Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abteilung Luft

Monitoring

Marius Egli, Felix Baum

Stadtklima-Messungen: Ausgewählte Resultate Sommer 2019

9. Januar 2020

Inhalt

1. Ausgangslage **3**

2. Ziele **3**

3. Messmittel **4**
3.1. Temperatur und Luftfeuchte 4
3.2. Wind 5

4. Witterung Sommer 2019 **8**

5. Resultate **9**
5.1. Hitzetage und Tropennächte in der Stadt und im Umland 9
5.2. Vergleich ausgewählter Stationspaare während Hitzeperiode(n) 12
5.2.1. Schlieren / Stadt - Land 12
5.2.2. Zürich Oerlikon / Innenhöfe 13
5.2.3. Zürichsee / Versiegelungsgrad (1) 14
5.2.4. Friedhof Sihlfeld – Hardplatz / Versiegelungsgrad (2) 15
5.2.5. Uster 16
5.3. Transekte 17
5.4. Verifikation Klimaanalyse-Model 20
5.4.1. Einleitung 20
5.4.2. Temperatur 20
5.4.3. Wind 22

6. Fazit und Ausblick **24**

7. Abbildungsverzeichnis **26**

8. Tabellenverzeichnis **27**

1. Ausgangslage

Die Auswirkungen des Klimawandels sind während Hitzeperioden in Stadtgebieten noch intensiver spürbar, da sich städtische Gebiete im Vergleich zum Umland stärker erwärmen. Die Auswirkungen dieser städtischen Wärmeinsel werden durch das Bevölkerungswachstum und die zunehmende Verdichtung in Städten und Agglomerationen weiter verstärkt. Die Änderung der Durchlüftungssituation durch neue städtebauliche Vorhaben wirkt sich zudem auf die Wärmeverteilung in der Stadt aus. Die Baudirektion des Kantons Zürichs hat einen Massnahmenplan zur Anpassung an den Klimawandel erarbeitet. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) hat zur Unterstützung der klimaangepassten Raumplanung Klimaanalysekarten für Hitzesituationen erarbeitet (weiterführende Informationen unter www.klima.zh.ch). Um diese Aktivitäten durch Messungen zu unterstützen, betreibt das AWEL im Kanton Zürich ein Sensormessnetz für die Messung von Lufttemperatur und –feuchte. An ausgesuchten Messstellen werden zudem Windmessungen durchgeführt.

2. Ziele

Damit Lokalklima und Klimawandel in der Raumplanung und Stadtentwicklung stärker berücksichtigt werden, sollen diese Messungen die Kommunikation unterstützen und Raumplaner, Architekten sowie die allgemeine Öffentlichkeit für das Thema Stadtklima sensibilisieren.

Im Einzelnen werden folgende Ziele verfolgt:

Plausibilisierung / Verifikation Klimaanalyse-Modell:
Überprüfung der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur während Hitzeperioden anhand von Messwerten.

Ergänzung zum Klimaanalyse-Modell:
Es werden unter anderem Extremwerte für spezielle Situationen gemessen, die mit den Klimakarten aufgrund der Mittelung über 25m x 25m nicht abgebildet werden können. Damit wird die Bandbreite der realen Bedingungen besser aufgezeigt.

Verbesserung der Grundlagen zur Wirkungsbeurteilung von Massnahmen:
Es besteht die Möglichkeit zu mehreren Zeitpunkten am gleichen Standort zu messen, so dass die Wirkung von baulichen Veränderungen oder gestalterischen Massnahmen auf das Lokalklima ausgewiesen werden kann (Vorher-Nachher-Vergleich). Dies verbessert die Entscheidungsgrundlage für lokalklima-angepasste Stadtentwicklung. Weiter besteht die Möglichkeit gleichzeitig an mehreren Orten zu messen, um die Datengrundlage für Vergleiche zwischen unterschiedlichen räumlichen Situationen (z. B. mit / ohne Kaltluftstrom, schattige / besonnte Lage) und Oberflächen (z. B. versiegelte bzw. begrünte Oberfläche) zu verbessern. Die «Massnahmenperspektive» soll berücksichtigt werden, z.B. durch den Vergleich verschieden gestalteter städtebaulicher Situationen (z.B. Plätze, Strassenräume, Innenhöfe, Pausenplätze).

Kommunikation:
Die Kommunikation von Messwerten, die für die Bevölkerung und Planer relevant sind (z.B. Extremwerte Hitzebelastung) kann zur Sensibilisierung von Bevölkerung, Planern und Entscheidungsträgern beitragen und zu besser fundierten Entscheidungen führen. Die Messdaten werden der Öffentlichkeit frei zur Verfügung gestellt (www.open-data.swiss)

3. Messmittel

3.1. Temperatur und Luftfeuchte

Die Messgeräte für Lufttemperatur und Luftfeuchte stammen von der Firma Decentlab (www.decentlab.com / Typen SHT21 und Nachfolgemodell SHT35) mit Sensoren von Sensirion. Die Sensoren verfügen über einen passiven (d.h. nicht aktiv mit einem Ventilator belüfteten) Strahlungsschutz (Abbildung 1). Sie kommunizieren über das Long Range Wide Area Network (LoRa WAN) der Swisscom und senden alle 10 Minuten den aktuellen Wert in eine cloudbasierte Datenbank.
Vor Projektbeginn wurden die Sensoren umfangreichen Vergleichsmessungen unterzogen.

Abbildung 1: Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit am Messort Bülach-Süd

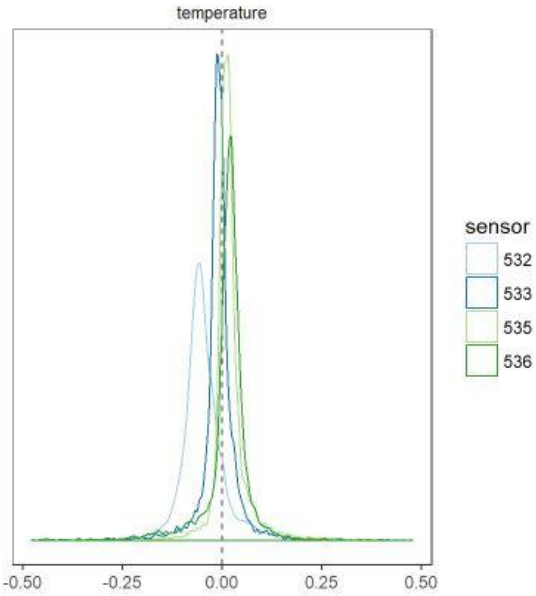

Abbildung 2: Vergleich von 4 Sensirion Temperatur-Feuchte-Sensoren. Die Grafik zeigt die Abweichung der Temperatur [°C] vom Median aller Sensoren. Messperiode: 01.12.2017 – 12.06.2018

Die Sensoren zeigen unter sich nur sehr kleine Abweichungen (Abbildung 2). Vergleicht man die Sensoren mit einem hochwertigen, aktiv belüfteten Messgerät (Thygan, Firma

Meteolabor) halten sich die Unterschiede an beschatteten Standorten im Durchschnitt weiterhin in engen Grenzen, während die (nicht aktiv belüfteten) Sensoren an besonnten Messorten erwartungsgemäss zu hohe Werte liefern (Abbildung 3).

