



Erfassung von Stadtklima-Massnahmen – Methodische Erkenntnisse aus Bern und Zürich

u^b

b
UNIVERSITÄT
BERN

OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften

zhaw
School of
Engineering
ZAV Zentrum für Aviatik

Der Klimawandel führt in Europa zu häufigeren, stärker ausgeprägten und länger anhaltenden Hitzeperioden¹. Ein Effekt solcher Hitzeperioden ist ein erhöhtes Risiko von negativen Auswirkungen auf die Gesundheit², wovon speziell alte und junge Menschen, sowie Bevölkerungsgruppen in Armut oder mit Vorerkrankungen betroffen sind³. Auch die Bevölkerung der Schweiz wurde in den letzten Jahren vermehrt mit diesem Risiko konfrontiert, wobei die Herausforderungen in Städten im Vergleich zu ländlichen Gebieten noch grösser sind, da dort die Temperatur während Hitzeperioden nachts meist hoch bleibt. Um der Hitze entgegenzuwirken und das lokale Mikroklima zu verbessern wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Schweizer Städten Massnahmen ergriffen. Die Effektivität dieser Massnahmen können unterschiedlich simuliert, gemessen und evaluiert werden.

Fast jeder Sommer ein Hitzesommer

Hitzesommer gehören in der Schweiz mittlerweile zur Normalität. Über die letzte Dekade reihten sich nicht weniger als sechs Sommerjahreszeiten in die Top 10 der heissesten Sommer seit Messbeginn ein (2015, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023). Einzig während des Sommers 2003 wurden noch extremere Temperaturen verzeichnet⁴. Besonders betroffen von den heisser werdenden Sommern sind dicht besiedelte Gebiete, da diese durch den städtischen Wärmeinseleffekt vor allem nachts im Vergleich zum Umland noch höheren Temperaturen ausgesetzt sind. Dieser Wärmeüberschuss entsteht durch einen hohen Anteil versiegelter Flächen (z.B. Strassen, Plätze), der Verwendung wärmespeichernder Materialien (z.B. Beton, Asphalt), dem Mangel an grünen (Vegetation) und blauen (Wasser) Flächen und zusätzlichen Wärmeemissionen durch Industrie und Verkehr^{3, 5}.

Durch die hohen Temperaturen der letzten Sommer nimmt das Bewusstsein der Stadthitze-Problematik zu: In verschiedenen

Schweizer Städten wurden Initiativen zur Reduktion der Stadthitze aufgegleist und umgesetzt⁶. Einige Projekte wurden wissenschaftlich begleitet, wobei verschiedene Mess- und Modellierungsmethoden zum Einsatz kamen.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, diese unterschiedlichen Mess- und Modellierungsansätze aus Projekten zweier Schweizer Städte gesamtheitlich zu analysieren und einzuordnen. Insgesamt werden fünf Mess- und Modellierungsmethoden, die zwischen 2018 und 2023 für die Analyse der Wirksamkeit von Stadtklima-Massnahmen angewendet wurden, untersucht. Dabei werden Vor- und Nachteile, sowie Anwendungsmöglichkeiten der jeweiligen Methode durchleuchtet, mit dem Ziel, bei zukünftigen Projekten die Entscheidungsfindung für die Art der Methode zu erleichtern.

Projekte und Messnetze in Bern und Zürich

Die innerstädtische Temperaturvariabilität der Städte Bern und Zürich werden seit mehreren Jahren aufgezeichnet (Box 1). In Bern wird seit Sommer 2018 mit 70 bis 90 Stationen gemessen. Das Temperaturmessnetz besteht aus einem Hauptnetz mit 60 Stationen, die jeden Sommer an denselben Standorten installiert werden, und 10 bis 30 Stationen, die je nach Interesse von

Stadt und Universität an spezifisch interessanten Standorten montiert werden. Zusätzlich zu diesem Messnetz wurden fünf Umgestaltungsprojekte wissenschaftlich begleitet. Die Daten und Modellierungen aus diesen Umgestaltungsprojekten und dem Messnetz werden in der Folge für diesen Bericht verwendet (Abb. 1, Tab. 1).

Autoren: Moritz Burger, Ivo Suter, Julien Anet, Moritz Gubler, Nils Tinner, Stefan Brönnimann

Layout: Alexander Hermann, Geographisches Institut, Universität Bern

Burger M., Suter I., Anet J., Gubler M., Tinner N., Brönnimann S. (2024). Erfassung von Stadtklima-Massnahmen – Methodische Erkenntnisse aus Bern und Zürich. Geographica Bernensia G106. DOI:10.4480/GB2024.G106

Mit freundlicher Unterstützung des BAFU

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2024, Geographisches Institut, Universität Bern, Schweiz



Das Messnetz in Zürich bestand von 2019 bis 2022 aus 270 Stationen, welche regelmässig über das Stadtgebiet verteilt waren (Abb. 1). Das Netz wurde Ende 2022 auf 90 Stationen verdünnt. Der langjährige Betrieb und die hohe Dichte erlauben auch ohne

zusätzliche Messkampagnen die Analyse von städtischen Entwicklungen. Ausserdem stehen zusätzliche Sensoren zur Verfügung, mit welchen Massnahmen zur Hitzeminderung wissenschaftlich begleitet werden können.

