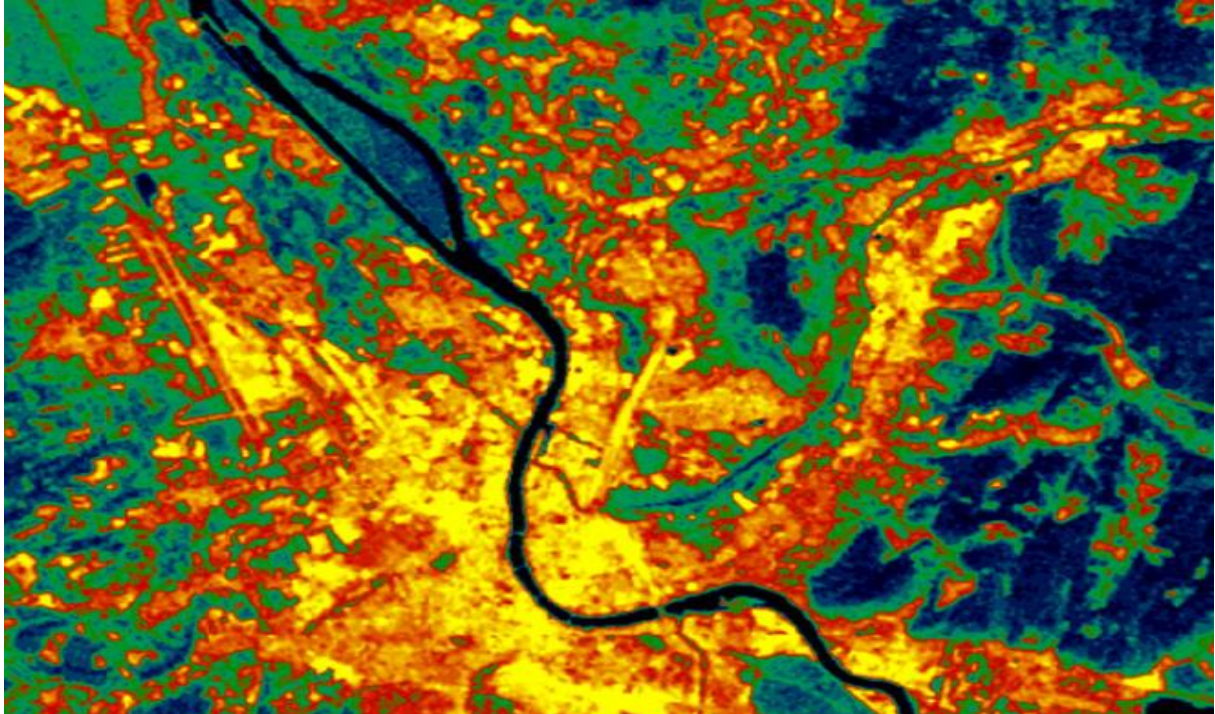


# Städtischer Wärmeinsel-Effekt

## Grundlagenarbeit für die Klimarisikoanalysen 2060

Klimabedingte Risiken und Chancen: Fallstudien Kanton Basel-Stadt und Genf  
Zürich, 4. Mai 2015

Mario Betschart



# **Impressum**

## **Städtischer Wärmeinsel-Effekt**

Grundlagenarbeit für die Klimarisikoanalysen 2060

Klimabedingte Risiken und Chancen: Fallstudien Kanton Basel-Stadt und Genf

Zürich, 4. Mai 2015

Städtischer\_Wärmeinsel-Effekt.docx

## **Auftraggeber**

BAFU - Bundesamt für Umwelt

Pamela Köllner-Heck, Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung

## **Projektleitung**

Jürg Füssler

## **Autorinnen und Autoren**

Mario Betschart

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

## **Korreferate**

Elias Zubler, MeteoSchweiz

Hans-Rudolf Moser, Lufthygieneamt beider Basel

Silvan Aemsiger, Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt

## **Begleitung Fallstudienkanton**

Franziska Schwager, AUE Abteilung Koordinationsstelle Umweltschutz

## **Dank**

Wir danken allen Beteiligten für die konstruktiven Rückmeldungen, Verbesserungsvorschläge, Datenlieferungen und Experteneinschätzungen.

## **Hinweis**

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.

Für den Inhalt sind allein die Auftragnehmer verantwortlich.

## Zusammenfassung

Der städtische Wärmeinsel-Effekt (WIE oder engl. *urban heat island effect* - UHI) stellt eines der signifikantesten menschengemachten Veränderungen in Bezug auf das oberflächennahe Klima dar (e.g. Kalnay & Cai 2003; Zhao et al. 2014; Zhou et al. 2004). Der Effekt wird bisher jedoch nicht in den Projektionen gängiger Klimamodelle berücksichtigt. Klimafolgenabschätzungen berücksichtigen den Wärmeinsel-Effekt, wenn überhaupt, somit nur qualitativ. Gängig ist dabei, die vorgenommenen Abschätzungen mit Hilfe von Experteneinschätzungen zu ergänzen, um die Tendenzen eines städtischen Wärmeinsel-Effekts qualitativ in die Gesamtab-schätzungen aufzunehmen. Für die Klimarisikoanalysen der Kantone Basel-Stadt und Genf wurde deshalb im Vorfeld der Hauptstudie zum ersten Mal überhaupt versucht, das Wissen und die Daten über den Wärmeinsel-Effekt aus der Literatur aktiv zu nutzen, um den Klimawandel im städtischen Raum auf Basis von Temperaturbeobachtungen der MeteoSchweiz (Begert et al. 2005, Frei 2013) und mit Hilfe von aus Klimamodellen errechneten Temperaturänderungssignalen für den Zeitraum um 2060 (als resultierender Mittelwert der Periode 2045-2074 ) gemäss Zubler et al. (2014a,b) zu modellieren. Die Messwerte der ruralen MeteoSchweiz-Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE) wurden mit den vorliegenden Daten zur Wärmeinsel in Basel angepasst. So konnte aufgezeigt werden wie sensitiv verschiedene Klimaindikatoren auf die Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts um das Jahr 2060 reagieren und wie wichtig es ist, diesen Effekt bei klimarelevanten Folgeabschätzungen zu berücksichtigen.

Die mit Wärmeinsel-Zuschlag spezifisch gerechneten Klimaindikatoren reagierten teils sehr sensitiv auf klimatische Veränderungen bis 2060. Speziell für die Fallstudien Basel-Stadt und Genf wurde der Klimaindikator „sehr heisse Tage“ berechnet, um dabei die gesundheitsrelevanten Auswirkungen von Hitzeereignissen besser abschätzen zu können. Dabei zeigt gerade dieser Indikator beträchtliche Änderungen bis um das Jahr 2060, wobei die grossen Unsicherheiten hier entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Die vorliegende erste grobe quantitative Abschätzung des städtischen Wärmeinsel-Effekts ist ein wichtiger Schritt im Zusammenhang mit Klimafolgeabschätzungen. Die in diesem Inputpapier vorgestellte Methodik und der daraus abgeleitete mittlere Wärmeinsel-Zuschlag verstehen sich als erster Versuch den Wärmeinsel-Effekt kleinräumig in die Klimamodellierung zu integrieren. Das Vorgehen sollte in Zukunft unbedingt weiter verfeinert und mit Hilfe aufwändigeren Datenanalysen ergänzt werden.



## Glossar

- Urban heat island (UHI)      Städtischer Wärmeinsel-Effekt
- Hitzetage      Tage, an denen das Tagesmaximum der Lufttemperatur 2m über Boden 25°C erreicht oder überschreitet ( $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) [Anzahl]
- Tropennächte      Anzahl Tage, an denen das Tagesminimum der Lufttemperatur 2m über Boden 20°C nicht unterschreitet ( $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ )
- sehr heisse Tage      Sehr heisse Tage sind definiert als Tage mit maximaler Temperatur  $>35^{\circ}\text{C}$  und minimaler Temperatur  $<20^{\circ}\text{C}$ .
- Kühlgradtage      Summe der Differenzen zwischen der Tagesmitteltemperatur und der Referenztemperatur von 18.3°C.
- Kühltage      Tage, an denen das Tagesmittel der Lufttemperatur 2m über Boden 18.3°C überschreitet ( $T_{\text{mittel}} > 18.3^{\circ}\text{C}$ ) [Anzahl]
- Heizgradtage      Die Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen einer angestrebten Raumlufttemperatur (20°C) und des Tagesmittels der Aussenlufttemperatur 2m über Boden aller Heiztage (siehe Definition Heiztage) nach Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) Empfehlung 381/3 [°C]
- Heiztage      Tage, an denen das Tagesmittel der Lufttemperatur 2 m über Boden 12°C unterschreitet ( $T_{\text{mittel}} < 12^{\circ}\text{C}$ ) [Anzahl]



## 1. Einleitung

Städte und urbane Regionen haben ein charakteristisches Lokalklima, welches stark von jenem des Umlandes abweicht. Erhöhte Temperaturen, belastete Luft und eine geringe Durchlüftung sind typische Kennzeichen dicht bebauter Innenstädte (KLAZ 2011). In Städten kann die Wirkung hoher Temperaturen durch lokale Effekte verstärkt werden: Eine infolge dichter Bebauung eingeschränkte Windzirkulation, die fehlende Beschattung und die fehlenden Grünflächen, die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung durch die vielen versiegelten Flächen sowie die Abwärme von Industrie, Gebäuden und Verkehr tragen zur städtischen Wärmeinsel (engl. *urban heat island* - UHI) bei, wodurch die Aufheizung tagsüber gesteigert und die nächtliche Abkühlung deutlich reduziert (BAFU 2012) wird. Demnach werden bereits heute maximale Temperaturunterschiede zwischen den Kernstädten und dem umliegenden ländlichen Raum von bis zu 10 °C festgestellt (BAFU 2012). Der sogenannte Wärmeinsel-Effekt (WIE) findet sich in den meisten Städten der Welt, wobei dieser auch in kleineren Städten mit weniger als 100'000 Einwohner auftritt (Torok et al. 2001). Der städtische Wärmeinsel-Effekt stellt eine der signifikantesten menschengemachten Veränderungen in Bezug auf das oberflächennahe Klima dar (e.g. Kalnay & Cai 2003; Zhao et al. 2014; Zhou et al. 2004). Die Wärmeinselintensität, das heisst die Grösse des Temperaturunterschieds, korreliert positiv mit der Grösse der Stadt, wobei auch Unterschiede zwischen Städten einzelner Kontinente bestehen (Oke 1987). Die Wärmeinsel ist spürbar, besonders wenn man in den frühen Morgenstunden oder spät abends zwischen Stadt und Umland unterwegs ist (Vogt und Parlow 2011). Die Erhöhung der Lufttemperaturen zwischen Stadt und Umland beschränkt sich nicht nur auf den Sommer, sondern ist für das ganze Jahr gültig (Parlow 2011a). So wurde die Wärmeinsel in den letzten Jahren mehr und mehr von den Planungsbehörden als wichtiger stadtplanerischer Faktor erkannt und in deren Planungsprozesse integriert (Parlow 2011b) und gerät zusehends in den Fokus der Diskussionen rund um den Klimawandel.

Dabei ist klar, dass sich das Klima im Laufe des 21. Jahrhunderts verändern wird (IPCC 2013). In der Schweiz werden der Klimawandel und seine Folgen für Gesellschaft und Ökologie intensiv untersucht. Das Bundesamt für Umwelt BAFU lancierte dazu eine Reihe von Fallstudien, in welchen die klimabedingten Risiken und Chancen des Klimawandels für den Zeitraum um 2060<sup>1</sup> (Periode 2045-2074) abgeschätzt werden sollen (BAFU 2013). Zur Folgenabschätzung kann in der Schweiz auf fundierte Studien zur Veränderung des zukünftigen Klimas und dessen Indikatoren zurückgegriffen werden (e.g. CH2011 2011; CH2014-Impacts 2014; MeteoSchweiz

---

<sup>1</sup> Es werden lediglich Mittelwerte über die Periode 2045-2074 betrachtet. Es ist aufgrund natürlicher Schwankungen nicht möglich, eine Prognose für ein spezifisches Jahr abzugeben. Hier wird deshalb der Einfachheit halber das Jahr 2060 stellvertretend für die Periode genannt.

2013; Zubler et al. 2014a, b). Diese Studien lassen zwar Rückschlüsse auf die Klimaveränderung bis ins Jahr 2060 auf der Ebene der Agglomerationen zu, der eigentliche Effekt der Wärmeinseln und die damit verbundene thermische Überhitzung der Agglomerationsgebiete ist jedoch bislang von den quantitativen Abschätzungen ausgenommen. Auf Seiten der Folgenabschätzung wird von zahlreichen Studien qualitativ darauf hingewiesen, dass die prognostizierte Erwärmung in innerstädtischen Gebieten noch dramatischer ausfallen könnte, wenn die Wärmeinsel mitberücksichtigt würde. Auf diesen Umstand wird insbesondere auch im Bericht über die Folgen des Klimawandels im Kanton Basel-Stadt (Kanton Basel-Stadt 2011) und in der Fallstudie des Grossraums Zürich (econcept 2013) hingewiesen.