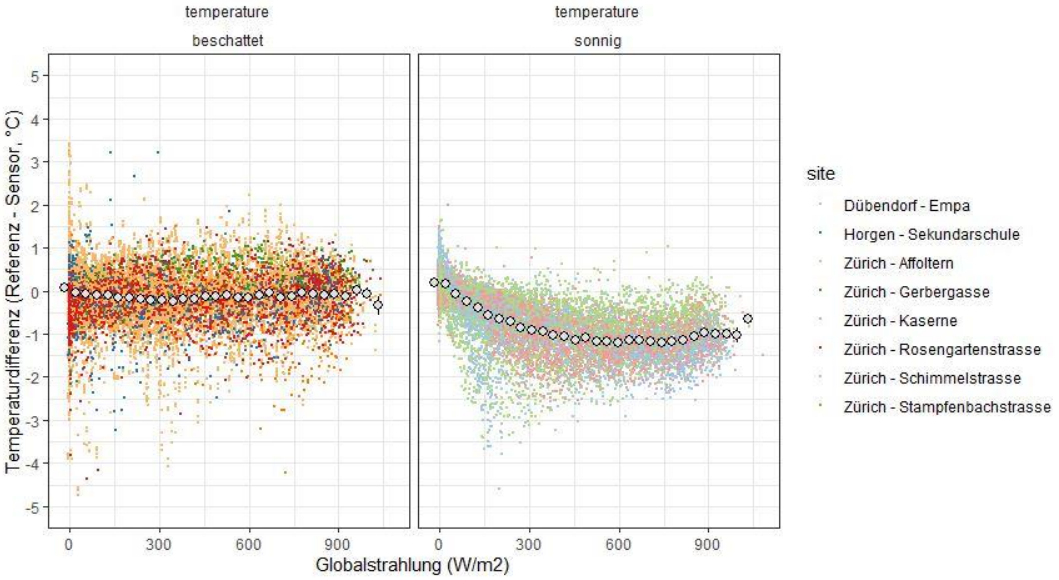

Abbildung 3: Abweichung der Temperatur gegenüber einem aktiv ventilierten Referenzgerät bei Besonnung bzw. Beschattung. Bei beschatteten Standorten Unterschiede im Durchschnitt von < 0.2 °C, Streuung ≤ 1°C. Bei besonnten Standorten im Mittel bis zu > 1 °C, im Einzelfall bis 4 °C.

Zur Beseitigung der kleinen sensorspezifischen Temperaturunterschiede (in der Regel < 0,2 °C) wurden die im Messnetz eingesetzten Temperatur-/Feuchtesensoren zudem mit einem Referenzmessgerät während einigen Tagen kalibriert. Um unterschiedliche Bestrahlungen an verschiedenen Tagen auszuschliessen, wurden hierfür nur die während der Nacht (21 Uhr – 6 Uhr) erhobenen Daten verwendet.

3.2. Wind

Für die Windmessung wurde das Ultraschall-Anemometer ATMOS22 (Firma Decentlab) eingesetzt. Besonders vorteilhaft bei diesen Geräten ist, dass es keine mechanischen Teile gibt. Deshalb funktionieren Ultraschall-Anemometer auch bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten. Die Spezifikationen des Messgerätes sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Windgeschwindigkeit, Bereich	0 bis 30 m/s
Windgeschwindigkeit, Genauigkeit	0,30 m/s oder < 3% (was größer ist)
Windgeschwindigkeit, Auflösung	0,01 m/s
Windrichtung, Bereich	0 bis 359 °
Windrichtung, Auflösung	1°
Windrichtung, Genauigkeit	±3°

Tabelle 1: Spezifikationen Ultraschall-Anemometer ATMOS22

Das Messgerät verfügt über ein Temperaturmodul von guter Qualität. Um die Vergleichbarkeit der Temperaturmesswerte abzusichern, wurden ebenfalls Vergleichsmessungen durchgeführt. Im Hinblick auf die Messungen im Sommer 2020 werden die Temperaturmodule der ATMOS22 analog zu den Temperatursensoren kalibriert.

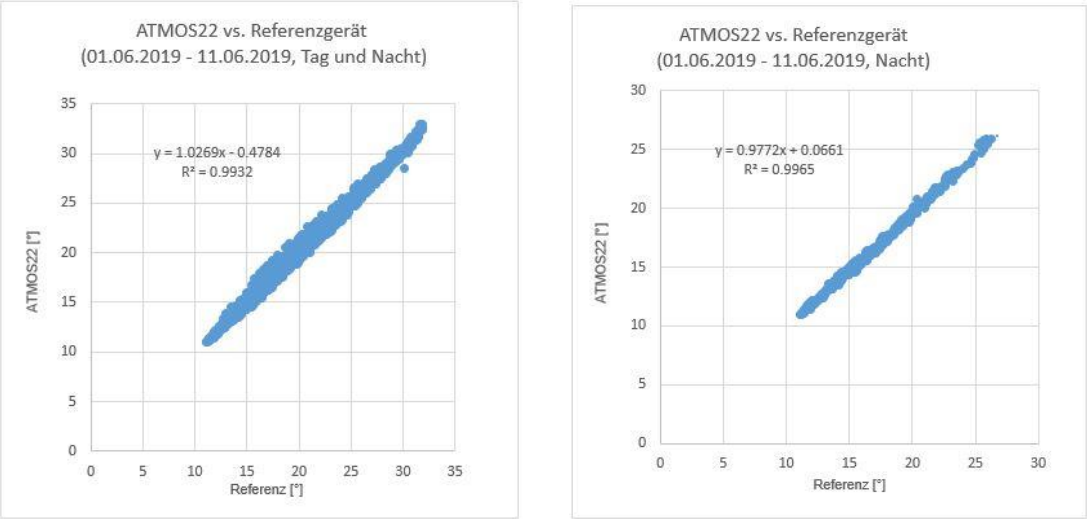

Abbildung 4: Vergleichsmessungen Temperatur ATMOS22 / Referenzgerät. Links mit Strahlungseinfluss, rechts ohne (nur Nacht).

Abbildung 5: Windmessungen mit dem ATMOS22 im Irchelpark (links) und in Zürich Wiedikon, Bertastrasse (rechts).

Das Stadtklima-Messnetz (Abbildung 6) umfasst rund 40 Sensoren, welche in der Regel auf 2 Metern Höhe an Kandelabern, Strassenschild-Masten und dergleichen befestigt werden. Dabei werden für die in Kapitel zwei genannten Ziele geeignete Standorte im ganzen Kanton berücksichtigt. In der Stadt Zürich wird verdichtet, d.h. mit einer erhöhten Anzahl an Sensoren gemessen. Ergänzt wird das Messnetz mit den Stationen von «Meteo-Schweiz» und dem Luftqualitätsmessnetz der Ostschweizer Kantone «Ostluft».

