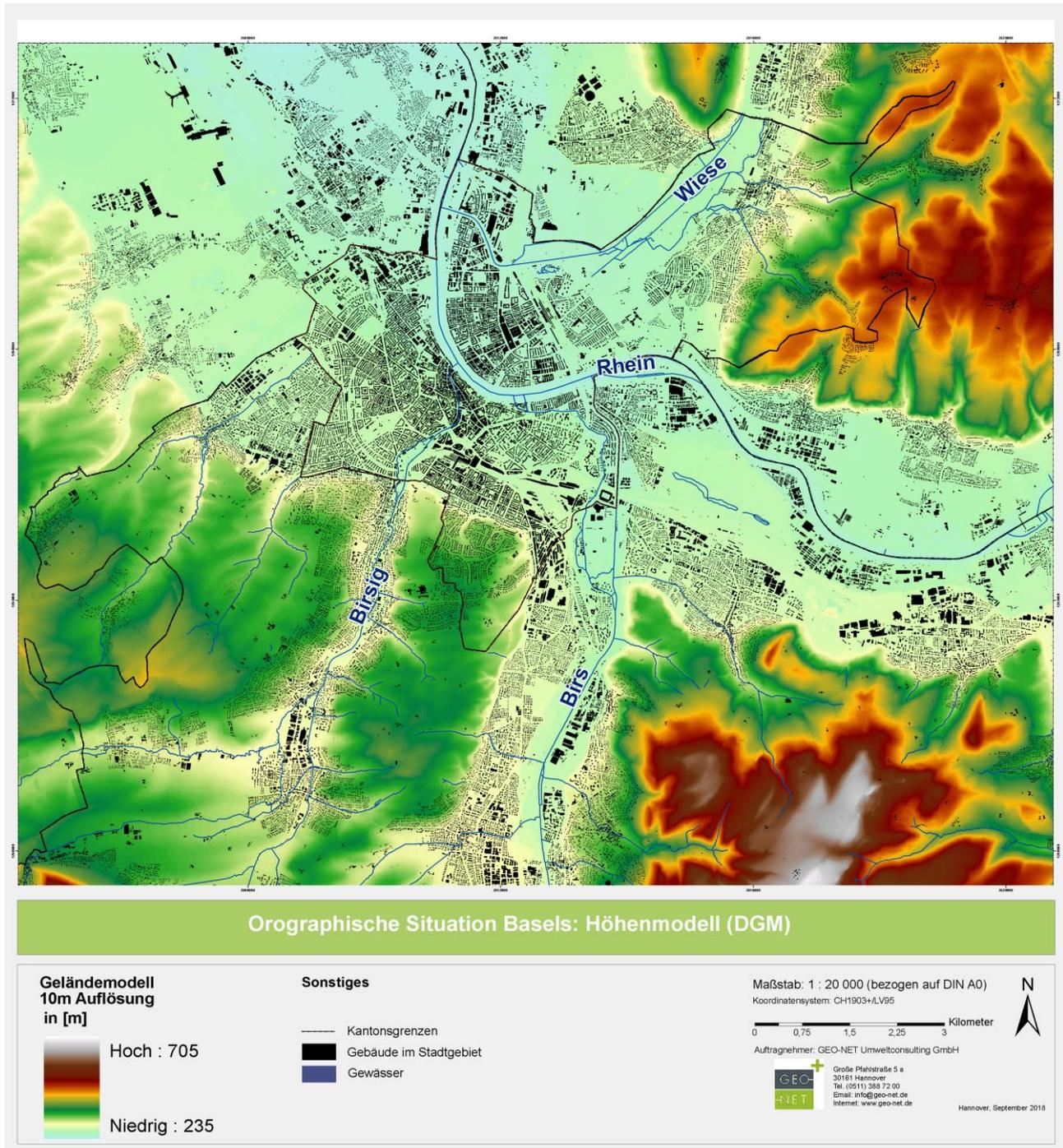


Abbildung 9: DGM für das Untersuchungsgebiet

### 2.3.1 KLIMADATEN

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen



Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt – so wurde z.B. die für die langjährige Klimaentwicklung angegebene internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD; WMO 1996). In der Schweiz gilt für die Beschreibung des Klimas jeweils die aktuellste Klimaperiode, momentan die Periode 1981-2010 (Begert et al. 2013). Im Folgenden werden die wichtigsten meteorologischen Parameter und damit einen aktuelleren Bezugszeitraum dargestellt. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der Meteo-Swiss Station Basel-Binningen. Innerhalb des Stadtgebiets kann es nutzungsbedingt deutliche Abweichungen von den Messwerten an der Wetterstation geben.

**MAKROKLIMA**

Der Kanton Basel-Stadt ist dem mitteleuropäischen Kontinentalklima zuzuordnen, speziell der Klimaregion Östlicher Jura. Die Jahresmittelwerte haben seit 1785 von 8,8 °C bis ins Jahr 2005 auf 10,4°C zugenommen (siehe Abbildung 10).

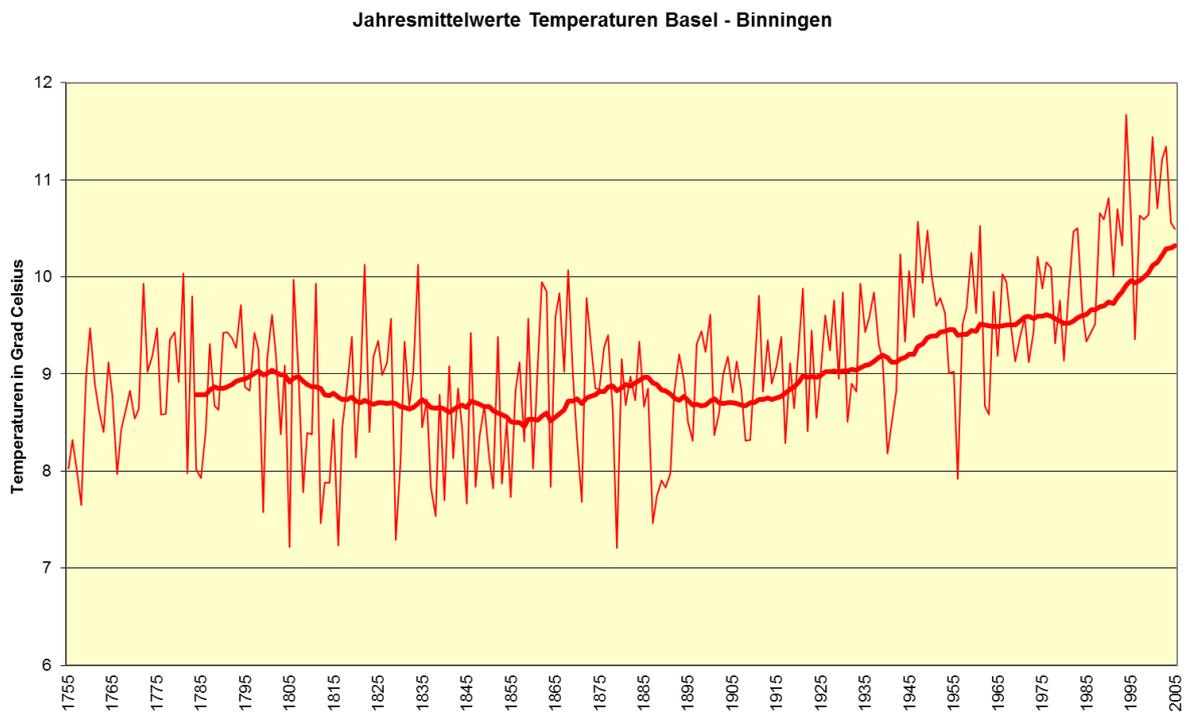


Abbildung 10: Jahresmitteltemperaturen für die Station Binningen. Quelle: Exceltabelle Stadt Basel. 2018, Reiter: D\_Jahr\_Temp

Die Abbildung 11 zeigt die langjährige jahreszeitliche Varianz auf, wobei der Frühling und Herbst ähnliche Werte aufweisen (grüne und braune Linie). Dabei ist fest zu stellen, dass in allen Jahreszeiten eine Zunahme der mittleren Temperaturen bis 2005 zu verzeichnen ist. Die mittlere Temperatur liegt seit den 2000er Jahren bei ca. 2 °C im Winter, im Herbst und Frühling bei ca. 10 °C und im Sommer bei ca. 18°C.



Jahreszeitenmittelwerte Temperaturen Basel - Binningen

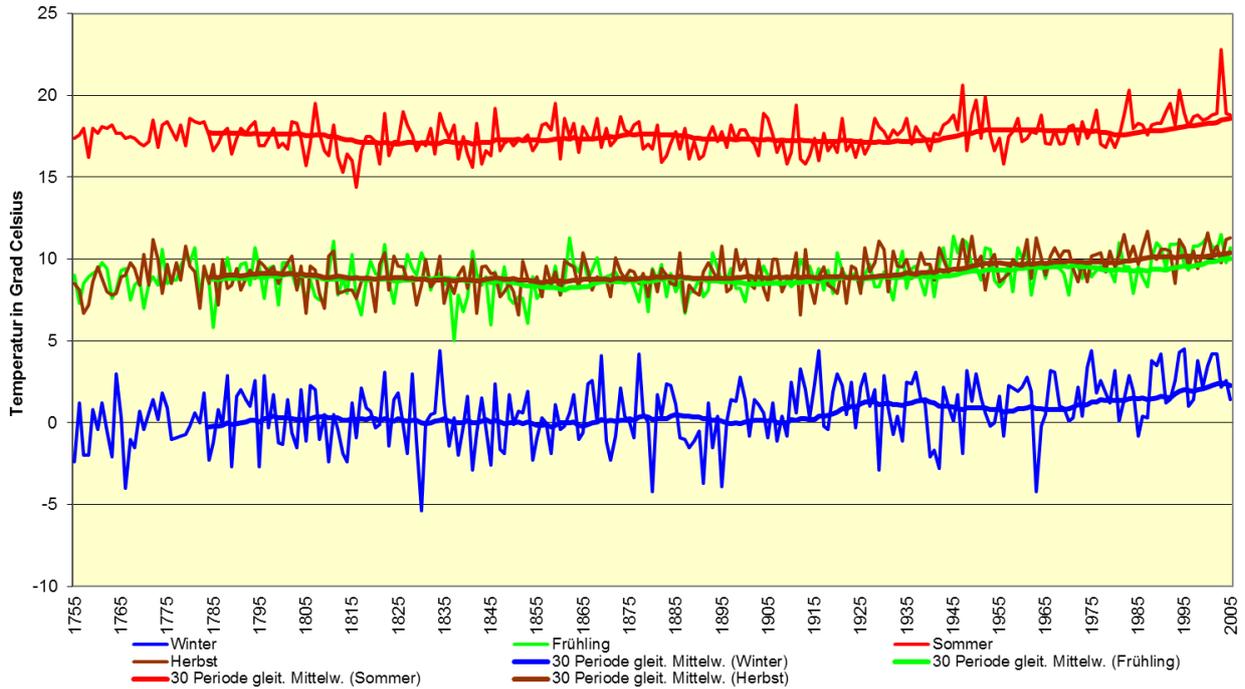


Abbildung 11: Jahreszeitenmittelwerte. Quelle: Exceltabelle Basel-Binningen, (D\_Jzeiten\_Temp2018)

