

Zusammenfassung basierend auf dem Schlussbericht «Wissenschaftliche Begleitung des Projektes «Alto Zürrus»» vom Dezember 2023

Author

Dr. Ivo Suter

Datum

14.06.2024

ALTO ZÜRRUS – RESULTATE DER WISSENSCHAFTLICHEN BEGLEITUNG



Fog-Ringe auf dem Turbinenplatz. Foto links, grosser Fog-Ring 1, von Tabea Vogel. Oben: Fog-Ring 2, unten: Fog-Ring 3.

Im Rahmen des Projektes «Alto Zürrus» wurde im Sommer 2022 auf dem Turbinenplatz in Zürich eine künstliche Nebelanlage installiert, die im Sommer 2023 um drei kleinere Elemente erweitert wurde. Die Anlage sollte an heissen Sommertagen die Temperatur auf dem Platz mittels Verdunstungskühlung senken. Um diesen Effekt zu evaluieren und gleichzeitig mögliche Auswirkungen auf die lokale Luftqualität zu prüfen, wurde das Projekt in beiden Jahren vom Zentrum für Aviatik der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften begleitet. Dabei wurden mittels Messungen vor Ort und darauf basierenden Computersimulationen folgende Fragen beantwortet:

1. Wie wirkt sich der Sprühnebel auf die Lufttemperatur aus?
2. Wie wirkt sich der Sprühnebel auf die gefühlte Temperatur aus?
3. Wie wirkt sich der Sprühnebel auf die lokale Luftqualität aus?

Kontakt

Bei Fragen zu den Messungen

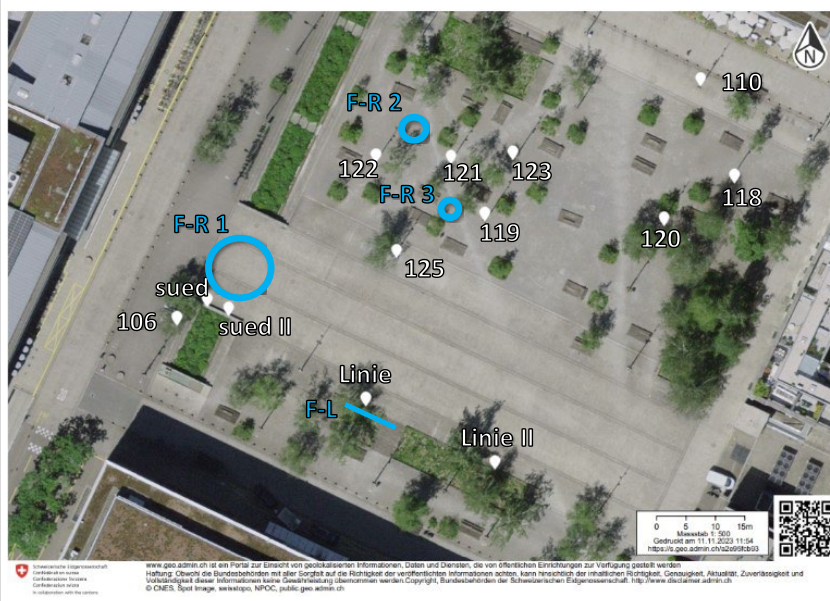
Saskia Drossaart van Dusseldorp
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Forschungsgruppe für Meteorologie, Umwelt und Aviatik
Zentrum für Aviatik ZHAW
saskia.drossaartvandusseldorp@zhaw.ch

Bei Fragen zu den Simulationen

Dr. Ivo Suter
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Forschungsgruppe für Meteorologie, Umwelt und Aviatik
Zentrum für Aviatik ZHAW
ivo.suter@zhaw.ch