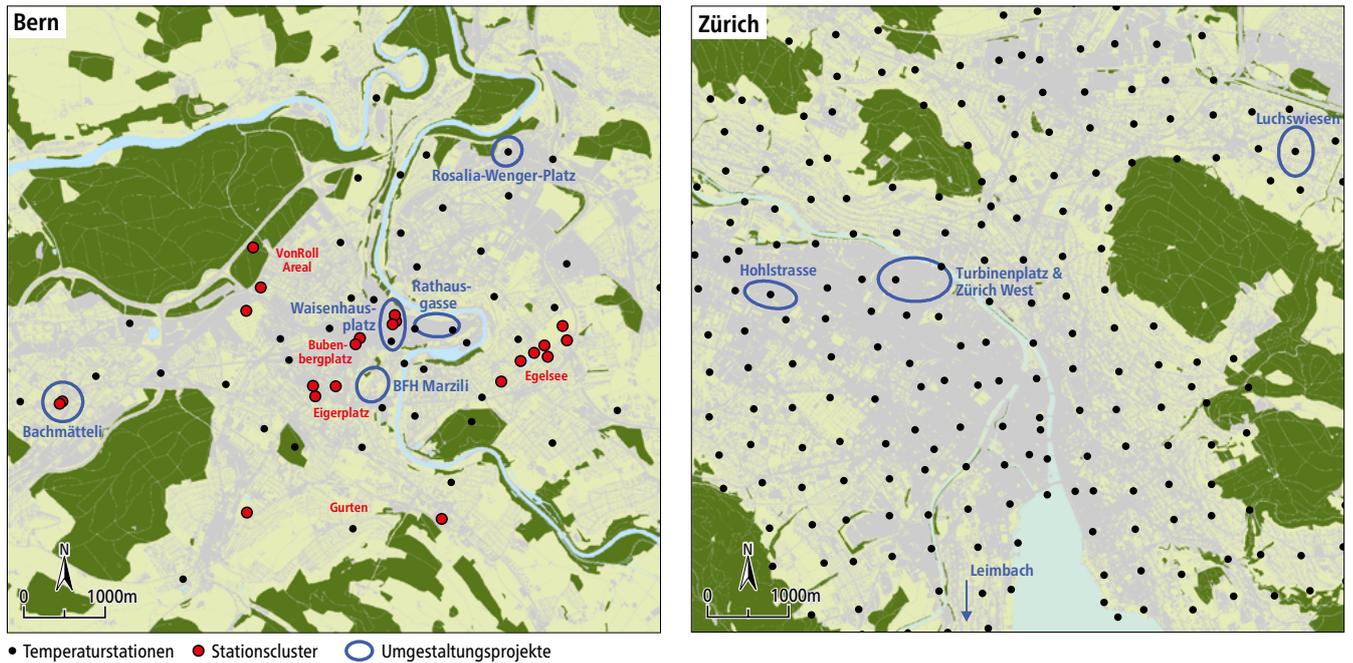


Abb. 1: Stadtklimamessnetze und Umgestaltungsprojekte in Bern und Zürich. Die schwarzen Punkte zeigen die Standorte der Temperaturstationen. Die roten Punkte zeigen Standorte von Temperaturstationen, die in Bern als Cluster zur Analyse von bestimmten städtebaulichen oder topografischen Merkmalen ausgewählt wurden. Blau umkreist sind Standorte von Umgestaltungsprojekten, die in diesem Bericht behandelt werden.

| Stadt | Standort | Massnahme | Angewandte Methode |
|--------|----------------------|---------------------------------|--|
| Bern | Bachmätteli | Chaussierung & Ruderalfläche | vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur (1) vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur (2) Stationscluster (3) |
| Bern | Rathausgasse | Kopfsteinpflaster | vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur (1) vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur (2) |
| Bern | Waisenhausplatz | Kopfsteinpflaster & helle Farbe | direkter Vergleich der Oberflächentemperatur (2) Stationscluster (3) geostatistische Stadtklima-Simulationen (5) |
| Bern | Rosalia-Wenger-Platz | Chaussierung & Microforest | vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur (1) vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur (2) |
| Bern | BFH Marzili | Chaussierung | vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur (1) vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur (2) |
| Zürich | Hohlstrasse | Neues Gebäude | vorher/nachher Vergleich der Lufttemperatur (1) |
| Zürich | Turbinenplatz | Nebelring | vorher/nachher Vergleich der Lufttemperatur (1) |
| Zürich | Leimbach | Gebäudeausrichtung | numerische Stadtklima-Simulationen (4) |
| Zürich | Luchswiesen | Gebäudebegrünung | numerische Stadtklima-Simulationen (4) |
| Zürich | Zürich West | Verschiedene Entsiegelungen | numerische Stadtklima-Simulationen (4) |

Tab. 1: Übersicht über die in diesem Bericht vorgestellten Umgestaltungsprojekte in Bern und Zürich

Box 1: Verwendete Messstationen in Bern und Zürich

Für die Stadtklima-Messnetze wurde aus Kostengründen allgemein (Bern) oder zu einem grossen Teil (Zürich) auf Geräte zur Erfassung der Lufttemperatur gesetzt, welche auf einem selbst entwickelten Strahlungsschutz basierten (Abb. B1). Die Messgeräte wurden an der Universität Bern entwickelt und im Sommer 2018 getestet. Vergleiche mit drei professionellen Messgeräten zeigten auf, dass tagsüber, vor allem während sonnigen und windstillen Situationen, Abweichungen von bis zu 2 K (entspricht 2°C) auftreten können. Nachts sind die kostengünstigen Geräte (ca. 65.-CHF) hingegen sehr präzise,

mit durchschnittlichen Abweichungen von -0.12 bis $+0.23$ K⁷. Ein Video zum Bau solcher Messgeräte ist online zu finden⁸.

Für die Messung der Oberflächentemperatur (Methode 2) wurde die Handkamera FLIR E6-XT verwendet. Die Kamera weist eine Genauigkeit von ± 2 K auf⁹. Für die Analyse der Oberflächentemperaturen wurden die Mitteltemperaturen von festgelegten Bereichen versiegelter und entsiegelter Fläche verglichen (Abb. B2). Die Differenz zwischen der Situation vor und nach der Umgestaltung wurde als Kühleffekt definiert.

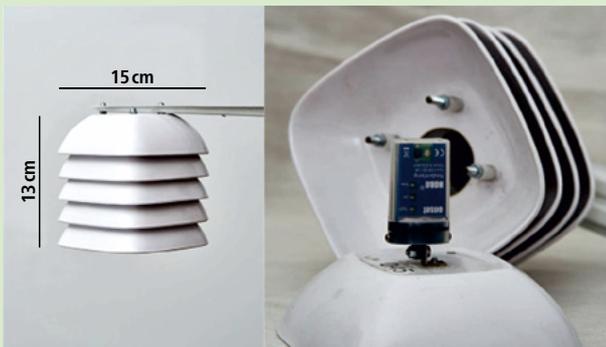


Abb. B1: Kostengünstige Messstation zur Erfassung der Lufttemperatur, die in Bern und (leicht adaptiert) in Zürich eingesetzt wurde.