Der Niederschlag ist von einer recht gleichmäßigen Verteilung innerhalb eines Jahres gekennzeichnet. Abbildung 12 zeigt den jährlichen Verlauf der Normperiode von 1981 bis 2010 der Niederschlagssummen für die Station Basel-Binningen.

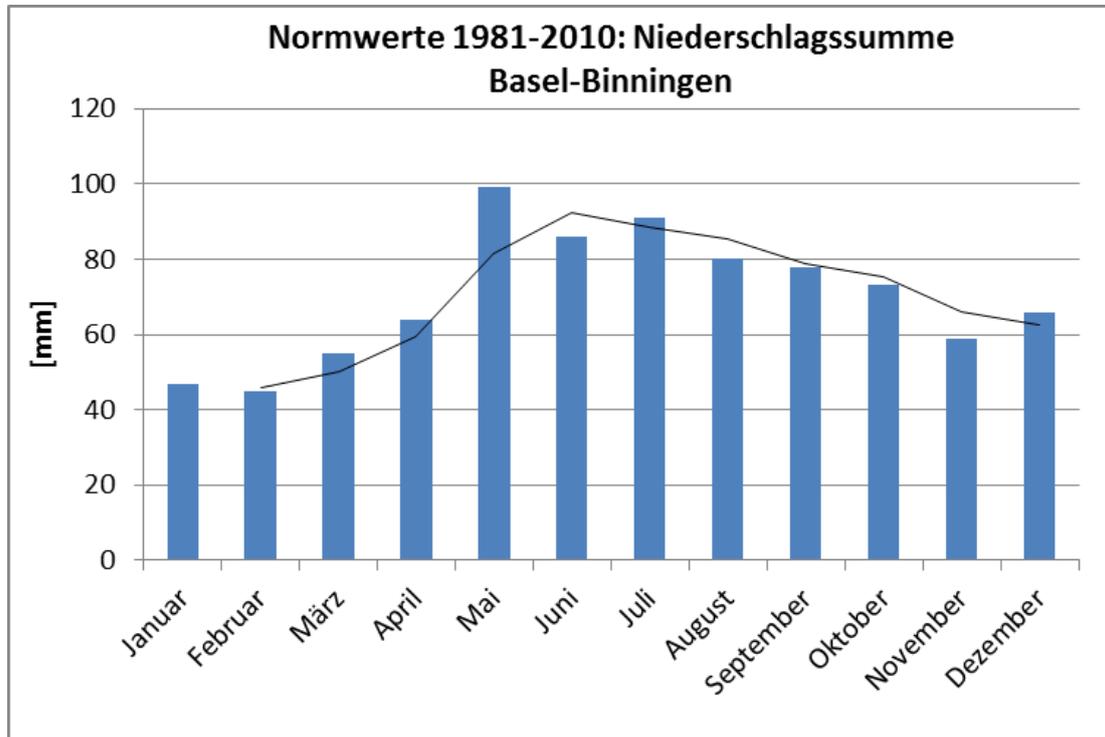


Abbildung 12: Niederschlagssummen für die Station Basel-Binningen. Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteoschweiz



## 3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

### 3.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom DWD für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen).

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

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert (Deutsche Forschungsgemeinschaft 1988). Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen stehen neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien universell einsetzbare Werkzeuge zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

Sofern ausreichend detaillierte Eingangsdaten zur Verfügung stehen, ist das Modell FITNAH 3D (Gross 1989, 1993, 2002) in der Lage, räumlich hoch aufgelöste Berechnungen in einem 10 x 10 m-Raster durchzuführen und ermöglicht damit mikroskalige Stadtklimaanalysen.

#### 3.1.1 GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH 3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und



Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Planungslösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung stadtklimatisch wichtiger Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 10 m. Die vertikale Gitterweite (z-Richtung) ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

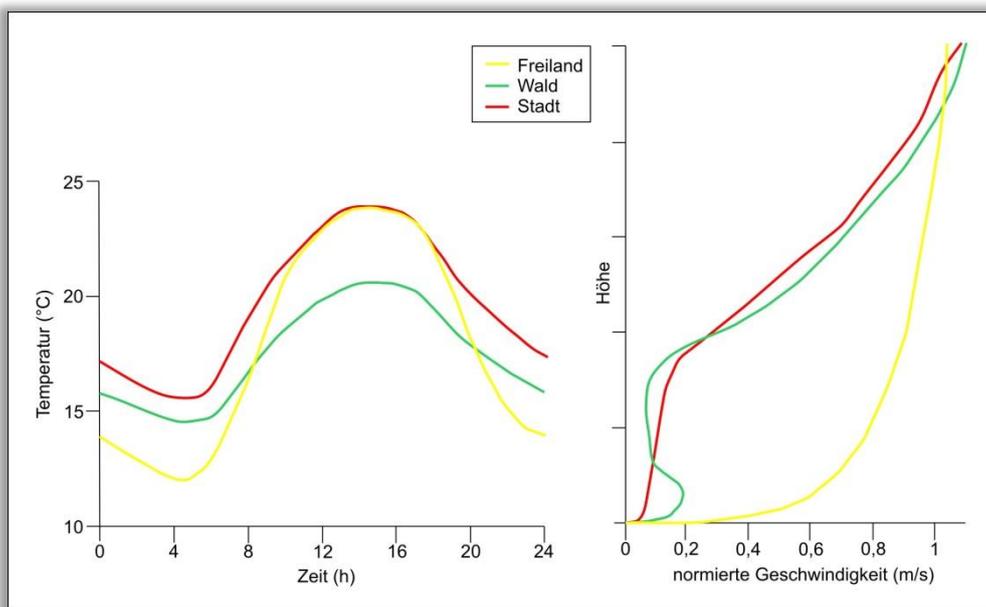


Abbildung 13: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen



### 3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die durchgeführte numerische Simulation mit FITNAH 3D legt eine autochthone Wetterlage zugrunde. Diese wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Entsprechend wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermaßen festgelegt:

- ◆ Lufttemperatur 22 °C über Freiland um 21:00 Uhr
- ◆ Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- ◆ Bedeckungsgrad 0/8
- ◆ Kein überlagernder geostrophischer Wind

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten während der austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitig hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische Belastungsräume ausbilden (Darstellung eines *worst case*-Szenarios). Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

In Abbildung 13 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien deutlich geringer ist. Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

### 3.3 METHODE DER ZUKUNFTSRECHNUNG STADTKLIMA 2030

Neben der Analyse der gegenwärtigen Situation (Status quo bzw. Ist-Szenario) sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima im Jahr 2030 untersucht werden (Zukunftsszenario). Analog zur Klimaanalyse des Status quo kommt das Modell FITNAH 3D zum Einsatz, das gewisse meteorologische Rahmenbedingungen als Antrieb der Modellierung verwendet. Um das zukünftige Stadtklima abzubilden, hat sich die sogenannte Delta-Methode bewährt, in der das Modell mit einer um  $1,2\text{ K}^2$  erhöhten Temperatur angetrieben wird (Klimaänderungssignal  $\delta = 1,2\text{ K}$ ). Potentielle Landnutzungsänderungen wurden zeitgleich mit in das Modell aufgenommen, sodass eine Mischung der Auswirkungen des Klimawandels und der Siedlungsentwicklung sichtbar wird.

#### 3.3.1 METHODISCHE GRUNDLAGEN

Das Klimaänderungssignal der Temperatur wurde aus Regionalmodelldaten der EURO-CORDEX-Initiative ermittelt (Jacob et al. 2014). Dafür standen jeweils 15 Modellsimulationen für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 sowie 9 Modellsimulationen für das Klimaszenario RCP 2.6 zur Verfügung<sup>3</sup> (insgesamt 39 Modellläufe). Die Zusammenstellung der Modellsimulationen wird Ensemble genannt. Eine Modellsimulation besteht einerseits aus der Kombination eines Globalen Klimamodells (GCM) und eines Regionalen Klimamodells (RCM). Andererseits beinhaltet jede Modellsimulation eine Klimaprojektion eines

<sup>2</sup> Die Temperaturdifferenz in Kelvin (K) entspricht dem Wert in Grad Celsius (°C)

<sup>3</sup> RCP = Representative Concentration Pathways



der aufgeführten RCP-Szenarien. Somit setzt sich eine Modellsimulation aus der Kombination von GCM, RCM sowie einem entsprechenden Klimaszenario zusammen.