Für die Klimarisikoanalysen der Fallstudienregionen Kanton Basel-Stadt und Genf, welche eine möglichst quantitative Abschätzung der zusätzlichen Kosten und Erträge um das Jahr 2060 (Periode 2045-2074) zum Ziel haben, ist es daher wichtig, die Unbekannte Wärmeinsel grob abschätzen zu können und für die Risikoanalyse 2060 möglichst quantitativ zu berücksichtigen. Nur so kann ein vollständiges Bild der Risiken und Chancen aufgezeigt werden. Für die Wärmeinsel der Stadt Basel wurden zahlreiche und detaillierte Studien publiziert, die den Wärmeinsel-Effekt von Basel sowohl qualitativ als auch quantitativ charakterisieren (e.g. Parlow 1996; Parlow et al. 2014; Rotach et al. 2005; Vogt und Parlow 2011).

Für die Klimarisikoanalysen der Kantone Basel-Stadt und Genf wird deshalb im Vorfeld der Hauptstudie versucht, das Wissen und die Daten über den Wärmeinsel-Effekt aus der Literatur zu nutzen, um den Klimawandel im städtischen Raum auf Basis von Temperaturbeobachtungen der MeteoSchweiz (Begert et al. 2005, Frei 2013) und mit Hilfe von aus Klimamodellen errechneten Temperaturänderungssignalen für den Zeitraum um 2060 (Zubler et al. 2014a; Zubler et al. 2014b) zu modellieren. Hierfür sollen die Daten der ruralen MeteoSchweiz-Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE) mit den vorliegenden Daten zur Wärmeinsel in Basel angepasst werden. So soll aufgezeigt werden, wie sensitiv verschiedene Klimaindikatoren auf die Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts um das Jahr 2060 reagieren. Die Daten werden analog auch noch für das Fallstudiengebiet Kanton Genf vorgestellt.

Dieses Inputpaper beschreibt die Methodik, die verwendete Literatur, sowie die Berücksichtigung und Anwendung des Wärmeinsel-Effekts in den Risikoanalysen Basel-Stadt und Genf. Weiter werden die quantitativen Abschätzungen einzelner wichtiger anwendungsorientierter Klimaindikatoren in Bezug auf die Wärmeinsel von Basel-Stadt und Genf für den Zustand *heute* (resultierend aus dem Mittelwert der Referenzperiode 1981-2010) und 2060 (als resultierender Mittelwert der Periode 2045-2074) aufgezeigt und interpretiert.



## 2. Methodik

Das Vorgehen zur Bestimmung des für die Klimarisikoanalysen Basel-Stadt und Genf um das Jahr 2060 wichtigen Wärmeinsel-Effekts besteht aus zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird die Wärmeinsel von Basel mit Hilfe eines breiten Literaturstudiums charakterisiert und beschrieben (Kapitel 4.1) und schliesslich für die Anwendung der Studie festgelegt (als additives Delta der Mitteltemperatur, Maximaltemperatur und Minimaltemperatur, siehe Kapitel 4.2). In einem zweiten Schritt wird das Delta der Wärmeinsel auf die Temperaturbeobachtungen der MeteoSchweiz (Begert et al. 2005, Frei 2013) geschlagen, um so die Daten der ruralen MeteoSchweiz-Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE) entsprechend zu korrigieren. Zur Berücksichtigung des Klimawandels werden die von Zubler et al. (2014a) aus regionalen Klimamodellen berechneten Temperaturänderungssignale für zwei Szenarien ebenso zu den Beobachtungen addiert (Delta-Change-Ansatz). Als Referenzperiode dient der Beobachtungszeitraum 1981-2010, analog zu CH2011 (2011). Anschliessend werden für die Referenzperiode und die Szenarioperiode 2045-74 (2060) verschiedene Klimaindikatoren für zwei in der Studie relevante *Klimaszenarien schwach* und *stark* gerechnet (Kapitel 5), analog dem Vorgehen bereits vorhandener Klimaindikatoren (MeteoSchweiz 2013; Zubler et al. 2014a; Zubler et al. 2014b). Die Resultate werden im Kapitel 5 als Vergleich zwischen dem Zustand *heute* (Mittelwert 1981-2010) und den beiden Zuständen für die *Klimaszenarien schwach* und *stark* um das Jahr 2060 (resultierender Mittelwert der Periode 2045-2074) gegenübergestellt und deren Sensitivität diskutiert.

Mangels alternativer Datengrundlagen, wird der für Basel bestimmte Jahresgang der Wärmeinsel im Sinne einer ersten Näherung analog für die Stadt Genf übernommen, um daraus wiederum individuelle Klimaindikatoren zu berechnen (Kapitel 5).

## Verwendete Klimaszenarien

### Heute

Referenzperiode 1981-2010

### Klimaszenario schwach

Mittlere Schätzung RCP3PD 2060 (Mittelwert 2045-2074) für die Temperatur und den Niederschlag.

### Klimaszenario stark

Obere Schätzung A1B 2060 (Mittelwert 2045-2074) für die Temperatur im ganzen Jahr und den Niederschlag im Winter und im Frühling. Für den Niederschlag im Sommer und im Herbst wird die untere Schätzung A1B verwendet, um eine möglichst starke Abnahme zu betrachten.

## 3. Anwendung des Wärmeinsel-Effekts für die Klimarisikoanalysen Basel und Genf

Der Wärmeinsel-Effekt ist innerhalb der schweizweiten Klimarisikoanalysen vor allem im Wirkungsbereich Gesundheit relevant. Die thermische Überhitzung wird von der Bevölkerung als fühlbares Phänomen wahrgenommen und wirkt sich entsprechend auf das körperliche Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit aus. Für die schweizerischen Fallstudien ist es wichtig, diesen Punkt möglichst quantitativ zu erfassen um die Abschätzungen in Bezug auf zusätzliche Kosten und Erträge um das Jahr 2060 darauf basierend vornehmen zu können. Denn die grosse Schwäche bisheriger Studien ist, dass der Wärmeinsel-Effekt lediglich qualitativ abgehandelt wird und im Rahmen von Folgenabschätzungen nur auf den Umstand hingewiesen wird, dass aufgrund der Wärmeinsel in innerstädtischen Gebieten weitaus grössere Auswirkungen infolge des Klimawandels zu erwarten sein könnten, ohne deren Umfang genauer zu beziffern. Aus diesem Grund, und weil der Kanton Basel-Stadt sowie auch weite Teile des Kantons Genf aus urbaner Fläche bestehen, ist es für die Studie entscheidend, dass der Wärme-Effekt auch quantitativ berücksichtigt wird, um zumindest in diesem Punkt die Unsicherheiten etwas zu verringern und in einem ersten Pilotversuch die Folgen des Wärme-Effekts zu quantifizieren.

Die konkret für die Fallstudien berechneten Klimaindikatoren, welche den Wärmeinsel-Effekt berücksichtigen, sind unten aufgeführt, wobei BAS für die SwissMetNet-Station Ba-

sel/Binningen und GVE für Genève-Cointrin stehen und der Subskript „urban“ die entsprechende Station mit Berücksichtigung des städtischen Wärmeineffekts meint.

- Mitteltemperatur für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$
- Anzahl „sehr heisse Tage“ für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$
- Anzahl Hitzetage für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$
- Anzahl Tropennächte für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$
- Heizgradtage für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$
- Kühlgradtage für  $BAS_{urban}$  und  $GVE_{urban}$

Die konkrete Anwendung dieser Indikatoren für die pragmatisch orientierte Abschätzung der zusätzlichen Kosten und Erträge je Auswirkungsbereich um das Jahr 2060 werden in den Fallstudien beschrieben. Die Klimaindikatoren wurden jedoch so gewählt, dass diese mit den vorhandenen Inputdaten möglichst kompatibel sind und sich daraus vernünftige, pragmatische und zielgerichtete Abschätzungen ergeben. Konkret wurde zum Beispiel in Anlehnung an die Literatur und in Absprache mit entsprechenden Fachexperten der Klimaindex „sehr heisse Tage<sup>2</sup>“ gerechnet, welcher es erlauben wird, hitzebedingte Gesundheitsfolgen besser quantitativ abschätzen zu können.

---

<sup>2</sup> Sehr heisse Tage sind definiert als Tage mit maximaler Temperatur >35 °C und minimaler Temperatur <20 °C.

## 4. Städtischer Wärmeinsel-Effekt

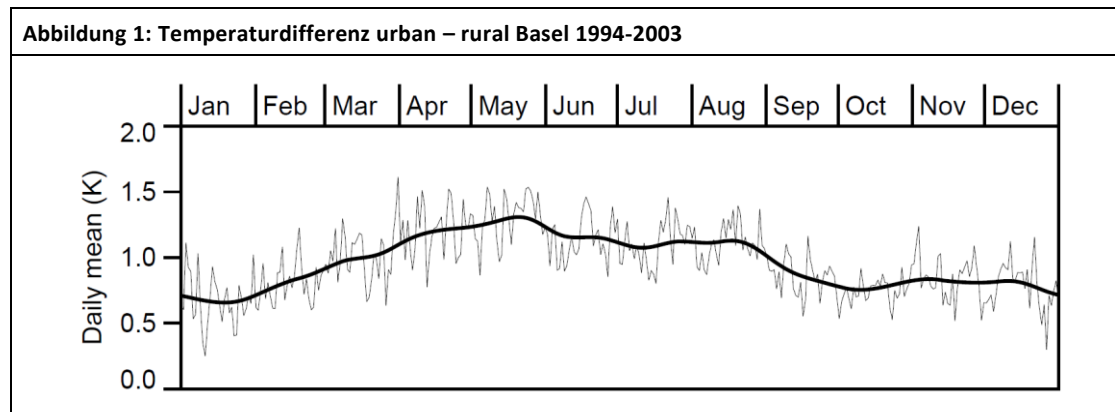
### 4.1. Städtische Wärmeinsel in Basel

Der städtische Wärmeinsel-Effekt der Stadt Basel wird insbesondere in Parlow et al. (2014) sehr detailliert beschrieben. Die Wärmeinsel wird in der Studie mit Hilfe von drei verschiedenen Messverfahren dargestellt, wobei insbesondere auch die Vor- und Nachteile je System zum Vorschein kommen und gegeneinander abgewogen werden. Parlow et al. (2014) macht deutlich, dass aufgrund des Messverfahrens zum Teil höchst unterschiedliche Resultate gewonnen werden. Einzelheiten hierzu können direkt aus Parlow et al. (2014) entnommen werden.

Für die Anwendung des Wärmeinsel-Effekts in den schweizerischen Klimarisikoanalysen soll dieser anhand von Messungen fixer Messstationen bestimmt werden. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der innerstädtischen (urbanen) Temperaturmessungen mit den ländlichen (ruralen) Stationen wie Basel/Binningen, welche Messungen nach WMO-Standard vornehmen.

