

# Analyse des urbanen Wärmeinseleffektes in Krefeld, Deutschland

Sommer 2023



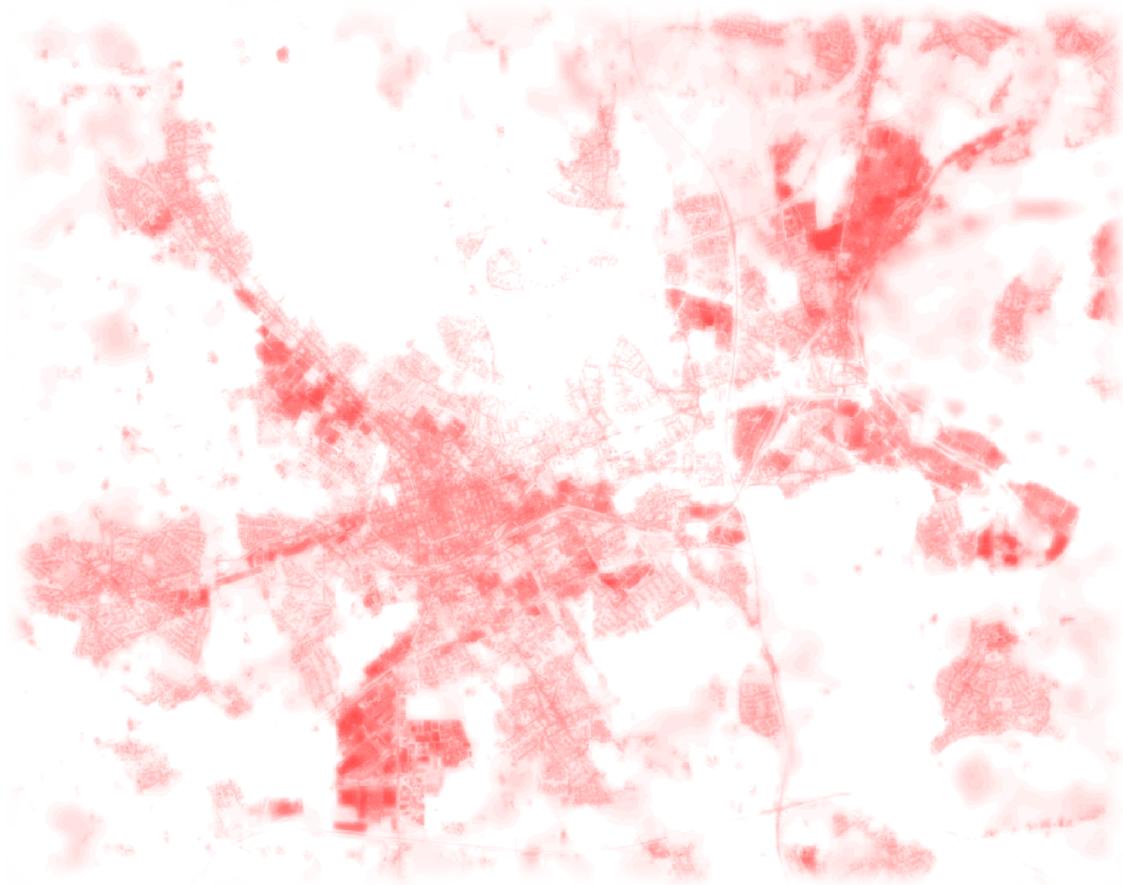
**Auftraggeber:**

Krefeld Business  
Neue Linner Straße 87  
47798 Krefeld



**Auftragnehmer:**

meteoblue AG  
Greifengasse 38  
4058 Basel



## Inhaltsverzeichnis

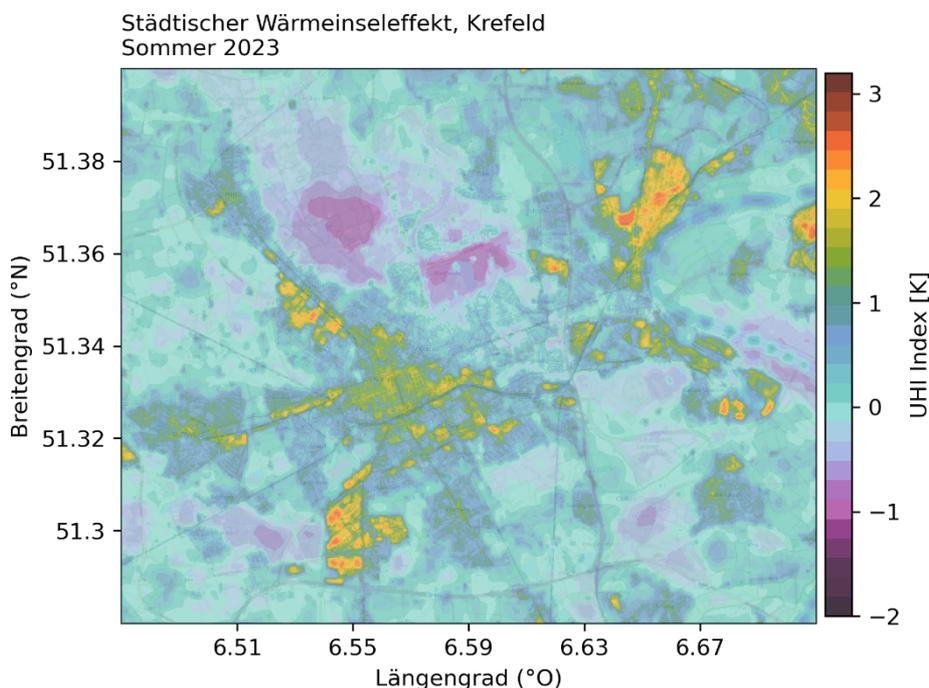
|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>0 Kurzfassung</b> .....                             | <b>3</b>  |
| <b>1 Wissenschaftlicher Hintergrund</b> .....          | <b>4</b>  |
| <b>2 Lokale Klimazonen</b> .....                       | <b>5</b>  |
| 2.1 Einleitung.....                                    | 5         |
| 2.2 Lokale Klimazonen in Krefeld.....                  | 8         |
| <b>3 Meteorologische Messungen in Krefeld</b> .....    | <b>9</b>  |
| 3.1 Qualitätssicherung .....                           | 9         |
| <b>4 Städtischer Wärmeinseleffekt in Krefeld</b> ..... | <b>12</b> |
| 4.1 Einleitung.....                                    | 12        |
| 4.2 Datenmanipulation .....                            | 12        |
| 4.2.1 Modellspezifikationen.....                       | 14        |
| 4.3 «Wärmekarte» von Krefeld.....                      | 14        |
| 4.3.1 Tag- vs. Nachtbedingungen .....                  | 15        |
| 4.3.2 UHI in Abhängigkeit von LCZs.....                | 15        |
| <b>5 Verifikation</b> .....                            | <b>17</b> |
| <b>6 Über meteoblue</b> .....                          | <b>18</b> |
| <b>7 Publikationen</b> .....                           | <b>19</b> |

## 0 Kurzfassung

In dieser Analyse wurde der urbane Wärmeinseleffekt (UHI = «urban heat island» (engl.)) in Krefeld, Schweiz anhand des meteoblue Stadtklima-Modells (mCCM = «meteoblue City-Climate model» (engl.)) berechnet. Dieses wird durch lokale Lufttemperaturmessungen und Parametern aus Satelliten- und Reanalyse-Modelldaten angetrieben.

Folgendes lässt sich anhand der durchgeführten Analyse für die Stadt Krefeld zusammenfassen:

1. Lufttemperaturmessungen an 32 Standorten und das mCCM wurden genutzt, um den urbanen Wärmeinseleffekt in Krefeld im Sommer 2023 zu modellieren.
2. Der urbane Wärmeinseleffekt ist (im Vergleich mit anderen Städten) während des Sommers schwach bis mittel einzuschätzen. Die Industriegebiete in Fischeln und Uerdingen, sowie Zentren und Industriegebiete der Vororte Inrath und Gellep-Stratum sind im Mittel etwa 2.5 – 3 °C wärmer als umliegende ländliche Gebiete. Das Zentrum Krefeld ist im Vergleich nur leicht erhöht. Die kühlest Gebiete sind der Stadtwald, der Forstwald und der Hülser Berg.
3. LCZ D (Niedrige Bepflanzung) und LCZ A (dichte Bäume) sind die dominierenden natürlichen lokalen Klimazonen in Krefeld, wobei die Klimazonen LCZ 5 (offene, mittelhohe Bebauung) und LCZ 6 (offene, niedrige Bebauung) die dominierenden künstlichen Flächen sind.
4. Die höchsten Lufttemperaturen wurden mit dem mCCM für die LCZ 2 (kompakte, mittelhohe Bebauung), LCZ 8 (grossflächige, niedrige Bebauung) und LCZ E (versiegelte Flächen) berechnet. Die niedrigsten Lufttemperaturen werden für die LCZ 6 (offene, niedrige Bebauung), LCZ A (dichte Bäume) und LCZ D (niedrige Pflanzen) berechnet.
5. Während der Zeitperiode vom 01.06.2023 bis 31.08.2023 beträgt der mittlere, absolute Fehler (MAE) des mCCM 0.82 K.