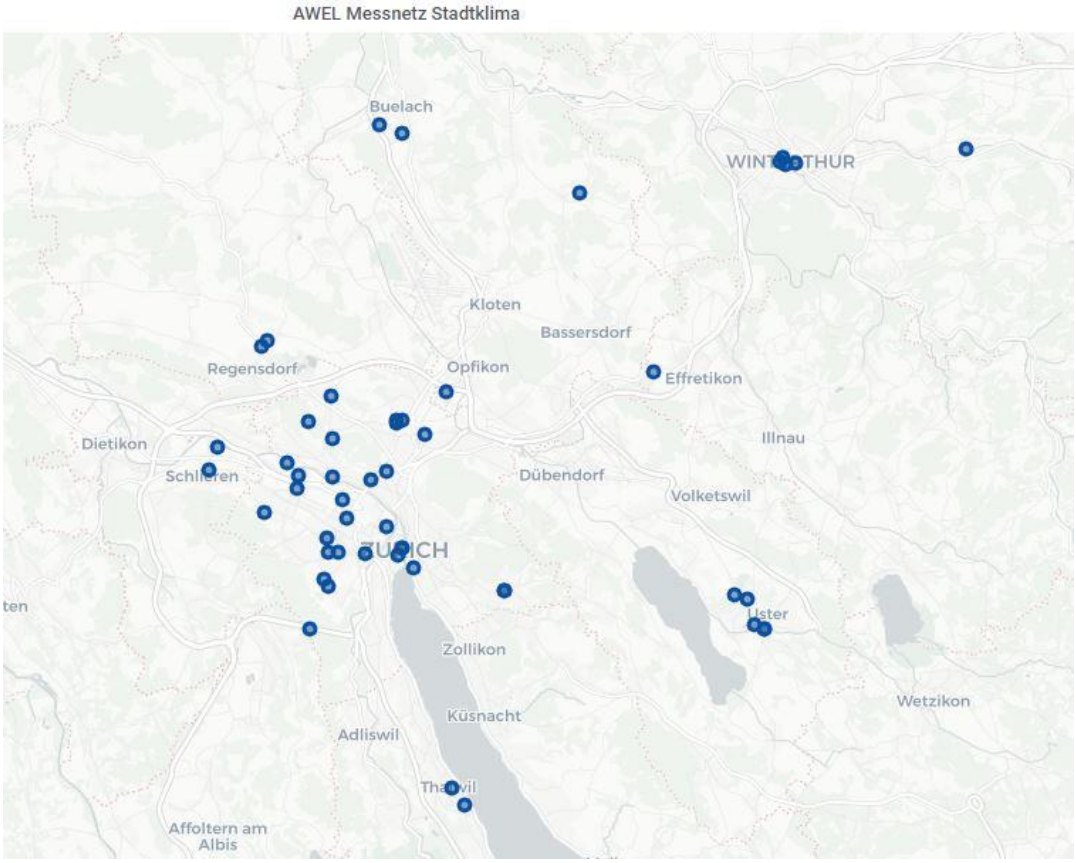

Abbildung 6: AWEL LoRa-Sensormessnetz im Sommer 2019

4. Witterung Sommer 2019

Die Schweiz blickt auf den drittheissesten Sommer seit Messbeginn (1864) zurück. Er ist dabei in guter Gesellschaft mit den letzten ähnlich heissen Sommern 2018, 2017 und 2015. Wesentlich heisser zeigte sich nur der legendäre Hitzesommer 2003 (Klimabulletin Sommer 2019, MeteoSchweiz). Die grösste Hitze entwickelte sich im Juni und Juli mit zwei ausgeprägten Hitzewellen jeweils am Ende des Monats. Der August verlief wechselhaft. Es gab zwar einige Hitzetage (Tageshöchstwert > 30 Grad), wiederholt zogen aber auch Störungszonen durch und sorgten für Regen und Abkühlung. Die Sonnenscheindauer während der Sommermonate war deutlich überdurchschnittlich und schlug in Zürich mit 125% der Norm (1980 – 2010) zu Buche.

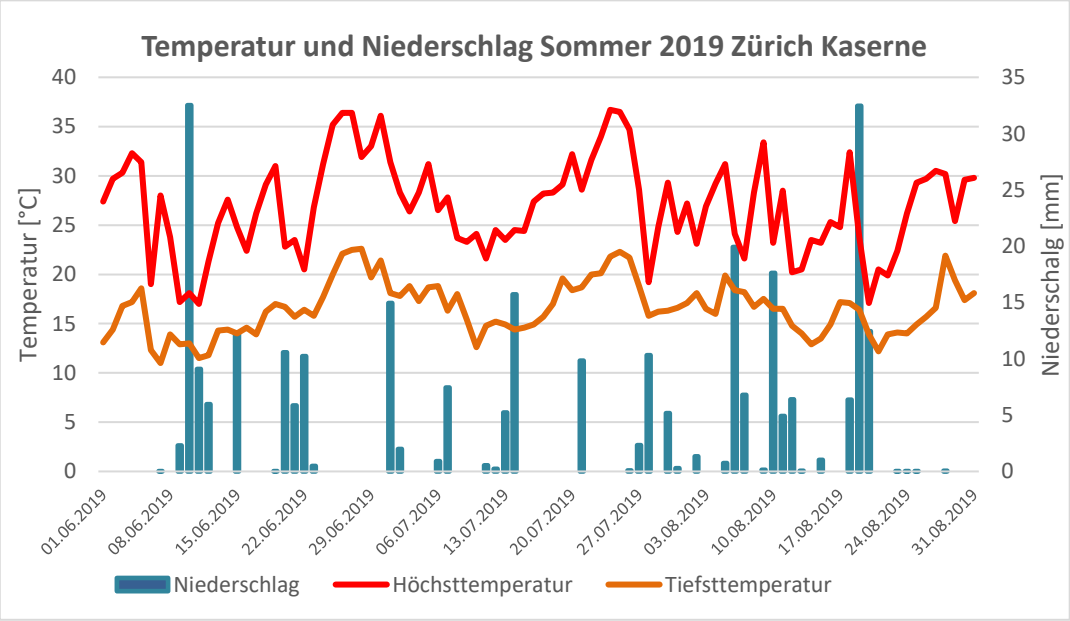

Abbildung 7: Temperaturverlauf und Niederschlag an der Messstation Zürich-Kaserne. Gut zu sehen sind die beiden Hitzewellen Ende Juni und Ende Juli mit Höchsttemperaturen von teilweise über 35 Grad.

5. Resultate

Die folgenden Resultate basieren auf den Daten, welche während der Sommermonate Juni, Juli und August 2019 erhoben wurden. Solange nichts Anderes vermerkt ist, wurden für die Analysen Stundenmittelwerte verwendet. Bei Stationsvergleichen wurden die Paarungen so gewählt, dass Temperaturunterschiede aufgrund von Höhenunterschieden vernachlässigbar sind.

Da einige der Standorte sonnenexponiert sind, erwärmen sich die Sensoren tagsüber um bis zu 4°C (siehe Kapitel 3). Aus diesem Grund ist die Anzahl Hitzetage in *Tabelle 2* mit Vorsicht zu geniessen. Unsere Analysen stützen sich in der Folge auch mehrheitlich auf nächtliche Daten, da diese von sehr guter Qualität sind.

5.1. Hitzetage und Tropennächte in der Stadt und im Umland

In Tabelle 2 sind ein Grossteil der Messorte des Sommers 2019 mit der zugehörigen Anzahl Hitzetage (mindestens ein 10-Minuten-Mittel der Temperatur ist grösser 30°C) und der Anzahl Tropennächte aufgelistet. Für die Bestimmung der Tropennächte wurde die Definition des Deutschen Wetterdienstes übernommen, wonach eine Nacht dann als Tropennacht gilt, wenn kein 10-Minuten-Mittel der Temperatur zwischen 18:00 UTC und 06:00 UTC kleiner 20°C ist.