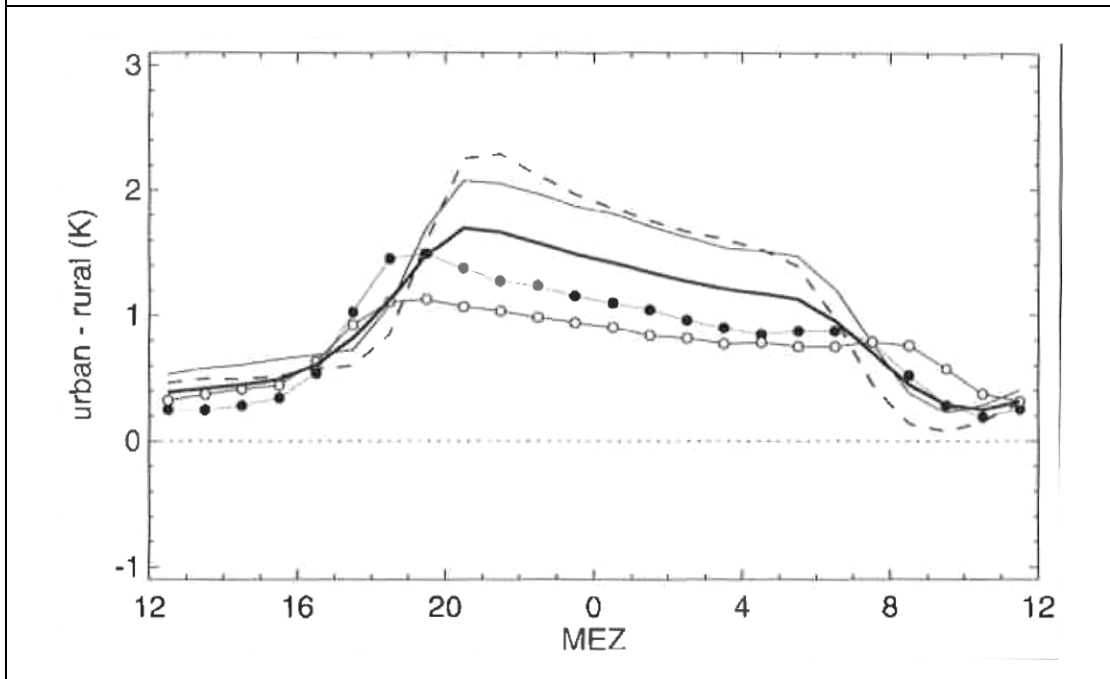
In Parlow et al. (2014) wird hierzu eine Temperaturmessreihe in verschiedenen Höhen über Grund analysiert. Die Zeitreihe (siehe Abbildung 1) zeigt das Delta der mittleren stündlichen Temperaturmessungen der urbanen Station Basel-Spalenring (BSPA, 3m über Grund) und des ruralen Standorts Basel Lange Erlen (BLER, 2m über Grund) für den Zeitraum 1994-2003. Dieselbe Messreihe wird auch in Vogt und Parlow (2011) diskutiert. Gemäss Vogt und Parlow (2011) kann der Effekt der städtischen Wärmeinsel als Temperaturdifferenz urban minus rural definiert werden. Die in Abbildung 1 dargestellten Tagesmittelwerte der Temperaturdifferenzen rural minus urban schwanken im Winter um 0.7 K und erreichen das Maximum zu Beginn des Sommers mit knapp 1.3 K. Die Mittelwerte verbergen jedoch ausgeprägte Tagesgänge mit Maximalwerten im Sommer nach Sonnenuntergang in der ersten Nachthälfte von im Mittel 2.5 K (Vogt und Parlow 2011). Die Werte decken sich jedoch auch mit einer anderen gesamteuropäischen Studie, wonach eine Temperaturdifferenz zwischen den Kernstädten und dem Umland von 1 bis 1.8 K gefunden wurde (Schwarz et al. 2011). Gemäss Vogt und Parlow (2011) ist der städtische Wärmeinsel-Effekt tagsüber gering mit Werten um 0.5 K, wobei das Minimum typischerweise in der ersten Tageshälfte auftritt. Vogt und Parlow (2014) geben zudem an, dass der Hauptanteil der Wärmeinsel-Werte, bezogen auf 75% der Stundenwerte in der 10 jährigen Zeitreihe, zwischen -2 K und +2 K, mit allerdings 72% über und nur 12% unter 0 K, liegen. Im Jahr 1994 war die städtische Wärmeinsel an beispielsweise ungefähr 30 Tagen unter 0 K (Parlow 2011a). Dies bedeutet, dass die Wärmeinsel insbesondere eine thermische Wärmeinsel und nur selten kühler als das Umland ist, dieser zweite Fall jedoch auch auftritt. Zwischen 2 und 4 K sind noch 14% der Werte zu finden und zwischen 6 und 8 K nur noch knapp 2%. Die hohen Werte treten nachts auf und sind positiv mit der Temperatur korreliert (Parlow et al. 2014; Vogt und Parlow 2011). Betrachtet man keine über die Jahre gemittelten Daten, sondern

tägliche Messwerte, so kann eine Temperaturdifferenz von zum Teil mehr als 8 K beobachtet werden, auch während des Hitzesommers 2003 (Parlow 2011a, Parlow 2011b). Parlow (2011a) quantifizieren den Effekt der städtischen Wärmeinsel im Allgemeinen mit einer erhöhten Differenz der Mitteltemperatur von 2 – 6 K. Dieser Wert liegt höher als dies die Messwerte von Basel nahelegen, welche aber über mehrere Jahre gemittelt sind und daher auch stärker geglättet werden. Betrachtet man beispielsweise nur ein einziges Jahr (e.g. 1994) so liegen die Differenzen der Mitteltemperaturen in der Basler Innenstadt zwischen 1.5 und 3K höher mit den grössten Differenzen vorrangig während den Sommermonaten (Parlow 2011a). Die Unterschiede können von Tag zu Tag jedoch erheblich grösser sein.



Differenz der Lufttemperatur urban – rural zwischen den Stationen Basel Spalenring (3m, Strasse) und Lange Erlen (2m) basierend auf Stundenmittel für den Zeitraum 1994 bis 2003. Die Grafik zeigt den Verlauf der mittleren Tagesmittel und gleitendes mittleres monatliches Tagesmittel (aus Parlow et al. 2014; Vogt und Parlow 2011. Parlow 2011a).

Abbildung 2: Mittlerer Tagesgang der Differenz der Lufttemperatur urban – rural in Basel

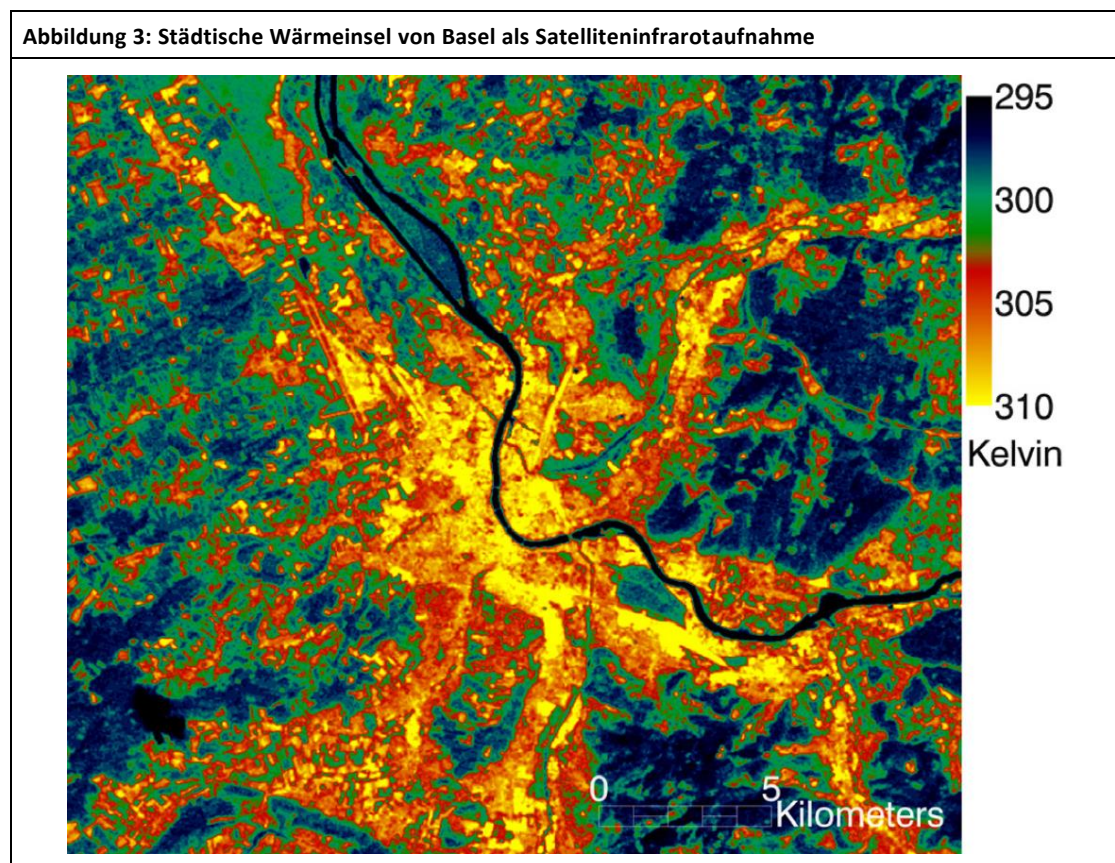


Jahreszeitenmittel der Tagesgänge der Differenz der Lufttemperatur urban – rural der Stationen Basel Spalenring (3m, Strasse) und Lange Erlen (2m) basierend auf Messungen der Jahre 1994 bis 2003. Die ausgezogene, dünne schwarze Linie zeigt den Tagesgang im Frühling, die gestrichelte Linie repräsentiert den Tagesgang im Sommer, die ausgefüllten Kreise stehen für den Herbst und die leeren Kreise illustrieren den Tagesgang im Winter. Die dicke ausgezogene Linie ist der mittlere jährliche Tagesgang (aus Vogt und Parlow 2011).

Die Kurve in Abbildung 2 illustriert den tagsüber schwach bis gar nicht vorhandenen Wärmeinsel-Effekt, welcher nur auf die Bestandesschicht (urban canopy layer – UCL) begrenzt ist (Vogt und Parlow 2011). Gemäss den Autoren widerspricht dies der Empfindung vieler Menschen, die das Stadtklima tagsüber, insbesondere im Sommer, als wärmer im Vergleich zum Umland empfinden. Dabei wird vergessen, dass die Temperatur nur ein Faktor für das Behaglichkeitsempfinden ist. Vogt und Parlow (2011) schreiben weiter, dass die Abstrahlung der umgebenden Häuserwände, die Luftfeuchtigkeit und die reduzierte Durchlüftung Faktoren sind, die die Energiebilanz des Menschen beeinflussen, mit der Folge, dass das Stadtklima vergleichsweise belastend sein kann. Die Studie von Vogt und Parlow (2011) zeigt weiter, dass der Wärmeinsel-Effekt an urbanen Standorten ohne Vegetation am stärksten ausfällt. Es spielt jedoch auch die Wahl des ruralen Vergleichsorts eine Rolle, welcher die resultierende Wärmeinsel beeinflusst. Hier spielt in erster Näherung die Wasserverfügbarkeit eine wichtige Rolle (Vogt und Parlow 2011).

Die thermische Wärmeinsel (urban heat island) ist in Basel klar ausgebildet und zeigt ihre grösste Ausprägung am späten Abend.

Um die städtische Wärmeinsel von Basel zu veranschaulichen, ist in Abbildung 3 eine Infrarotaufnahme von Basel vom 12. August 2012 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die urbanen Gebiete weit höhere Temperaturen aufweisen, als die übrigen ruralen Gebiete. Ein Spezialfall ist der Rhein, welcher aufgrund der Wassertemperaturen eine deutlich kühlende Wirkung auf die Stadt hat. Die Informationen der Satellitenaufnahme lassen sich jedoch aufgrund der verschiedenen Messverfahren nicht direkt mit den oben beschriebenen Temperaturmessungen vor Ort vergleichen. Dennoch vermittelt die Aufnahme einen Eindruck über die differenzierte Ausprägung der Basler Wärmeinsel und die Notwendigkeit, dieses Phänomen im Rahmen von Risikoanalysen entsprechend zu berücksichtigen.



Landsat-7-ETM+ thermale infrarot Aufnahme vom 12. August 2000 in 60 m räumlicher Auflösung resampled auf 30 m räumliche Auflösung (aus Parlow et al. 2014).

Die oben gemachten Ausführungen mit Hilfe der Messreihe von Basel zeigen, dass in Basel-Stadt ein städtischer Wärmeinsel-Effekt existiert, welcher mit Hilfe der Messreihe aus Abbildung 1 quantifiziert ist. Die Messreihe liefert insgesamt plausible und zuverlässige Zahlen. Für die Klimarisikoanalysen der beiden Fallstudiengebiete Basel-Stadt und Genf wird mit den monatlichen Tagesmittelwerten eine quantitative Approximation der Wärmeinsel vorgenommen. Dennoch dürfte die Anwendung dieser Zahlen für die Klimarisikoanalysen 2060 aufgrund der starken Glättung der Tagesmittelwerte und der mittleren monatlichen Tagesmittelwerte eher vorsichtige Schätzungen sein. Daten aus Parlow (2011a) legen zudem nahe, dass die städtische Wärmeinsel an einzelnen Tagen durchaus auch negative Werte annimmt, im Mittel jedoch stets einen Wärmeüberschuss im Vergleich zum Umland aufweist.

Fasst man dies zusammen, so sehen wir im Mittel nachts einen starken, tagsüber einen schwachen Effekt, der in einzelnen Nächten  $+4-6^{\circ}\text{C}$  überschreiten und an einzelnen Tagen  $-1^{\circ}\text{C}$  tagsüber unterschreiten kann.