**Abbildung 0.1:** «Wärmekarte» von Krefeld und den umliegenden ländlichen Gebieten für den Sommer 2023.

## 1 Wissenschaftlicher Hintergrund

---

Heute lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten, und dieser Anteil wird voraussichtlich in naher Zukunft weiter zunehmen (Grimm et al., 2008). Hitzewellen führen weltweit zu Todesfällen und enormen wirtschaftlichen und ökologischen Schäden, insbesondere in städtischen Gebieten, wo die Lufttemperaturen typischerweise höher sind als in ländlichen Gebieten. In vielen Teilen der Welt führen Hitzewellen zu mehr Todesopfern als jede andere Naturgefahr (Changnon, 2003).

Städtische Regionen verzeichnen im Vergleich zu ihrer natürlichen Umgebung höhere Lufttemperaturen, was hauptsächlich auf Veränderungen im Energiehaushalt der Oberfläche aufgrund der erhöhten Wärmespeicherkapazität künstlicher Oberflächen zurückzuführen ist (Oke, 1982). Weitere Beiträge zur atmosphärischen Erwärmung in städtischen Gebieten sind die Verringerung der Verdunstungskühlung, Unterschiede in den konvektiven und advektiven Strömungen und die erhöhte anthropogene Wärmefreisetzung in Städten.

Städtische Gebiete haben in der Regel eine geringere Albedo als ländliche Gebiete. Gebäude und Strassen interagieren mit der Sonne so, dass die Sonnenstrahlung von Gebäuden und Strassen mehrfach reflektiert wird, bevor die Sonnenstrahlung in die freie Atmosphäre reflektiert wird. In städtischen Gebieten ist der «Sky View Factor» (SVF) in der Regel geringer als in ländlichen Gebieten, was die thermischen Emissionen reduziert. Daher ist das Seitenverhältnis von Gebäudehöhe und Strassenbreite ein entscheidender Parameter, um das kleinräumige Lufttemperaturfeld in Städten zu erfassen.

Das Phänomen der höheren Lufttemperaturen in städtischen Gebieten wird mit dem städtischen Wärmeinseleffekt (UHI) qualitativ erfasst. Mehr als 400 Städte weltweit sind gut dokumentiert (Basara et al., 2010; Tan et al., 2010; Li und Bou-Zeid, 2013; Founda et al., 2015; Cheval et al., 2009), deren UHI je nach analysierter Stadt und gewählter Methode in den verschiedenen Studien zwischen 1 und 8 K schwankt. In vielen Studien wurde ein maximaler UHI am späten Abend, im Sommer und in Städten mit einer hohen Bevölkerungszahl festgestellt. Viele empirische Formeln berechnen den maximalen UHI auf der Grundlage von z. B. dem Sky-View-Faktor, der Bevölkerung, den Gebäudeeigenschaften, Albedo-Funktionen oder Oberflächen- und Vegetationsindizes.

Chapman et al. (2017) analysierten in einer Übersichtsarbeit, dass der grösste UHI-Effekt bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und geringer Bewölkung auftritt. Varentsov et al. (2018) berechneten das kleinräumige Lufttemperaturfeld für Moskau für 10 Sommersaisons mit dem COSMO-CLM-Modell und fanden UHIs während der Nacht von grösser 3 K. Chow und Roth (2006) erreichten den Spitzenwert der UHI 3 bis 4 Stunden nach Sonnenuntergang und einen sich verstärkenden Effekt für niedrige Windgeschwindigkeiten und Windgeschwindigkeiten und keine Wolkenbedeckung.

In der Literatur wurden viele verschiedene Ansätze genutzt, um UHI-Effekte abzuschätzen:

1. Satellitenbeobachtungen im thermischen Infrarotbereich (Parlow et al., 2014)
2. In-situ Messungen von Lufttemperaturen in ländlichen und städtischen Regionen (Meier et al., 2017)
3. Kleinräumige Modellansätze, z.B. mit COSMO-CLM (Varentsov et al., 2018)

Der meteoblue-Ansatz kombiniert in-situ Messungen mit Satellitenbeobachtungen und kleinräumigen Modellansätzen, um eine hohe Genauigkeit bei der Abschätzung des UHI-Effektes zu erreichen.

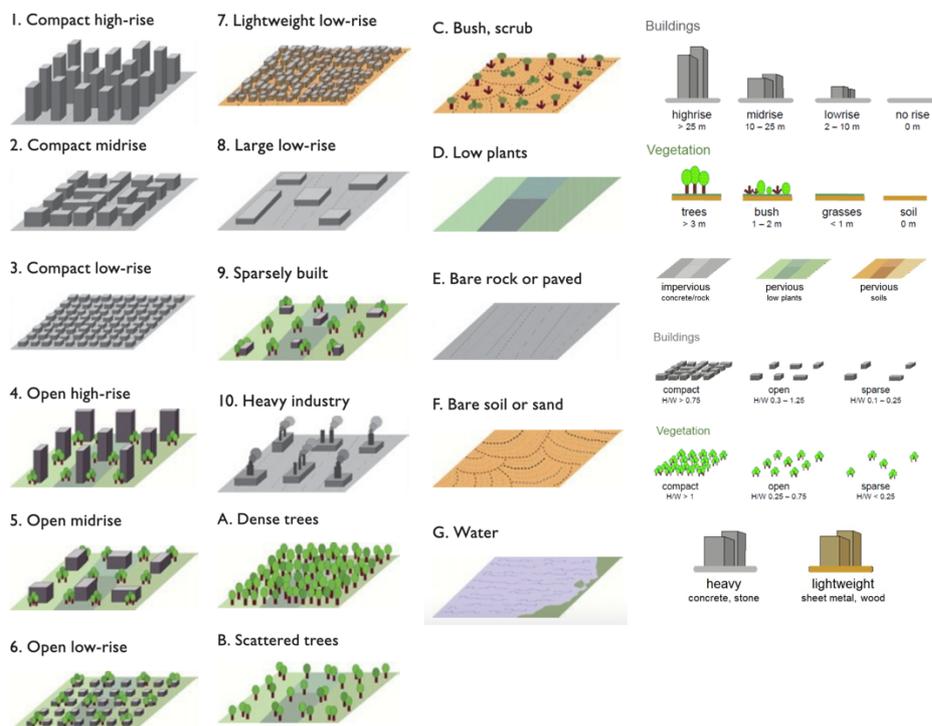
Kapitel 2 befasst sich mit den lokalen Klimazonen in Krefeld, Kapitel 3 mit den meteorologischen Messungen in Krefeld. In Kapitel 4 werden die städtischen Wärmeinseln mit dem mCCM berechnet, für Tag/Nacht-Bedingungen analysiert und gegen die lokalen Klimazonen aufgetragen. Unter Kapitel 5 wird eine kurze, lokale Validierung des mCCM auf der Grundlage der in-situ Messungen vorgenommen. In Kapitel 6 und 7 folgen allgemeine Informationen über meteoblue und eine Liste von Veröffentlichungen.

## 2 Lokale Klimazonen

### 2.1 Einleitung

Lokale Klimazonen (LCZ) klassifizieren Oberflächentypen, die durch das lokale Klima unterschiedlich beeinflusst werden. 10 verschiedene LCZ-Klassen (LCZ 1 – 10) beschreiben bebaute Gebiete in Bezug auf Gebäudetypen und räumliche Anordnung, Materialien, menschliche Aktivitäten, Pflanzen, Eigenschaften der Bodenoberfläche usw. 7 weitere Klassen (LCZ A – G) beschreiben die Oberflächenbedeckung in Form von Pflanzenbewuchs und Bodenbeschaffenheit. Diese Art der Definitionen von LCZ wurden von Stewart und Oke (2012) eingeführt.

Lokale Klimazonen (Stewart und Oke, 2012) helfen, die Auswirkungen städtischer Wärmeinseln besser zu verstehen, da kleinräumige Stadtklimamodelle auf einer objektbasierten Analyse beruhen. Die verschiedenen Objekte in einer Stadt werden durch die LCZ-Klassifizierung geschätzt. LCZ-Kartierungen tragen weitgehend dazu bei, a) optimale Messstandorte zu finden, b) Standorte zu klassifizieren, c) hochauflösenden Modellen zu verbessern und d) die Übertragung von Modellergebnissen von einer Stadt auf eine andere zu erleichtern.