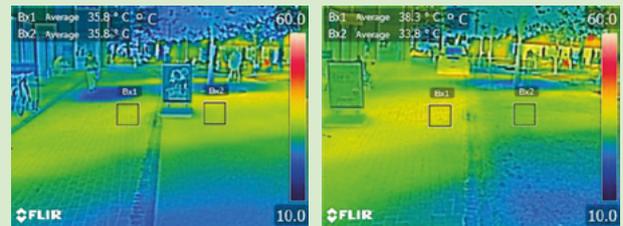


Abb. B2: Wärmebildaufnahmen im Projekt Bachmätteli, der einen entsiegelten Bereich (Kies, im rechten Bild) zeigt. Der Kühleffekt (Differenz vorher [links] zu nachher [rechts]) beträgt in diesem Beispiel 4.5 K.

1 Vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur

Veränderungen der Lufttemperatur können am direktesten untersucht werden, wenn die Temperaturen am selben Standort vor und nach einer Umgestaltung aufgezeichnet werden. Dies wurde in Bern und Zürich bei insgesamt sechs Umgestaltungsprojekten gemacht (Tab. 1). Für die Analyse wurden die Daten jeweils

in «vorher» und «nachher», sowie in «Tag» (06 bis 22 Uhr) und «Nacht» (22 bis 06 Uhr) aufgeteilt. Da der Sprühnebel am Turbinenplatz nur tagsüber betrieben wurde, entfällt dort die nächtliche Analyse. Bei allen Projekten gab es eine Test-Station, die in unmittelbarer Nähe der Massnahme montiert wurde

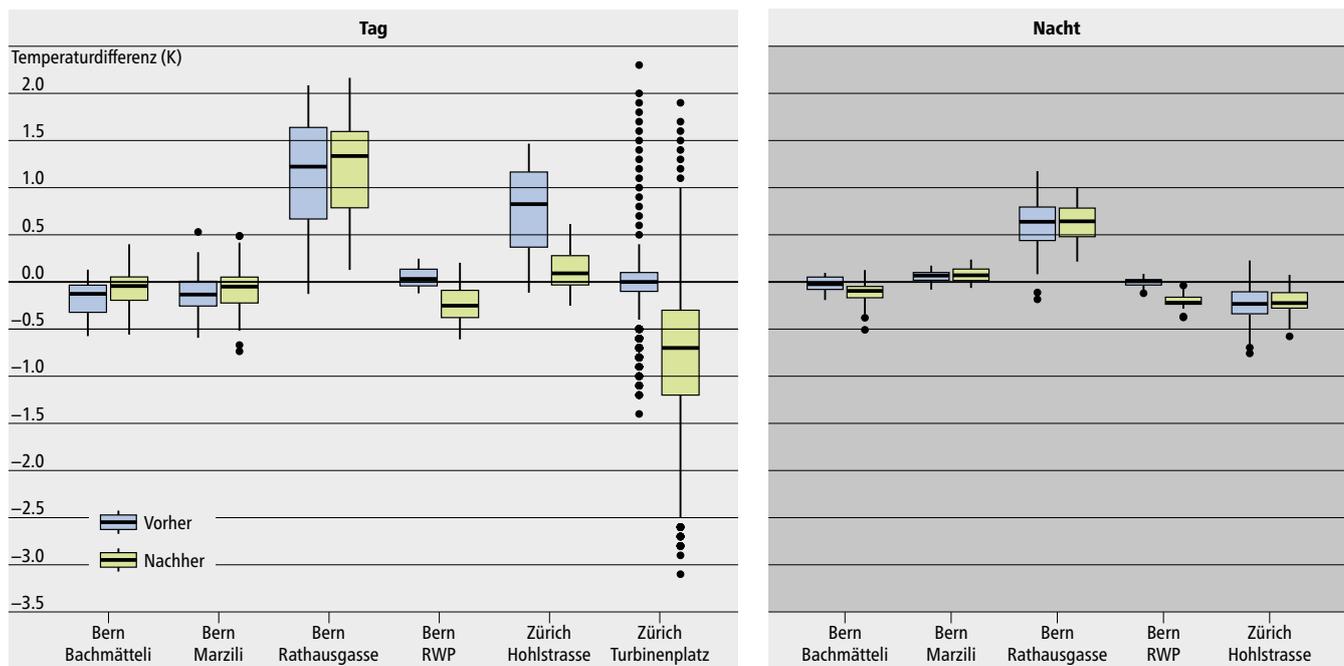


Abb. 2: Vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur bei Umgestaltungsprojekten in Bern und Zürich während des Tages (links) und der Nacht (rechts). Eine negative Differenz zwischen der vorher (blau) und nachher (grün) Messung wird als durch die Umgestaltung herbeigeführten Effekt bewertet.

und eine oder mehrere Referenzstationen, die nicht von der Massnahme beeinflusst werden sollten. Die Differenz zwischen den Stationen vor und nach der Umgestaltung zeigt auf, ob die Massnahme einen direkten Effekt auf die lokale Lufttemperatur zur Folge hatte.

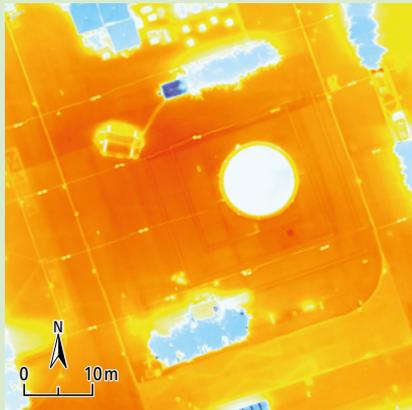
Die Ergebnisse der sechs Projekte variieren deutlich (Abb. 2). In Zürich wurden tagsüber bei der Hohlstrasse (durch Abschattung) und am Turbinenplatz (durch Verdunstungskühlung) ein Effekt von rund 0.7K erreicht (1K entspricht 1°C), während in Bern nur beim Rosalia-Wenger-Platz (RWP) eine Abkühlung messbar war (auch durch Abschattung). Nachts waren die Differenzen nochmals geringer: Einzig in Bern bei den Projekten Bachmätteli

und RWP konnte durch die Massnahmen eine Abnahme der durchschnittlichen nächtlichen Temperatur von 0.1 K bis 0.25 K gemessen werden.