Für die Stadt Basel wurden aus dem EURO-CORDEX-Modellgitter der nächstgelegene sowie seine acht umliegenden Gitterpunkte ausgewählt (räumliche Auflösung ≈ 12,5 km). Die Daten dieser Gitterpunkte wurden für jede Modellsimulation zu einheitlichen Zeitreihen räumlich aggregiert und ausgewertet – die Datensätze umfassen jeweils Werte in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag bis zum Jahr 2100. Folgende 30-jährige Zeiträume (Perioden) wurden zur Bestimmung der Klimaänderungen festgelegt:

- × p0 1971 – 2000 (Referenzperiode)
- × p1 2015 – 2045 (1. Zukunftsperiode zentriert auf das Jahr 2030)
- × p2 2041 – 2070 (2. Zukunftsperiode zentriert auf das Jahr 2055)
- × p3 2071 – 2100 (3. Zukunftsperiode zentriert auf das Jahr 2085)

Die klimatischen Änderungen der langjährigen jährlichen und monatlichen Mittelwerte der einzelnen betrachteten Variablen (hier: die Temperatur) wurden für jede Modellsimulation aus der Differenz der jeweiligen Zukunftsperiode zur Referenzperiode ermittelt. Dies ergibt die für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 genannten 15 Änderungswerte bzw. 9 Änderungswerte für das Szenario RCP 2.6, welche die Basis für die Bestimmung der Änderungsstatistik bilden (siehe Abbildung 14).

GCM	RCM	historical	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	CCLM	✓	✗	✓	✓
CNRM-CM5	RCA4	✓	✗	✓	✓
EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
EC-EARTH	HIRHAM5	✓	✓	✓	✓
EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM5A-MR	RCA4	✓	✗	✓	✓
HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

Abbildung 14: Momentan verfügbare Modellläufe der EURO CORDEX Initiative. Quelle: Eigene Darstellung.

Für Europa stehen in den EURO-CORDEX-Daten aktuell die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und RCP 8.5 zur Verfügung, deren Bezeichnung den zusätzlichen Strahlungsantrieb in  $W\ m^{-2}$  bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts benennt. Die RCP-Szenarien lösen im aktuellen fünften Sachstandsbericht des IPCC („Weltklimarat“ der Vereinten Nationen<sup>4</sup>) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien<sup>5</sup> ab (vgl. Abbildung 15):

<sup>4</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>5</sup> Special Report on Emissions Scenarios



- × Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf knapp  $3 \text{ W m}^{-2}$ . Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf  $2,6 \text{ W m}^{-2}$ . Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario die  $2 \text{ °C}$ -Grenze voraussichtlich nicht überschreiten (IPCC 2014).
- × RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach nur noch geringfügig bis etwa 2075 steigt und in der Folge stagniert.
- × Das Szenario RCP 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca.  $4 \text{ K}$  gegenüber dem Zeitraum 1986-2005 bewirken würde (IPCC 2014). Dieses Szenario entspricht am ehesten dem „Weiter wie bisher“-Trend und würde sich vermutlich ohne zusätzliche Bemühungen zur  $\text{CO}_2$ -Reduzierung einstellen.

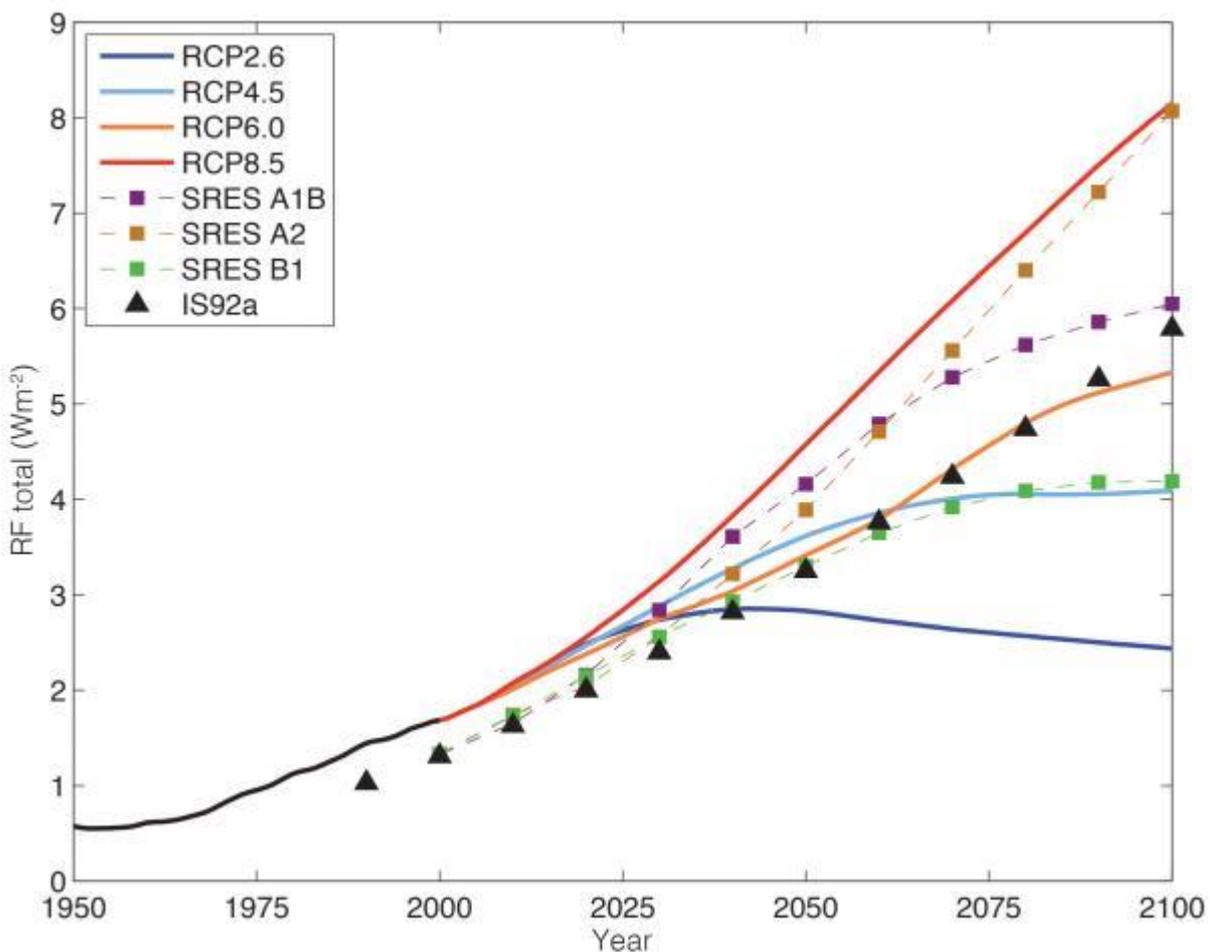


Abbildung 15: Vergleich der alten Szenarien (IS92a, SRES) mit den neuen RCP Szenarien: Historische (für das 20. Jahrhundert) und projizierte (für das 21. Jahrhundert) Veränderung des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebes (,radiative forcing' RF in  $\text{W/m}^2$ ) im Vergleich (Klimanavigator 2017)

### 3.3.2 ÄNDERUNGSSTATISTIK

In Abbildung 16 ist jeweils der Median der Temperaturänderungssignale des Modellensembles für die drei RCP-Szenarien gegenüber der Referenzperiode 1971 - 2000 aufgeführt, die mit dem Tool des Climate Data Analyzer ausgewertet wurden (Tagungsband zur METTOOLS X, S. 62).

Für die Stadt Basel schwanken die Medianwerte der von der ersten Zukunftsperiode 2021 - 2050 von  $1,0 \text{ °C}$  für RCP 2.6 bis zur Zukunftsperiode 2071-2100 für RCP 8.5 in Höhe von  $2,8 \text{ °C}$  (siehe Abbildung 16). Auch innerhalb der Zukunftsperioden ist die Schwankung von  $>1\text{K}$  zwischen RCP 2.6 bis RCP 8.5 erheblich. Die



Abbildung 17 und die Abbildung 18 zeigen die Änderungen noch mal in einer geänderten Form für die Klimaperioden für das RCP 4.5 auf und sind mit den Daten aus Abbildung 16 jeweils Mitte der Klimawandelperioden identisch.

Zeitraum	2021-2050			2041-2070			2071-2100		
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
15. Perzentil	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,7	1,0	1,1	1,6
Median	1,0	<b>1,2</b>	1,4	1,2	1,6	2,1	1,6	2,0	2,8
85. Perzentil	1,5	1,6	1,9	1,5	2,3	2,8	3,1	3,7	4,8

Abbildung 16: Euro-Cordex Auswertung der Temperaturänderung für die Zukunftsperioden. Quelle: Eigene Auswertungen, Pavlik Geo-Net 2018

In Abstimmung mit den verantwortlichen Kantonsmitarbeitern aus Basel-Stadt und Basel-Landschaft wurde ein mittleres Szenario bis zum Bezugsjahr 2030 herausgesucht. Die Wahl fiel daher auf die erste Periode mit dem Median des RCP-Szenario 4.5 als Änderungssignal (Klimaänderungssignal  $\delta = 1,2$  K), um die Auswirkungen im Sinne des Vorsorgegedankens für ein mittleres Klimawandelszenario zu berücksichtigen. Dieses Delta geht bei der Zukunftsrechnung mit FITNAH 3D ein.

Eine andere Art der Darstellung dieser Ergebnisse liefern die

Abbildung 17 und Abbildung 18. In der

Abbildung 17 ist die Änderung des mittleren Tagestemperaturganges für das RCP 4.5 mithilfe von Box-Whisker Plots dargestellt. Die farbigen Kästen umfassen jeweils das 25. bis 75. Perzentil der Daten. Dabei ist offensichtlich, dass sich die mittlere Temperaturzunahme in den Zukunftsperioden erhöht. Vor allem in der letzten Zukunftsperiode bis 2100 ist ein Anstieg der jährlichen Mitteltemperatur von 2K (schwarzer horizontaler Strich im rosafarbenen Kasten = Median) zu erwarten. Im RCP 4.5 liegt diese Zunahme bei 1,2 K, was bereits sehr stark ist.