Standort	Raumlage	Anzahl Hitzetage	Anzahl Tropennächte
Elsau - Halden	Land	25	1
Lindau - Tagelswangen	Land	20	2
Oberembrach - Schüler	Land	24	0
Schlieren - Brachweg	Land	29	3
Uster - Sunnenloobach	Land	22	2
Zürich - Altuetliberg	Land	5	9
Bülach - Süd	Agglomeration	37	7
Opfikon - Glattpark	Agglomeration	22	7
Regensdorf - BahnhofNord	Agglomeration	32	7
Regensdorf - Geerenwiesstrasse	Agglomeration	37	5
Uster - ImLot	Agglomeration	20	8
Uster - SchulhausPünt	Agglomeration	28	5
Zürich - Grünau	Park	22	10
Zürich - Lindenhof	Park	28	17
Zürich - Sihlfeld	Park	20	3

Standort	Raumlage	Anzahl Hitzetage	Anzahl Tropennächte
Zürich - Werdinsel	Park	14	3
Zürich - Zürihorn	Park	21	9
Schlieren - Badenerstrasse	Stadt	43	10
Uster - Ackerstrasse	Stadt	29	5
Uster - SchulhausDorf	Stadt	25	6
Zürich - Blumenfeld	Stadt	27	8
Zürich - Bucheggplatz	Stadt	22	11
Zürich - Eichbühl	Stadt	23	5
Zürich - Hardplatz	Stadt	33	17
Zürich - Nordlicht	Stadt	17	11
Zürich - Nordlicht2	Stadt	26	11
Zürich - Oerlikerpark	Stadt	20	9
Zürich - offene Rennbahn	Stadt	25	9
Zürich - Paradeplatz	Stadt	20	23
Zürich - Perron HB	Stadt	31	16
Zürich – Science-City	Stadt	13	10
Zürich - Sechseläutenplatz	Stadt	33	18
Zürich - Vulkanplatz	Stadt	32	14
Zürich - Witikon	Stadt	14	4

Tabelle 2: Anzahl Hitzetage und Tropennächte im Sommer 2019

Am meisten Hitzetage wurden an der Badenerstrasse in Schlieren - am meisten Tropennächte am Paradeplatz in Zürich registriert.

Abbildung 8: Zwei Hotspots: Links Messstelle Schlieren - Badenerstrasse (höchste Anzahl Hitzetage, rechts Zürich Paradeplatz (höchste Anzahl Tropennächte)

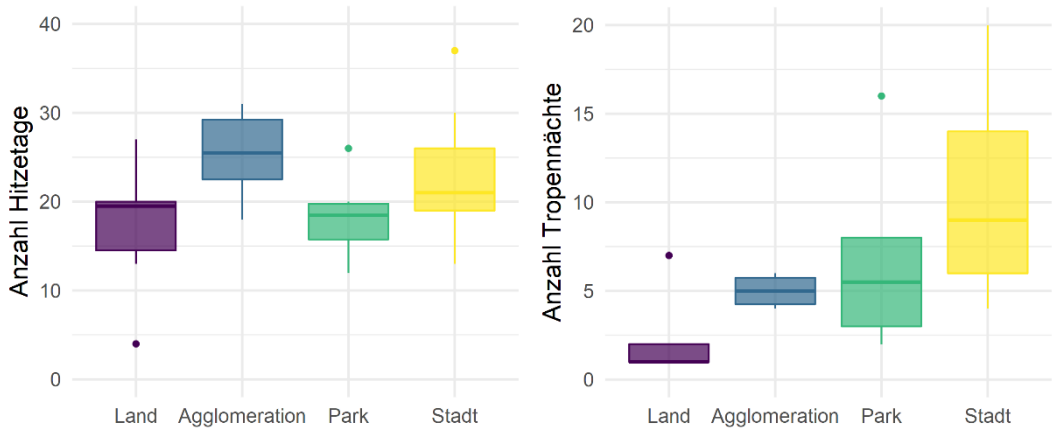

Abbildung 9: Zusammenfassung der Anzahl Hitzetage bzw. Tropennächte nach Raumlage. Die Anzahl Hitzetage ist aufgrund der unterschiedlichen Bestrahlungssituation der Messstellen mit Vorsicht zu interpretieren.

5.2. Vergleich ausgewählter Stationspaare während Hitzeperiode(n)

5.2.1. Schlieren / Stadt - Land

Einige Sensoren wurden mit dem Ziel platziert, kleinskalige Temperaturunterschiede zu erfassen, welche lediglich durch unterschiedliche räumliche Situationen verursacht sind. In Schlieren, beispielsweise, wird dabei zwischen der dichtbebauten Badenerstrasse und dem nahegelegenen, flussnahen Brachweg ein nächtlicher Temperaturunterschied von 2 bis 3 °C sichtbar. Während es am kaum versiegelten Messort in Limmatnähe nachts deutlich besser abkühlt, ist es tagsüber an der Badenerstrasse (vollständig versiegelt) um einige Grad heisser.

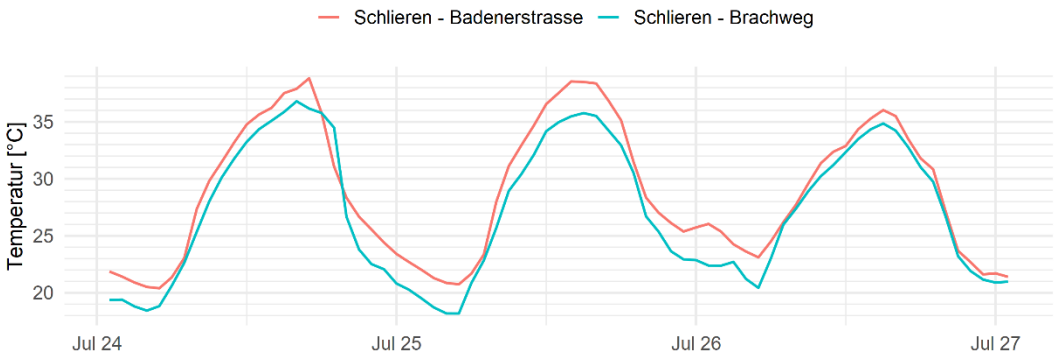

Abbildung 10: Zeitreihe der Temperatur während der zweiten Hitzeperiode und die Standorte Schlieren-Badenerstrasse (rot) und Schlieren Brachweg (blau)

Die höhere Tageshöchsttemperatur ist aber teilweise auch auf die intensivere Besonnung des Messortes zurückzuführen. An der Messort Badenerstrasse wurden 43, am Brachweg 29 Hitzetage registriert. Am Brachweg gab es insgesamt drei, an der Badenerstrasse 9 Tropennächte (siehe auch Tabelle 2).

5.2.2. Zürich Oerlikon / Innenhöfe

Eine weitere Vergleichsmessung fand in Zürich Oerlikon zwischen zwei Innenhöfen am Max-Bill-Platz statt. Der Innenhof des Altersheims Nordlicht (rot) verfügt über eine Teichanlage und ausgiebige Beschattung. Das Vergleichsgebäude (grün) ist mit einem Parkplatz im Innenhof ausgestattet, welcher grösstenteils asphaltiert ist. Eine weitere Messung im Oerlikerpark (blau) wurde hinzugezogen, um den Effekt der Begrünung und Durchlüftung genauer zu untersuchen. Alle Sensoren sind tagsüber relativ gut beschattet, daher halten sich Messartefakte aufgrund des Strahlungsschutzes in Grenzen.