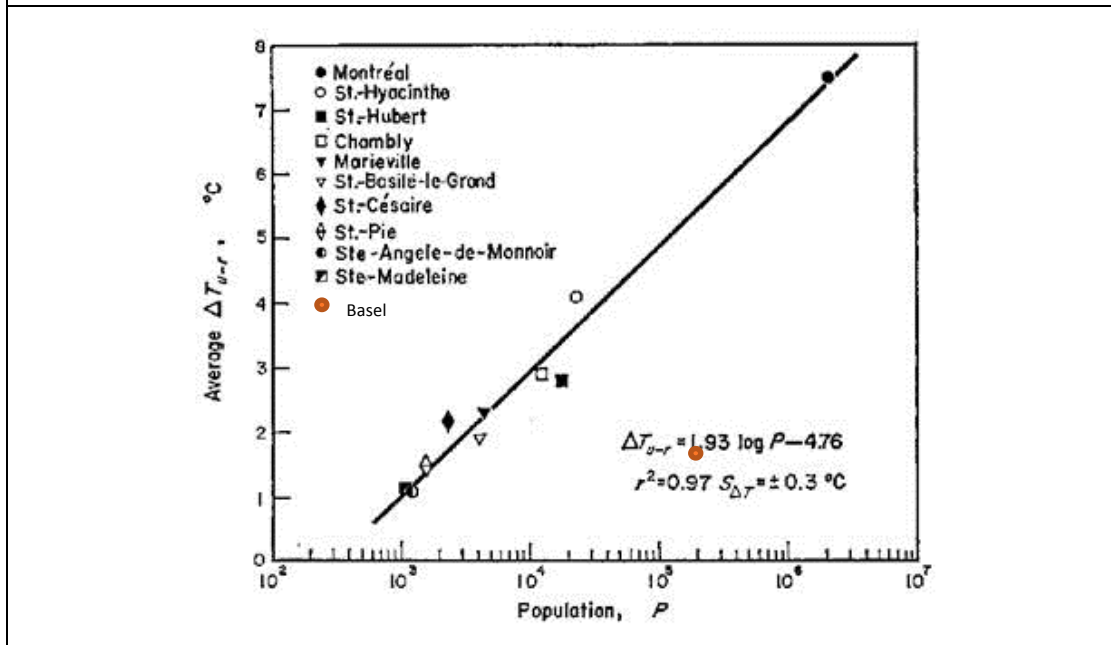
Vergleicht man die mittleren Zuschläge von Abbildung 1 mit der Kurve aus Oke (1973) in Abbildung 4, so wird deutlich, dass sich der mittlere Wärmeinsel-Zuschlag in Bezug auf die Bevölkerungsanzahl nicht so verhält, wie dies die Studie von Oke (1973) nahe legt. Dieser Umstand stützt die Vermutung, dass die Anwendung der Messreihe für die Klimarisikoanalysen 2060 einen eher konservativen Ansatz folgt. Grund für eine weniger stark ausgeprägte städtische Wärmeinsel könnte jedoch auch die spezielle Situation des kühlenden Flusses Rhein sein. Dieser ist insbesondere tagsüber eine regelrechte Kältequelle und in Abbildung 3 deutlich sichtbar. Es ist daher gut möglich, dass Basel aufgrund topographischer Gegebenheiten eine tiefere Wärmeinsel aufweist, als dies aufgrund von Oke (1973) und anderen Studien angenommen werden könnte.

Diese Vermutung legt nahe, dass in Genf ähnliche Verhältnisse wie in Basel-Stadt anzutreffen sind, wo sowohl der angrenzende Genfersee als auch die Rhone einen zusätzlich kühlende Komponente in Bezug auf die thermische Überhitzung darstellen dürften.

Ein Vergleich der mittleren Zuschläge aus Abbildung 1 mit den Werten einer breit abgestützten statistischen Studie zum Wärmeinsel-Effekt in Europa (Zhou et al. 2013) zeigt, dass die für Basel gefundenen Werte durchaus realistisch sind. In Zhou et al. (2013) wurden für Städte mit ähnlichem Flächenbedarf wie Basel Werte im Bereich von  $0.5$  bis  $1.5^{\circ}\text{C}$  gefunden. Gemäss Zhou et al. (2013) streuen die Werte jedoch stark. Vergleichbare Werte wurden auch in Chrysanthou et al. (2014) für die Stadt Paris gefunden. Die Temperaturdifferenz urban – rural in Paris beträgt rund  $1\text{K}$  in den Monaten Mai, Juni und Juli und sinkt gegen  $0.5\text{K}$  im Januar. Die Studie zeigt weiter auf, dass die Urbanisierung selbst für einen kleinen Teil der gemessenen durchschnittlichen Erwärmung in Europa verantwortlich ist.



Abbildung 4: Stadtgrösse im Vergleich zum städtischen Wärmeinsel-Effekt

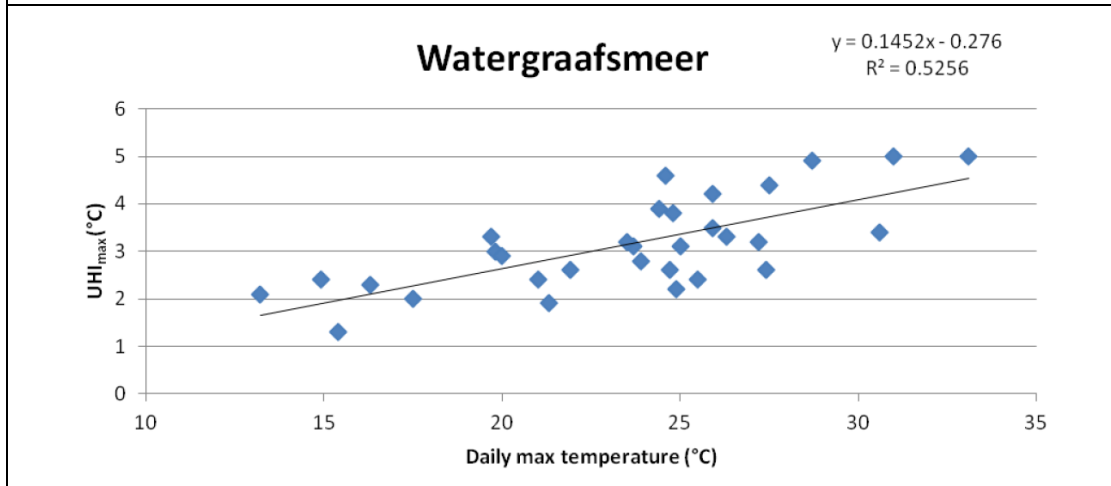


Die Abbildung zeigt den Wärmeinsel-Effekt aufgetragen nach Grösse der Stadt, respektive der entsprechenden Bevölkerungszahl gemäss Oke (1973). Der rote Punkt wurde nachträglich von den Autoren eingetragen. Er zeigt die heutige Bevölkerungszahl von Basel (rund 196'000) und den in Abbildung 1 aufgezeigten mittleren städtischen Wärmeinsel-Zuschlag.

### Exkurs: Städtische Wärmeinsel und Abhängigkeit von der Maximaltemperatur

Wie das Beispiel aus Amsterdam (siehe Abbildung 5) zeigt, scheinen die täglichen Maximaltemperaturen das Delta des Wärmeinsel-Zuschlags direkt zu beeinflussen. Demnach ist der Wärmeinsel-Effekt umso ausgeprägter, je höher die tägliche Maximaltemperatur steigt. Für Basel-Stadt liegen hierzu keine Daten vor. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Ausprägung des Effekts der thermischen Überhitzung auf ähnliche Weise der Maximaltemperatur folgt, wie dies für Amsterdam der Fall ist. Dieses Verhalten kann jedoch für die anstehenden Klimarisikoplanungen 2060 von Basel-Stadt und Genf nicht quantitativ berücksichtigt werden. Dennoch zeigt die Fallstudie von Diogo und Koomen (2014), dass in städtischen Gebieten die städtische Wärmeinsel möglicherweise sensitiv auf Temperaturzunahmen reagiert. Die Erkenntnis von Parlow (2011a), wonach die Wärmeinsel von Basel tendenziell grösser ist, je höher die Mitteltemperatur – und somit analog auch die Maximaltemperatur – steigt, entspricht genau diesem Umstand. Diogo und Koomen (2014) berechnen demnach einen Anstieg der städtischen Wärmeinsel um 0.15 °C je 1°C Erwärmung. Für zukünftige Klimaentwicklungen ist dieser Sachverhalt daher nicht ganz unbedeutend und sollte nach Möglichkeit für die Projektionen miteinbezogen werden.

**Abbildung 5: Temperaturabhängigkeit der Wärmeinsel von der täglichen Maximaltemperatur in Amsterdam**



Die Abbildung zeigt die Temperaturabhängigkeit des maximalen Wärmeinsel-Effekts (°C) verglichen mit der täglichen Maximaltemperatur (°C) von Watergraafsmeer in Amsterdam (NL) gemäss Diogo und Koomen (2014).

## 4.2. Städtischer Wärmeinsel-Zuschlag für die Anwendung in den Klimarisikoanalysen

Für die beiden Klimarisikoanalysen Basel-Stadt und Genf soll der städtische Wärmeinsel-Effekt mit Hilfe einer einfachen Methode grob abgeschätzt werden. Die Abschätzung wird auf der Grundlage der Messreihe von Basel-Stadt mangels alternativer Datenquellen 1:1 auch für Genf verwendet. Die grobe Abschätzung des Wärmeinsel-Effekts soll im Anschluss dazu dienen, um überhaupt für eine Stadt in der Schweiz die klimabedingte Änderung verschiedener Klimaindikatoren unter Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts quantitativ herzuleiten.

Zur Abschätzung des Wärmeinsel-Effekts für die weiteren Berechnungen verschiedener Klimaindikatoren (siehe Kapitel 3) wurde die von Parlow (2011a), Parlow et al. (2014) und Vogt und Parlow (2011) vorgestellte graphische Darstellung der Messreihe der mittleren Tagesmittel verwendet (siehe Abbildung 1). Auf der Basis einer grafischen Auswertung der Messreihe unter Berücksichtigung der mittleren monatlichen Tagesmittel wurden verschiedene Stützpunkte abgeschätzt und definiert, mit deren Hilfe die Werte dazwischen linear interpoliert wurden. So konnte mit Hilfe einer einfachen optischen Methode eine Zeitreihe approximiert werden, die das additive Delta der städtischen Wärmeinsel zur Tagesmitteltemperatur für den Zustand *heute* darstellt (INFRAS 2014). Leider war die Verwendung der ursprünglichen Messdaten im Rahmen dieser Studie nicht möglich, wodurch dieser vereinfachte Ansatz zur Anwendung kam. Die aus optischer Abschätzung generierte Jahresgangkurve schwankt zwischen Werten von 0.65 bis 1.4 K (Abbildung 6). Die in der Messreihe von Parlow (2011a), Parlow et al. (2014) und

Vogt und Parlow (2011) enthaltene charakteristische verzögerte Absenkung des additiven Wärmeinsel-Deltas gegen anfangs September hin wurde für die interpolierte Jahresgangkurve berücksichtigt.

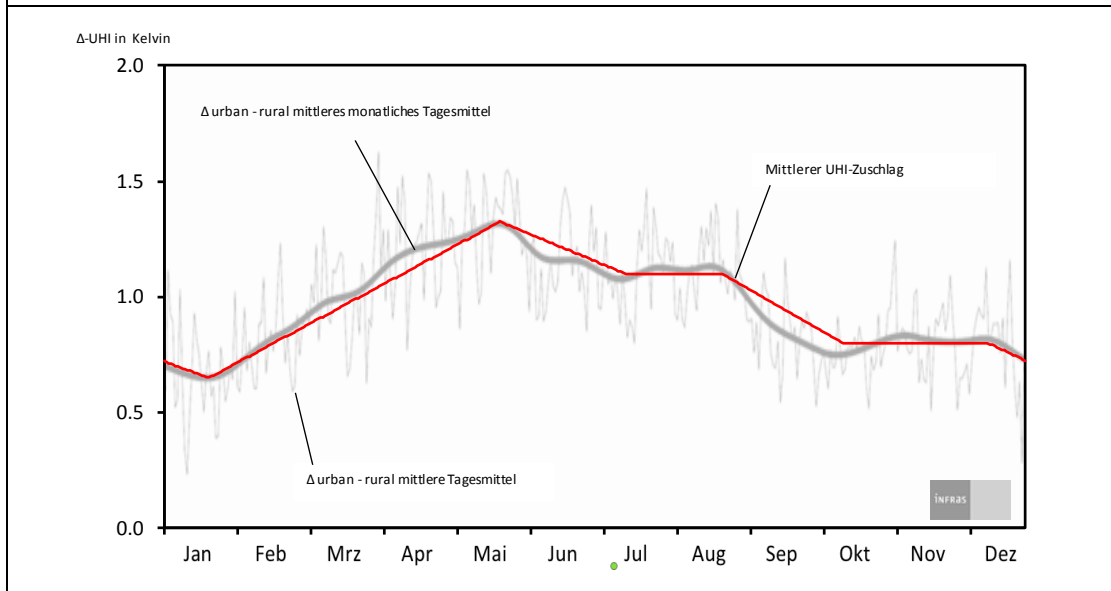
Die Jahresgangkurve (rote Kurve in Abbildung 6) wurde mit Hilfe von Stützpunkten der mittleren monatlichen Tagemitteltemperaturen hergeleitet. Die Kurve ist somit entsprechend geglättet, obschon die Übergänge von einem Stützpunkt zum anderen sprunghaft sind. Wie schon die einzelnen mittleren Tagesmittel zeigen (dünne graue Linie in Abbildung 6) können einzelne Tagesmitteltemperaturen höher oder tiefer als die abgeschätzte Jahresmittelkurve ausfallen (siehe oben), welche jedoch in der vorliegenden Studie im Detail nicht berücksichtigt werden. Die Jahresgangkurve des additiven städtischen Wärmeinsel-Zuschlags ist somit eine erste konservative Schätzung. Der eigentliche Wärmeinsel-Effekt könnte für einzelne Tage weitaus höher sein.