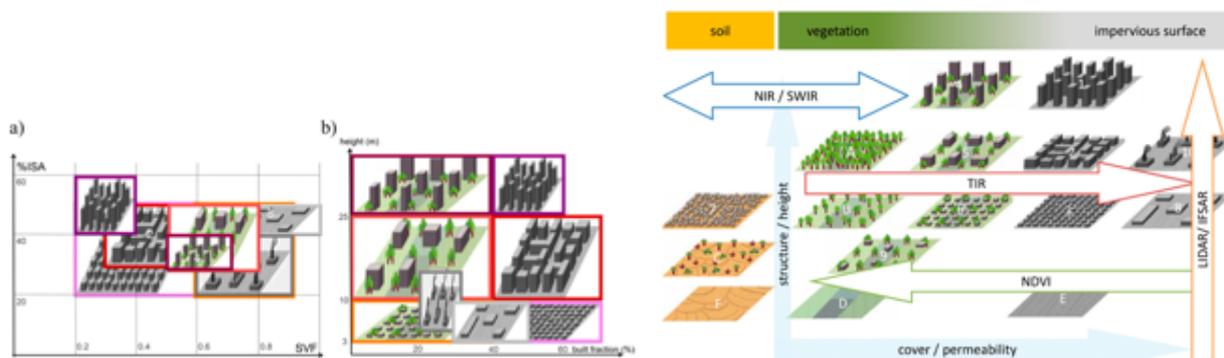


**Abbildung 2.1:** LCZ-Klassifizierung: Oberflächenelemente (LCZ 1 – 10) in Kombination mit Oberflächenbedeckung (LCZ A – G) und die vier verschiedenen Komponenten, welche die LCZs charakterisieren.

LCZs hängen von vier verschiedenen Komponenten ab:

1. Höhe der Rauigkeitselemente
2. Kompaktheit der Rauigkeitselemente
3. Oberflächenbedeckung um die Rauigkeitselemente
4. Wärmeleitfähigkeit des Materials

Zudem können LCZs anhand des Sky View Factors (SVF), Anteil der verdichteten Flächen (ISA), Höhe der Gebäude und Anteil der Gebäude charakterisiert werden.



**Abbildung 2.2:** LCZ-Klassifikation in Abhängigkeit von SVF, ISA, Höhe und Gebäudeanteil (links) und in Abhängigkeit des NDVI, TIR, NIR/SWIR, LIDAR/IFSAR (rechts).

Die LCZs werden im Folgenden detaillierter beschrieben:

### LCZ 1: Kompakte, hohe Bebauung:

LCZ 1 ist gekennzeichnet durch eine dichte Mischung von hohen Gebäuden (mehr als 10 Stockwerke) aus Beton, Stahl, Stein und Glasbaustoffen. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation und die Oberfläche ist grösstenteils gepflastert.

### LCZ 2: Kompakte, mittelhohe Bebauung:

LCZ 2 ist durch eine dichte Mischung von Gebäuden mittlerer Höhe (3-9 Stockwerke) aus Beton, Stahl, Stein und Glas gekennzeichnet. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation und die Oberfläche ist grösstenteils gepflastert.

### LCZ 3: Kompakte, niedrige Bebauung:

LCZ 3 ist durch eine dichte Mischung von Gebäuden niedriger Höhe (1-3 Stockwerke) aus Beton, Stahl, Stein und Glas gekennzeichnet. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation und die Oberfläche ist grösstenteils gepflastert.

### LCZ 4: Offene, hohe Bebauung:

LCZ 4 charakterisiert sich durch eine offene Anordnung von hohen Gebäuden (mehr als 10 Stockwerke) mit Beton, Stahl-, Stein- und Glasbaustoffen. Niedrige Pflanzen und vereinzelte Bäume schaffen eine durchlässige Bodenbedeckung.

### LCZ 5: Offene, mittelhohe Bebauung:

LCZ 5 charakterisiert sich durch eine offene Anordnung mittelhoher Gebäude (3-9 Stockwerke) mit Beton, Stahl-, Stein- und Glasbaustoffen. Niedrige Pflanzen und vereinzelte Bäume schaffen eine durchlässige Bodenbedeckung.

### LCZ 6: Offene, niedrige Bebauung:

LCZ 6 charakterisiert sich durch eine offene Anordnung niedriger Gebäude (1-3 Stockwerke) mit Beton, Stahl-, Stein- und Glasbaustoffen. Niedrige Pflanzen und vereinzelte Bäume schaffen eine durchlässige Bodenbedeckung.

### LCZ 7: Leichte, niedrige Bebauung:

LCZ 7 zeichnet sich durch eine dichte Mischung aus eingeschossigen Gebäuden mit leichten Baumaterialien wie Holz, Stroh und Wellblech. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation, und die Oberfläche ist meist hart geteert.

**LCZ 8: Grosse, niedrige Bebauung:**

LCZ 8 ist durch eine offene Anordnung von grossen Flachbauten (1-3 Stockwerke) aus Beton, Stahl-, Stein- und Metallkonstruktionen gekennzeichnet. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation und die Oberfläche ist meist gepflastert.

**LCZ 9: Spärliche Bebauung:**

LCZ 9 ist durch eine spärliche Anordnung von kleinen oder mittelgrossen Gebäuden in einer natürlichen Umgebung gekennzeichnet. Niedrige Pflanzen und vereinzelt Bäume schaffen eine durchlässige Bodenbedeckung.

**LCZ 10: Schwerindustrie:**

LCZ 10 ist gekennzeichnet durch niedrige und mittlere Industriebauten wie Türme, Tanks und Schornsteine aus Metall-, Stahl- und Betonkonstruktionen. Es gibt wenig oder gar keine Vegetation und die Oberfläche ist meist gepflastert oder verdichtet.

**LCZ A: Dichte Bäume:**

Die LCZ A ist durch laubabwerfende und/oder immergrüne Bäume gekennzeichnet. Es handelt sich um eine stark bewaldete Landschaft und die Bodenbedeckung ist meist durchlässig. Die Zone fungiert als Naturwald, Baumzucht oder Stadtpark.

**LCZ B: Vereinzelt Bäume:**

Die LCZ B ist durch laubabwerfende und/oder immergrüne Bäume gekennzeichnet. Es handelt sich um eine leicht bewaldete Landschaft und die Bodenbedeckung ist meist durchlässig. Die Zone fungiert als Naturwald, Baumzucht oder Stadtpark.

**LCZ C: Büsche, Sträucher:**

LCZ C ist durch eine offene Anordnung von Büschen, Sträuchern und kurzen, holzigen Bäumen gekennzeichnet. Die Bodenbedeckung ist meist durchlässig und besteht aus nacktem Boden oder Sand. Die Zone funktioniert als natürliches Buschland oder Landwirtschaft.

**LCZ D: Niedrige Bepflanzung:**

Die LCZ D ist durch eine strukturlose Landschaft mit Gras- oder Staudenpflanzen oder Feldfrüchten gekennzeichnet. Es gibt wenig oder keine Bäume. Die Zone funktioniert als natürliches Grünland, Landwirtschaft oder Stadtpark.

**LCZ E: Blanker Fels, Versiegelung:**

Die LCZ E ist durch eine strukturlose Landschaft mit Felsen oder Pflasterung gekennzeichnet. Es gibt wenig oder keine Vegetation. Die Zone fungiert als natürliche Wüste (Fels) oder als städtischer Verkehrsraum.

**LCZ F: Blanker Boden, Sand:**

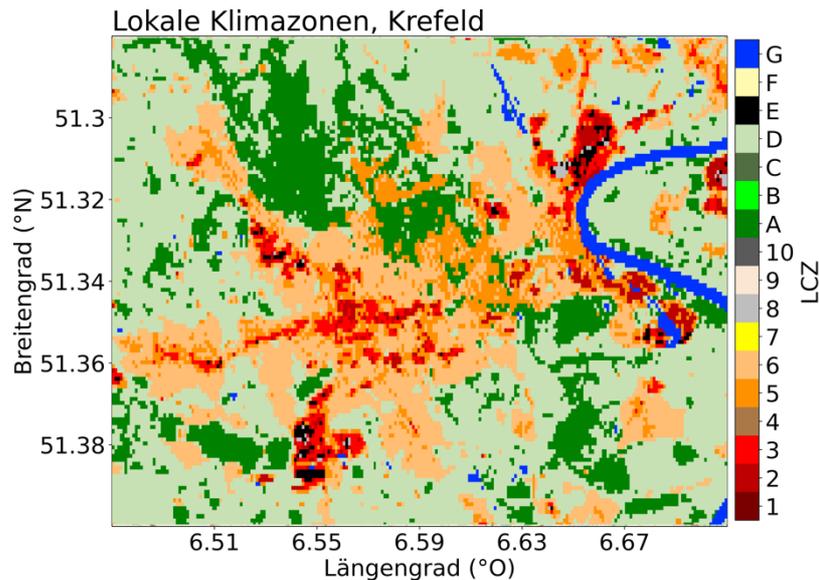
Die LCZ F ist durch eine strukturlose Landschaft mit Boden- oder Sandbedeckung gekennzeichnet. Oft gibt es wenig oder keine Vegetation. Die Zone funktioniert als natürliche Wüste oder Landwirtschaft.