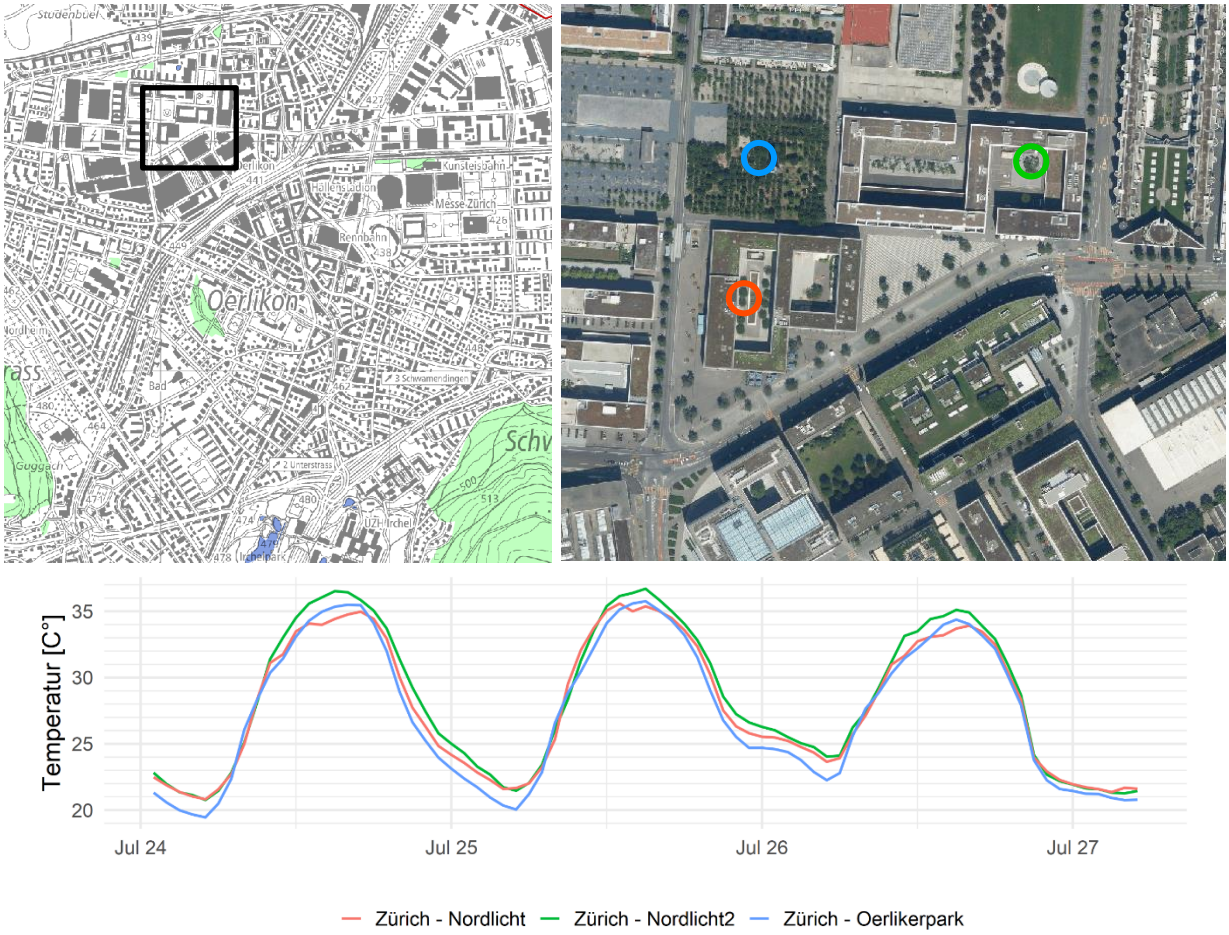

Abbildung 11: Drei Messungen auf engen Raum in Oerlikon (Messpunkt rot: Zürich – Nordlicht, Messpunkt grün: Nordlicht2, Messpunkt blau: Oerlikerpark), Zeitreihe während der zweiten Hitzewelle

Die Messungen zeigen, dass sich die beiden Innenhöfe speziell bei der Tageshöchsttemperatur unterscheiden. Die Bäume und die Teichanlage mildern die Hitze am Tag etwas. Das schlägt bei der Anzahl Hitzetage deutlich zu Buche (17 gegenüber 26, siehe Tabelle 2). Die Tiefsttemperaturen (und somit auch die Anzahl Tropennächte) der Innenhöfe sind praktisch identisch. Bei der Messstation im Oerlikerpark ist es nachts hingegen etwa 1.5°C weniger warm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier der Effekt

der Wärmespeicherung der umliegenden Gebäude geringer und die Durchlüftung besser ist.

5.2.3. Zürichsee / Versiegelungsgrad (1)

Ein Sensorpaar wurde mit «Blick» auf den Zürichsee platziert. Einer am nahezu vollständig versiegelten Sechseläutenplatz, der andere am grünen Zürihorn. Die Temperaturunterschiede betragen hier zwischen 2° und 4°C.

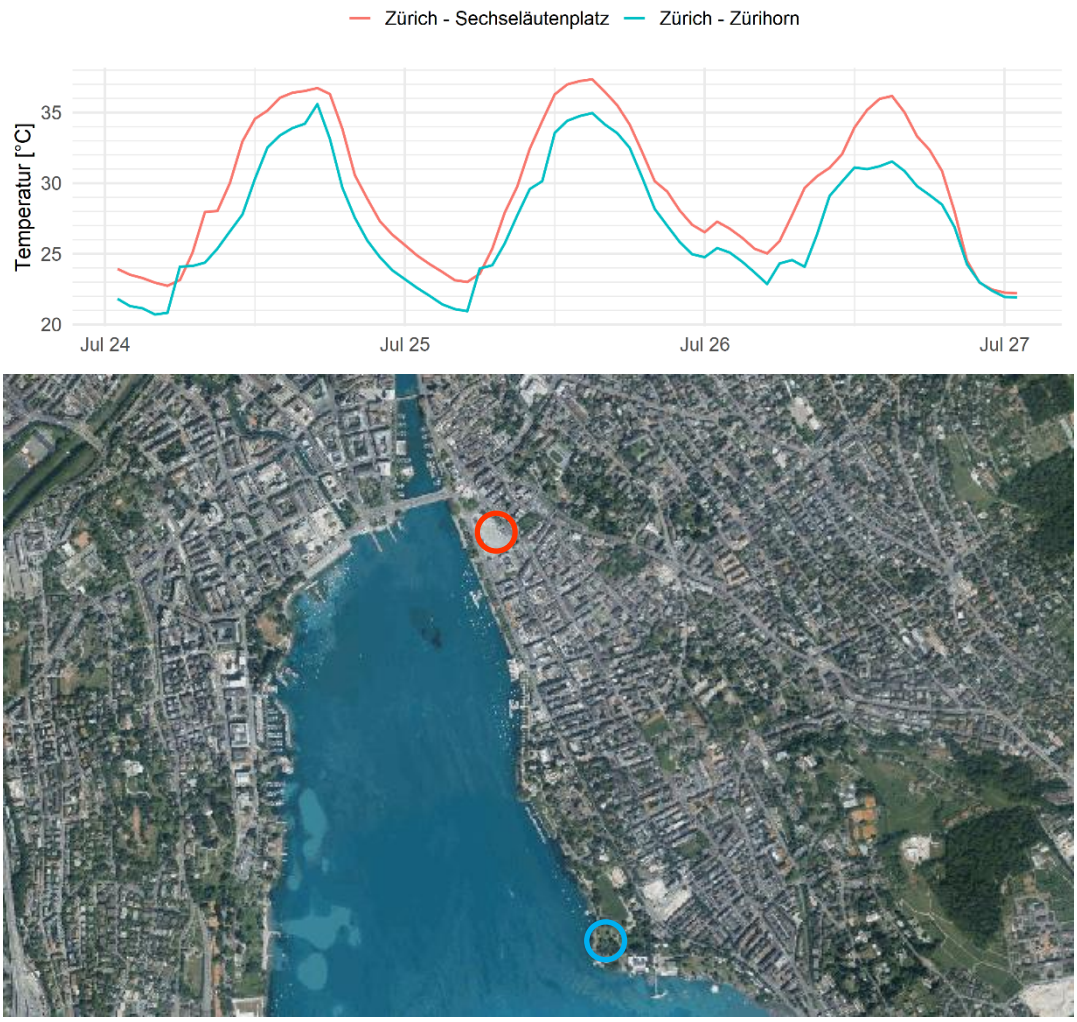

Abbildung 12: Temperaturmessung in Seenähe während der zweiten Hitzewelle am Sechseläutenplatz (rot) und am Zürihorn (bau)

Am Zürihorn gab es insgesamt 21 Hitzetage und 9 Tropennächte, auf dem Sechseläutenplatz wurden doppelt so viele Tropennächte registriert und die Temperatur stieg an 33 Tagen über 30 Grad (siehe Tabelle 2).