Projektübersicht

Hitzesommer werden in der Schweiz häufiger und sechs der zehn heissesten Sommer (2015, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023) seit Messbeginn 1864 liegen in der letzten Dekade. Auch die Anzahl Hitzetage mit Tagesspitzen über 30 °C nehmen zu [1]. Unter diesen Voraussetzungen wurde das Vernebeln und Verdunsten von Wasser auf dem Turbinenplatz als mögliche lokale Abkühlungsmassnahme untersucht. Das Versprühen feinsten Wassertröpfchen in warmer Umgebungsluft, hat zur Folge, dass die Tröpfchen sehr rasch verdunsten. Dieser Vorgang entzieht der Umgebung Wärme und kühlt die Luft ab. Das Verdunsten von einem Liter Wasser würde dabei ein Zimmer von 20 m² um über 30 °C abkühlen. Der Effekt im Freien fällt kleiner aus, da die Luft durch den Wind kontinuierlich ausgetauscht wird. Beim Verdunsten gelangen auch Feststoffe und gelöste Salze vom Wasser in die Luft [2]. Andererseits können Tröpfchen, die nicht verdunsten und zu Boden fallen, auch bereits vorhandene Luftschadstoffe aus der Luft «auswaschen» [3].



■ Vier Elemente wurden installiert (Titelbild und Abbildung 1):

- **Fog-Ring 1:** 9m Durchmesser auf 5 m Höhe, 180 Düsen
- **Fog-Ring 2:** 3.3 m Durchmesser auf 3.1 m Höhe, 48 Düsen
- **Fog-Ring 3:** 1.6 m Durchmesser auf 2.9 m Höhe, 20 Düsen
- **Fog-Linie:** 7 m Länge auf 0.3 m Höhe entlang einer Sitzbank, 50 Düsen

■ Der Wasserverbrauch beträgt in etwa 2.6 Liter Wasser pro Düse pro Stunde, während die Anlage in Betrieb ist:

- Trinkwasser, entkalkt, UV-behandelt

Die Anlage war zwischen 07:00 und 23:00 in Betrieb, sofern die Umgebungstemperatur den Schwellenwert von 22 °C überschritt und die relative Luftfeuchtigkeit unter 75% lag.

Abb 1. Luftbild des Turbinenplatzes (Quelle: ©swisstopo) mit den Anlagen (in Blau) und Messstandorten (in Weiss). Zeigt die Messstandorte in der Saison 2023. Sonneneinstrahlung, Wind und Feinstaubbelastung wurde nicht an allen Standorten gemessen.

Messungen

Um die Kühlwirkung der künstlichen Nebelwolke und deren räumliche Ausdehnung auszuwerten, wurden an verschiedenen Messtandorten während beider Saisons folgende Grössen gemessen:

▪ Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung:

- Kontinuierliche Messung während der Saison 2023 an allen in Abb. 1 gekennzeichneten Messtandorten.
- Kontinuierliche Messungen während beider Saisons an den Standorten *106, sued, 125, 123* und *110*. (Weitere Messtandorte der Saison 2022 sind nicht gezeigt).
- Kontrollmessung am Standort *110*.
- Die Daten wurden gemäss WMO-Standard alle 10 Minuten erhoben.

▪ Wind:

- Kontinuierliche Messung von Windgeschwindigkeit und -richtung an wechselnden Standorten

Bei der Vernebelung von Wasser kann es als Folge der Freisetzung mineralischer Rückstände und/oder der Wechselwirkung des Wasserdampfs mit der Umgebungsluft zu einer Veränderung der lokalen Feinstaubbelastung kommen. Im Falle von mikrobiellen Verunreinigungen in Wasser oder wasserführenden Teilen der Vernebelungsanlage, besteht zudem die Gefahr der Freisetzung von Keimen. Um mögliche Gesundheitsrisiken für Passanten und Anwohner auszuschliessen, wurde deshalb die Feinstaub- und Luftkeimbelastung rund um die Anlage untersucht.

▪ Feinstaub:

- Kontinuierliche Messungen an verschiedenen Standorten auf dem Turbinenplatz während beider Saisons.
- Gemessen wurde die Gesamtoberfläche der lungengängigen Feinstaubpartikeln (Durchmesser < 300 nm) pro Luftvolumen (Lung Deposited Surface Area LDSA). Diese gilt als guter Indikator für das gesundheitsschädliche Potential der Feinstaubbelastung [4,5].

▪ Luftkeime:

- Mehrere Stichprobenmessungen in unmittelbarer Nähe der künstlichen Nebelwolke und der Hintergrundbelastung auf dem Turbinenplatz während der Saison 2022.
- Die Stichprobennahme und -auswertung wurde vom Institut für Chemie und Biotechnologie der ZHAW durchgeführt.
- Die Luftkeimmessungen wurden begleitend zur Überprüfung der Wasserqualität durch das externe Labor LeWoH durchgeführt.