### LCZ G: Wasser:

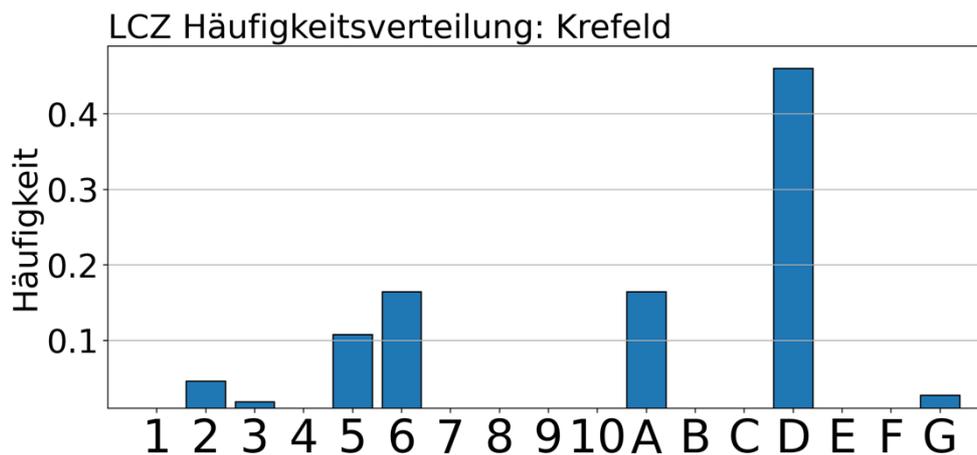
Die LCZ G ist gekennzeichnet durch grosse, offene Gewässer wie Meere und Seen oder kleine Gewässer wie Flüsse, Stauseen und Lagunen.

## 2.2 Lokale Klimazonen in Krefeld

Die lokalen Klimazonen wurden, basierend auf Steward and Oke (2012), mit einer horizontalen Auflösung von 100 x 100 m klassifiziert. Die LCZ-Karte für Krefeld ist in Abbildung 2.3 zu finden, sowie die dazugehörige Verteilung der LCZs für Krefeld in Abbildung 2.4.



**Abbildung 2.3:** LCZ-Karte von Krefeld in einer horizontalen Auflösung von 100 x 100 m, basierend auf Steward and Oke (2012).

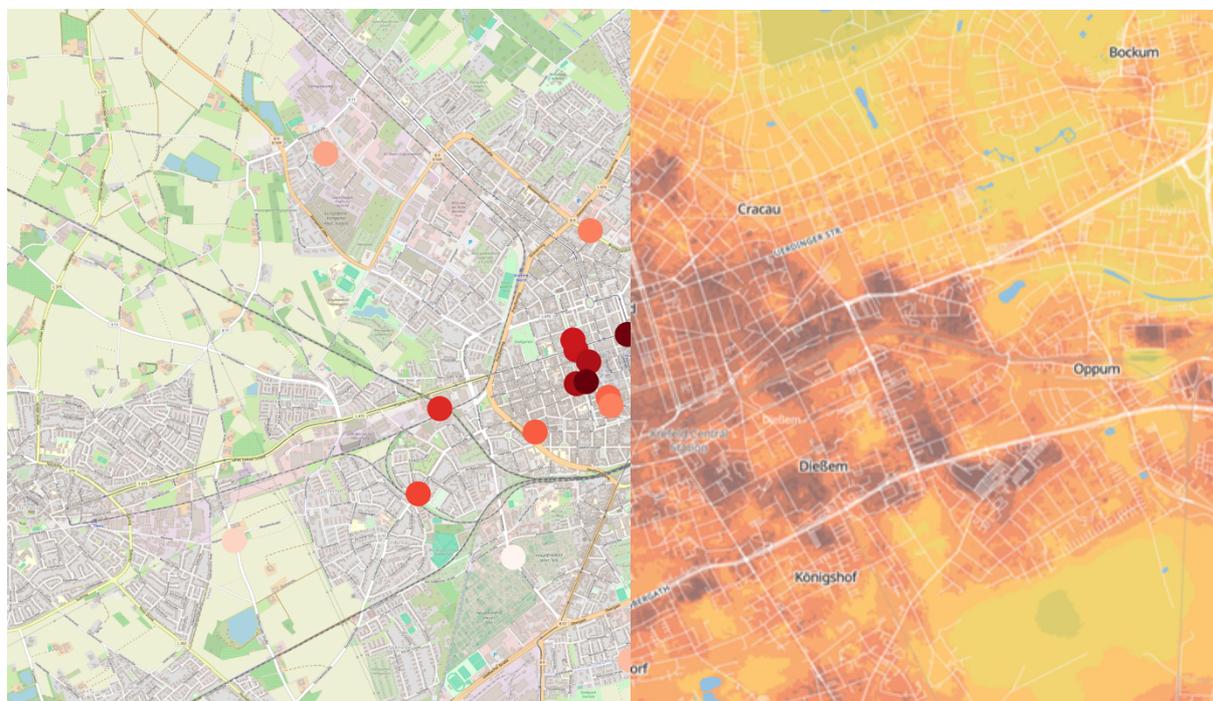


**Abbildung 2.4:** Verteilung der LCZs in Krefeld.

## 3 Meteorologische Messungen in Krefeld

Um das Stadtklima in Krefeld zu messen und die Wirksamkeit von Anpassungsmassnahmen zu testen, wurde im Jahr 2023 in Krefeld ein hochauflösendes LoRaWAN-Messnetz installiert, welches aus 12 Pessl LoRain und 20 Dragino-Sensoren besteht (Stand: 31.08.2023). Diese 32 meteorologische Sensoren decken ein möglichst breites Spektrum der lokalen Klimazonen (LCZ) im Stadtgebiet von Krefeld ab, wobei ein zusätzlicher Referenzstandort eingerichtet wurde und Sensoren an belebten Plätzen, sowie an Orten mit zukünftig geplanten Umbaumassnahmen installiert wurden. (siehe Abb. 3.1). Neben der Lufttemperatur werden auch Niederschlag und relative Luftfeuchte in 15-minütiger zeitlicher Auflösung gemessen. Die Daten werden mit den neuesten IoT-Technologien über das LoRaWAN-Netzwerk der Stadtwerke Krefeld übertragen.

Die Echtzeit-Lufttemperaturmodellierung für das Stadtgebiet Krefeld, basierend auf dem hochauflösenden mCCM, kann von jedem interessierten Nutzer auf der meteoblue Website (<https://www.meteoblue.com/en/products/cityclimate/heatmaps/krefeld>) aufgerufen werden. Die Kartendarstellung erlaubt es, kleinskalige Temperatur- oder Niederschlagsmuster im urbanen Gebiet zu erkennen (siehe Abb. 3.1). Hotspots können dadurch visuell erkannt werden.



**Abbildung 3.1:** Meteorologische Messungen (links) und die daraus resultierende Modellierung (rechts) in der Stadt Krefeld.

### 3.1 Qualitätssicherung

Es sind zahlreiche Messungen nötig, um die kleinskalige Variabilität der Lufttemperatur in einem komplexen urbanen Gebiet zu erfassen. Dennoch können Messungen (vor allem low-cost Sensoren, wie sie in Krefeld verwendet werden) von verschiedenen Fehlerquellen beeinflusst werden. Dafür durchlaufen die Messungen eine Qualitätssicherung, da das Arbeiten mit fehlerhaften Daten zu ungültigen Ergebnissen und falschen Schlüssen führen kann.

#### I) Qualitätskontrolle

Für die Lufttemperaturmessungen in Krefeld wird eine dreistufige Qualitätskontrolle durchgeführt:

##### QC 0 – Screening

Die Daten werden auf Vollständigkeit und Verfügbarkeit geprüft. Beim Screening wurden SI-Einheitskontrollen durchgeführt sowie statische Prüfungen auf Ausreisser und interne Konsistenz durchgeführt.

#### QC 1 – Station QC check

Die zeitliche Konsistenz einer einzelnen Station wird geprüft (e.g. blip-Check und flatliner-Check).

#### QC 2 – Dynamischer QC check

Die dynamische QC-Kontrolle analysiert räumliche Muster pro Zeitschritt. Die räumliche Konsistenz wird überprüft, indem Stationen in einem definierten Radius um die Station zur Kontrolle genutzt werden.

### II) Strahlungskorrektur

Bevor die Strahlungskorrektur genutzt werden kann, müssen QS-Standorte (ZH-Affoltern, ZH-Heubeeribüel, ZH-Schimmelstrasse) eingerichtet werden, die es ermöglichen, die Lufttemperatur parallel zu einer WMO-Station und am selben Standort zu messen. Nur so kann der Strahlungsfehler eines bestimmten Sensors quantifiziert werden und ein Modell zur Strahlungskorrektur trainiert werden.

Die trainierte Strahlungskorrektur berechnet anhand meteorologischer und astronomischer Parameter den mittleren Strahlungsfehler des Messnetzes, welcher aufgrund der äusseren Bedingungen zu erwarten ist.