Abbildung 7 illustriert die natürliche Variabilität der mittleren Wärmeinsel-Tagesmitteltemperaturen. Der grösste Teil dieser Werte befindet sich innerhalb einer Bandbreite von  $\pm 0.25$  Kelvin. Da die optische Datenauswertung keine weiteren Interpretationen zulässt, kann diese Variabilität für die Risikoanalysen von Basel-Stadt und Genf für den Zeithorizont 2060 nicht spezifisch genutzt werden. Dennoch zeigt sich deutlich, dass die Abschätzung der mittleren Wärmeinsel für den grössten Teil der heutigen Tagesmittelwerte mit einer Abweichung von  $\pm 0.25$  K gültig ist. Konkret wird der mittlere Wärmeinsel-Zuschlag wie folgt angewandt:

- *Der Jahresgang der additiven Deltas der Wärmeinsel-Tagesmitteltemperaturen wird zur Abschätzung des mittleren Tagesmitteltemperatur, der Tagesmaximumtemperatur und Tagesminimumtemperatur 2060 verwendet (Werte der roten Linie in Abbildung 6)*
- *Das additive Delta der Wärmeinsel-Tagesmitteltemperaturen wird zur Abschätzung des mittleren Tagesmitteltemperatur, der Tagesmaximumtemperatur und Tagesminimumtemperatur 2060 für ein beispielhaftes Extremereignis analog dem Hitzesommer 2003 verwendet*

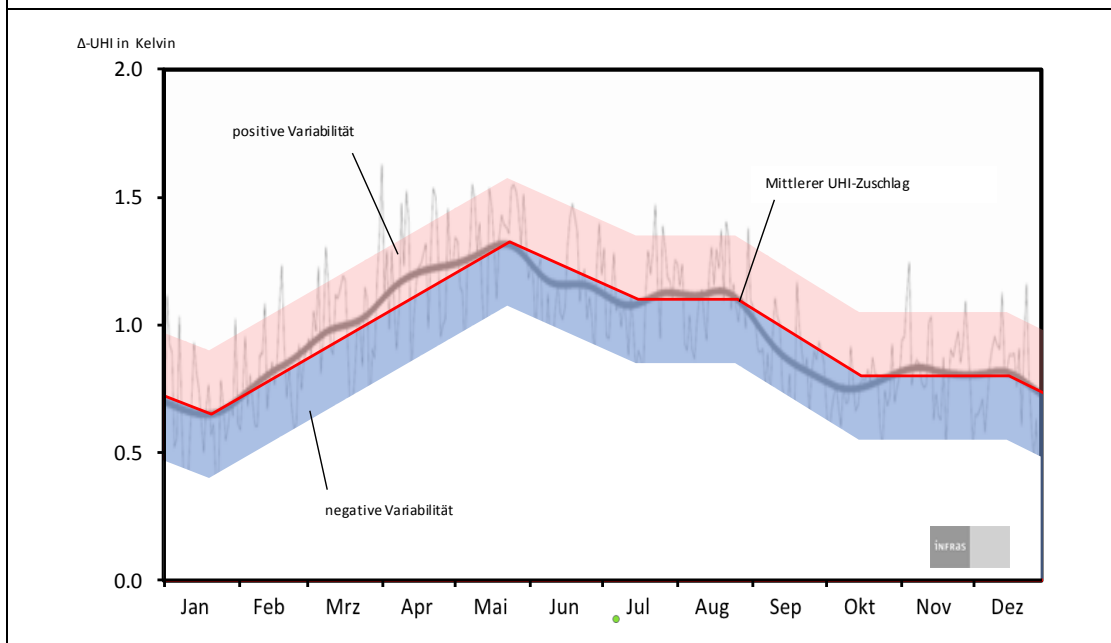
Dieses Vorgehen erlaubt es sowohl die Tagesmitteltemperaturen, das Tagesmaxima und die Tagesminimumtemperaturen 2060 additiv mit dem Delta des Wärmeinsel-Effekts zu belegen.

**Abbildung 6: Mittlere Wärmeinsel von Basel-Stadt als einfache Abschätzung für die Fallstudien**



Die Abbildung illustriert die mittlere Wärmeinsel von Basel-Stadt als additives Delta zur Tagesmitteltemperatur in Kelvin (rote Linie; UHI-Zuschlag). Der mittlere Wärmeinsel-Jahresgang von Basel-Stadt sowie deren Bandbreiten der Variabilität wurden durch INFRAS abgeschätzt. Die ursprüngliche Grafik (Zeitreihe im Hintergrund) stammt aus Vogt und Parlow (2011).

**Abbildung 7: Mittlere Wärmeinsel und deren Bandbreite der Variabilität für Basel-Stadt**



Die Abbildung zeigt die mittlere Wärmeinsel von Basel-Stadt (rote Linie, UHI-Zuschlag) und die Bandbreite der natürlichen Variabilität in positiver (rote Schattierung) und negativer (blaue Schattierung) Richtung. Die obere und untere Bandbreite der Variabilität weichen je 0.25 Kelvin von der mittleren Wärmeinsel ab. Bis auf einzelne Peaks, werden beinahe alle Tagesmittel-

werte mit den resultierenden 0.5 K Bandbreite abgedeckt. Der mittlere Wärmeinsel-Jahresgang von Basel-Stadt sowie deren Bandbreiten der Variabilität wurden durch INFRAS abgeschätzt. Die ursprüngliche Grafik (Zeitreihe im Hintergrund) stammt aus Vogt und Parlow (2011).

### **Annahmen und Vorbehalte bei der Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts im Zusammenhang mit verschiedenen Klimaindikatoren**

- Bei der oben vorgestellten einfachen Vorgehensweise gilt es die gemachten Annahmen und Vorbehalte entsprechend zu berücksichtigen. Die von Parlow (2011), Parlow et al. (2014) und Vogt und Parlow (2011) berechnete Zeitreihe beruht auf Messungen der Jahre 1994-2003. Die Werte zeigen also das Mittel dieser Zeitperiode. Für die Studie wird vereinfacht angenommen, dass die Daten dem Zustand *heute* entsprechen, welcher in den Risikoanalysen typischerweise als Mittel der Referenzperiode 1981-2010 definiert ist, jedoch abhängig von der Datenlage auch abweichen kann.
- Weiter wurde die Annahme getroffen, dass die für den heutigen Zustand abgeschätzte Jahresganglinie von Abbildung 6 auch im Jahr 2060 gleich bleiben wird. Wie der Exkurs der Messreihe von Amsterdam (siehe oben) nahelegt, dürfte der Wärmeinsel-Effekt jedoch proportional mit dem Anstieg der Tagesmaximumtemperaturen zunehmen. Es wurde im Zusammenhang mit der Berechnung der verschiedenen Klimaindikatoren somit kein Trend für den Zeithorizont 2060 berücksichtigt.
- Da die simple optische Approximation der additiven Tagesmitteltemperaturen unter Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts lediglich auf mittleren monatlichen Tagesmitteltemperaturen beruht, ist das Wärmeinsel-Signal stark geglättet. In Realität dürften sich einzelne Tagesmittelwerte oder gar Stundenmittelwerte in weit grösseren Bandbreiten bewegen, wie weiter oben dargestellt wurde. Die Abschätzung des Effekts der Wärmeinsel kann demnach als Abschätzung des mittleren Einflusses der Wärmeinsel interpretiert werden. Dies wird auch durch die gemachten Ausführungen rund um die Abbildung 4 deutlich, wonach der hier abgeschätzte Wärmeinsel-Zuschlag deutlich unter den Erwartungen gemäss Oke (1973) zu liegen kommt.
- Es wurde weiter angenommen, dass das additive Delta der Basler Wärmeinsel, welches aus der Differenz der Messwerte der Station Basel Spalenring (3m, Strasse) und Lange Erlen (2m) berechnet wurde, in dieser Weise für die Berechnung der Klimaindikatoren verwendet werden darf. Keine der Stationen entspricht dem WMO-Standard. Die Messreihen wurden vom Meteorologischen Institut der Universität Basel durchgeführt. Die Messungen entsprechen den allgemein gültigen Standards und können von der Qualität her als hochwertig eingestuft werden. In den Fallstudien wird in der Regel auf die Standorte der SwissMetNet-Stationen Referenziert (BAS und GVE). Es wurde angenommen, dass der her-

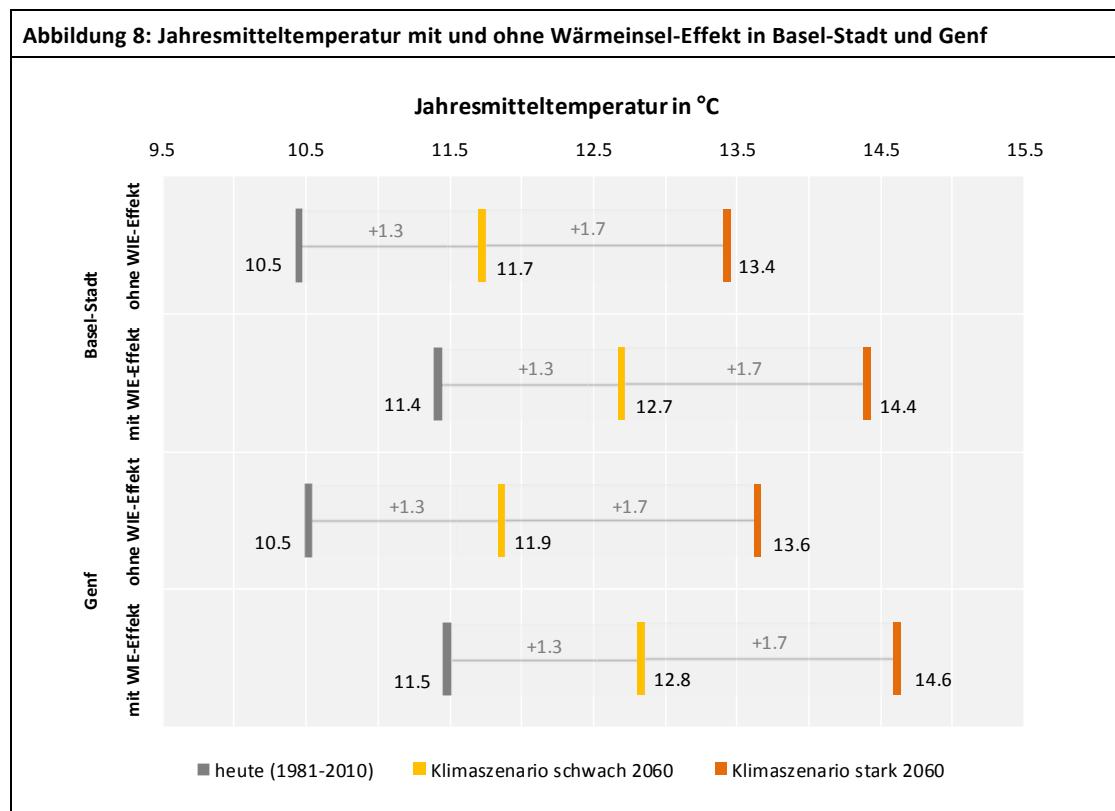
geleitete Wärmeinsel-Zuschlag ohne weiteres den Stationen Basel-Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE) hinzuaddiert werden darf.

- Effekte wie jene des „urban coolings“ werden für die Risikofallstudien nicht berücksichtigt. Aufgrund des strikten Zeitplans, war es im Rahmen dieser Studie nicht möglich auf die ursprünglichen Messwerte aus Basel zurückzugreifen. Für zukünftige Studien wäre dies unbedingt zu empfehlen, da sich der Wärmeinsel-Effekt in seiner ganzen Komplexität (Kühlinsel am Tag und Wärmeinsel in der Nacht) nur auf der Basis mittlerer stündlicher Messwerte korrekt abbilden lässt.
- Die Studie macht keine Aussage über die Änderung der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der Temperatur oder der Wärmeinsel und kann allfällige Änderung von Extremen, auch im Zusammenhang mit der Wärmeinsel, nicht abbilden. Die Aussagen dieser Studie beschränken sich auf Änderungen im 30-jährigen Mittel für verschiedene Klimaindikatoren.
- Zur Abschätzung eines ähnlichen Ereignisses wie jenes des Hitzesommers 2003 wurde die mittleren Tagesgangtemperaturen des Sommers 2003 mit jenen des Klimaänderungssignals und zusätzlich mit den mittleren monatlichen Tagesmitteltemperaturen des Wärmeinsel-Effekts belegt. So soll aufgezeigt werden, was bei einem ähnlichen Ereignis wie dem Hitzesommer 2003 im Jahr 2060 unter Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts beim Eintreten verschiedener Klimaszenarien zu erwarten sein dürfte. Bei dieser simplen Abschätzung ist davon auszugehen, dass die Änderung bis 2060 eher vorsichtig und optimistisch abgeschätzt wird und der Wärmeinsel-Zuschlag gerade bei solch extremen Ereignissen in Realität höher sein dürfte.

## 5. Resultate Basel-Stadt und Genf

### 5.1. Mitteltemperatur

Die Mitteltemperatur sowohl ohne als auch mit Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts verändert sich in Basel-Stadt und Genf bis ins Jahr 2060 deutlich. Auffällig ist insbesondere, dass sowohl in Basel-Stadt als auch in Genf die heutigen Mitteltemperaturen mit städtischem Wärmeinsel-Effekt bereits beinahe das Niveau erreichen, wie es ohne städtischen Wärmeinsel-Effekt erst im Jahre 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* erwartet wird. Entsprechend werden bis ins Jahr 2060 beim *Klimaszenario stark* Mitteltemperaturen erreicht, wie sie beispielsweise heute in Pisa (Italien) anzutreffen sind.