Zusätzlich zu den oben erwähnten Parametern wurde aufgezeichnet, zu welchen Zeiten die Wolke in oder ausser Betrieb war.

Betriebszeiten

- Während der Saison 2022 war die Anlage rund 995 Stunden in Betrieb, wobei total etwa 465'000 Liter Wasser vernebelt wurden. Dies entspricht in etwa 40% des jährlichen Wasserverbrauchs eines städtischen Brunnens (~1'180'000 Liter Wasser pro Jahr).
- Während der Saison 2023 war die Anlage mit den bodennahen Erweiterungen rund 1100 Stunden in Betrieb, wobei total etwa 855'900 Liter Wasser vernebelt wurden. Dies entspricht in etwa 72% des jährlichen Wasserverbrauchs eines städtischen Brunnens.

Kühleffekt

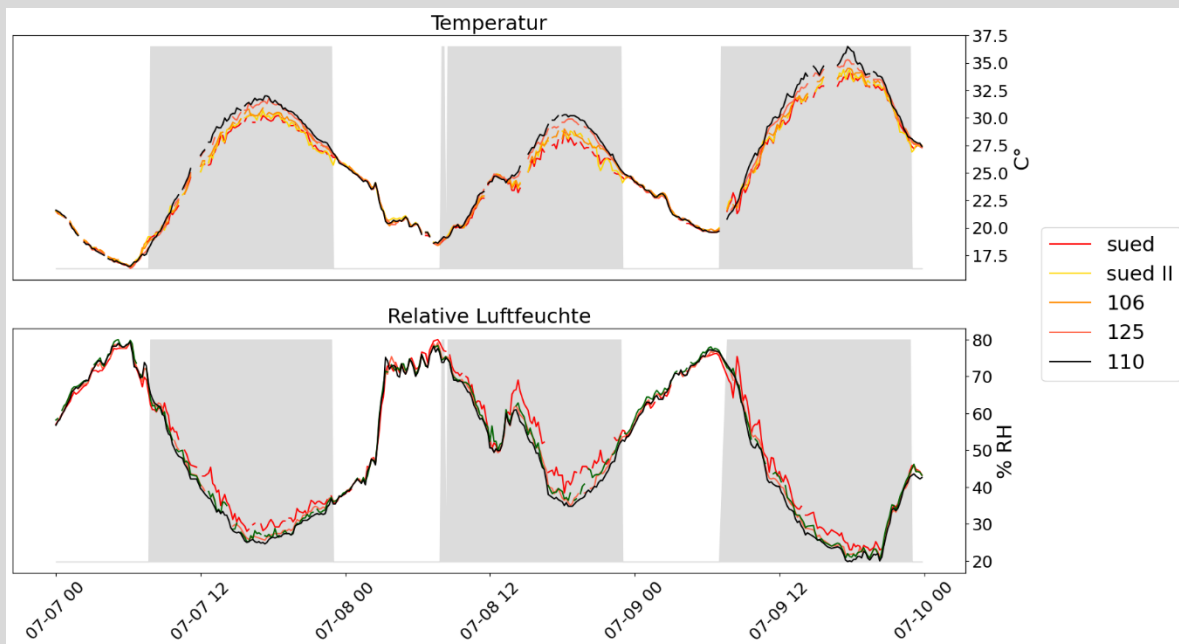


Abb 2. Beispiel Temperatur und relative Luftfeuchte über drei Hitzetage im Juli 2023, gemessen an verschiedenen Standorten. Grau hinterlegt sind die Betriebszeiten der Wolke.