5.2.4. Friedhof Sihlfeld – Hardplatz / Versiegelungsgrad (2)

Die Tiefsttemperaturen unterscheiden sich deutlich und sind am Hardplatz aufgrund der Versiegelung und der hohen Überbauungsdichte 3 bis 4 Grad höher. Der Friedhof Sihlfeld dürfte zudem noch etwas vom Kaltluftabfluss des Uetlibergs profitieren. Während der Letzten der hier dargestellten Nächte fallen die Unterschiede geringer aus, da der Wind zwischenzeitlich auflebte und zu einer allgemeinen Durchmischung führte. Bei den Maximaltemperaturen sind die Unterschiede weniger ausgeprägt.

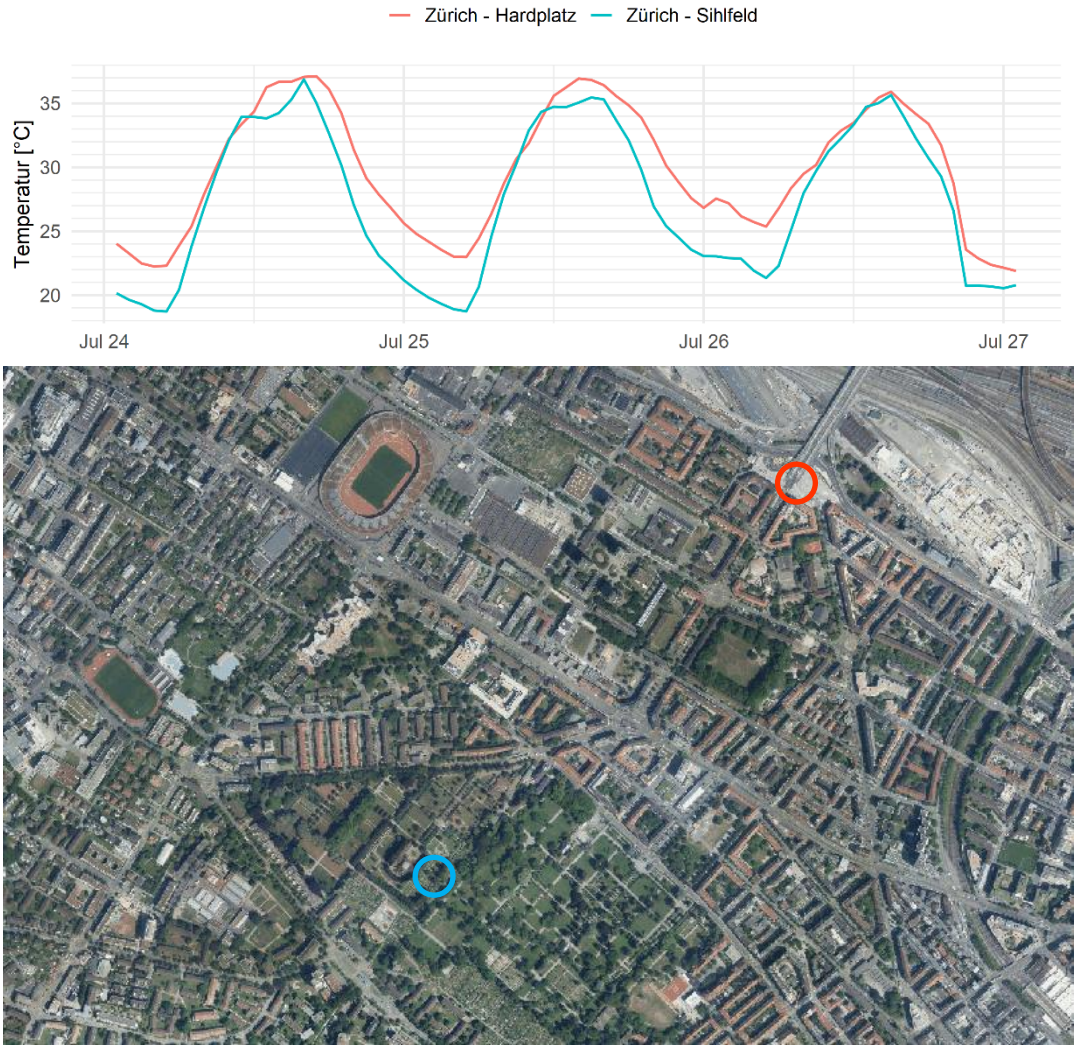

Abbildung 13: Die Messstellen Hardplatz (rot) und Friedhof Sihlfeld (blau)

5.2.5. Uster

Die Messungen in Uster bestätigen die im vorgängigen Kapitel gemachten Erkenntnisse: Die Temperaturminima sind am unversiegelten Messort Sunnenloobach 3 bis 4 Grad tiefer als im naheliegenden Industriegebiet (Uster – Ackerstrasse) oder beim zentral gelegenen Schulhaus Dorf. Die kleineren Differenzen während der Nacht vom