Dargestellt sind die Jahresmitteltemperaturen *heute* (grau), 2060 *Klimaszenario schwach* (gelb), 2060 *Klimaszenario stark* (orange) ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) (jeweils obere Reihe) und mit Wärmeinsel-Effekt (WIE) (jeweils untere Reihe). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

## 5.2. Hitzetage

Die Anzahl Hitzetage<sup>3</sup> mit und ohne städtischen Wärmeinsel-Effekt verändert sich bis 2060 spürbar. Die Differenz ob mit oder ohne städtischen Wärmeinsel-Effekt wird jedoch bis 2060 grösser, weshalb die Berücksichtigung eine grössere Veränderung bis 2060 beinhaltet und daher in den Städten eine hitzebedingte Mehrbelastung erwartet wird.

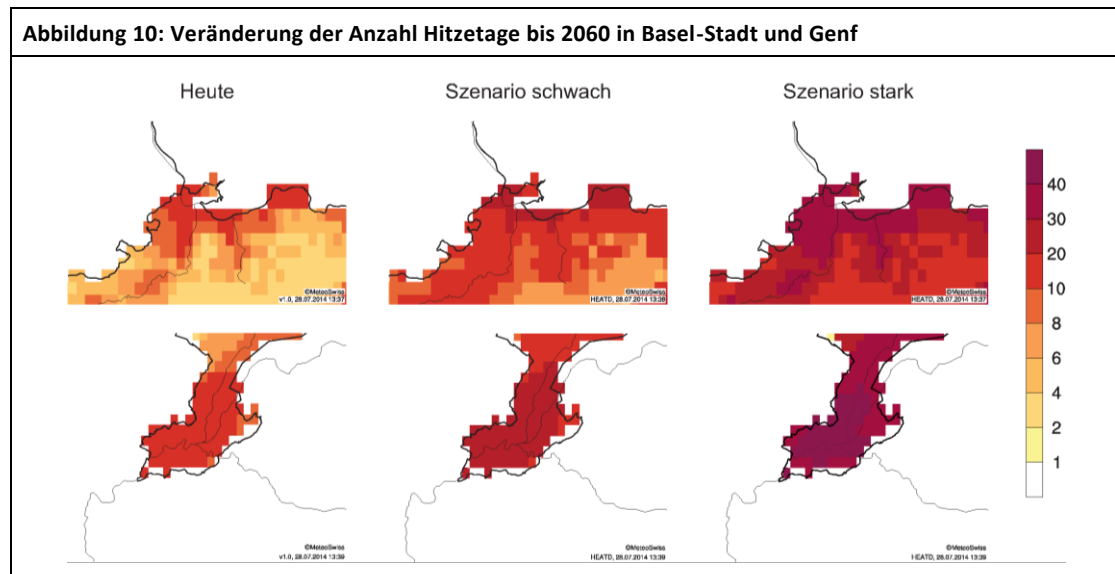


Anzahl Hitzetage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Die räumliche Verteilung der Anzahl Hitzetage ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts *heute* und 2060 wird in Abbildung 10 illustriert. Die Veränderung fällt mit Einbezug der thermischen Überhitzung noch deutlicher aus.

<sup>3</sup> Hitzetage: Tage mit Maximaltemperatur  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ .

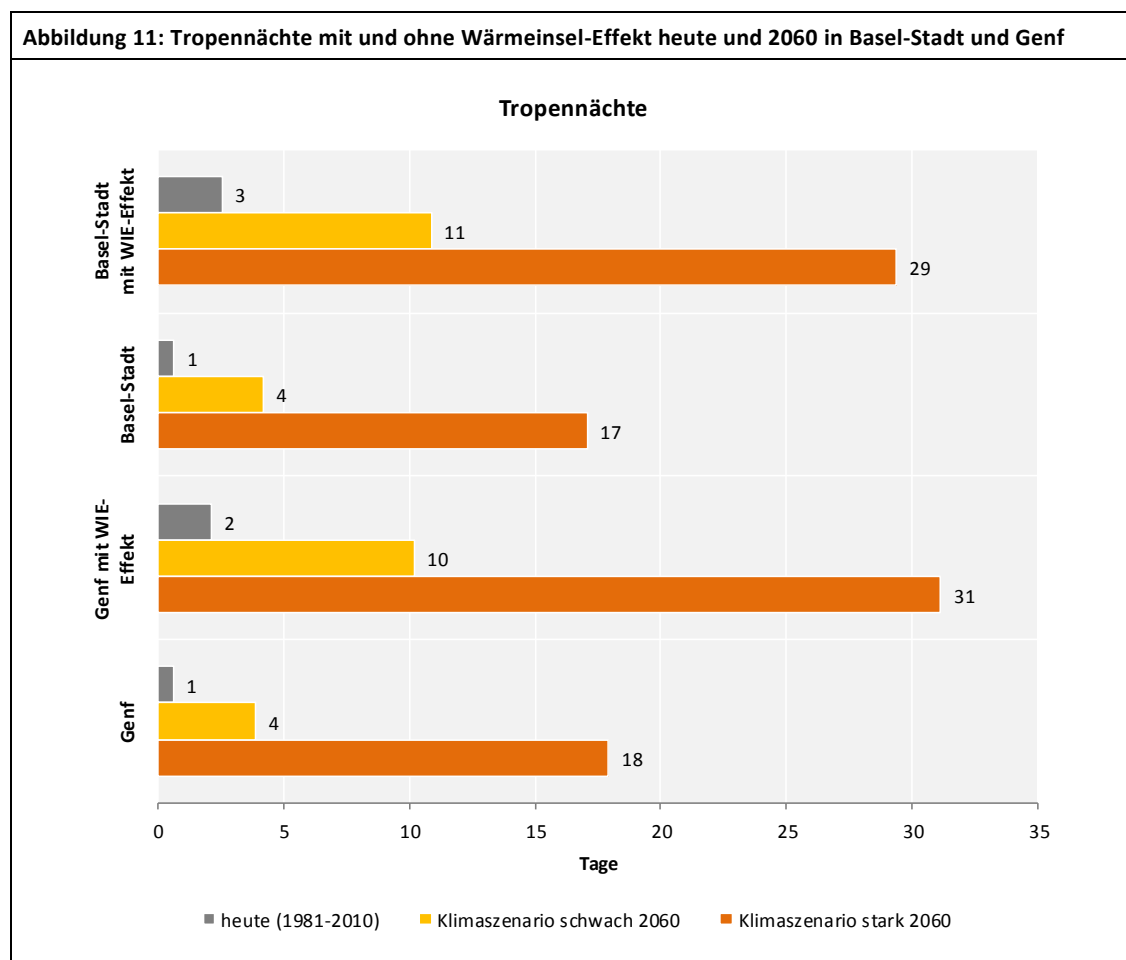




Veränderung der Anzahl Hitzetage in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts. Illustriert ist der Zustand *heute* (links), der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* (Mitte) und der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios stark* (rechts). Quelle: MeteoSchweiz (2014d).

### 5.3. Tropennächte

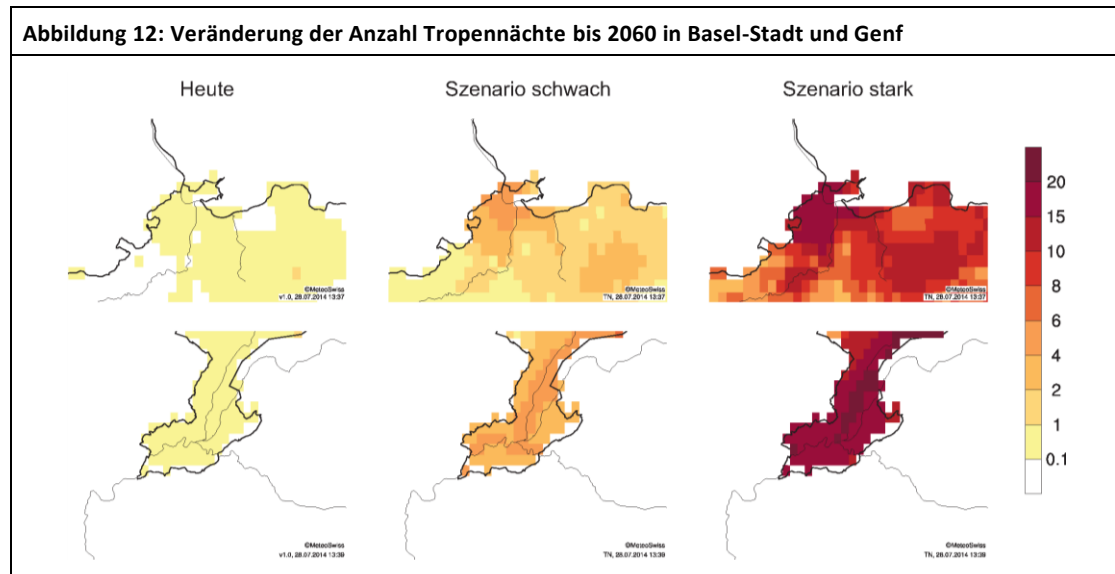
Abbildung 11 veranschaulicht den deutlichen Unterschied der Veränderung bis 2060 mit und ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts der Anzahl Tropennächte<sup>4</sup>. Bis ins Jahr 2060 sind mit Wärmeinsel-Effekt nahezu doppelt so viele Tropennächte zu erwarten, wie ohne den Wärmeinsel-Effekt. Der Unterschied Innenstadt und Agglomeration/Land wird demnach bis 2060 deutlich ausfallen.



Anzahl Tropennächte mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau), und 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

<sup>4</sup> Tropennächte: Tage mit Minimaltemperatur  $\geq 20^{\circ}\text{C}$

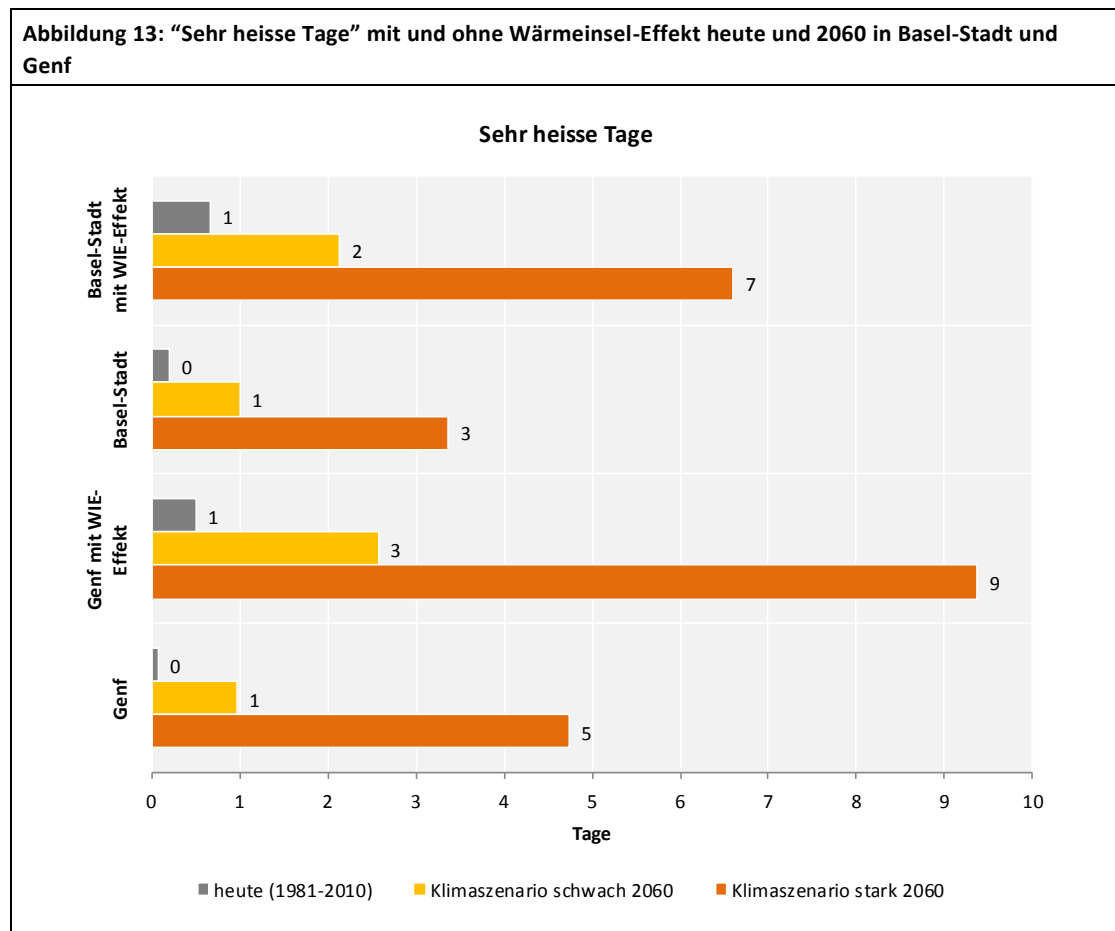
Die räumliche Verteilung der Anzahl Tropennächte ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts *heute* und 2060 wird in Abbildung 12 illustriert. Die Veränderung fällt mit Einbezug der thermischen Überhitzung noch deutlicher aus.