- Bei Messtandorten nahe des Fog-Ring 1 wurden während der Betriebszeiten tiefere Temperaturen und höhere Luftfeuchtigkeit gemessen als an weiter entfernten Messtandorten. Ausserhalb der Betriebszeiten ist die Lufttemperatur auf dem gesamten Platz sehr ähnlich, wie in Abb. 2 erkennbar ist.
- Während den Betriebszeiten wurde an Messtandorten nahe dem Fog-Ring 1 eine Temperaturabnahme um bis zu -2.5 °C gemessen, wobei der mittlere Kühleffekt über beide Saisons bei etwa -0.7 °C lag.
- Im Vergleich mit anderen, deutlich invasiveren Massnahmen ohne Schattenwurf, wie beispielweise Entsiegelung oder Aufhellung der Oberfläche, schneidet die künstliche Nebelwolke damit gleich gut oder besser ab, was den kühlenden Effekt betrifft [6].
- Es zeigt sich eine Tendenz zu stärkerer Abkühlung bei höheren Temperaturen und einer damit einhergehenden tieferen Luftfeuchtigkeit (nicht gezeigt).
- Die Gesamtintensität der Sonneneinstrahlung hat keinen nennenswerten Einfluss auf die kühlende Wirkung der Wolke, wobei sich aber abbildet, dass der relative Kühleffekt bei lokaler Beschattung grösser ist. Es wird vermutet, dass dies mit den verringerten thermischen Aufwinden bei tieferer Bodentemperatur zu tun hat.
- Eine deutliche Abkühlung der gefühlten Temperatur ist im Abwind der Wolke wahrnehmbar.

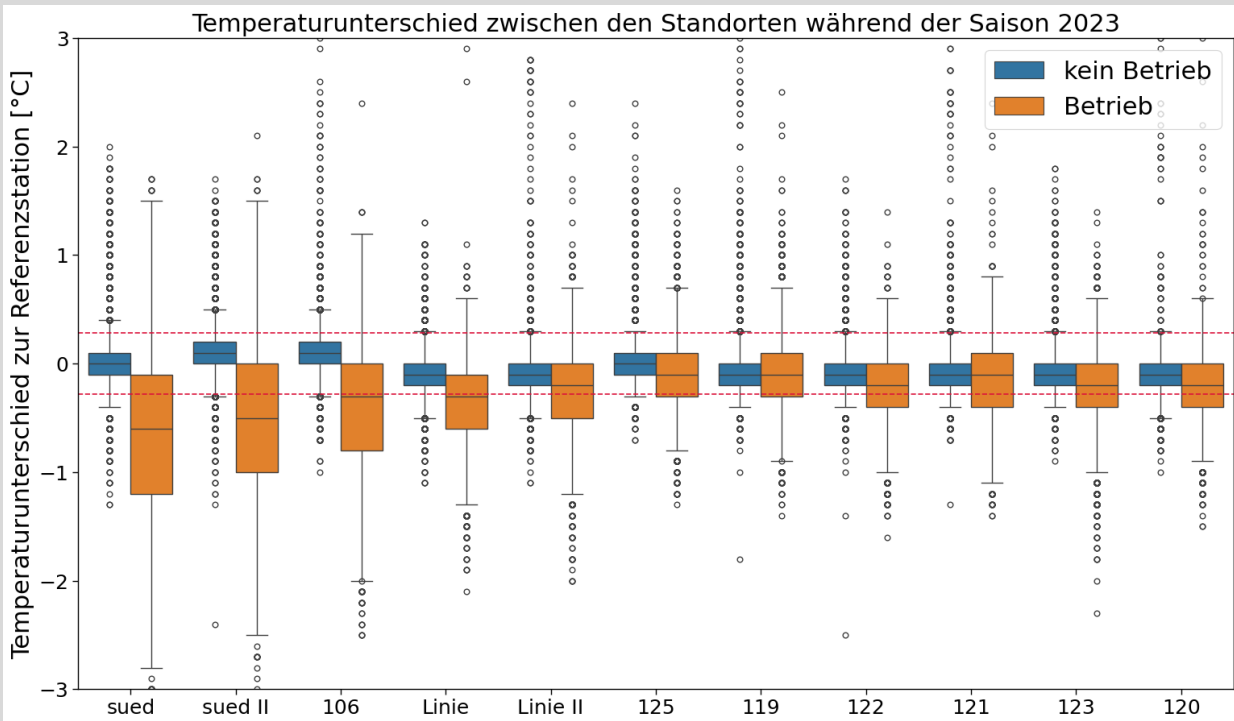
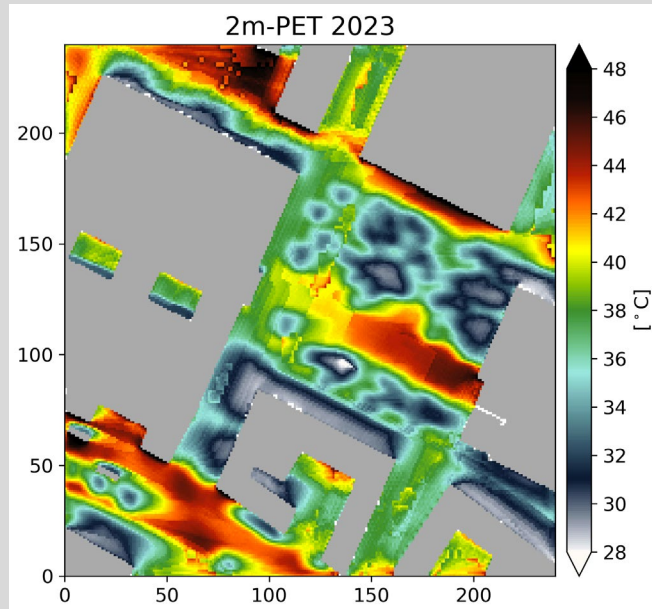