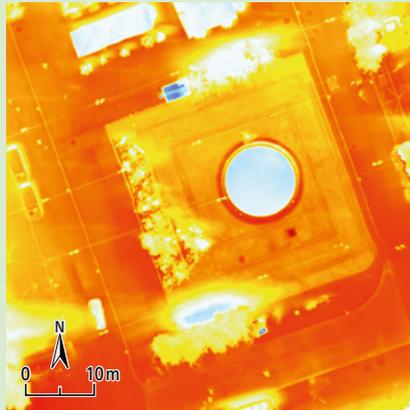
Die Resultate haben jedoch auch mit temporalen und raumgestalterischen Elementen zu tun. Während zum Beispiel beim Bachmätteli die «vorher» Zeitspanne mit 21 Tagen sehr kurz ausfiel, wurden die mikroklimatischen Bedingungen in der Rathausgasse (Haus abgerissen) und im Marzili (Baum gefällt) zwischen den Messperioden verändert. Da die messbaren Unterschiede in der Lufttemperatur oft klein sind, können solche Veränderungen die Ergebnisse eines Monitorings entscheidend beeinflussen.

Box 2: Die Messung der Oberflächentemperatur mittels Drohne

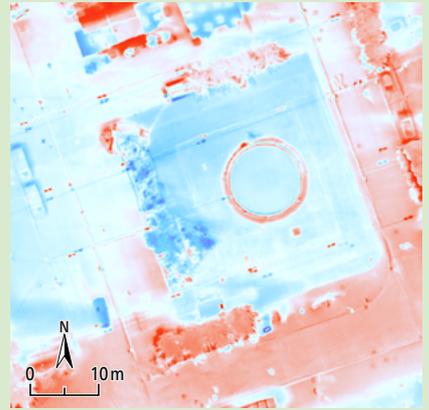
A vor der Entsiegelung (2021)



B nach der Entsiegelung (2023)



C Relative Veränderung zwischen den Aufnahmen



Oberflächentemperatur (°C)

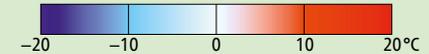
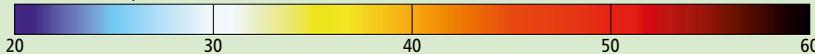


Abb. B3: Mit der Drohne gemessene Oberflächentemperatur vor (A) und nach (B) der Entsiegelung des Rosalia-Wenger-Platzes, sowie relative Differenz zwischen den beiden Aufnahmen (C)

Die Oberflächentemperatur kann auch mit einer an einer Drohne installierten Wärmebildkamera aufgezeichnet werden. Diese Methode wurde in Bern in bisher drei Projekten (Bachmätteli, Rosalia-Wenger-Platz, BFH Marzili) angewendet. Diese Art der Messung hat den Vorteil, dass der gesamte Perimeter erfasst werden kann. Mit einer vorher/nachher-Messung können auch hier (relative) Differenzen und somit Kühleffekte berechnet werden (Abb. B3).

Die Messung mit Drohne birgt jedoch auch einige Unsicherheiten. So kann sich die Kamera der Drohne durch Sonneneinstrahlung erwärmen, was einen Anstieg der gemessenen Temperatur zur Folge hat. Weiter kann die Emissivität der Oberfläche (Wärmeabstrahlung von Materialien), variierender Abstand zur Drohne (z.B. Häuserschluchten) oder eine variierende Luftfeuchte der Atmosphäre die Qualität der Messung beeinflussen. Im Idealfall sind solche Störfaktoren zu korrigieren, was aber mit hohem Aufwand verbunden ist. Aufgrund der relativ grossen Unsicherheiten wurden Drohnenbilder in den bisherigen Projekten vor allem für kommunikative Zwecke eingesetzt (Abb. B4).

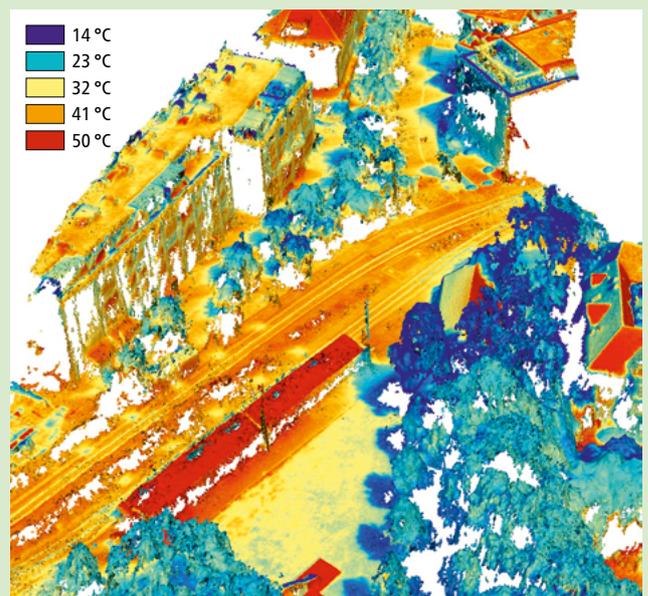


Abb. B4: 3D Wärmebild vom Projekt «Bachmätteli»

2 Vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur

Nebst der Lufttemperatur kann bei Umgestaltungsprojekten auch die Oberflächentemperatur analysiert werden, was in Bern bei allen fünf Pilotprojekten gemacht wurde (Tab. 1). Dabei wurden zu verschiedenen Tageszeiten während Tagen mit möglichst ähnlichen Wetterbedingungen mittels Handkamera Wärmebildaufnahmen definierter Standorte aufgenommen. Auf den Fotos wurde jeweils ein entsiegelter (Testfläche) und versiegelter (Referenzfläche) Bereich aufgenommen, um einen direkten Vergleich (Temperaturdifferenz) zu ermöglichen (Box 1). Die Referenz-Flächen waren bei allen fünf Projekten Asphalt.

Die Resultate zeigen, dass im Vergleich zu den Lufttemperaturen deutlich stärker ausgeprägte Temperaturdifferenzen gemessen wurden. Alle Oberflächentypen wiesen im Vergleich zu asphaltierten Flächen tiefere Oberflächentemperaturen aus, wobei ein grösserer Grad an Entsiegelung zu grösseren Temperaturdifferenzen führte. Als wichtiger Faktor für die Ausprägung des Kühleffektes zeigte sich insbesondere bei der Chaussierung die Verfügbarkeit von Wasser (Abb. 3).