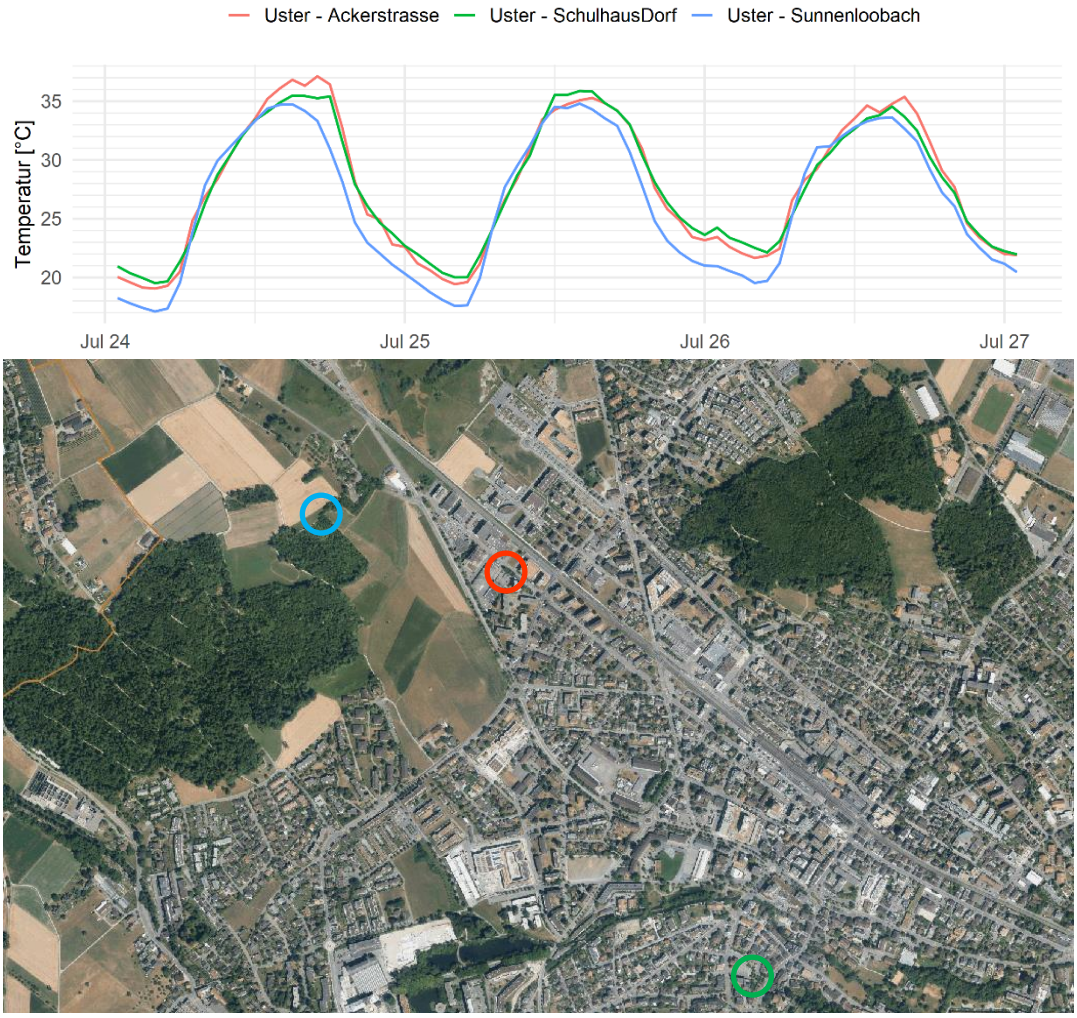

Abbildung 14: Drei Temperaturmessstellen in Uster: Uster – Sunnenloobach (blau), Uster – Ackerstrasse(rot), Uster - Schulhaus Dorf (grün).

26. Juli zum 27. Juli sind auch hier eine Folge des auflebenden Windes. Die Maximaltemperaturen unterscheiden sich weniger deutlich. Diese Daten sind aufgrund der unterschiedlichen Bestrahlung durch die Sonne aber auch weniger belastbar (siehe auch Kapitel 3.1).

5.3. Transekte

Der nächtliche Wärmeinseleffekt zeigt sich deutlich bei der Darstellung der Tagestiefstwerte entlang von Transekten, welche die Stadt durchqueren. Im Folgenden betrachten wir die beiden Transekte «Zürich-Limmattal» und Zürich «Nord-Ost».

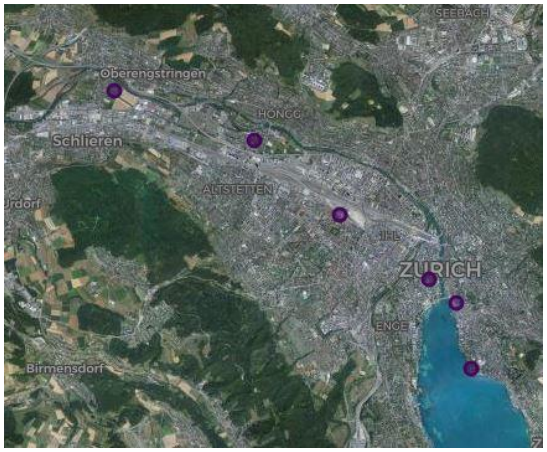

Abbildung 15: Transekte «Zürich - Limmattal», von Schlieren bis zum Zürihorn (links) und «Zürich-Nord - Ost», von Oberembrach in den Friesenberg (rechts)

Abbildung 16 illustriert das Transsekt Limmattal. Es sind nur Nächte dargestellt, in denen die Tiefsttemperatur am Paradeplatz nicht unter 20°C fiel.

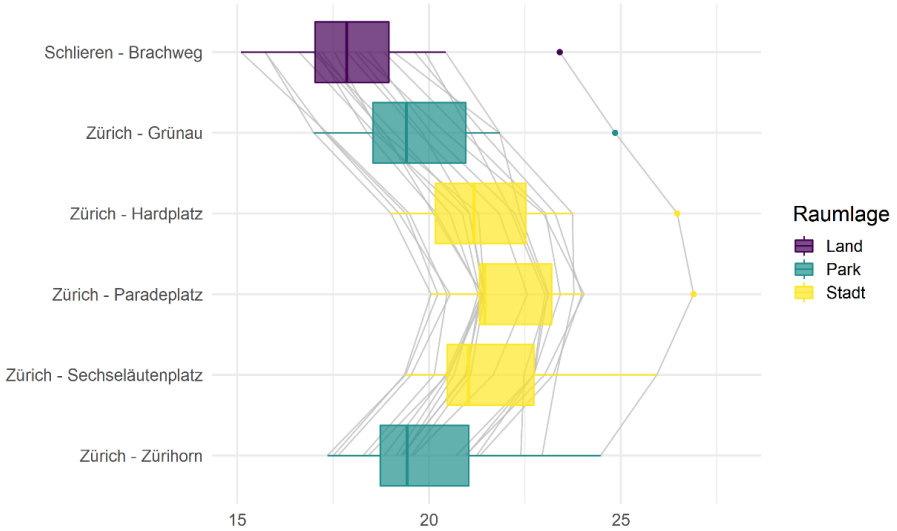

Abbildung 16: Transekt Limmattal, X-Achse zeigt Boxplots der Tagestiefsttemperaturen während Tropennächten am Paradeplatz, die grauen Linien verbinden die Nächte gleichen Datums.

Abbildung 17 zeigt ein ähnliches Muster: Die Temperaturen auf den zentral gelegenen Plätzen in der Stadt Zürich sind in der Nacht im Durchschnitt 4 bis 5°C höher als diejenigen an den ländlichen Messorten. Die Messstelle in Oberembrach zeichnet sich durch speziell tiefe Temperaturen während der Nacht aus, worauf wir in Kapitel 5.4.2 noch kurz eingehen werden

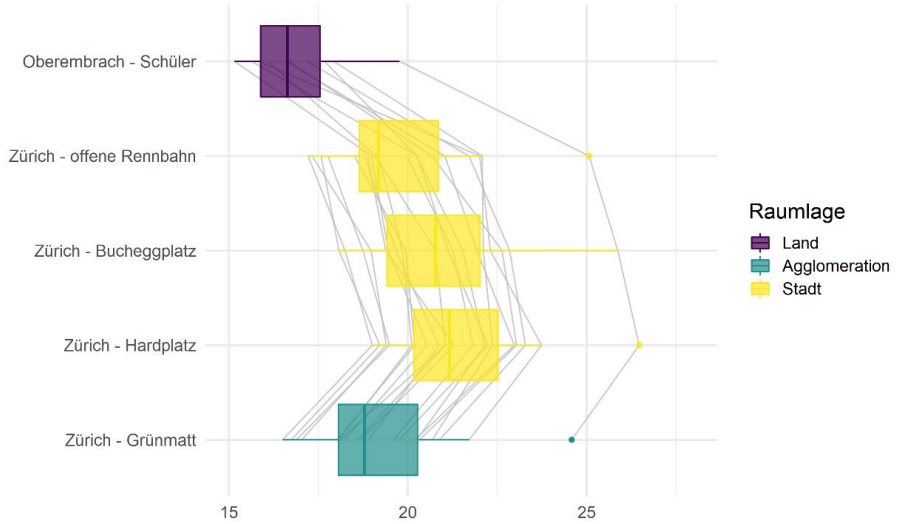

Abbildung 17: Transekt Zürich Nord – Ost; X-Achse zeigt Boxplots der Tagestiefsttemperaturen [°C]. Für die Analyse wurden nur Nächte verwendet, in welchen am Paradeplatz nicht unter 20 Grad gemessen wurden (Tropennächte). Einzelne Nächte sind durch die grauen Linien verbunden.