Abb 3. Verteilung der gemessenen Temperaturunterschiede zur Referenztemperatur als Boxplot-Diagramm. Die schwarze horizontale Linie innerhalb der Box zeigt den Median an, die farbige Box den Bereich, indem die mittleren 50% der gemessenen Werte liegen, und die schwarzen Antennen den Maximal- und Minimalwert. Die schwarzen Punkte sind Ausreisser. Die roten Linien markieren den aus der Messgenauigkeit resultierenden Unsicherheitsbereich von ± 0.28 °C. Die Grafik basiert auf den Messungen während der Saison 2023.

- Der Kühleffekt der Fog-Linie konnte nicht einwandfrei (statistisch signifikant) gemessen werden (siehe Abb. 3). Dies wird auf die Anbringungshöhe der Messtation (ca. 2.5 Meter über der Fog-Linie) zurückgeführt. Die gekühlte und somit dichtere Luft verbreitete sich am Boden und nicht in die Höhe, sodass sie von der Messtation nicht eingefangen wurde. Die dadurch verminderten thermischen Aufwinde verstärken diesen Effekt.
- Die beiden kleinen Ringe mit jeweils 48, bzw. 20 Düsen vermochten die Umgebung nicht messbar zu kühlen (siehe Abb. 3). Dies könnte einerseits ebenfalls auf den Höhenunterschied zurückgeführt werden, andererseits auf die deutlich geringere Anzahl Düsen, durch welche weniger Wasser vernebelt wurde und damit der Gesamtkühleffekt geringer war.
- Generell lässt sich sagen, dass der Kühleffekt in der Nähe, und dabei insbesondere im Abwind, des Fog-Ring 1 am stärksten gemessen wurde. In weiterer Entfernung und auch in der Nähe der kleineren Elemente konnte auf der Höhe der Messtationen keine signifikante Veränderung der Lufttemperatur beobachtet werden.

Stadtklimamodell

Die empfundene Wärmebelastung von Menschen basiert nicht nur auf der Lufttemperatur, sondern auch auf anderen physikalischen Grössen der Umwelt, wie z.B. Wind, thermophysiological wirksame Strahlung und Luftfeuchtigkeit. Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist eine Annäherung and diese empfundene Wärmebelastung, die vor allem im Freiraum zur Anwendung kommt und stark von der lokalen Sonneneinstrahlung abhängt. Grossflächig PET zu messen ist aufwendig. Das Lokalklima auf dem Turbinenplatz wurde daher zusätzlich mit Computermodellen simuliert. Beim verwendeten PALM [7,8] handelt es sich um ein sogenanntes Large-Eddy Simulationsmodell. Damit wird das explizite, hochaufgelöste Modellieren von turbulenten Strömungen auf Stadtgebiet ermöglicht. Dies ist insofern wichtig, weil turbulente Strömungsvorgänge in der Stadt allgegenwärtig sind und die lokalen Strömungen durch thermische Effekte wiedergegeben werden können. PALM berechnet zudem auch die Oberflächenenergiebilanzen und berücksichtigt dabei Strahlung, Wärmetransport und Wärmespeicherung, sowie Vegetation.