Veränderung der Anzahl Tropennächte in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts. Illustriert ist der Zustand *heute* (links), der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* (Mitte) und der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios stark* (rechts). Quelle: MeteoSchweiz (2014d).

## 5.4. Sehr heisse Tage

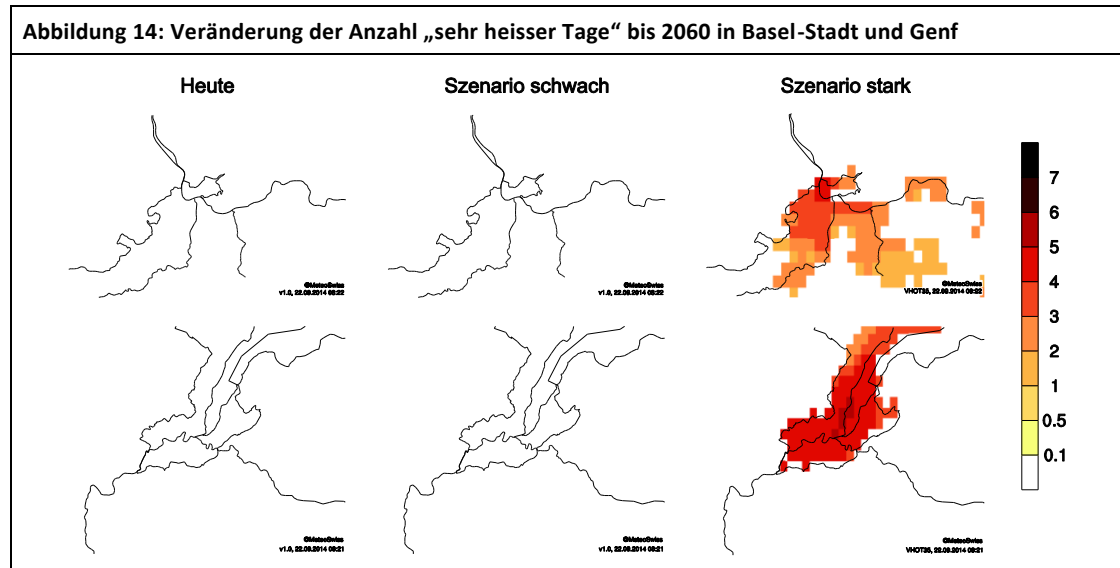
Bei den sehr heissen Tagen<sup>5</sup> zeigen sich sehr deutliche Unterschiede, ob nun der städtische Wärmeinsel-Effekt berücksichtigt wird oder nicht. Das Bild dramatisiert sich deutlich bis 2060 und dürfte für die Bevölkerung der Innenstädte zu deutlichen gesundheitlichen Mehrbelastungen führen.



Anzahl "sehr heisse Tage" mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Die räumliche Verteilung der Anzahl „sehr heisser Tage“ ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts *heute* und 2060 wird in Abbildung 14 illustriert. Die Veränderung fällt mit Einbezug der thermischen Überhitzung noch deutlicher aus.

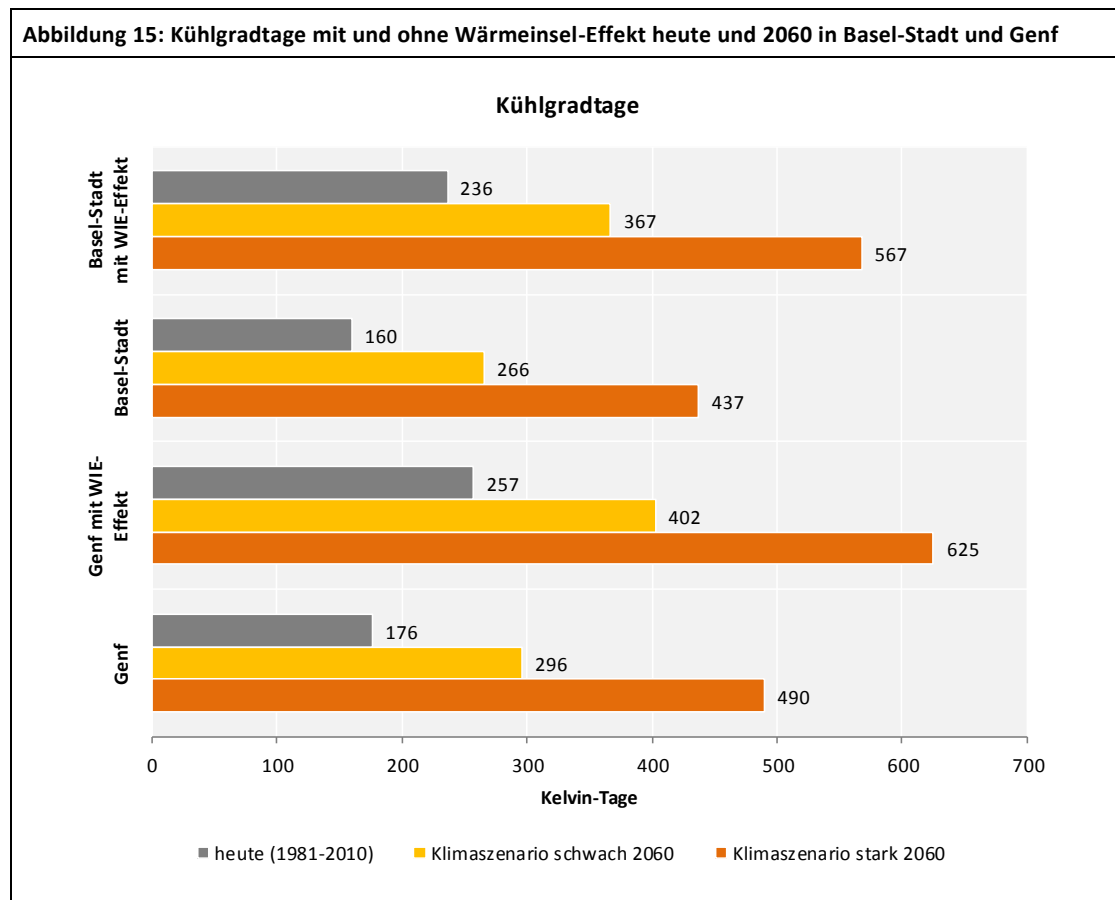
<sup>5</sup> "Sehr heisse Tage": Tage mit Maximaltemperatur >35°C und Minimaltemperatur >20°C.



Veränderung der Anzahl „sehr heisser Tage“ in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts. Illustriert ist der Zustand *heute* (links), der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* (Mitte) und der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios stark* (rechts). Quelle: MeteoSchweiz (2014d).

## 5.5. Kühlgradtage

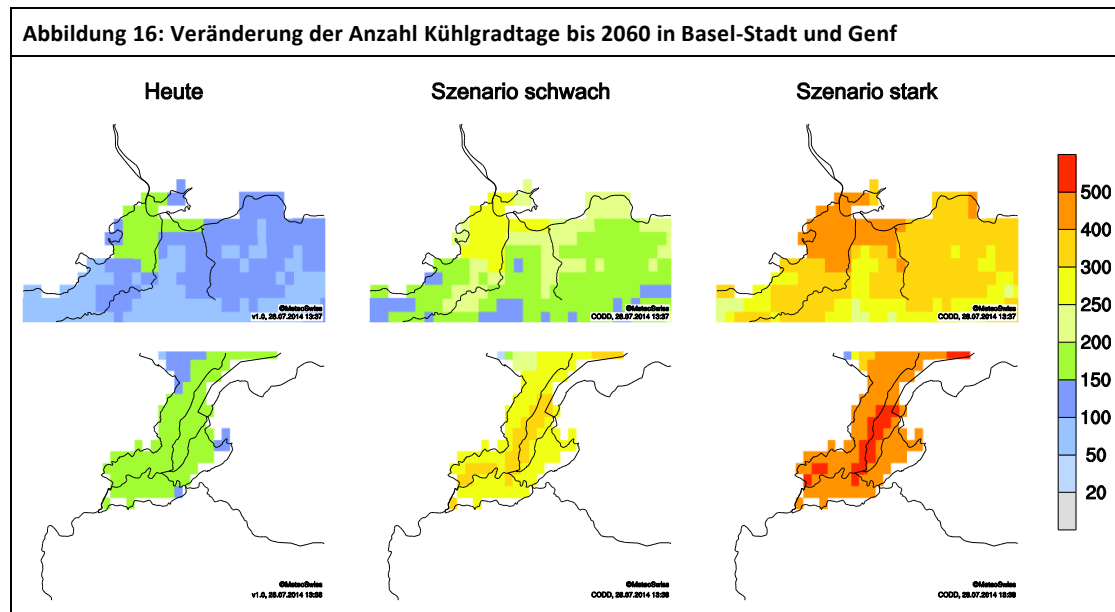
Wie bei den übrigen Indikatoren oben, wird die Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts bis 2060 auch bei der Anzahl Kühlgradtage<sup>6</sup> deutlich sichtbar. Es ist daher in den Innenstädten zukünftig mit höheren Energieverbräuchen in Punkto Kühlung zu rechnen.



Kühlgradtage [Kelvin-Tage] mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Die räumliche Verteilung der Anzahl Kühlgradtage ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts *heute* und 2060 wird in Abbildung 16 illustriert. Die Veränderung fällt mit Einbezug der thermischen Überhitzung noch deutlicher aus.

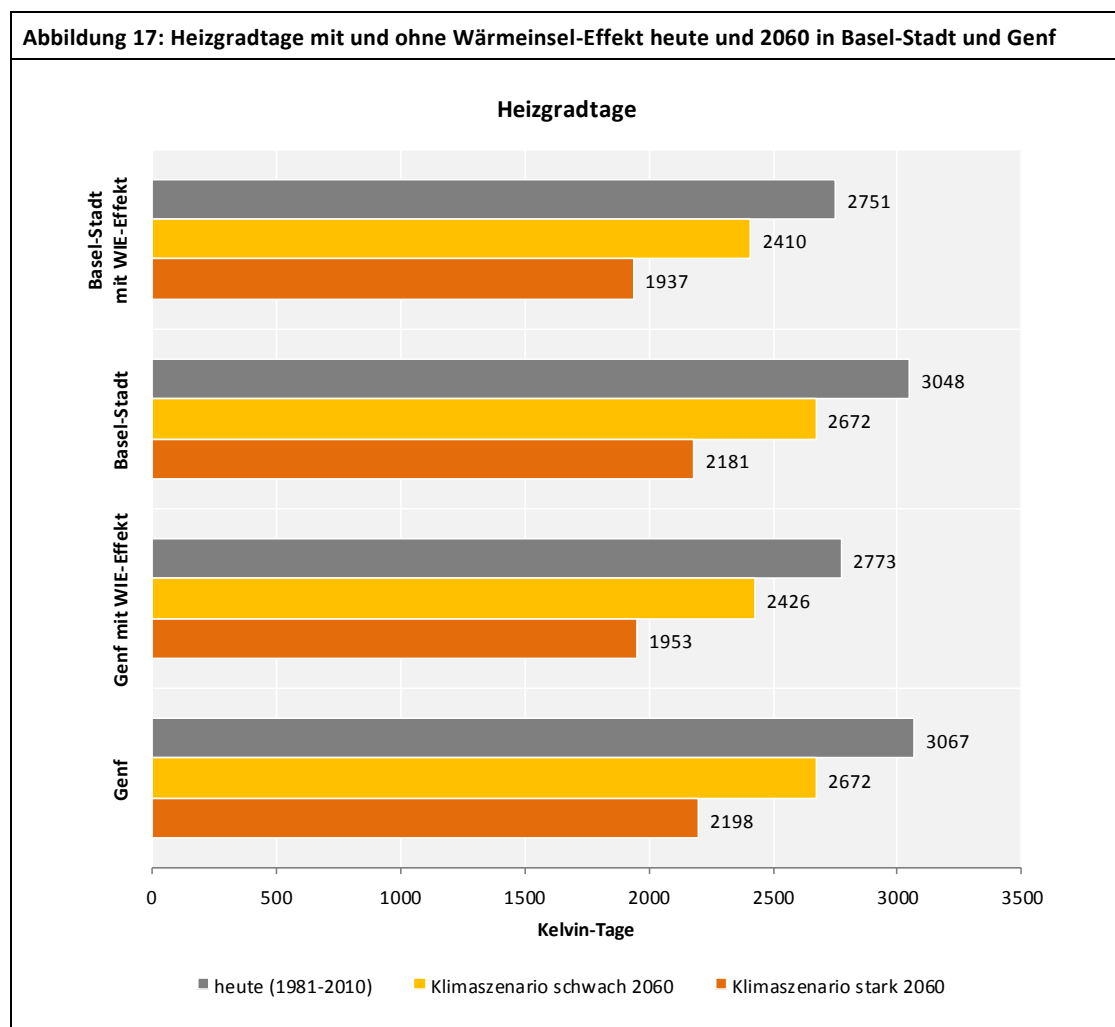
<sup>6</sup> Kühlgradtage: Die Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen einer angestrebten Raumlufttemperatur (18.3°C) und des Tagesmittels der Aussenlufttemperatur 2m über Boden aller Kühlstage [Kelvin-Tage].