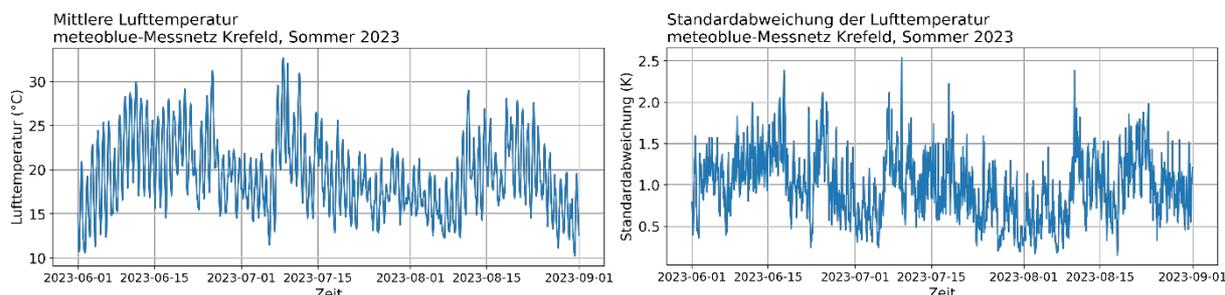
Die Stärke der Strahlungskorrektur der lokalen Lufttemperatur an den einzelnen Standorten wird anhand des lokalen Strahlungsfehlers zum mittleren Strahlungsfehler des gesamten Messnetzes gewichtet, welcher relativ zu einem WMO-Standort berechnet wird.

### III) Datenhomogenisierung

Für die Datenhomogenisierung muss jeweils mindestens ein Sensor der verwendeten Sensorik an einem QS-Standort installiert werden, um Parallelmessungen zu einer verfügbaren WMO-Station zu machen. Die Messung der WMO-Station dient als Referenz, auf dessen «Level» jede Messsensorik korrigiert werden soll, um Vergleichbarkeit unter den einzelnen Sensoren zu schaffen.

Die Datenhomogenisierung wird an einem QS-Standort für jede Sensorik trainiert. Dabei wird ein Korrekturwert modelliert, welcher von meteorologischen Parametern wie Windgeschwindigkeit, Strahlung und Temperatur abhängig ist. Zudem wird zwischen Korrekturfunktionen in der Nacht und am Tag unterschieden, da das Verhalten der Sensorik zu unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten deutlich unterschiedlich sein kann.

Abbildung 3.2 beschreibt die mittlere Lufttemperatur aller 32 Stationen und die Standardabweichung der 32 Stationen pro Zeitschritt.



**Abbildung 3.2:** Zeitserie der mittleren Lufttemperatur (links) und die Standardabweichung (rechts) aller 32 Stationen.

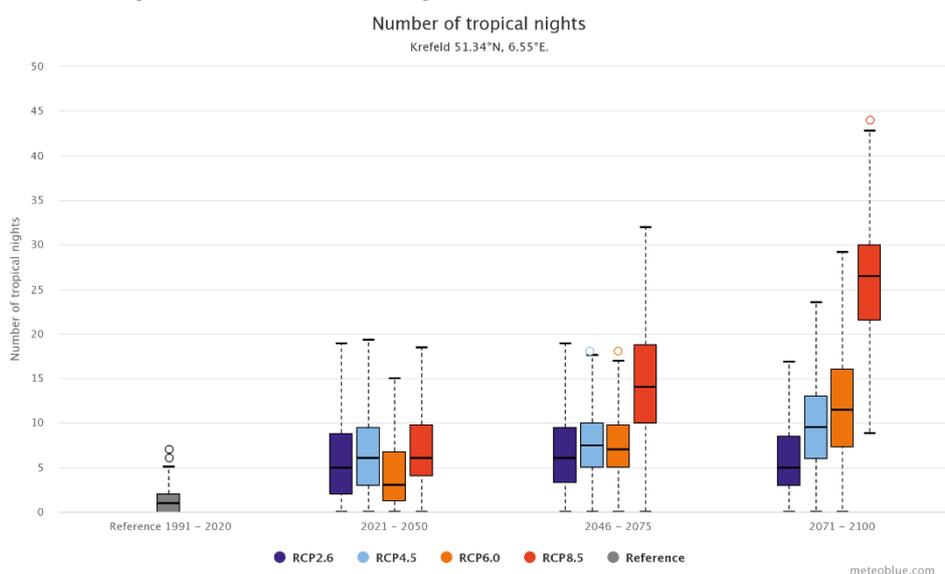
Im Sommer 2023 gab es in Krefeld zwei Hitzewellen mit Lufttemperaturen von über 30 °C, jeweils über einen kurzen Zeitraum. Die erste Hitzewelle trat Ende Juni auf, während die zweite Hitzewelle in der zweiten Juliwoche 2023 auftrat (siehe Abb. 3.2, links). Die Hitzewellen waren meist mit Tropennächten verbunden, das heisst die Lufttemperatur ist nachts nicht unter eine Lufttemperatur von 20 °C gesunken. Die Standardabweichung der Lufttemperatur, gemessen an den 32 Standorten, war vor allem zu Ende der zweiten Hitzewelle erhöht, im Vergleich mit den Zeiträumen vor und nach der Hitzewelle (siehe Abb. 3.2, rechts). Zusätzlich war die Standardabweichung auch in der zweiten Augustwoche erhöht, in der

über mehrere Tage hinweg eine Lufttemperatur von über 25°C verzeichnet wurde. Der Grund für diese erhöhte Standardabweichung ist die starke Sonneneinstrahlung mit den damit verbundenen hohen Lufttemperaturen während einer Hitzewelle. Diese sorgen dafür, dass sich die Stadt mit ihren künstlichen Oberflächen und Gebäuden, stark aufwärmt und die Energie speichert. Diese Wärme wird nachts wieder abgegeben wodurch ein starkes Temperaturgefälle zwischen Stadt und Land entsteht und damit eine ausgeprägte Heterogenität in den Messdaten, welche sich in einer hohen Standardabweichung äussert.

## 4 Städtischer Wärmeinseleffekt in Krefeld

### 4.1 Einleitung

Mit dem fortschreitenden Klimawandel sind die Städte der Hitze stärker ausgesetzt als ihr Umland. Die Zahl tropischer Nächte und Hitzetage wird in den Städten weiter zunehmen (siehe Abb. 4.1); Hitzewellen werden in Zukunft länger, intensiver und häufiger auftreten.



**Abbildung 4.1:** Klimaprojektion der Anzahl der Tropennächte pro Jahr für Krefeld für verschiedene Emissionsszenarien bis 2100.

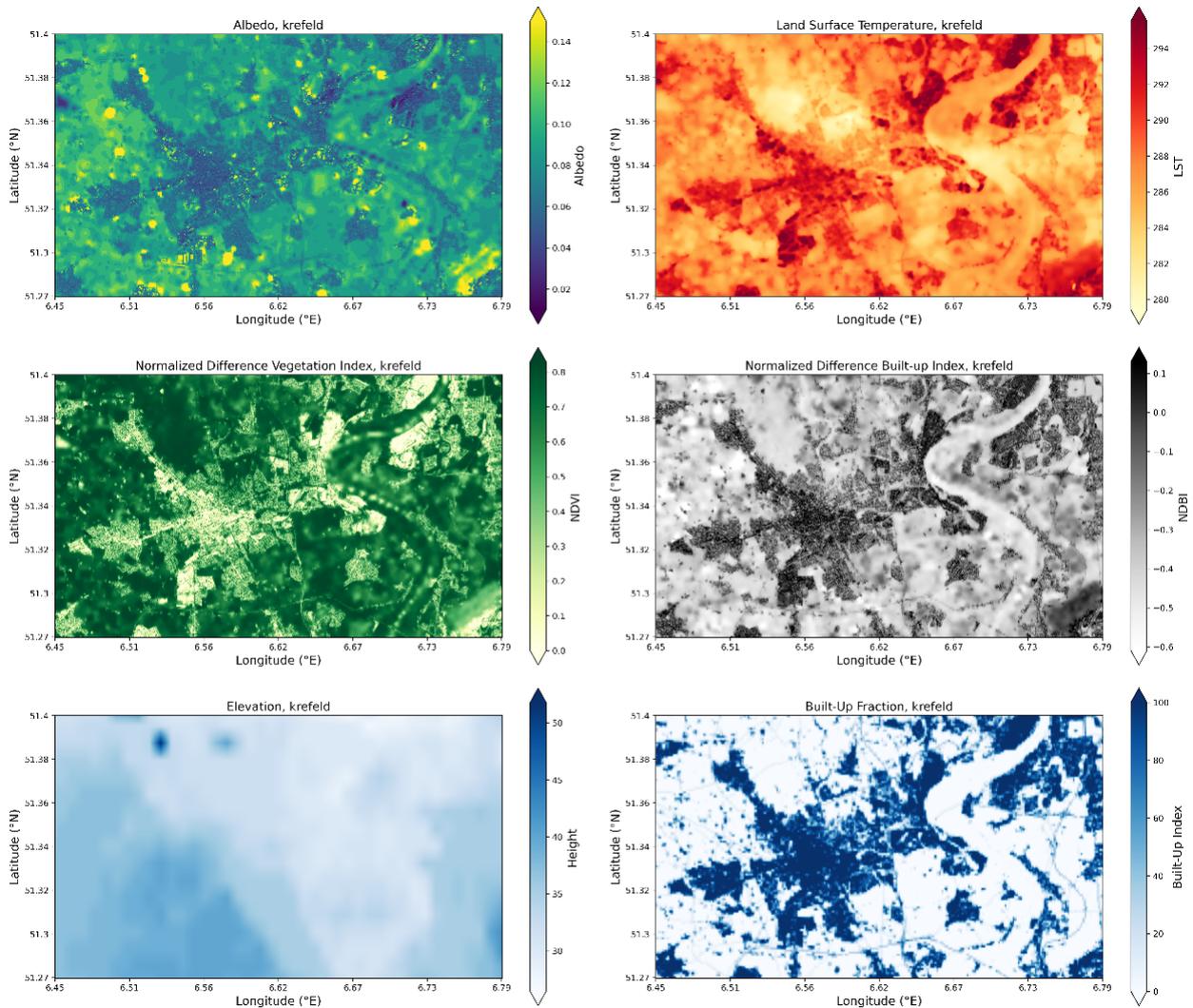
Der städtische Wärmeinseleffekt (UHI) ist ein typisches Merkmal des Stadtklimas. Er ist gekennzeichnet durch den Temperaturunterschied zwischen der wärmeren Stadt und dem kühleren, ländlichen Umland. Die höchsten Lufttemperaturunterschiede treten typischerweise in der Nacht auf. Dieses Phänomen wird durch die Tatsache verursacht, dass tagsüber kurzweilige Strahlung als Energie in Gebäuden und versiegelten Flächen gespeichert und in Form von Wärme in der Nacht abgegeben wird. Innerhalb des Stadtgebiets gibt es jedoch Orte, die besonders anfällig sind für eine solche Erwärmung, so genannte "Hotspots". Dabei handelt es sich in der Regel um dicht bebaute und versiegelte Flächen, die die Wärme länger speichern können als das Umland.