- PET auf Strassenniveau (Abbildung 4) ist relevant für das Wohlbefinden der Passanten
- Das Modell erlaubt ein von anderen Einflussfaktoren unabhängigen Vergleich der Temperatur- und Feuchteverteilung auf dem Turbinenplatz mit und ohne Massnahme.
- Die gefühlte Temperatur PET variiert viel stärker als die Lufttemperatur auf dem ganzen Platz, mit kühleren Bereichen vor allem auf der Schattenseite (oben, Norden) von Gebäuden und unter Bäumen.
- Die PET bei der Fog-Linie ist durch die Beschattung und Verdunstung um mehr als 10 °C kälter als über offenen Asphaltflächen.

Abb 4. Simulierte gemittelte physiologisch äquivalente Temperatur (PET) auf 2 m Höhe am Nachmittag; entsprechend dem Aufbau 2023. Die grauen Bereiche sind die Gebäude um den Turbinenplatz. Die Vegetation ist nicht dargestellt.

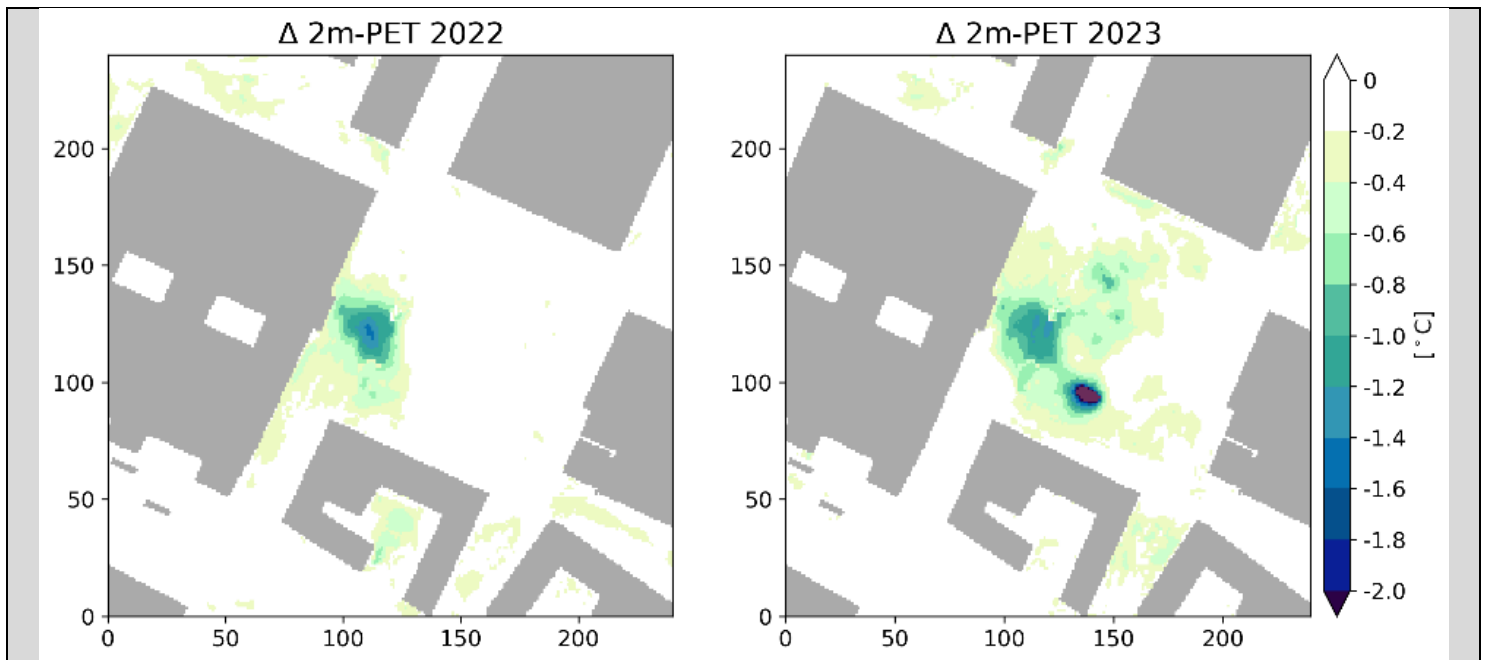


Abb 5. Simulierter gemittelter Unterschied (Δ) in PET auf 2 m Höhe am Nachmittag: *mit* minus *ohne Massnahme*. Das linke Bild entspricht dem Aufbau 2022, das rechte demjenigen vom 2023. Die grauen Bereiche sind die Gebäude um den Turbinenplatz. Die Vegetation ist nicht dargestellt.