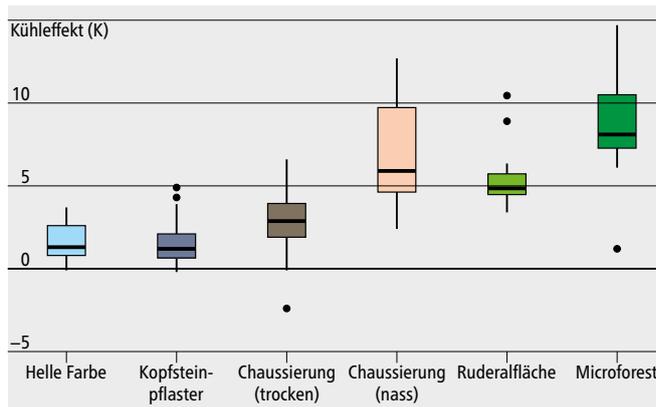


Abb. 3: Vorher/nachher Vergleiche von Oberflächentemperaturen in Bern. Die Referenz (0 K) war bei allen Projekten asphaltierte Flächen. Ein Aufnahmetag wurde als nass definiert, wenn innerhalb der letzten fünf Tage bei der offiziellen Messstation Bern-Zollikofen mehr als 1 mm Niederschlag aufgezeichnet wurde.

3 Vergleiche der Lufttemperatur mit Stationsclustern

Falls kein direkter vorher/nachher Vergleich möglich ist, kann der Effekt von unterschiedlicher Bebauung oder Landnutzung auch mittels Stationsclustern gemessen werden. Für diesen Vergleich werden im gewünschten Untersuchungsgebiet mehrere Stationen (mindestens zwei) montiert, wobei mindestens eine als «Test-Station» (z.B. innerhalb des Parks) und eine als «Referenz-Station» (ausserhalb des Parks) dienen sollte. In Bern wurden bisher Messungen mit insgesamt sieben solchen Stationsclustern durchgeführt (Abb. 1). Um die Daten trotz unterschiedlicher Messdauer und Periode vergleichbar zu machen, wurden nur Tage mit Potential zur Bildung von stark ausgeprägter Stadthitze berücksichtigt (sonnige, warme, windschwache Tage ohne Niederschlag). Damit konnte z.B. die unterschiedliche Anzahl von Regentagen pro Sommer ausgeglichen werden. Für die Analyse wurde die Differenz von Test- zu Referenz-Stationen berechnet. Die Ergebnisse der sieben Stationsclustern und insgesamt 23 Stationen weisen teils grosse Unterschiede auf, wobei die grössten Differenzen im Wald entstehen (Abb. 4). Ansonsten weisen tagsüber vor allem jene Stationen hohe Werte auf, die im Vergleich zur Referenzstation beschattet werden. Während der Nacht scheinen hingegen Topographie und Ventilation («Kaltluftschneise» und «Ausrichtung der Gebäude») entscheidende Faktoren zu sein.

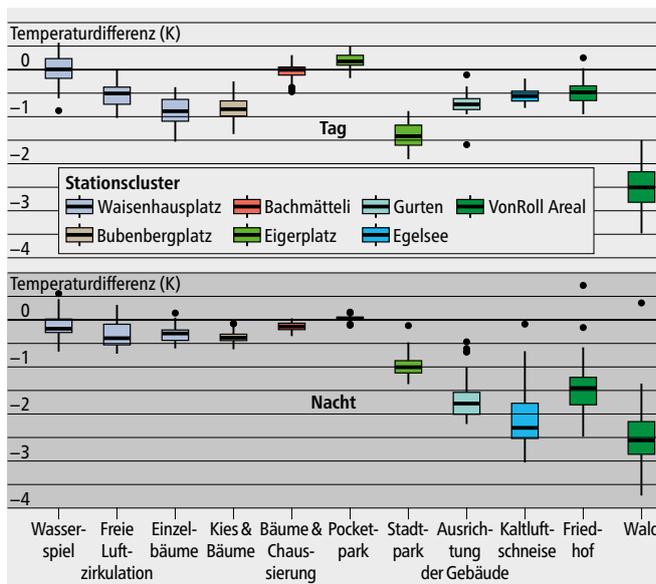


Abb. 4: Vergleich von Lufttemperatur tagsüber (oben) und in der Nacht (unten) mit Stationsclustern in Bern. Die Stationscluster sind farblich nach Standort aufgeschlüsselt.

4 Numerische Stadtklima-Simulationen

Das Stadtklima kann nicht nur vermessen – sondern auch modelliert werden. In Zürich wurden solche Stadtklimasimulationen mit dem Simulationsmodell PALM durchgeführt. Das Modell läuft typischerweise auf einem Rechenverbund von einigen hundert Prozessoren und benötigt umfangreiche Eingangsdaten zur grossräumigen Wetterlage (Temperatur, Winde, Feuchte) und zu den Oberflächengegebenheiten (Topografie, Gewässer, Gebäudebestand, Vegetationsbestand, Bodeneigenschaften). Durch die hohe Auflösung des Stadtklimamodells PALM sind detaillierte Datensätze nötig, die in der Schweiz meist durch die Behörden erstellt werden. Dank dieser Feinmaschigkeit kann der Einfluss verschiedener städtebaulicher Massnahmen auf das

Stadtklima untersucht werden¹⁰. PALM ermöglicht ausserdem die Simulation von Windströmungen und Verwirbelungen hinter Gebäuden und Bäumen. Durch Einbezug von regionalen Wettermodellaten können realitätsnahe Szenarien wie Hitzewellen simuliert werden.

Für die Analyse des Stadtklimas werden bei PALM jeweils mehrere Modellläufe durchgeführt, mit und ohne der zu untersuchenden Massnahme. Dies ermöglicht die Erfassung des isolierten Effektes einer Massnahme. An der ZHAW wurden bereits drei Berichte zu städtebaulichen Massnahmen mit PALM verfasst (Tab. 1). Untersucht wurden unter anderem der Einfluss von