### 4.2 Datenmanipulation

Zur Analyse des städtischen Wärmeinseleffekts in Krefeld werden Daten aus dem meteorologischen Messnetz, Satellitenparameter und Daten von Reanalyse-Modellen verwendet, um mit Hilfe des meteoblue Stadtklim-Modells (mCCM) so genannte "Wärmekarten" zu berechnen. Die Lufttemperaturen werden mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten erfasst und auf eine räumliche Auflösung von 10 m herunterskaliert. Dieses sogenannte «Downscaling» der Lufttemperatur wird mit Hilfe eines multivariaten Modells durchgeführt, welches auf abgeleiteten Variablen von Satellitenbildern wie der Albedo, dem NDVI, der Höhe und anderen beruht (siehe Abb. 4.2). Die Koeffizienten werden dynamisch berechnet und eine gleitende Mittelwertbildung als Filter angewendet, um fließende Übergänge zwischen wechselnden Wettermustern zu berücksichtigen. Anschliessend wird ein «Temperature-footprint»-Ansatz angewendet, um die horizontale Wärmedivektion zu berücksichtigen (Schlögl et al. 2018). Dadurch wird die 2-dimensionale Interaktion zwischen den einzelnen Pixeln sichergestellt. Die Darstellung der horizontalen Wärmedivektion stellt sicher, dass identische Satellitenpixel im Stadtzentrum und in den Vororten nicht notwendigerweise zu den gleichen Lufttemperaturen führen.

Schliesslich werden die Lufttemperaturen des multivariaten Modells mit den mittleren Temperaturen der

der ländlichen Gebiete normalisiert, um die städtischen Wärmeinseln zu berechnen. Ländliche Gebiete werden anhand der Klassifizierung der LCZs und des «Built-Up Index» definiert.



**Abbildung 4.2:** Verschiedene hochaufgelöste Satellitenparameter, abgeleitet von Sentinel-2 Satellitendaten vom 24.07.2019. Die Höhendaten werden von einem globalen digitalen Höhenmodell (DEM) abgeleitet, der Built-Up Index stammt vom Land Monitoring Service des Copernicus-Programm.

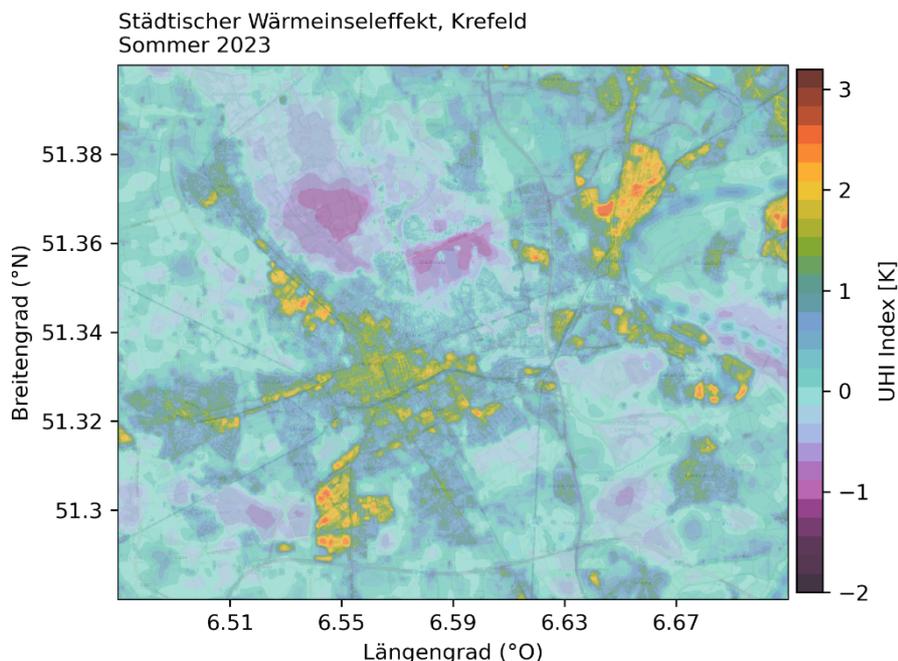
#### 4.2.1 Modellspezifikationen

Eine Übersicht über die Spezifikationen des meteoblue Stadtklima-Modells (mCCM) werden im Folgenden gezeigt:

- Anzahl Messstandorte: 12 Pessl LoRain, 20 Dragino (Stand: 31.08.2023)
- Analytierte Zeitperiode: 01.06.2023 – 31.08.2023 (JJA)
- Räumliche Dimension des Stadt-Ausschnitts: Definiert wie in Abbildung 4.3
- Zeitliche Auflösung der Messungen: 15 Minuten
- Qualitätskontrolle: Ja
- Satellitenparameter im mCCM: Digitales Höhenmodell (DEM), «Normalized Difference Vegetation Index» (NDVI), «Normalized Difference Built-up Index» (NDBI), Albedo, Landoberflächentemperatur (LST)
- Modelldaten: Reanalyse-Modell ERA5 (ECMWF)
- Erstellen einer Modellvalidierung: Ja
- Dynamische Berechnung der Modellkoeffizienten: Ja
- Anwendung des «Temperature-footprint»-Ansatzes: Ja
- Ausschliessen von Wasserflächen aus der Analyse: Ja

#### 4.3 «Wärmekarte» von Krefeld

Hotspots in der Stadt werden mit Hilfe der Wärmekarte in Abbildung 4.3 genau ermittelt. Die durchschnittlichen Unterschiede in den Lufttemperaturen zwischen der Stadt und dem umliegenden ländlichen Gebiet werden mit dem meteoblue Stadtklima-Modell (mCCM) modelliert. Die Ergebnisse des Modells zeigen, dass bestimmte Gebiete im Stadtzentrum von Krefeld im Durchschnitt 2 °C wärmer sind als die Vororte oder ländliche Gebiete. Für bestimmte Wetterbedingungen (wenig Wind, keine Strahlung) wurden im Stadtgebiet wärmere Lufttemperaturen von grösser 5 °C modelliert. Die "Hitzekarte" von Krefeld zeigt Hotspots innerhalb der Stadt und in den umliegenden Siedlungen. Insbesondere die Industriegebiete in Fischeln und Uerdingen sind von deutlich höheren Lufttemperaturen betroffen als die umliegenden Gebiete. Das Zentrum Krefeld ist im Vergleich nur leicht erhöht. Die Zentren und Industriegebiete der Vororte Inrath und Gellep-Stratum sind ebenfalls stärker vom städtischen Wärmeinseleffekt betroffen als die umliegenden ländlichen Gebiete. Vor allem im Forstwald, Stadtwald und am Hülser Berg sind deutlich niedrigere Temperaturen zu verzeichnen.