Bei Betrachtung der langjährigen monatlichen Temperaturänderungen (vgl. Abbildung 18) wird deutlich, dass die Temperaturzunahmen in den (Spät)Sommermonaten (August, September) und Wintermonaten (Dezember bis Februar) am höchsten und im Frühjahr (April) am geringsten ausfallen.

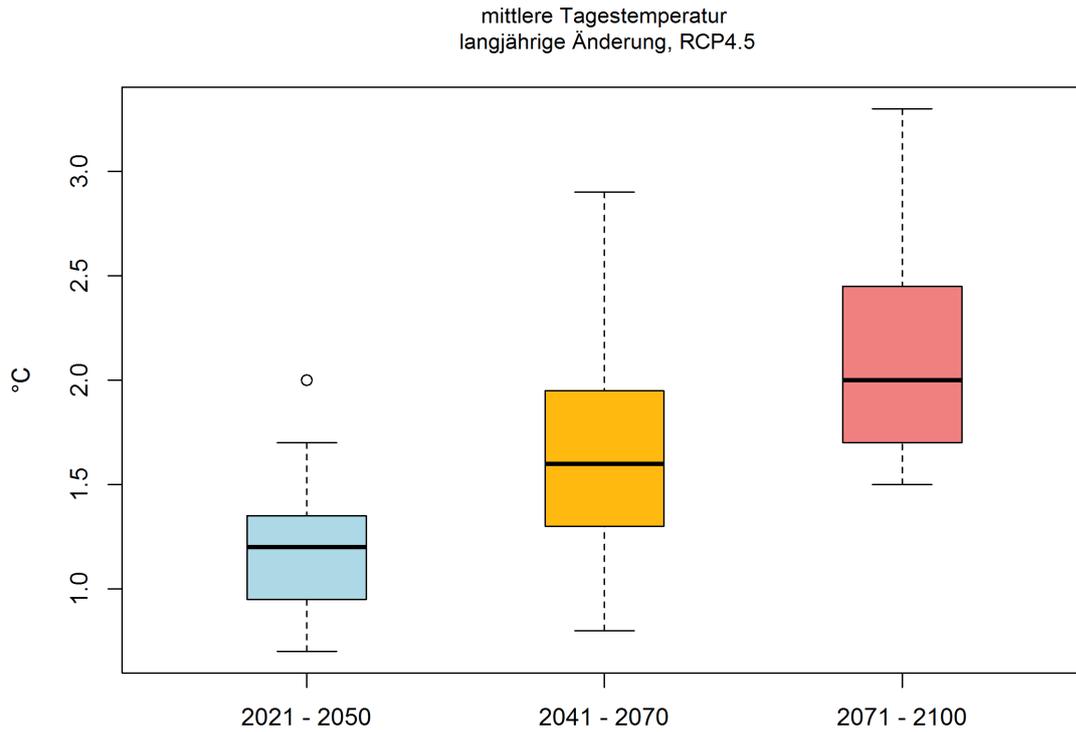


Abbildung 17: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für die Stadt Basel, Klimaszenario RCP 4.5

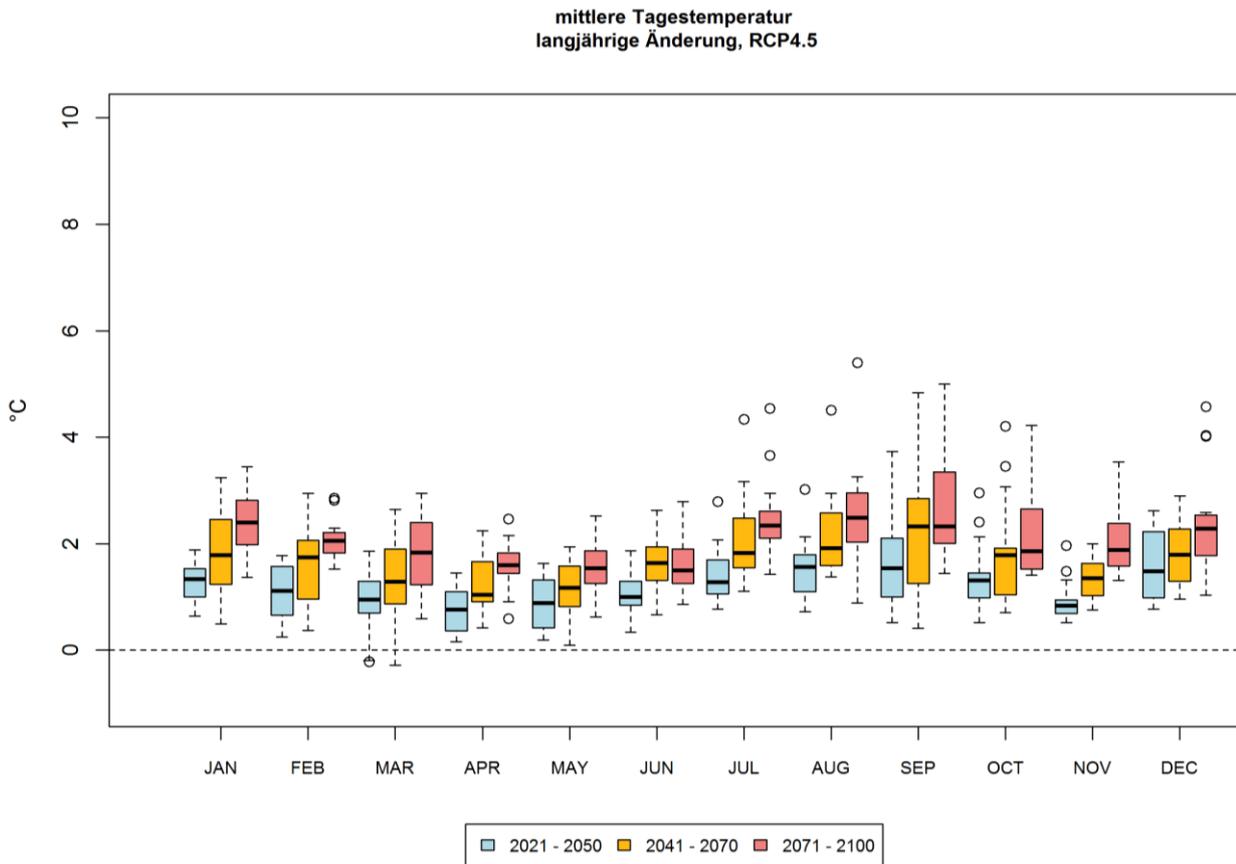


Abbildung 18: Langjährige Änderungen der Monatsmitteltemperatur für die Stadt Basel, Klimaszenario RCP 4.5



### 3.4 EINGANGSDATEN

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- ◆ Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- ◆ Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Digitales Landschaftsmodell)

Im Unterschied zur mesoskaligen Modellierung wurden darüber hinaus Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss als auch ihre Höhe erfasst (LOD1-Daten<sup>6</sup>), sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Weiterhin wurde das Digitale Oberflächenmodell (DOM) und ein Datensatz der Universität Basel zur Vegetation zur individuellen Berechnung der Strukturhöhen von Grünbeständen verwendet. Die räumliche Auflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insb. kleinkronige) Bäume auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden.

Die Versiegelungsgrade wurden für die Siedlungsflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes anhand einer visuellen Interpretation des Bodenbedeckungslayer der AV-Daten abgeleitet und übertragen. In Frankreich lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder (Rot Grün Blau Infrarot) in einer Auflösung von 20x20cm vor, die in einen Vegetationsindex: NDVI überführt wurden, der dann in Versiegelungsklassen eingeteilt wurde. Für Deutschland wurde der Versiegelungsgrad analog zum Vorgehen mesoskaliger Berechnungen mittels der Landnutzungsklassen parametrisiert. Sämtliche Eingangsdaten wurden anhand aktueller Luftbilder (Bezugsjahr 2017) abgeglichen und auf Plausibilität geprüft. Die Herausforderung in der Aufbereitung der Eingangsdaten liegt vor allem in der Harmonisierung der einzelnen Datensätze mit unterschiedlichen Auflösungen und Projektionen. Abbildung 19 soll dies noch einmal als Übersicht über die verwendeten Datensätze verdeutlichen.

---

<sup>6</sup> Gebäude außerhalb des Stadtgebiet Basels in Deutschland und Frankreich wurden über Open Street Map-Daten erfasst und die Gebäudehöhen aus DGM minus DOM abgeleitet.



Land	Was	Quelle/Übergabe
Deutschland	DGM 5m	<a href="https://shop.lgl-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&amp;keyinfo=&amp;os=Win64&amp;mapw=600">https://shop.lgl-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&amp;keyinfo=&amp;os=Win64&amp;mapw=600</a>
	DOM 5m	<a href="https://shop.lgl-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&amp;keyinfo=&amp;os=Win64&amp;mapw=600">https://shop.lgl-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&amp;keyinfo=&amp;os=Win64&amp;mapw=600</a>
Frankreich	DGM 5m	<a href="https://www.cigalsace.org/portail/fr/doc/787/guide-comment-telecharger-donnees-images-sur-plateforme-open-data-information-geographique">https://www.cigalsace.org/portail/fr/doc/787/guide-comment-telecharger-donnees-images-sur-plateforme-open-data-information-geographique</a>
	DOM 0,2m	<a href="http://professionnels.ign.fr/mnt">http://professionnels.ign.fr/mnt</a>
Schweiz - BS	DTM 1m DOM 1m, Gebäude und Vegetation	Gis Stelle Basel-Stadt
Schweiz – BL LIDAR AGI	DTM 0,5m DOM 0,5m	Gis Stelle Basel-Landschaft
swiss ALTI3D	DTM 2m	Gis Stelle Basel-Landschaft

Abbildung 19: Übersicht über die unterschiedlichen Höhenmodelle in ihrer unterschiedlichen Auflösung. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Daten aus Abbildung 19 wurden im Frühjahr 2018 vom Kanton Basel-Stadt sowie Basel-Landschaft übermittelt und repräsentieren den Stand des Jahres 2017 für den größten Teil der Daten.