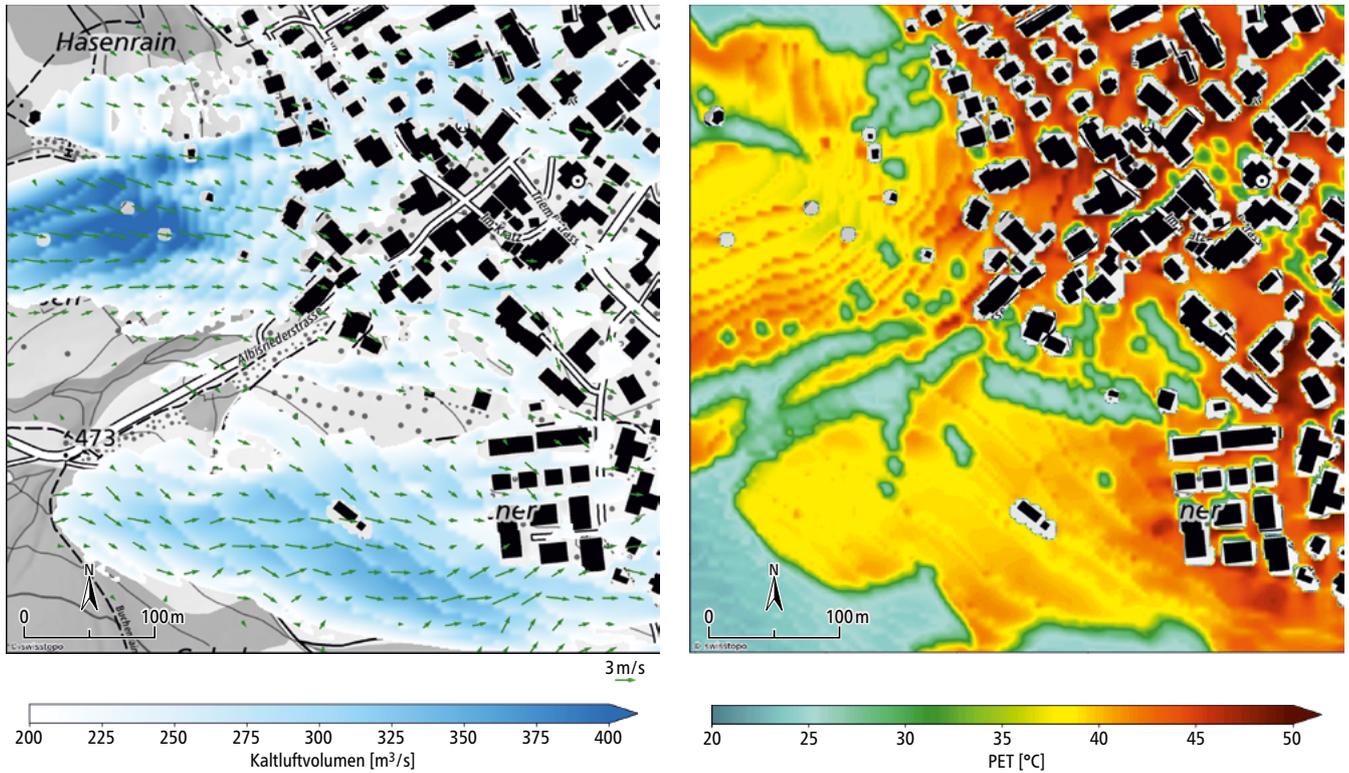


Abb. 5: Beispiele numerischer Stadtklima-Simulationen von Kaltluft (links) und gefühlter Temperatur (rechts) in Zürich Albisrieden

- Entsiegelung, Dachbegrünung und Albedo von Gebäuden und Strassen (Zürich West, Zürich Luchswiesen)
- Offenen Wasserflächen (Zürich Luchswiesen)
- Form und Orientierung von Gebäuden (Zürich Leimbach)

auf stadtklimarelevante Grössen wie Windgeschwindigkeit, Kaltluft-Volumenstrom oder gefühlte Temperatur. Dabei konnte

aufgezeigt werden, dass vor allem Kombinationen von Massnahmen das Stadtklima positiv beeinflussen, aber das häufig auch ungewollte Effekte auftreten. So führt zum Beispiel eine Erhöhung der Albedo zu kühleren Oberflächen, häufig jedoch auch zu höheren gefühlten Temperaturen. Der Einfluss von baulichen Massnahmen kann ausserdem weit über das Gebiet der Bauparzelle hinausreichen.

5 Geostatistische Stadtklima-Simulationen

Neben numerischen Stadtklima-Simulationen wurden in Bern auch geostatistische Landnutzungsregressions-Modelle berechnet. Für diese Modellierung werden die Punktdaten aus dem Temperaturmessnetz (Abb. 1) in einem Regressionsmodell mit Landnutzungsdaten erklärt, woraus dann flächige Temperaturkarten entstehen. Mit dieser Methodik gelangt man somit vom Punkt in die Fläche. Dank der hervorragenden Datengrundlage in Bern konnten die Lufttemperaturen aller Sommernächte von 2007 bis 2022 in einer räumlichen Auflösung von 50m berechnet werden (Abb. 6A)¹¹.

Für stadtklimatische Analysen kann das Modell bis auf einen Meter aufgelöst werden. Dies wurde in Bern im Rahmen des Pro-

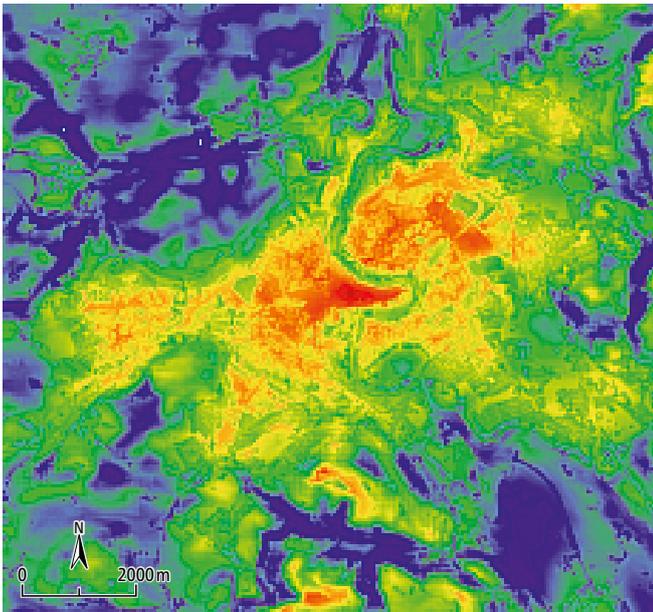
jektes «Waisenhausplatz» für die Altstadt gemacht (Tab. 1). Somit können einerseits die 1 m Temperatur der Altstadt der letzten 16 Jahre analysiert (Abb. 6B), andererseits auch Veränderungen der Landnutzung simuliert werden (Abb. 6C), wobei dies in der Berner Altstadt vor allem Veränderungen der Vegetationshöhe (Anzahl und Mächtigkeit der Bäume) betrifft. Im hier gezeigten Beispiel wurde der Einfluss unterschiedlicher Vegetationshöhen (2013 und 2021) auf die nächtliche Temperatur während einer warmen Nacht (13.07.2022) analysiert, wobei die berechneten Differenzen mit -0.1 bis $+0.1$ K gering ausfielen (Abb. 6C).