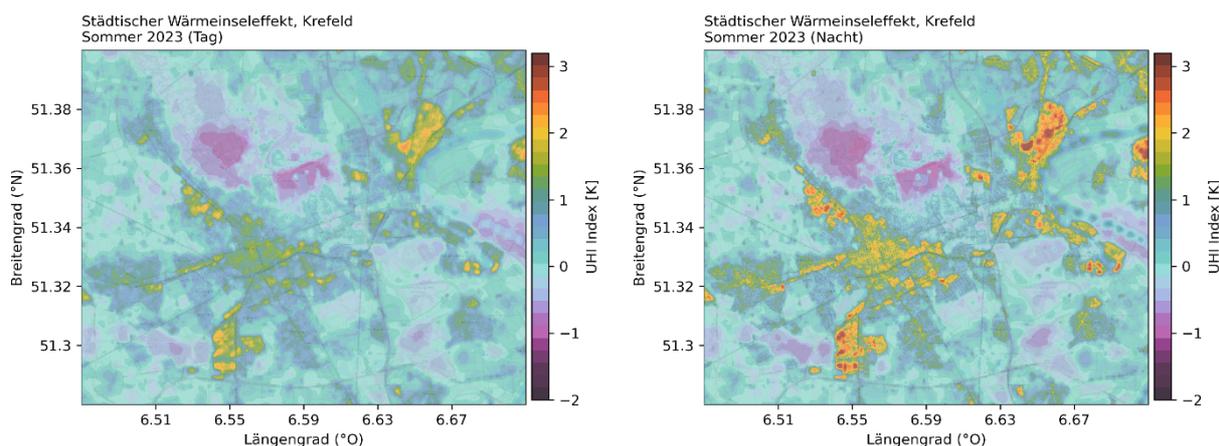
**Abbildung 4.3:** «Wärmekarte» von Krefeld und den umliegenden ländlichen Gebieten für den Sommer 2023 unter der Nutzung der in 4.2.1 genannten Spezifikationen.

Die "Wärmekarte" kann in der Stadtplanung verwendet werden, um Massnahmen zur Reduzierung des städtischen Wärmeinseleffekts ortsspezifisch zu planen. Die Reduzierung des städtischen Wärmeinseleffekts durch geeignete Massnahmen (Entsiegelung, Begrünung, Bewässerung, Berücksichtigung natürlicher Kältekorridore) kann nur dann klimaefizient und kostengünstig umgesetzt werden, wenn der lokale Wärmebeitrag des städtischen Wärmeinseleffekts (über die Wärmekarte) bekannt ist. Daher dienen die Wärmekarten den Stadtplanern als Entscheidungshilfe bei ihrer Entscheidung zur Reduzierung des städtischen Wärmeinseleffekts.

Mit Hilfe der Wärmekarten können ortsspezifische Informationen gewonnen werden, z. B. über Tropennächte, Hitzetage, Heiz- und Kühlgradtage und vieles mehr. Diese Analysen können sowohl für das aktuelle Jahr als auch für zukünftige Jahre unter Verwendung der gängigsten RCP-Emissionsszenarien berechnet werden. Die Analyse leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Wärmemanagement der Stadt Krefeld und stellt ein wichtiges Instrument zur Unterstützung von Städten in einem sich ändernden Klima dar.

### 4.3.1 Tag- vs. Nachtbedingungen

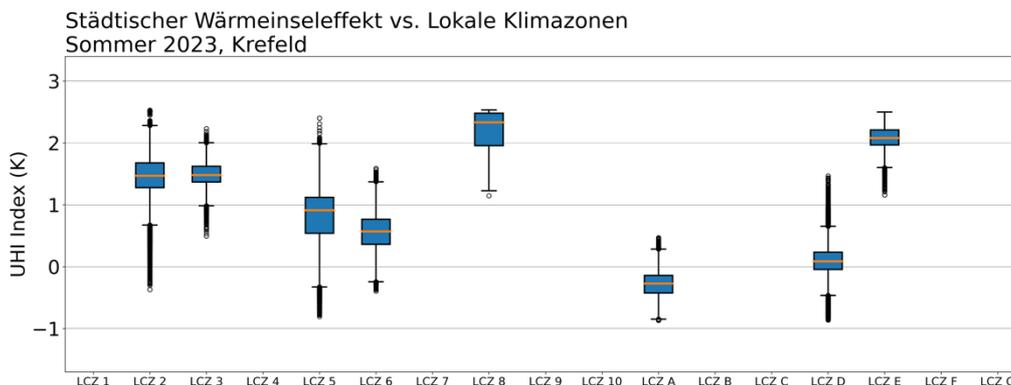
Wie in Abbildung 4.4 deutlich zu sehen ist und durch wissenschaftliche Studien bestätigt wird, ist der UHI-Effekt am Tag schwächer als in der Nacht. Dieses Phänomen wird dadurch verursacht, dass die kurzweilige Strahlung tagsüber als Energie in Gebäuden und versiegelten Flächen gespeichert und in der Nacht in Form von Wärme abgegeben wird.



**Abbildung 4.4:** «Wärmekarte» von Krefeld und den umliegenden ländlichen Gebieten für Tag (10:00 – 18:00, links) und Nacht (22:00 – 06:00, rechts).

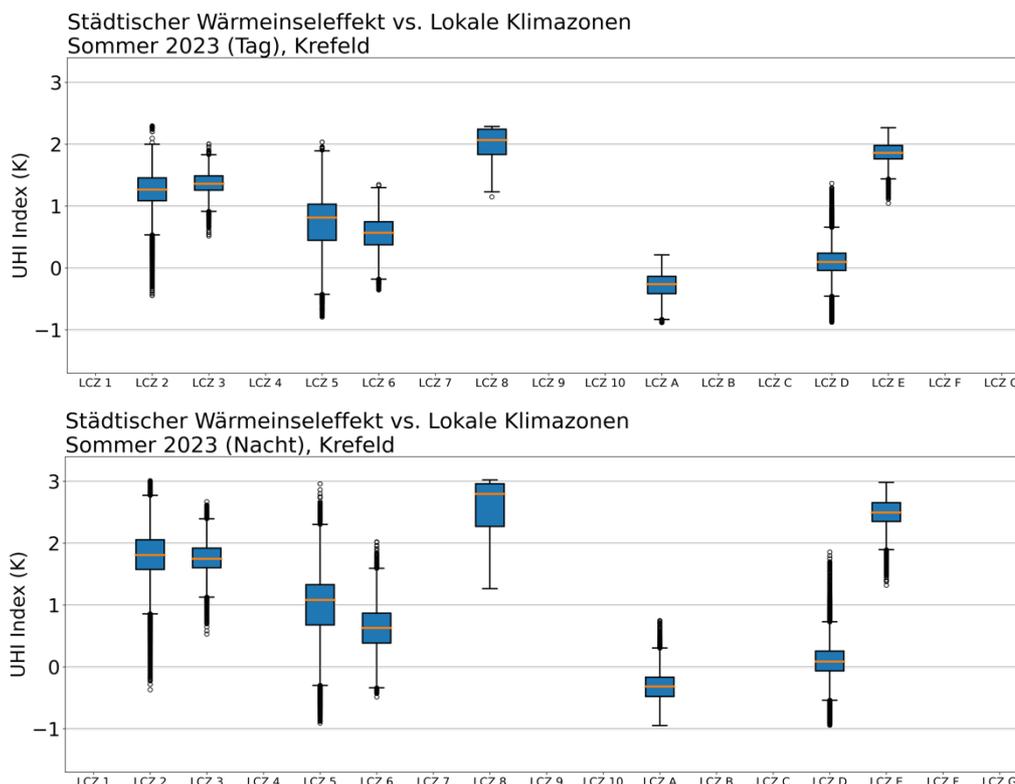
### 4.3.2 UHI in Abhängigkeit von LCZs

In diesem Kapitel wird der UHI-Effekt in Abhängigkeit der LCZs analysiert (siehe Abb. 4.5). Die höchsten UHI-Werte sind (wie zu erwarten) in den LCZ 2 (Kompakte, mittelhohe Bebauung), LCZ 8 (Grosse, niedrige Bebauung) und LCZ E (Blanker Fels, Versiegelung) festzustellen. Die geringsten UHI-Werte werden für die LCZ A (Dichte Bäume) modelliert. Die Variabilität innerhalb jeder LCZ zeigt die erwartete Streuung in jeder LCZ. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Variabilität innerhalb einer LCZ grösser ist als die Variabilität unter den LCZs. Dadurch hat eine Detektion der UHI für Krefeld, die rein auf den LCZs basiert, zu berücksichtigende Grenzen.



**Abbildung 4.5:** Boxplots der UHI-Intensität in Abhängigkeit der verschiedenen LCZs in Krefeld. Zu beachten ist, dass LCZ 1, LCZ 4, LCZ 7, LCZ 9, LCZ 10, LCZ B, LCZ C und LCZ F in Krefeld vom LCZ-Modell nicht festgestellt werden konnten. LCZ G (Wasser) wurde in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da Messungen über Wasserflächen nicht verfügbar sind.