Die Landnutzung wurde mit aktuellen Arealentwicklungen abgeglichen, die vom Planungsamt Kanton Basel-Stadt übermittelt wurden und Arealentwicklungen enthalten, für die es einen rechtsgültigen Bebauungsplan gibt und eine Umsetzung in den nächsten 5 Jahren als sehr wahrscheinlich gilt. Die Landnutzung wurde ebenfalls für die Zukunftsrechnung angepasst werden. Es wurden Arealentwicklungen berücksichtigt, für die erste Planungen vorliegen und deren Umsetzung bis 2035 erfolgt. Nicht berücksichtigt werden Arealentwicklungen deren Planung der künftigen Bebauungsstruktur zum Zeitpunkt der Analyse noch zu ungewiss waren, wie z.B. das Areal Klybeck +.

Die Abbildung 19 zeigt, welche Entwicklungen dies betrifft. Die Arealentwicklung rund um den Erlenmattpark ging teilweise für die Ist- und teilweise für die Zukunftsrechnung ein.



Abbildung 20: Arealentwicklungen, die in die Modellsimulationen eingegangen sind. Schwarz beschriftete Areale sind bereits als bebaut in der Ist-Situation eingeflossen, rot beschriftete Areale sind in die Zukunftsrechnung als bebaut eingeflossen. Quelle: Stadtplanungsamt Basel-Stadt, eigene Darstellung.



### 3.4.1 ABGRENZUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAÖKOLOGISCH WIRKSAMEN NUTZUNGSSTRUKTUREN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 10 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form flächenbezogene Klimaparameter (vgl. Abbildung 21). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter in einer Auflösung von 10x10m. Zum anderen beruht eine weitere Darstellungsweise auf Baublöcken (polygonbasiert), die die planungsrelevanten, maßstabsgerechten und räumlich in der Realität abgrenzbaren Flächeneinheiten wiedergeben. Auf diese Weise bleiben alle Informationen erhalten: die Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation in 10x10m Auflösung und die abstrahierte Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge.

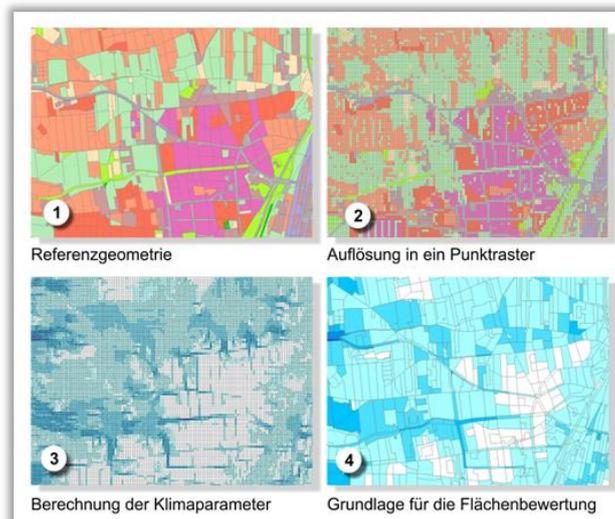


Abbildung 21: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



## 4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (in 2 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kap. 3.2). Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftleitbahnen).

Die einzelnen Ergebnisse werden jeweils für die Ist-Situation und für die zukünftige Betrachtung unter dem Klimawandelszenario RCP 4.5 (siehe Kap. 3.3) dargestellt.

### 4.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

#### 4.1.1 ALLGEMEINES

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

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

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem großen Teil auf dem zweiseichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion in 2m Höhe dagegen geringer aus. Höhere Kaltluftproduktionsraten sind erst *über* dem Kronendach zu finden. Der Wald stellt ein Strömungshindernis dar. Die hohe spezifische Wärmekapazität von **Wasser**, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte Temperaturamplitude im Tagesgang über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere Gewässer auf bebaute

Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern (vgl. auch Kap. 2.2).

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb des Stadtgebiets bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitestgehend auch während anderer Wetterlagen.

#### 4.1.2 ERGEBNISSE TEMPERATURFELD

Das sich um 04:00 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst bei Minimalwerten von weniger als 7°C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten von mehr als 20°C im Stadtkern eine Spannweite von ca.13 K. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14 C.

In der Zukunft unter einer angenommenen mittleren Temperaturzunahme des RCP 4.5 in Höhe von 1,2 K bis 2030 nehmen die Temperaturen auch unterschiedlich stark in der Stadt Basel zu (vgl. Abbildung 23).

Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Zeilen- oder Blockbebauung unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23).

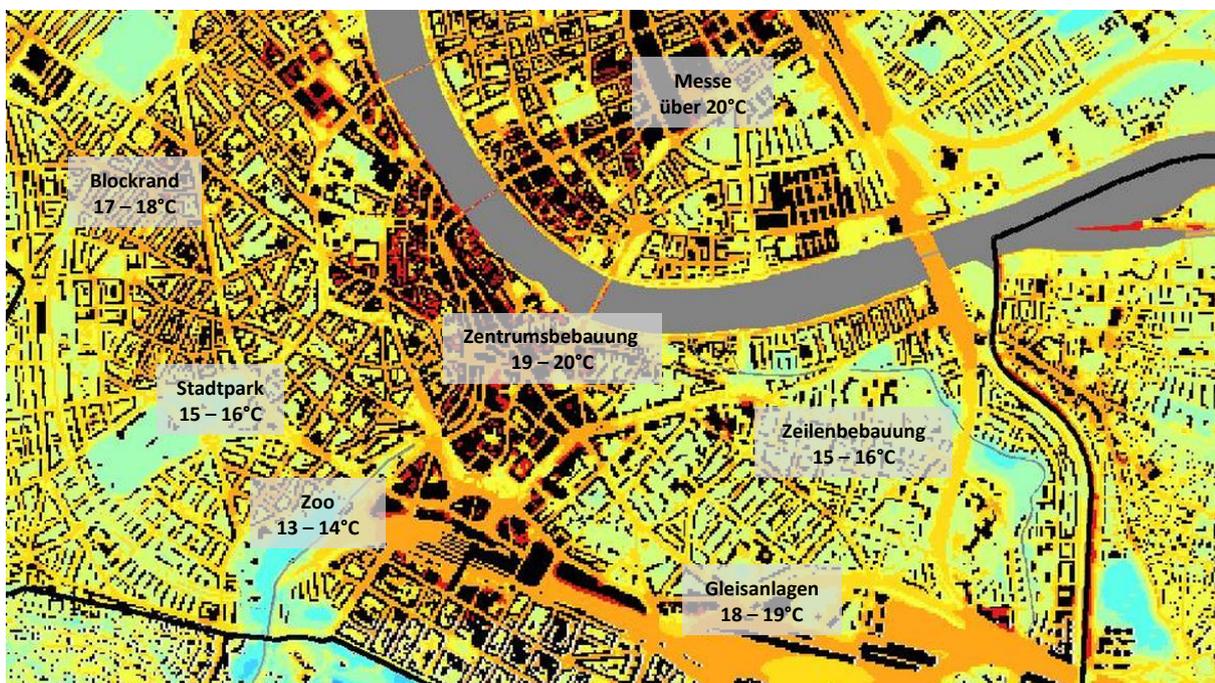


Abbildung 22: Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Basel mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen in der Ist Situation

Die höchsten Temperaturen treten mit >20°C in den stark verdichteten Bereichen und resultieren aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad. Diese Gebiete werden zukünftig unter



Klimawandelbedingungen noch wärmer mit  $> 21^{\circ}\text{C}$ . Auch der Innenstadtbereich mit der Basler Altstadt tritt im nächtlichen Temperaturfeld mit  $19$  bis  $20^{\circ}\text{C}$  aufgrund des Wärmespeichervermögens der Gebäude deutlich hervor. Je nach Bauvolumina und Durchgrünungsgrad stufen sich die Temperaturen der einzelnen Bebauungsstrukturen dann weiter ab. Der in den Abbildung 22 und Abbildung 23 als Blockrand bezeichnete Bereich ist mit  $17$  bis  $18^{\circ}\text{C}$  noch deutlich wärmer als die stark durchgrünte Zeilenbebauung im Gellertviertel mit  $15$  bis  $16^{\circ}\text{C}$  (vgl. Abbildung 22). Unter Klimawandelbedingungen erhöhen sich die Temperaturwerte, v.a. ist eine erhöhte Temperaturzunahme in den Baustrukturen, die einen hohen Versiegelungsgrad und Bauvolumina aufweisen, zu verzeichnen. Dazu zählen die Straßenräume, die Gewerbegebiete und der Innenstadtbereich. Das Gellertviertel verhält sich unter Klimawandelbedingungen doch recht robust (vgl. Abbildung 23).



Abbildung 23: Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Basel mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen in der Zukunftssituation

Im nächtlichen Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als  $7^{\circ}\text{C}$  über ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im Umland in höheren Lagen zu verzeichnen. Ähnlich geringe Werte können in Bereichen von Senken auftreten, in denen sich Kaltluft aufgrund ihrer – im Vergleich zu wärmeren Luftmassen – höhere Dichte sammelt. In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in  $2\text{ m}$  ü. Gr. Temperaturwerte um  $15^{\circ}\text{C}$  erreicht werden (z.B. im Zoo Basel). Verglichen mit den weitläufigen Freiräumen des Umlandes weisen innerstädtische Grünflächen wie Parks mit ca.  $16$  -  $17^{\circ}\text{C}$  ein höheres Wertespektrum auf (z.B. Schützenmattpark, Kannenfeldpark oder die Grünfläche im Universitätsspital Basel), wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter  $15^{\circ}\text{C}$ , da sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. Spitalgarten des Universitätsspitals Basel). Nichtsdestotrotz kühlen sie die umliegenden Siedlungsflächen ab.



In der Zukunft nehmen auch die Temperaturen über den Parkflächen im Stadtgebiet zu, allerdings ist es im Verhältnis weniger für Flächen, die mit vielen Bäumen bestanden sind und am Hang liegen, wie bspw. der Zoologische Garten, der auch von einer Kaltluftleitbahn durchströmt wird.