Synthese

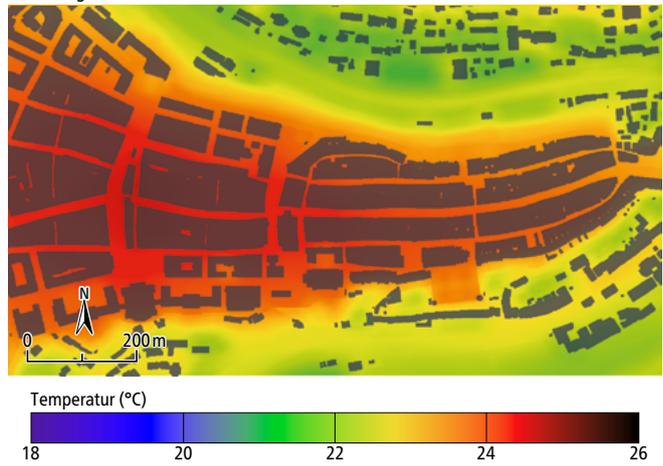
In diesem abschliessenden Kapitel werden Vor- und Nachteile und jeweilige Anwendungsbereiche der vorgestellten Methoden diskutiert und zusammengefasst. Bei den Messtechniken fällt auf, dass je nach Methode unterschiedliche Ergebnisse erreicht wurden. So waren die gemessenen Temperaturdifferenzen bei den Lufttemperaturen gering bis nicht erfassbar, während bei denselben Projekten deutliche Differenzen bei den Oberflächentemperaturen gemessen wurden. Es ist wichtig zu erwähnen, dass diese Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Während Oberflächentemperaturen das Potential für Stadthitze aufzeigen, sind die Lufttemperaturen deren Manifestation. Jedoch wird die Lufttemperatur durch viele weitere Faktoren beeinflusst: Schon nur eine schwache Windströmung kann die Lufttemperaturen von zwei sich nahestehenden Messstationen ausgleichen. Beim Monitoring von Lufttemperaturen ist die Planung somit zentral. Es braucht eine lange Messreihe (mindestens einen Sommer vorher/nachher) und vergleichbare Tests und Referenzstationen, die sich während der Messkampagne möglichst

A Bern 50m



B Nesting Altstadt 1 m



C Temperaturdifferenzen Altstadt 1 m

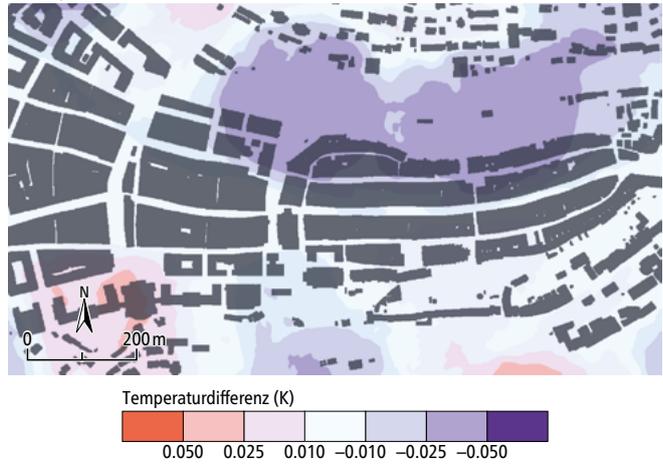


Abb. 6: Geostatistische Modellierung der Lufttemperatur in der Nacht vom 13. Juli 2022 der gesamten Stadt Bern in einer 50m Auflösung (A), und der Altstadt in einer 1 m Auflösung (B), sowie die modellierte Differenz der Lufttemperatur, die durch unterschiedliche Vegetationshöhen (2013 und 2021) berechnet wurde (C).

nur durch die Massnahme unterscheiden. Aus den bisherigen Erfahrungen kann zusammengefasst werden, dass sich vorher/nachher Messungen der Lufttemperaturen bei mittelgrossen Massnahmen mit genug langer Planungszeit eignen, während Vergleiche der Oberflächentemperatur auch bei kleinräumigen Massnahmen eher spontan umgesetzt werden können. Der Vergleich mittels Stationsclustern eignet sich wiederum in einer früheren Phase der Planung, um den Wert von bestehenden Anlagen oder möglichen Massnahmen (z. B. Parks, Wälder, Kaltluftschneise) zu eruieren. Auch bei dieser Methodik ist die Wahl der Referenzstation entscheidend.

Oft stellt sich beim Monitoring die Frage, ob nun Modellieren oder Messen angebracht ist. Aus den bisherigen Erfahrungen sind Modellierungen vor allem dann sinnvoll, wenn Veränderungen an der Gebäudestruktur (v.a. Neubau) geplant sind, oder wenn verschiedene Mass-

| Methodik | Vorteile | Nachteile | Anwendungsbereiche |
|---|--|--|--|
| Vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur | <ul style="list-style-type: none"> Direktest möglicher Vergleich | <ul style="list-style-type: none"> Definition Referenzstation Eher kleiner Effekt Längere Planung | <ul style="list-style-type: none"> Mittelgrosse Massnahmen Gute Möglichkeit für Montage |
| Vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur | <ul style="list-style-type: none"> Kommunikativ wertvolle Resultate Einfache Umsetzung Benötigt keine lange Zeitreihe/Planung | <ul style="list-style-type: none"> Hoher personeller Aufwand (Flexibilität) Oberflächentemperatur \neq Lufttemperatur Punktdaten | <ul style="list-style-type: none"> Kommunikation Monitoring von kleinräumigen Massnahmen |
| Vergleiche der Lufttemperatur mit Stationsclustern | <ul style="list-style-type: none"> Geringe Kosten Einfach umsetzbar | <ul style="list-style-type: none"> Definition Referenzstation | <ul style="list-style-type: none"> Bestehende Anlagen beurteilen für zukünftige Planung |
| Numerische Stadtklima Simulationen | <ul style="list-style-type: none"> Effekt zahlreicher Massnahmen und deren Kombinationen Räumliche Abdeckung | <ul style="list-style-type: none"> Rechenintensiv Knowhow notwendig Limitierte Anzahl Wettersituationen | <ul style="list-style-type: none"> Bau neuer Gebäude (Kalt-)Luftströme Einfluss auf benachbarte Gebiete |
| Geostatistische Stadtklima Simulationen | <ul style="list-style-type: none"> Geringe Rechenleistung Unterschiedliche Wettersituationen modellierbar | <ul style="list-style-type: none"> Nur Lufttemperatur Messungen nötig | <ul style="list-style-type: none"> Grossskalige Analysen Risiko-Abwägung Historischer Kontext |