Veränderung der Anzahl Kühlgradtage in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) ohne Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts. Illustriert ist der Zustand *heute* (links), der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* (Mitte) und der Zustand um das Jahr 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios stark* (rechts). Quelle: MeteoSchweiz (2014d).

## 5.6. Heizgradtage

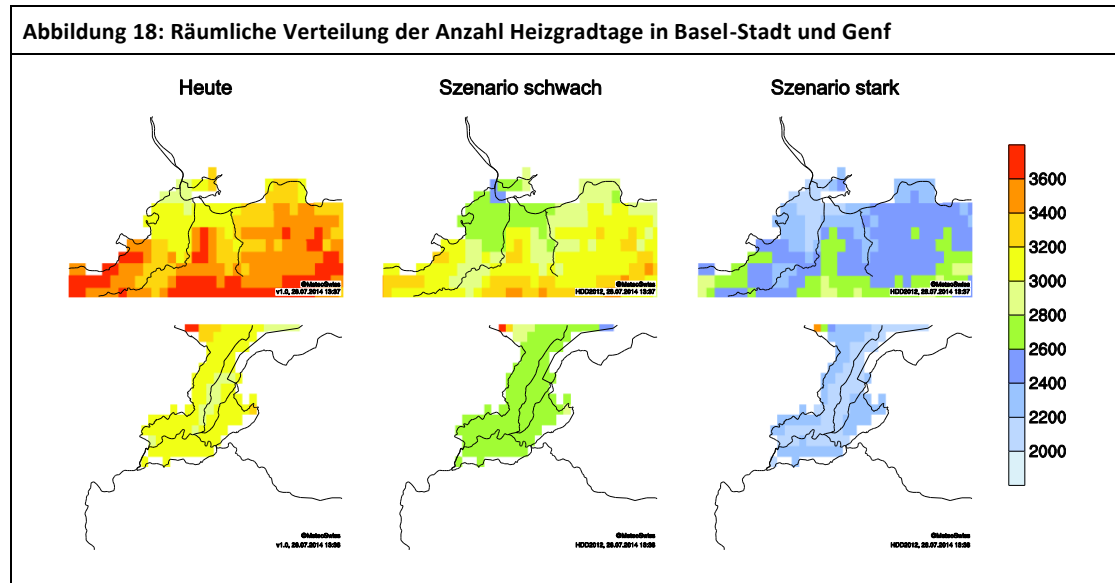
Bei der Anzahl Heizgradtage<sup>7</sup> ist zwar ein Unterschied in Richtung weniger Heizgradtage unter Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts feststellbar. Dieser fällt aber geringer aus als bei den übrigen vorgestellten Indikatoren (oben). Dennoch dürfte die Anzahl Heizgradtage mit Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts auf ein Niveau sinken, dass tiefer liegt als die Werte die heute im Tessin erreicht werden.



Heizgradtage [Kelvin-Tage] mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

<sup>7</sup> Heizgradtage: Die Heizgradtage sind die über eine bestimmte Periode gebildete Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen der Raumlufttemperatur und der Tagesmitteltemperatur der Aussenluft aller Heiztage dieser Periode. Gegenwärtig wird 20 °C als angestrebte Raumlufttemperatur verwendet.





Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Heizgradtage [Kd] in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Der städtische Wärmeineleffekt wurde in den Karten nicht berücksichtigt. Karten von MeteoSchweiz (2014d).

## 6. Interpretation der Klimaindikatoren

Wie die Resultate zu den einzelnen Klimaindikatoren zeigen (Abschnitt 5) hat die Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts einen grossen Einfluss auf die Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen. Für die Risikofallstudien Kanton Basel-Stadt und Kanton Genf sollen die im vorliegenden Inputpapier gefundenen ersten approximativen Abschätzungen zum mittleren Wärmeinsel-Zuschlag daher unbedingt berücksichtigt werden.

Es gilt jedoch ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass bei der Interpretation von Indikatoren besondere Vorsicht geboten ist. Bei Indikatoren die sich mit eher extremeren Phänomenen befassen, welche sich jeweils am oberen oder unteren Ende der Temperatur- oder Niederschlagsskala befinden, wie beispielsweise die Indikatoren "sehr heisse Tage", Hitzetage, Tropennächte, können aufgrund der Verteilung von Frequenz und Temperatur, respektive Niederschlagssummen schon eine geringfügige Änderung der Amplitude zu einer grossen Änderung in der Frequenz führen. Gemeint ist damit, dass extreme Ereignisse sehr selten vorkommen und je näher man an diese extremen Ereignisse heranrückt, indem beispielsweise die Temperatur immer mehr ansteigt, desto grösser sind die Auswirkungen auf die Frequenz, was bedeutet, dass bei einigen Indikatoren bereits eine geringe Zunahme der Mitteltemperatur eine grosse Auswirkung auf deren prognostiziertes Eintreten hat.

Die verschiedenen Indikatoren reagieren daher sehr sensitiv auf bereits geringfügige Änderungen des Wärmeinsel-Zuschlags. Die gemachten Abschätzungen verstehen sich dabei als „best estimates“ und sollten in Zukunft unbedingt weiterentwickelt und verbessert werden. So könnte zum Beispiel auf effektive Messwerte zurückgegriffen werden, damit die Variabilität, sowie die Abschätzungen der mittleren Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperaturen besser erfasst und beurteilt werden können. Ein weiterer Schritt wäre die detaillierte Modellierung des Wärmeinsel-Effektes in einem lokalen Oberflächenmodell.

## 7. Verwendung der Resultate

Die aufgrund der gewählten Methodik erarbeiteten Resultate und Erkenntnisse dienen in erster Linie als Grundlage für die eigentliche Klimarisikoanalyse für den Kanton Basel-Stadt als integraler Bestandteil der schweizweiten Analysen der klimabedingten Risiken und Chancen um das Jahr 2060 (siehe INFRAS/Egli Engineering 2015). Aufgrund der vorliegenden modellierten Klimaindikatoren konnte aufgezeigt werden, dass die zu erwartenden Veränderungen bis ins Jahr 2060 zum Teil deutlich von den mittleren Werten wie sie im Rahmen von regionalen Klimamodellierungen in der Schweiz gefunden wurden (e.g. CH2011 2011, Zubler et al. 2014a und 2014b) abweichen. Die entsprechende Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts für eine realistische Abschätzung der klimabedingten Risiken und Chancen bildet daher ein zentraler Bestandteil und sollte bei städtischen Klimaanalysen zwingend miteinbezogen werden.

Die Resultate legen zudem nahe, dass aus planerischer Sicht vermehrt Anstrengungen unternommen werden sollten, um die Effekte rund um den städtischen Wärmeinsel-Effekt möglichst abschwächen zu können. Detailliertere Analysen zu möglichen zu erwartenden Kosten oder zusätzlichen Erträgen bis ins Jahre 2060 können der Hauptstudie entnommen werden (INFRAS/Egli Engineering 2015). Die vom Bundesamt für Raumentwicklung veröffentlichte Arbeitshilfe für Planerinnen und Planer bietet hierzu eine Vielzahl von möglichen Anpassungsmassnahmen (ARE 2013). Jeder der aufgeführten Anpassungsmassnahmen würde in die gewünschte Richtung zielen. Gezieltere Empfehlungen können im Rahmen des vorliegenden Inputpapers nicht abgegeben werden.

## Literatur

- ARE 2013:** Klimawandel und Raumentwicklung: Eine Arbeitshilfe für Planerinnen und Planer. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).
- BAFU 2013:** Risiken und Chancen des Klimawandels in der Schweiz – Methodenbericht. EBP/WSL/SLF im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt – BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2013
- BAFU 2012:** Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder, Erster Teil der Strategie des Bundesrates, Bundesamt für Umwelt, 2012
- Bergert, M., Schlegel, T., Kirchhofer, W. 2005:** Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology* (25): 65-80
- CH2014-Impacts 2014:** Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136pp
- CH2011 2011:** Swiss Climate Change Szenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88p, 2011
- Chrysanthou, A., van de Schrier, G., van de Besselaar, E.J.M., Klein Tank, A.M.G., Brandsma, T. 2014:** The effect of urbanization on the rise of the European temperature since 1960. Supporting material for the research letter in *Geophysical Research Letters*, 41:7716-7722
- Diogo, V., Koomen, E. 2014:** Simulating future changes in the urban heat island effect based on an integration of socio-economic and climate scenarios. SPINlab/Department of Spatial Economics VU University Amsterdam. Circle2 Adaptation Frontiers, Conference on European Climate Change Adaptation – Research and Practice, 2014.
- econcept 2013:** Klimawandel im Grossraum Zürich – Auswirkungen und Anpassungsmassnahmen, wissenschaftliche Grundlagen – Schlussbericht, Wissenschaftsforum ZKB, econcept, Zürich 2013
- Frei, C. 2013:** Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and non-euclidean distances. *International Journal of Climatology*: [doi:10.1002/joc.3786](https://doi.org/10.1002/joc.3786)
- INFRAS 2014:** Zeitreihe des additiven Wärmeinsel-Zuschlags für die Fallstudie Basel-Stadt und Genf. INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt – BAFU, 2014.
- INFRAS/Egli Engineering 2015:** Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in der Schweiz – Regionale Fallstudie Kanton Basel-Stadt. INFRAS und Egli Engineering AG im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- IPCC 2013:** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J.

Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

**Kalnay, E., Cai, M. 2003:** Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, Vol. 423:528-531

**Kanton Basel-Stadt 2011:** Bericht über die Folgen des Klimawandels im Kanton Basel-Stadt – Handlungsmöglichkeiten und Handlungsbedarf aufgrund der Klimaänderung in Basel-Stadt

**KLAZ 2011:** Klimaanalyse Stadt Zürich (KLAZ) 2011 – Ergebnisbericht Grundlagenarbeiten und Massnahmenvorschläge aus stadtklimatischer Sicht, Stadt Zürich, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ, Zürich 2011

**MeteoSchweiz 2013:** Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht, Fachbericht MeteoSchweiz, 243, 36pp, 2013

**MeteoSchweiz 2014d:** Lieferung spezifischer Daten zur Temperatur, Niederschlag und verschiedener Klimaindikatoren für Klimaszenarien 2060 – Kanton Basel-Stadt und Genf, unpubliziert. Diverse E-Mails von Elias Zubler (MeteoSchweiz) an Mario Betschart (INFRAS), 2014

**Oke, T.R. 1987:** Boundary layer climates, 2<sup>nd</sup> edition, London 1987

**Oke, T.R. 1973:** City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* (1967), volume 7, Issue 8, August 1973: 769-779, 1973

**Parlow, E., Vogt, R., Feigenwinter, C. 2014:** The urban heat island of Basel – seen from different perspectives, *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin* Vol. 144, No 3: 105-119, 2014

**Parlow, E. 2011a:** Besonderheiten des Stadtklimas, in Gebhard, H., Glaser, R., Radtke, U., Reuber, P. 2011: *Geographie*, 2. Auflage, Springer Heidelberg: 287-294, 2011

**Parlow, E. 2011b:** Urban Climate in Niemelä et al. 2011 - Urban ecology – Patterns, Processes, and Applications, Oxford University Press: 31-44, New York 2011

**Parlow, E. 1996:** The regional climate project REKLIP – an overview, *Theoretical and Applied Climatology* 53 (1-3):3-7, 1996

**Rotach et al. 2005:** BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project, *Theoretical and Applied Climatology* 81: 231-261, 2005

**Schwarz, N., Lautenbach, S., Seppelt, R. 2011:** Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures, *Remote Sensing of Environment* 115: 3175-3186, 2011

**Torok, S.J., Morris, C.J.G., Skinner, C., Plummer, N. 2000:** Urban heat island features of south-east Australian towns, *Australian Meteorological Magazine* 50 (1): 1-13, 2000

**Vogt, R., Parlow, E. 2011:** Regio Basiliensis – Die städtische Wärmeinsel von Basel – tages- und jahreszeitliche Charakterisierung. *Regio Basiliensis* 52/1: 7-15, 2011

- Zhao, L., Lee, X., Smith, R.B., Oleson, K. 2014:** Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, Vol. 511:216-219
- Zhou, B., Rybski, D., Kropp, J.P. 2013:** On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical research letters*, vol. 40:5486-5491
- Zhou, L.M. et al. 2004:** Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol.101:9540-9544
- Zubler et al. 2014a:** Localized climate change scenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland, *Climatic Change*, 2014
- Zubler et al. 2014b:** Key climate indices in Switzerland – expected changes in future climate, *Climatic Change*, 2014