## 4.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

### 4.2.1 ALLGEMEINES

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln. Diese Windsysteme können Kaltluft transportieren.

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind Hangabwinde und Flurwinde – erstgenannte treten im Untersuchungsgebiet aufgrund der vergleichsweise hohen Reliefenergie häufiger auf.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Kuttler 2009).

**Hangabwinde** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa  $3 \text{ m s}^{-1}$ , ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Kuttler 2009; Schönwiese 2013). In ebenen Lagen bilden sich unter günstigen Bedingungen sogenannte **Flurwinde** aus, die radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet sind. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden. Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene (Geschwindigkeit i.d.R. deutlich  $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ), die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden **Strukturwinde** genannt.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

### 4.2.2 ERGEBNISSE KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Da die Stadt Basel dicht bebaut ist, kommen die Hangabwinde nicht bis direkt ins Zentrum. Die thermisch induzierten Flurwinde innerhalb des Stadtgebietes sind ebenfalls recht gering ausgeprägt aufgrund der kleinen innerstädtischen Grünflächen.

Abbildung 24 zeigt das für den Zeitpunkt 04:00 Uhr modellierte Strömungsfeld für einen Ausschnitt des südlichen Basler Stadtgebietes, das sich während einer sommerlichen austauscharen Strahlungswetternacht herausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und



Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt<sup>7</sup>. Im Strömungsfeld sind die Hinderniswirkung der Gebäude und die daraus resultierende Umlenkung der Strömung gut zu erkennen<sup>8</sup>.

Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  (in einer  $20 \times 20 \text{ m}$  Auflösung), für die unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu reliefbedingten Maximalwerten von ca.  $1,7 \text{ m s}^{-1}$  im Bereich südlich des Zoos in Basel entlang der Basler Straße.

In der Abbildung 24 ist deutlich zu erkennen, dass die Reihenhäuser im Bruderholz noch sehr gut durchströmt werden, wohingegen der Blockrand im Gundelingerquartier ein fast undurchdringliches Strömungshindernis darstellt. Da die Reliefenergie hier durch die südlicher gelegenen höheren Lagen sehr hoch ist, strömt hier auch viel Kaltluft den Hang herunter. Betrachtet man die gesamte Kantonale Karte zur nächtlichen Strömung wird ersichtlich, dass die eher ländlich geprägten Gemeinden Riehen und Bettingen gut durchströmt und durchlüftet werden. Die Kaltluftströmungen des Wiesentals, welche im Nordosten auf die Bebauungsstruktur treffen, belüften u.a. auch den Erlenmattpark und die angrenzende Bebauung.

Thermisch induzierte lokale Flurwindssysteme sind gut zu identifizieren anhand der kühleren ausströmenden Luft, bspw. aus den *Merian Gärten* in Richtung Norden als auch bspw. aus dem *Wolfgottesacker* und den *Freizeitgärtenareal "Dreispez"*.

Der Rhein ist als sehr rauigkeitsarme Struktur auch in einigen Bereichen eine gute Strömungsbahn. Ebenso Teile der Straßen und Eisenbahnschienen, die die vom Stadtrand eindringende Strömung in das Siedlungsgebiet noch eine gewisse Strecke weiter ins Stadtgebiet transportieren können.

Da generell eine dichte und enge Bebauung in Basel vorzufinden ist, wird die Strömung doch sehr deutlich abgebremst, entfaltet keine Wirkung und erreicht nicht das Stadtzentrum. Der Begleittext zur Klimaanalyse der Region Basel (Fehrenbach 1998, 56ff) stellte bereits fest, dass Anschlüsse an Kaltluftleitbahnen wiederhergestellt werden sollten, da „die Stadt Basel von dieser kritischen Durchlüftungssituation grossflächig und nicht nur in ihren Kernbereichen betroffen ist“.

Das Ergebnis der Klimawandelrechnung zeigt eine Abnahme der Strömung in den Entwicklungsgebieten und eine sehr geringe Zunahme an Flurwindsystemen in den bestehenden Siedlungsgebieten, da sich der Temperaturgradient zu den Grünflächen weiter erhöht.

---

<sup>7</sup> Bei gesamtstädtischer Betrachtung bzw. einem kleineren Maßstab werden die Pfeile für eine übersichtlichere Darstellung in geringerer Auflösung abgebildet, hier im  $50 \times 50 \text{ m}$  Raster (vgl. Karten im Anhang mit  $100 \times 100 \text{ m}$  Auflösung).

<sup>8</sup> Einzelne Gebäude werden in den Modellergebnissen fälschlicherweise überströmt, doch handelt es sich dabei um Ausnahmefälle.



**Strömungsfeld**  
[m/s] in 2 m ü. Grund

- ▮ > 0,2 bis 0,5
- ▮ > 0,5 bis 1
- ▮ > 1

Abbildung 24: Nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Basel

### 4.3 KALTLUFTVOLUMENSTROM

#### 4.3.1 ALLGEMEINES

Wie bereits im Kapitel 3.2 zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grün dominierten Fläche aber nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Vereinfacht ausgedrückt stellt der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (vgl. Abbildung 25). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 10 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*Dichte* aufzufassen.

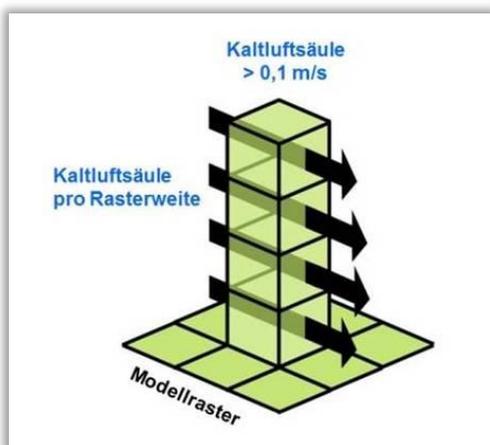


Abbildung 25: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Dieser Wert kann über ein 10 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz veranschaulicht werden, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Wird nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft bestimmt, ist diese als rasterbasierte Volumenstromdichte zu verstehen.

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftammelgebiet liegt. Letzteres kann als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann.



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

#### 4.3.2 ERGEBNISSE KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum folgt im Wesentlichen dem Muster des Kaltluftströmungsfeldes.

Die geringsten Werte finden sich abermals im Stadtkern als auch im dicht bebauten Novartis Gelände oder Roche Gelände, die aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur ganz gering durchlüftet werden und in dem nur wenige Grünflächen ein hohes Kaltluftentstehungspotenzials haben. Die Altstadt in Gross- und Kleinbasel sowie die Quartiere Clara und Matthäus sind sehr weit von den Tälern Birs, Birsig und Wiesental entfernt. Dies führt dazu, dass der Kaltluftvolumenstrom wie bereits vorher schon genannt (Kapitel 4.2 und Fehrenbach (1998)), nicht bis in die genannten Quartiere reicht und seine klimaökologische Kühlwirkung entfalten kann.

Die Kaltluft, die auf Freiflächen entsteht, die unmittelbar an den Siedlungsraum grenzen (Stadtrandlagen), strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt besonders in Hanglagen für die höchsten Kaltluftvolumenstromwerte. Zu nennen sind hier der Riehen und Bettingen, die sehr gut von den Hangabflüssen aus Osten versorgt werden, sowie im Süden das Bruderholz. Auch die ausströmende Kaltluft aus dem Hardwald versorgt die südöstlichen Randlagen der Stadt Basel. Hier kann die Kaltluft auch weit in die Bebauung eindringen, da diese sehr durchlässig ist.

Die Kaltluftströme aus dem Wiesental versorgen den oberen nördlichen Teil der Stadt Basel sowie den westlichen Teil der Gemeinde Riehen mit Kaltluft und versiegt aufgrund der Flachheit des Gebietes dann im weiteren Verlauf in Höhe der Rauracher Strasse. Auf der Höhe des Tierparks Lange Erlen, im Hirzbrunnenquartier, und rund um den Erlenmattpark sowie dem Badischen Bahnhof fließt wieder mehr Kaltluft, da die thermischen Unterschiede zwischen Freiflächen und erwärmten Siedlungskörper zunehmen und es zu thermisch induzierten Flurwinden kommt. Der Höhenunterschied, sozusagen die Sprungkante zwischen Weil am Rhein und Riehen sorgt für flächenhaften Kaltluftabfluss bis Anfang Basel-Kleinhüningen. Diese reicht jedoch nicht mehr bis in die dortigen Wohnbebauungen. In der Regionalen Klimaanalyse aus dem Jahr 1998, S. 55 wird diese Analyse bestätigt. Der Zoologische Garten Basel und die südlich davon gelegenen Grünflächen entlang der Birsig und im Umfeld des St. Margarethenhügels liefern eine große Menge an Kaltluft für die Stadt Basel (siehe Abbildung 25).