- Der isolierte Effekt der Verdunstung der Wolke ist in der Darstellung der Temperaturdifferenzen (Abbildung 5) klar zu sehen und entspricht den Messungen weitgehend:
- Temperaturreduktionen bei *sued* betragen tagsüber bis zu 1 °C und am Abend bis zu 2 °C.
- am Messstandort *Linie* ist die Temperaturreduktion meist < 0.5°C
- Die Fog-Linie zeigt die klarste Abkühlung auf Strassenniveau.
- Der grosse Fog-Ring 1 zeigt eine grossflächige Abkühlung um bis zu 1 °C.
- Die räumliche Ausdehnung des spürbaren Effektes beschränkt sich jedoch auf wenige zehn Meter.
- Die Abnahme der PET bestätigt, dass die erhöhte Luftfeuchtigkeit das Wohlbefinden in viel geringerem Masse beeinflusst als die Temperaturreduktion.

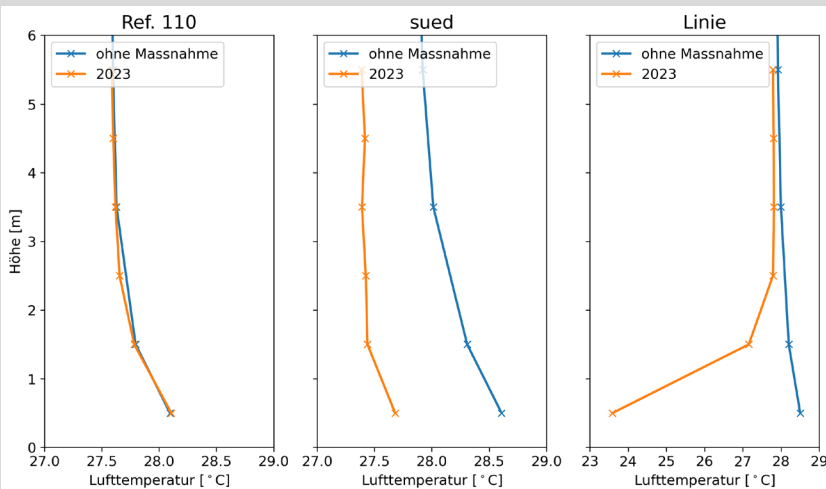


Abb 6. Vertikalprofile der gemittelten Nachmittagstemperaturen von Modellsimulationen 2023 und ohne Massnahme mit den Messungen an drei Messstandorten 110, sued und Linie.

- Am Referenzstandort ist kein Effekt der Wolke zu beobachten (Abbildung 6).
- An der Station *sued* ist die Temperatur auf der gesamten Höhe reduziert.
- Das Temperaturprofil am Standort *Linie* zeigt eine starke Abnahme in Bodennähe. Bei der Sitzbank ist die Reduktion rund 4 °C, während auf Messhöhe von 3 m kaum ein Signal zu beobachten ist.

Luftqualität

▪ **Feinstaubbelastung:**

Es wurde im Zusammenhang mit der Wasservernebelung eine vorübergehende Erhöhung der Gesamtoberfläche der lungengängigen Feinstaubpartikeln beobachtet. Insbesondere in der unmittelbaren Nähe des Fog-Ring 1 wurden eine erhöhte Feinstaubbelastung gemessen, die etwa derjenigen einer befahrenen Strasse in Zürich entspricht. Bei zunehmender Entfernung und auch nahe der kleineren Ringelemente wurden leicht erhöhte Konzentrationen festgestellt, die sich aber nicht massgeblich von den täglichen Schwankungen der Hintergrundkonzentration auf dem Turbinenplatz unterscheiden.