Zusätzlich werden die Differenzen zwischen Tag- und Nachtbedingungen in Abbildung 4.6 gezeigt:

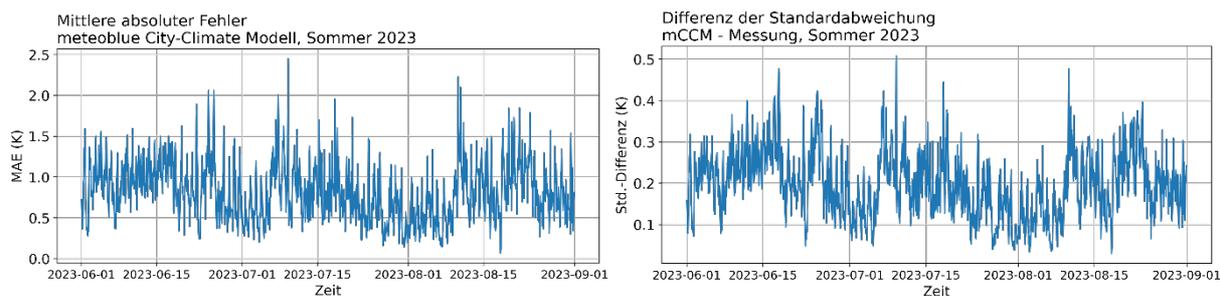


**Abbildung 4.6:** Boxplots der UHI-Intensität in Abhängigkeit der verschiedenen LCZs in Krefeld während des Tages (10:00 – 18:00, oben) und der Nacht (22:00 – 06:00, unten).

Die Unterschiede der UHI-Intensität zwischen Tag und Nacht für die verschiedenen LCZs sind durchaus feststellbar. In Nachtsituationen nimmt die Variabilität unter den LCZs zu, so dass der städtische Wärmeineffekt stärker ausgeprägt ist. Zudem ist die Variabilität innerhalb der LCZs in der Nacht grösser, da die Abgabe von Energie in Form von Wärme in der Nacht besonders grossen Einfluss hat und diese von der Wärmespeicherkapazität der Materialien abhängt. Deshalb sind die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Oberflächen- und Gebäudematerialien, auch innerhalb einer LCZ, in der Nacht besonders gross.

## 5 Verifikation

In diesem Kapitel wird eine kurze Analyse der Genauigkeit des mCCM durchgeführt. In Abbildung 5.1 sind der mittlere absolute Fehler (MAE = «mean absolute error» (engl.)) und die Differenz der Standardabweichung zwischen dem Modell und den Messungen dargestellt. Der MAE ist ein Mass dafür, wie stark der modellierte Wert von der Messung abweicht, während die Differenz der Standardabweichung ein Mass dafür ist, wie gut das Modell die Dynamik der Temperaturfelder reproduzieren kann.



**Abbildung 5.1:** MAE (K) in Abhängigkeit der Zeit des mCCM (links) und die Differenz der Standardabweichung zwischen dem Modell und den Messungen (rechts), basierend auf stündlicher zeitlicher Auflösung.

Während der Zeitperiode vom 01.06.2023 bis 31.08.2023 beträgt der MAE im Mittel 0.82 K, was im Vergleich zu anderen Städten als positiv zu bewerten ist. Der höchste MAE für einen einzelnen Zeitschritt beträgt 2.45 K. Die Differenz der Standardabweichung zwischen den Messungen und dem Modell betragen im Mittel 0.20 K. Der Maximalwert der Differenz der Standardabweichung zu einem Zeitpunkt beträgt 0.51 K.

Generell gibt es Grenzen bei der Genauigkeit der Wärmekarten aufgrund des kurzen Analysezeitraumes (hier wurden nur Daten von 3 Monaten verwendet). Um robustere Ergebnisse zu erhalten, sollte mindestens ein Jahr an Daten genutzt werden, um die gesamte Bandbreite verschiedener Atmosphärenbedingungen zu berücksichtigen.

## 6 Über meteoblue

---

meteoblue liefert weltweit präzise Wetterinformationen von hoher Qualität für jeden Punkt an Land und auf See. meteoblue Produkte und Dienstleistungen richten sich an Unternehmen, deren Entscheidungen vom Wetter abhängen, sowie an Nutzer mit einem besonderen Interesse am Wetter. Zu diesem Zweck erstellt meteoblue Wetterinformationen auf der Basis eigener Berechnungsmodelle. Wir bieten darauf aufbauende Produkte und Dienstleistungen zu wettbewerbsfähigen Preisen an. Für die breite Öffentlichkeit bieten wir eine hochauflösende Wettervorhersage auf unserer Website an, die in mehrfacher Hinsicht einzigartig ist.

meteoblue nutzt die neuesten wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen, um Wetterinformationen zu berechnen, anzuzeigen und zu liefern. Für die Vorhersage haben wir erstklassige, weltweit erfolgreiche NMM-Wettermodelle (wie sie in GFS verwendet werden) durch verbesserte Parametrisierung und Leistungssteigerung entwickelt, um uns in die Lage zu versetzen, hochauflösende Wettervorhersagen für ganze Kontinente in Entfernungen von 3 – 18 km zu berechnen und damit genaue Vorhersagen auch für Gebirgslandschaften zu liefern. Ereignisse wie Föhn, Gewitter und Winde zwischen Meer und Land können damit berechnet werden. Spezielle Algorithmen ermöglichen die Anpassung von Temperatur, Wind- und Feuchtigkeitsdaten an jeden beliebigen Ort anzupassen.

Die meteoblue Systeme sind auf globale Datenverfügbarkeit, übersichtliche Darstellungen, vielfältige Anpassungsmöglichkeiten an Kundenwünsche und einen kostengünstigen Betrieb ausgerichtet.

## 7 Publikationen

---

Anet, J. G., Schlögl, S., Spirig, C., Frey, M. P., Renold, M., and Gutbrod, K. G. (2021): Building a new high-density air temperature measurement network in two Swiss cities, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-9102, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9102>, 2021.

Bader, N., Schlögl, S., and Gutbrod, K. (2022): High-resolution temperature downscaling for global cities based on satellite imagery, weather station data and NWP model data, EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-384, <https://doi.org/10.5194/ems2022-384>, 2022.

Bader, N., Schlögl, S., and Gutbrod, K. (2023): High-resolution air temperature forecast for urban heat wave management, EMS Annual Meeting 2023, Bratislava, Slovakia, 4–8 Sep 2023, EMS2023-379, <https://doi.org/10.5194/ems2023-379>, 2023.

Basara, J. B., Basara, H. G., Illston, B. G., & Crawford, K. C. (2010). The impact of the urban heat island during an intense heat wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, 2010.

Changnon, D., Sandstrom, M., & Schaffer, C. (2003). Relating changes in agricultural practices to increasing dew points in extreme Chicago heat waves. *Climate Research*, 24(3), 243-254.

Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32(10), 1921-1935.

Cheval, S., Dumitrescu, A., & Bell, A. (2009). The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, 97(3), 391-401.

Chow, W. T., & Roth, M. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(15), 2243-2260.

Founda, D., Pierros, F., Petrakis, M., & Zerefos, C. (2015). Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves. *Atmospheric Research*, 161, 1-13.

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319(5864), 756-760.

Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051-2064.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.

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*, 145(1-2), 96-110.

Reiss, A., Schlögl, S., Ströbel, B., Bader, N., Indra, O., Gutbrod, K. (2023): «Basel Living Lab»: First insights in some results from a dense measurement network in Basel, Switzerland. Beating the Heat Conference 2023, Zürich, Switzerland, 15 Sep 2023.

Schlögl, S., Lehning, M., Fierz, C., & Mott, R. (2018). Representation of Horizontal Transport Processes in Snowmelt Modeling by Applying a Footprint Approach. *Frontiers in Earth Science*, 6, 120.

Schlögl, S., Bader, N., Anet, J. G., Frey, M., Spirig, C., Renold, M., and Gutbrod, K. (2021): Automated detection of urban heat islands based on satellite imagery, digital surface models, and a low-cost sensor network, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14143, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14143>, 2021

Schlögl, S., Bader, N., Reiss, A., Ströbel, B., and Gutbrod, K. (2023): An overview of four use cases from a dense urban measurement network in Basel, Switzerland: Quality of the measurements, temperature and precipitation variability, and mitigation of urban heat island mitigation strategies., EMS Annual Meeting 2023, Bratislava, Slovakia, 4–8 Sep 2023, EMS2023-370, <https://doi.org/10.5194/ems2023-370>, 2023.

Stewart, I. D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the 'local climate zone'scheme using temperature observations and model simulations. *International journal of climatology*, 34(4), 1062-1080.

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., ... & Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International journal of biometeorology*, 54(1), 75-84.

Varentsov, M., Wouters, H., Platonov, V., & Konstantinov, P. (2018). Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. *Atmosphere*, 9(2), 50.