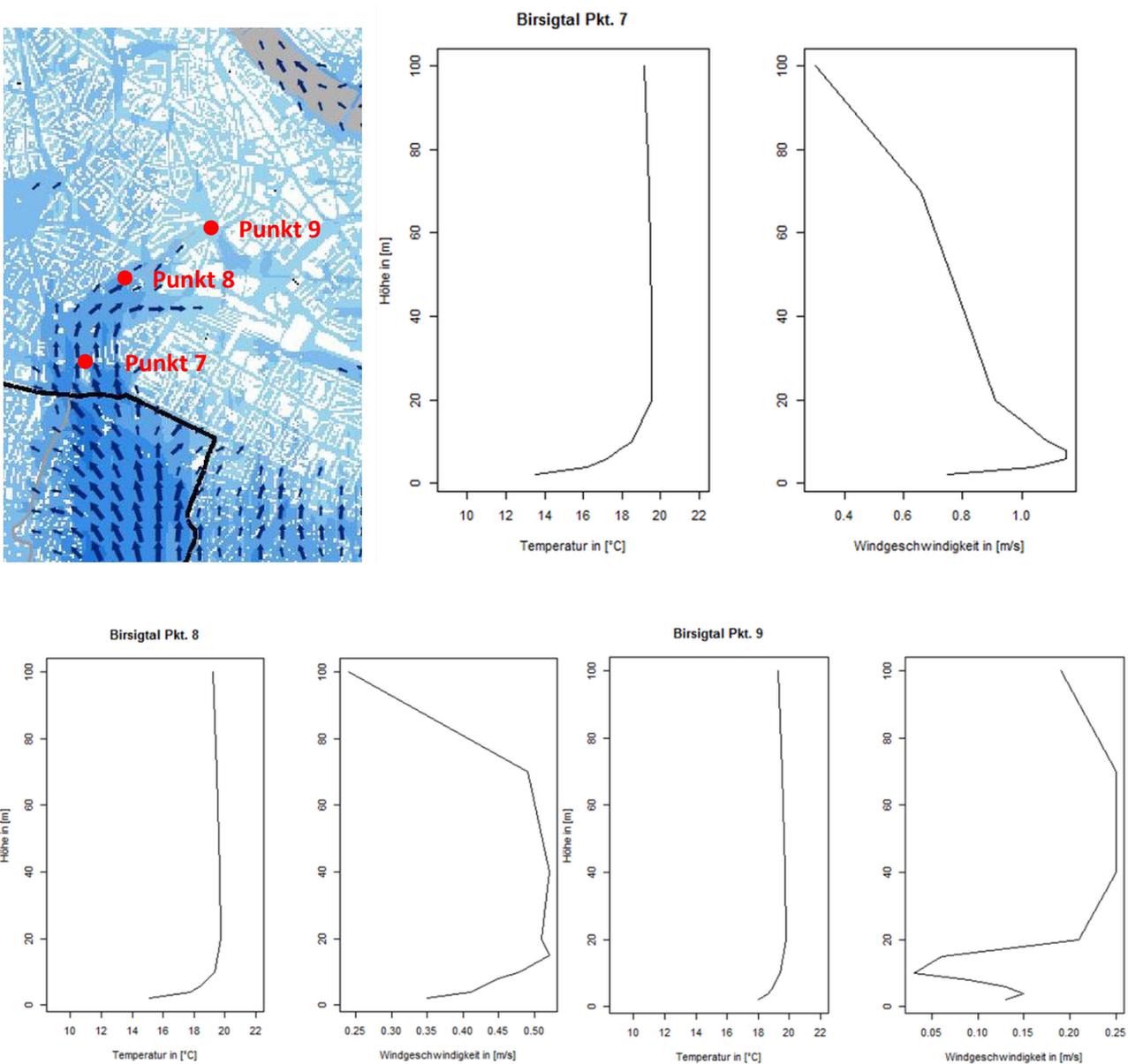


Abbildung 26: Vertikalprofile der Kaltluft im Teil des innerstädtischen Birsigtal.

In der Abbildung 25 ist an 3 Punkten die Temperatur und die Windgeschwindigkeit im Vertikalprofil dargestellt. Die Abbildung oben links gibt einen Überblick über die Lage der Profilpunkte. Es ist gut am Punkt 7 zu erkennen, dass die Kaltluft dort noch eine Mächtigkeit von 20m aufweist, da danach dann eine Inversion einsetzt (die Temperatur wird wieder kühler bzw. bleibt gleich). Mit ca. 14 °C in der bodennahen Schicht ist die Luft recht kalt und strömt ebenfalls mit einer hohen Geschwindigkeit von ca. 1,0 ms<sup>-1</sup>. Am Punkt 8 (Zooparkplatz) hat die Kaltluftmächtigkeit bereits auf ca. 10m abgenommen und auch die Geschwindigkeit ist deutlich abgebremst mit bis zu 0,5ms<sup>-1</sup>. Am Punkt 9, der Kreuzung Binningerstrasse / Heuwaage Viadukt ist die Luft bereits in den bodennahen Schichten deutlich wärmer als an den Punkten zuvor mit ca. 18°C und steht eher aufgrund der nur noch geringen Windgeschwindigkeit von maximal 0,2ms<sup>-1</sup> bis 20m Höhe, dringt jedoch bis dorthin ein, ist aber aufgrund der Erwärmung nicht mehr ganz so effektiv.



Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich naheliegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen. Die Kaltluft entsteht über dem Kronendach des Waldes, sinkt aufgrund ihrer höheren Dichte dann in den Wald ein und bleibt aufgrund der Baumstämme (Strömungshindernis) hängen. Am Waldrand kommt es jedoch zu deutlichem Kaltluftabfluss. Der Hardwald ist dafür ein gutes Beispiel.

In der Zukunft ändert sich an dem Kaltluftvolumenstromprozessgeschehen nichts Grundlegendes, außer es wird in den Kaltluftschneisen gebaut und die Kaltluft kann nicht weiterströmen, sondern wird abgebremst.

#### 4.4 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

##### 4.4.1 ALLGEMEINES

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen<sup>9</sup>. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*).

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

Tabelle 1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 3787, Blatt 2 11/2008).

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



Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Basel mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 2009). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

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

Tabelle 1).

#### 4.4.2 ERGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. PET-Werte  $\leq 23$  °C (*keine Wärmebelastung*) stellen eine Ausnahme dar und sind einzig über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. der *Rhein*). Bereits in unmittelbarer Nähe des Rheins steigen die PET Werte auf 30°C an. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit einer *schwachen Wärmebelastung* ab (PET  $\leq 29$  °C). Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können.

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte werden über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum erreicht (bis zu mehr als 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung am Tag über unversiegelten Freiflächen (z.B. Sportplätze) ähnlich hohe Werte. Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in den Zentrumsbebauungen, also der Grossbasler und Kleinbasler Altstadt weniger stark aus, da die dichte und zumeist hohe Bebauung für eine gewisse Verschattung sorgt. Innerhalb des Stadtraums zeichnen sich Parkareale wie der Schützenmattpark, Kannenfeldpark, Zoologischer Garten, Solitudepark, St. Johannis-Park, Horburgpark und Claramatte mit einer vergleichsweise geringen Wärmebelastung aus.

Unter Klimawandelbedingungen bis 2030 nehmen flächendeckend die PET-Werte in unterschiedlicher Relation zu. Beispielsweise sind die Basler Bahnhöfe (SBB und Badischer) mit ihrem Gleissumfeld, die Industriegebiete Roche und Novartis sowie das Messgelände immer noch in der Kategorie extreme Wärmebelastung (wie auch in der Ist-Situation) eingeteilt und nehmen im Vergleich zu den übrigen Flächen in der Zukunft stärker zu. Die Grünflächen verzeichnen auch einen Anstieg der Wärmebelastung, jedoch nicht so stark. So rutschen beispielsweise Teile des Schützenmattparks sowie das angrenzende Sportareal von einer mäßigen Wärmebelastung in eine starke Wärmebelastung in der Zukunft.

Die Flächen, die im Randbereich des Rheins liegen, werden zukünftig nicht so stark erwärmt, auch der Wald puffert steigende Temperaturen ab (siehe bspw. Hardwald). Die innerstädtischen Grünflächen wie bspw. der Schützenmattpark und Kannenfeldpark verzeichnen aufgrund ihrer Lage im Siedlungskörper bereits eine Zunahme der Wärmebelastung von einer mäßigen zur starken Wärmebelastung auf. Die geringsten Zunahmen verzeichnen die stark durchgrünten Quartiere, wie z.B. das Gellert und das Hirzbrunnenquartier sowie die Freizeitgärten.



## 5 Klimaanalysekarten

### 5.1 VORGEHENSWEISE

Um Aussagen über Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen untereinander abgrenzbar sein. Zum Beispiel ist die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt, auch in den Siedlungsflächen kann die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren. Um diese Heterogenität in den Klimaanalysekarten darstellen zu können, wurden Blockflächen anhand ihrer Nutzungsinformationen unterschieden und ihnen jeweils die Ergebnisse der Klimaparameter aus der Modellrechnung zugeordnet (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom, PET).

Die Klimaanalysekarte<sup>10</sup> für die Nachtsituation bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Für die Tagsituation wurde keine separate Klimaanalysekarte erstellt, da die Wärmebelastung auf Grün-, Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie dem Straßenraum auf den Ergebnissen der PET beruht (siehe Karten im Anhang).

### 5.2 NACHTSITUATION

#### 5.2.1 BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung des Siedlungskörpers wird über den **Wärmeinseleffekt** dargestellt (auch Hitzeinseleffekt, siehe Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2018). Der Wärmeinseleffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen unversiegelten Freiflächen und den Siedlungsflächen. Die Freiflächen im Untersuchungsgebiet<sup>11</sup> weisen unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur für die gegenwärtige Situation von 14,2 °C auf (siehe Karten im Anhang). Für die Zukunftsrechnung liegt dieser mittlere Wert bei 14,8 °C. Der Wärmeinseleffekt ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und ordnet die absoluten Temperaturwerte dem Stadtklimaeffekt zu.

Nächtlicher Wärmeinseleffekt [K]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]	
	Ist	Klimawandel bis 2030
bis 2	39,9	29,5
> 2 bis 3	11,6	15,0
> 3 bis 4	23,4	14,8
> 4 bis 5	21,6	29,4
> 5 bis 6	3,3	10,0
> 6	0,05	1,3

Tabelle 2: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbebaum für die Ist-Situation und unter Klimawandelbedingungen bis 2030.

<sup>10</sup> Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte.

<sup>11</sup> Die Freiflächen wurden im Untersuchungsgebiet noch eingeschränkt auf eine Höhenlage kleiner 385m.



Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 17,6 °C in der Ist Situation und 18,8 in der Zukunftsrechnung. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass in der Ist-Situation über ein Drittel der Flächen eine Überwärmung  $< 2\text{ K}$  aufweisen, der Rest liegt darüber. Die Hälfte der Flächen liegt über  $3\text{ K}$  Wärmeinseleffekt, wobei aber sehr wenige Flächen einen Wärmeinseleffekt von  $> 6\text{ K}$  aufweisen.

In der Zukunft verschieben sich die Werte für den Wärmeinseleffekt deutlich nach oben (

Tabelle 2). Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbauung tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen sowie Zentrums- bzw. Blockrandbebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind.