Bei den Partikeln handelt es sich höchst wahrscheinlich um mineralische Rückstände, die trotz Aufbereitung und Enthärtung im Trinkwassers zurückbleiben und bei dessen Verdunstung als Partikel in die Luft gelangen. Es ist nicht davon auszugehen, dass durch diese Partikel ein Gesundheitsrisiko für Anwohner:innen oder Passant:innen ausgeht.

▪ **Luftkeimbelastung**

Es wurden bei keiner der Stichproben Anhaltspunkte für eine erhöhte Luftkeimbelastung gefunden. Dies deckt sich mit den Wasserqualitätsmessungen des externen Labors LeWoH, die keine Verunreinigungen feststellen konnten.

Das Projekt von Grün Stadt Zürich erlaubte es die Auswirkung einer Sprühnebelanlage auf das lokale Klima und die Luftqualität über längere Zeit und in verschiedenen Konstellationen zu beobachten. Basierend auf den Messungen konnte die kühlende Wirkung parametrisiert und in einem Stadtklimamodell integriert werden, sodass auch die Wirkung auf die gefühlte Temperatur (PET) räumlich analysiert werden konnte. Die Erkenntnisse aus diesem Pilotprojekt erlauben zukünftig eine Abschätzung der Eignung von künstlichem Nebel als hitzemindernde Massnahme für verschiedenste Verhältnisse und können so eine informierte Planung unterstützen.

Fazit:

- Die Abkühlung der Luft durch die künstlichen Nebelwolken beträgt meist weniger als 1 °C und ist räumlich beschränkt.
- Sprühnebel führen zu ähnlicher oder stärkerer Abkühlung der Luft als andere Massnahmen ohne Schattenwurf [6], z.B. als Entsiegelung oder Aufhellung der Oberflächen
- Modellsimulationen zeigen die räumliche Verteilung des Kühleffektes auf und bestätigen, dass Massnahmen in Bodennähe die Temperatur stark senken können, obwohl es schwierig ist, dies zu messen. Ausserdem können Modelle zur Vorhersage des zu erwarteten Effektes dienen.
- Die Empfundene Temperatur (PET) nimmt bei bodennahen Massnahmen lokal um über 4 °C ab, die zusätzliche Feuchte führt nicht dazu, dass Temperaturen als wärmer empfunden werden.
- Es wurden keine Hinweise gefunden, dass sich die Luftqualität durch Vernebeln des behandelten Trinkwassers massgeblich verändert.

Quellen

- [1] MeteoSchweiz, Klimabulletin Sommer 2023, Zürich, 2023.
- [2] W. L. Knight, M. P. Fraser, und P. Herckes, „Impact of Misting Systems on Local Particulate Matter (PM) Levels“, *Aerosol Air Qual. Res.*, Bd. 21, Nr. 5, S. 200431, 2021, doi: 10.4209/aaqr.200431.
- [3] D. Pollock und J. Organiscak, „Airborne Dust Capture and Induced Airflow of Various Spray Nozzle Designs“, *Aerosol Sci. Technol.*, Bd. 41, Nr. 7, S. 711–720, Juni 2007, doi: 10.1080/02786820701408517.
- [4] T. Lepistö, H. Kuuluvainen, P. Juuti, A. Järvinen, A. Arffman, und T. Rönkkö, „Measurement of the human respiratory tract deposited surface area of particles with an electrical low pressure impactor“, *Aerosol Sci. Technol.*, Bd. 54, Nr. 8, S. 958–971, Aug. 2020, doi: 10.1080/02786826.2020.1745141.
- [5] O. Schmid und T. Stoeger, „Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung“, *J. Aerosol Sci.*, Bd. 99, S. 133–143, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jaerosci.2015.12.006.
- [6] 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
- [7] B. Maronga *u. a.*, „The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives“, *Geosci. Model Dev.*, Bd. 8, Nr. 8, S. 2515–2551, Aug. 2015, doi: 10.5194/gmd-8-2515-2015.
- [8] J. Resler *u. a.*, „PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model“, *Geosci. Model Dev.*, Bd. 10, Nr. 10, S. 3635–3659, Okt. 2017, doi: 10.5194/gmd-10-3635-2017