Tab. 2: Vor- und Nachteile, sowie mögliche Anwendungsbereiche der vorgestellten Methoden

nahmen getestet werden sollen. Insbesondere bei der Analyse von Kaltluftabflüssen und Ventilation, sowie beim Einfluss auf umliegende Gebiete ist die Verwendung von numerischen Modellen wie PALM zu empfehlen. Damit können verschiedene zeitlich hoch aufgelöste Szenarien berechnet werden, die bei der Entscheidungsfindung wichtige Grundlagen liefern. Steht hingegen die langfristige Planung eines gesamten Quartiers oder einer gesamten Stadt im Fokus, eignen sich geostatistische Modellierungen, da sie ohne grosse Rechenleistung für viele unterschiedliche Szenarien angewendet werden und lange Zeitreihen berechnet werden können, was bei numerischen Model-

lierungen mit (zu) grossem Aufwand verbunden ist. Im Gegensatz zu numerischen Modellierungen benötigen geostatistische Modelle jedoch Messdaten als Input, womit solche Modellierungen auch als Produkt eines Messnetzes angesehen werden können.

Zum Abschluss der Synthese und des Berichtes sind die jeweiligen Vor- und Nachteile (Tab. 1), sowie die Bewertung von Schlüsselfaktoren für die (Aus-)Wahl der unterschiedlichen Methoden (Tab. 2) in Tabellenform zusammengefasst, wobei die Einschätzung auf den Erfahrungen der bisherigen Projekte in Bern und Zürich beruht.

| Methodik | Kommunikation | Zeitraum | Abdeckung | Komplexität | Kosten |
|---|---------------|----------|-----------|-------------|--------|
| Vorher/nachher Vergleiche der Lufttemperatur | ☑ ☑ | 🕒 🕒 🕒 | 🏠 | 🔧 (🔧) | 💰 💰 |
| Vorher/nachher Vergleiche der Oberflächentemperatur | ☑ ☑ ☑ | 🕒 🕒 | 🏠 | 🔧 | 💰 💰 |
| Vergleiche der Lufttemperatur mit Stationsclustern | ☑ | 🕒 🕒 🕒 | 🏠 🏠 | 🔧 | 💰 |
| Numerische Stadtklima Simulationen | ☑ ☑ ☑ | 🕒 | 🏠 🏠 🏠 | 🔧 🔧 🔧 | 💰 💰 💰 |
| Geostatistische Stadtklima Simulationen | ☑ ☑ | 🕒 🕒 🕒 | 🏠 🏠 🏠 | 🔧 🔧 | 💰 💰 |

Tab. 3: Einschätzung der vorgestellten Mess- und Modellierungsmethoden betreffend fünf Schlüsselfaktoren im Entscheidungsprozess auf einer Skala von 1 bis 3 (wie wertvoll sind die Ergebnisse für die Kommunikation? Welche zeitliche und räumliche Abdeckung ist möglich? Wie hoch sind Komplexitätsgrad und Kosten?)



Abb. 7: Umgestaltungsmassnahmen (von links nach rechts): BFH Marzili/Kies, Bachmätteli/Ruderalbepflanzung, Turbinenplatz/Nebelwolke, Rosalia-Wenger-Platz/Kies und Microforest

Referenzen

- Schoetter, R., Cattiaux, J. and Douville, H. (2015). Changes of western European heat wave characteristics projected by the CMIP5 ensemble. *Climate Dynamics*, 45, 1601-1616.
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, S., Ma, W., Malik, A., Morris, N.B., Nybo, L., Seneviratne, S.I., Vanos, J. and Jay, O. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, 398(10301), 698-708.
- Burger, M. A., Gubler, M. R., Brönnimann, S., Vicedo-Cabrera, A. und Winkel, M. (2022). Berns Westen im (Klima-)Wandel. Wie sich Stadtentwicklung und Klimawandel auf das sommerliche Mikroklima auswirken. Fachbeitrag zu Berner Geographische Mitteilungen 2021.
- MeteoSchweiz (2023). Klimabulletin Sommer 2023. Zürich.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- BAFU (Hrsg.) (2023): Impulse für eine klimaangepasste Schweiz. Erkenntnisse aus 50 Projekten aus der zweiten Phase des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel. Bundesamt für Umwelt. Bern
- Gubler, M., Christen, A., Remund, J. and Brönnimann, S. (2021). Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban climate*, 37, 100817.
- <https://www.fairness-ca20108.eu/low-cost-radiation-shield-video-guide/>
- Tinner, N. (2023): Diurnal Cycle of Land Surface Temperatures in Bern. Bachelor Thesis. University of Bern (26p)
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C. et al., (2020). Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1335–1372.
- Burger, M., Gubler, M. and Brönnimann, S. (2024). High-resolution dataset of nocturnal air temperatures in Bern, Switzerland (2007–2022). *Geoscience Data Journal*.

Abbildungen

Titelbild: Referenz- und Teststation beim Rosalia-Wenger-Platz. Moritz Burger

Abbildung B1: Gubler, M., Christen, A., Remund, J. and Brönnimann, S. (2021). Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban climate*, 37, 100817.

Abbildung B2: Burger, M. und Gubler, M. (2021). Mikroklimatische Aufwertung Bümplizstrasse/Bachmätteli. Monitoring von Luft- und Oberflächentemperaturen im Rahmen der Umgestaltung der Fussgängerzone 2021/2022. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.

Abbildung B3: Burger, M., Tinner, N. und Vogt, M. (2023): Auwertung des Rosalia-Wenger-Platzes. Ergebnisse des mikroklimatischen Monitorings während der Sommer 2021 bis 2023. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.

Abb. 7 (von links nach rechts): Hofmann Landschaftsarchitekten; Moritz Burger; Tabea Vogel; Moritz Burger