### 5.2.2 KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkbereich** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauungen in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweisen. Als Kaltlufteinwirkbereiche sind Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom  $> 54\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  durchflossen werden in der Ist-Situation und  $56\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  in der Zukunftsrechnung (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet) und eine Fließgeschwindigkeit von  $> 0,2\text{ m s}^{-1}$  aufweisen. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkbereich ausgewiesen.

Hauptsächlich werden die Siedlungsbereiche, die sich an Hängen befinden stark durchströmt wie zum Beispiel im Birsig- und Birstal und Teile der Gemeinde Riehen. Mehrheitlich handelt es sich dabei um Flächen in den Randbereichen – im Stadtkern lassen sich keine Kaltlufteinwirkbereiche mehr finden.

### 5.2.3 KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN ÜBER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insb. unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z.B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), doch auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kap. 4.3).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen. Zudem werden über Grünflächen und Gewässern sowie Straßen- und Gleisflächen **Flurwinde** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von  $0,2\text{ m s}^{-1}$  durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen. Der Übersichtlichkeit halber sind nur Flurwinde über Grünflächen ab  $1\text{ ha}$  Größe aufgeführt.

**Kaltluftleitbahnen** verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation.



Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Da Leitbahnen selbst ebenfalls Kaltluft produzieren können, lassen sich Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf abgrenzen von Leitbahnen, die als mehr oder weniger reine „Transportwege“ fungieren. Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend thermisch induzierte und auf das Siedlungsgebiet ausgerichtete linienhafte Strukturen, die Flurwinde in das Stadtgebiet hineinragen, während Kaltluftabflüsse flächenhaft über un bebauten Hangbereichen auftreten. Daher wird in der Karte zwischen flächenhaftem - (Hangabfluss) und linienhaftem Kaltluftabfluss (Leitbahnen) unterschieden.

**Kaltluftentstehungsgebiete** kennzeichnen Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate, die Kaltluftleitbahnen speisen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mehr als  $12,1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  Kaltluft produzieren (siehe Karten im Anhang).

### 5.3 TAGSITUATION

Zur Bestimmung der **Aufenthaltsqualität am Tage** ist die PET, als thermischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung, der maßgebende Parameter (vgl. Kap. 4.4 und die Kartenabbildungen im Anhang).



## 5.4 LESEHILFE FÜR DIE KLIMAANALYSEKARTEN

Exemplarisch soll anhand von zwei zukünftigen Arealentwicklungen aufgezeigt werden, wie die Informationen der Klimaanalysekarten (KAK) zu nutzen sind.

### 5.4.1 AREAL AM WALKEWEG

Ist Zustand

KAK Nacht Ist

KAK Nacht Zukunft

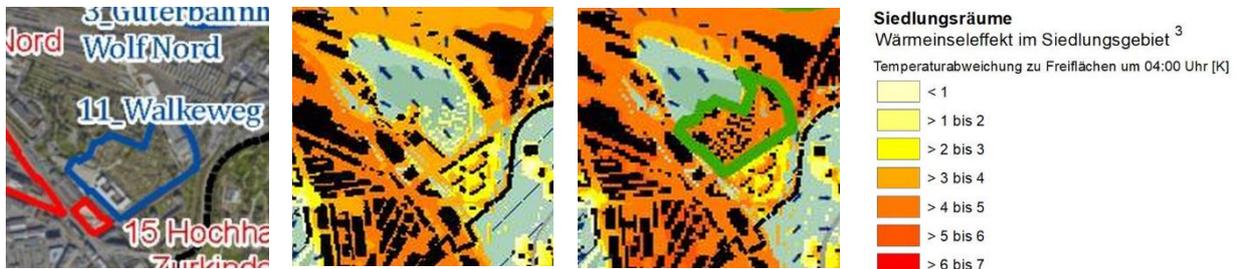


Abbildung 27: Zusammenstellung der Informationen aus den Klimaanalysekarten für das Areal am Walkeweg.

### KLIMAÖKOLOGISCHE AUSGANGSPOSITION

Momentan ist das Areal „Am Walkeweg“ eine Gartenfläche, die nordwestlich vom Friedhof Wolfgottesacker, im Nordosten von einer Gewerbefläche und im Süden von einer Reihenhausbebauung begrenzt wird. Im Perimeter liegen ebenfalls ein Spielplatz und eine Spielwiese.

Die Fläche des Areals „Am Walkeweg“ ist in der Modellrechnung in der Ist-Situation als Grünfläche eingegangen. Kaltluft strömt mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,5 m/s aus dieser Fläche über den Friedhof nach Nord und Nordwesten in die angrenzenden Bahnanlagen.

### ZU ERWARTENDE VERÄNDERUNG

In der Zukunft wird die Fläche zu einer Wohnbebauung entwickelt. Es sollen Zeilenbauten entstehen, die drei bis maximal neun Geschosse aufweisen. Die Modellrechnung „Am Walkeweg“ weist dichter stehende Gebäude auf. Diese höheren Bauvolumina speichern entsprechend mehr Strahlungsenergie auf dieser Fläche. Da das Areal "Am Walkeweg" in der Zukunft kein Kaltluftlieferant mehr ist und die Strömung nach Nordwesten nicht mehr speist, ist die noch vorhandene ausströmende Kaltluft aus dem Friedhof zukünftig geringer.

Der Friedhof Wolfgottesacker behält seine Bedeutung als Grünfläche in der Nacht mit einer hohen mikroklimatischen Bedeutung. Der Wolfgottesacker weist jedoch keinen unmittelbaren kühlenden Einfluss auf die Neubebauung „Am Walkeweg“ auf, da die Kaltluft nach Nordwesten ausströmt, also vom Arealentwicklungsgebiet weg.

Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der Arealentwicklung selbst und der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.



### 5.4.2 GEBIET VOLTA NORD

Ist Zustand

KAK Nacht Ist

KAK Nacht Zukunft



Abbildung 28: Zusammenstellung der Informationen aus den Klimaanalysekarten für das Gebiet Volta Nord.

#### KLIMAÖKOLOGISCHE AUSGANGSPOSITION

Das Gebiet Volta Nord ist momentan ein Industriegebiet, welches von Lagerhallen, Schienen und einer hohen Versiegelung gekennzeichnet ist. Das Gebiet (ca. 11,6 ha groß) liegt zwischen der Elsässerstrasse, Schlachthofstrasse und der Bahnlinie und wird intensiv genutzt.

Die Klimaanalysekarte Nacht für die Ist- Situation weist beim Wärmeineffekt zwischen 4 bis 5 °K im Gebiet Volta Nord aus. Eine ausgewiesene Grünfläche ist in der Ist-Situation im Gebiet Volta Nord nicht vorhanden.

#### ZU ERWARTENDE VERÄNDERUNG

Geplant ist eine Verdichtung und Neuordnung des Gebietes, was sich im Norden der Fläche in Gewerbenutzung und im südlichen Teil in Wohnnutzung niederschlagen soll. Es soll auch eine Schule in ein bereits bestehendes Gebäude einziehen. Entlang der Gleise und im südlichen Teil des Areals werden Grünflächen entstehen. Die Klimaanalysekarte Nacht für die Ist- und Zukunftssituation weisen beim Wärmeineffekt nach dem Umbau der Fläche kaum einen Unterschied auf. Beide Situationen zeigen, dass der simulierte Wärmeineffekt zwischen 4 bis 5 °K liegt. Wenn das jedoch vor dem Aspekt des Klimawandels gesehen wird, der der Zukunftsrechnung zugrunde liegt (mittlere Temperaturzunahme von 1,2 °K bis 2030), wird deutlich, dass trotz der Temperaturzunahme durch den Klimawandel der Wärmeineffekt in der Zukunft gleich dem in der Ist-Situation bleibt. Das heißt, es kommt zu einer deutlichen Verbesserung auf der Fläche durch die Neuplanung, der in der Lage ist, den Effekt des Klimawandels abzufangen. Die vorgesehenen Grünflächen liefern zukünftig Kaltluft, aber nicht so viel, dass es zu einer deutlichen Kühlung der Siedlungsflächen kommt. Die langgestreckte Grünfläche am Westrand von Volta Nord weist ein Kaltluftvolumenstrom von ca. 50 m<sup>3</sup>/ms auf. Die zentrale Grünfläche am Südrand dagegen nur ca. 14 m<sup>3</sup>/ms. Der Durchschnittswert für das Basler Stadtgebiet liegt bei ca. 56 m<sup>3</sup>/ms in der Zukunft (vgl. KAK Nacht im Anhang).

Für den klimawandelangepassten Umbau sollten Maßnahmen zur Erhöhung der Durchgrünung und Reduzierung des Versiegelungsgrades genutzt werden. Weiterführende anwendbare Maßnahmen nach dem BAFU Bericht „Hitze in Städten“ sollten geprüft werden (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2018).



## 6 Ausblick: Stadtklimatische Maßnahmen

An dieser Stelle wird ein kurzer Überblick über mögliche stadtklimatische Maßnahmen bzw. Empfehlungen gegeben. Die jüngst erschienene BAFU Studie zu „Hitze in den Städten“ liefert dabei eine umfangreiche Sammlung von Maßnahmen (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2018), welche auch in der Region Basel umgesetzt werden könnten. Aus der Stadtklimaanalyse lassen sich aber bereits folgende Haupthandlungsansätze ableiten:

Soweit möglich sollte der Grünanteil im Stadtgebiet erhöht werden, insbesondere in thermisch belasteten Bereichen. Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe von ca. 0,5 ha) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr nahes Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und ein verbessertes Niederschlagsmanagement (Versickerung).

Neben ihrem Potenzial zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität.

Bei Nachverdichtungen im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden und insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung. Klimaangepasstes Bauen ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei der Verdichtung sind entsprechende Maßnahmen möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlaf- bzw. Arbeitszimmern der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, grüne Freiflächen zwischen den Gebäuden). Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten.

Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten. Natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente oder Wärmedämmung sind auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude.



—

—