Um die beiden MeteoSchweiz Stationen (Zürich-Fluntern und Zürich-Affoltern), welche am Stadtrand platziert sind, mit innerstädtischen Messstellen zu vergleichen, wird in Abbildung 18 die Abweichung der Tagestiefsttemperatur gegenüber Zürich-Affoltern dargestellt. Auch hier wurden nur diejenigen Nächte ausgewertet, in welchen am Paradeplatz eine Tropennacht registriert wurde. Während diesen Nächten ist die Tiefsttemperatur in Zürich-Affoltern im Durchschnitt rund 4°C tiefer als an den beiden zentral gelegen Messorten Zürich-Kaserne und Hauptbahnhof. Am Bahnhof Regensdorf und in Zürich-Fluntern ist die Tiefsttemperatur durchschnittlich 2°C höher, auf dem Friedhof Sihlfeld 1.5°C.

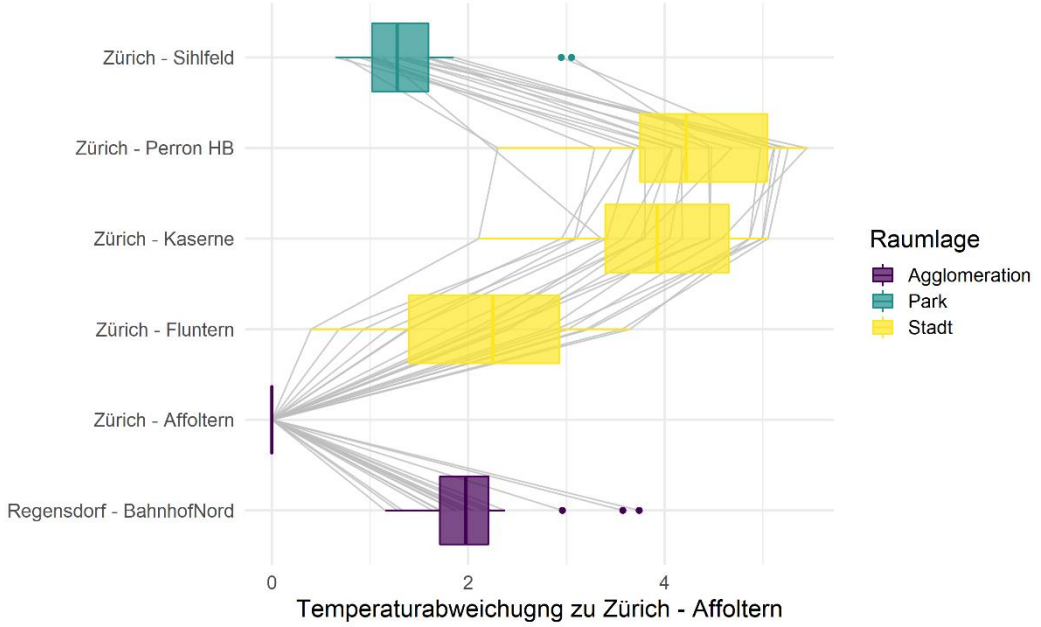

Abbildung 18: Vergleich zwischen den MeteoSchweiz-Stationen (ZH-Affoltern und ZH-Fluntern) und innerstädtischen Messungen. Gezeigt wird die Abweichung der Tiefsttemperatur der Standorte gegenüber Zürich-Affoltern. Positive Werte entsprechen einer höheren Tagestiefsttemperatur als derjenigen von Zürich-Affoltern.

5.4. Verifikation Klimaanalyse-Model

5.4.1. Einleitung

Seit 2018 verfügt der Kanton Zürich über eine Klimakarte, welche unter anderem die Temperaturverteilungen an einem typischen Hitzetag bzw. in einer typischen Nacht während einer sommerlichen Hitzewelle im Kanton aufzeigt. Die Karte wurde mit Hilfe eines hochauflösenden Klimaanalyse-Modells (25 m x 25 m) erstellt. Ein Ziel dieser Messungen und Auswertungen ist es, abzuschätzen wie gut die vom Modell berechnete Temperaturverteilung mit Messwerten übereinstimmt. Grundsätzlich sind bei einem Modell immer Abweichungen zur Realität zu erwarten. In diesem Fall sind sie primär auf Vereinfachungen des Modells zurückzuführen. Zudem gilt das Modell genau für die modellierte Situation, wovon die (reellen) Vergleichstage unweigerlich etwas abweichen.

5.4.2. Temperatur

Wir ermittelten zunächst Tage, an denen die Verhältnisse vergleichbar mit denjenigen des vom Klimamodell simulierten Tages sind. Die Rahmenbedingungen wurden hierfür folgendermassen gesetzt: Höchsttemperatur am Flughafen Kloten grösser 28°C und kleiner 31°C, mittlere Windgeschwindigkeit kleiner 1 m/s und Sonnenscheindauer grösser 8 Stunden. Für die ausgewählten Tage haben wir die Temperatur um 04:00 Uhr der darauffolgenden Nacht ausgewählt und sie dann gegen die modellierte 2-Meter-Temperatur um 04:00 Uhr am jeweiligen Standort geplottet (Abbildung 19).

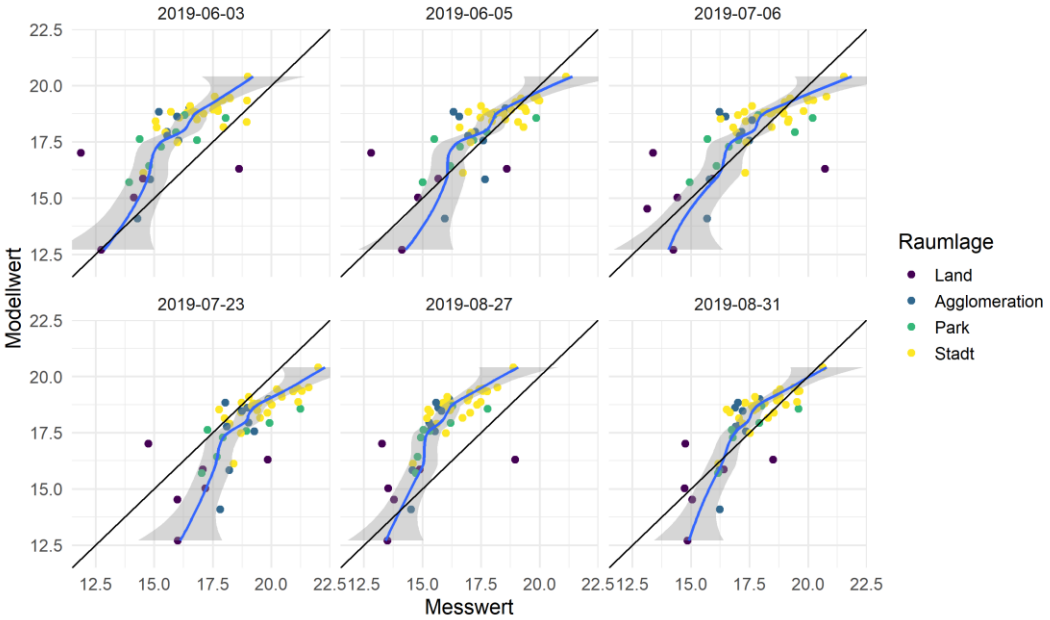

Abbildung 19: Scatterplot: Vergleich Temperaturmessungen / Werte aus Klimaanalyse - Modell (04:00 Uhr) [°C], schwarze Linie: Verhältnis 1:1, blaue Linie: LOESS Smoother durch Punkte, schattiert: Vertrauensintervall für Smoother

Die Punkte sind nach Raumlage eingefärbt. Die schwarze Linie geht mit Steigung 1 durch den Ursprung und zeigt wo die Punkte im Optimalfall zu liegen kämen. Um das Muster der Punkte zusammenzufassen ist zusätzlich eine geglättete (blau) durch die Punkte gelegt. Wichtig zu erwähnen ist, dass der Fokus auf den Vergleich der Steigun-

gen der blauen und der schwarzen Linie zu setzten ist. Dadurch kann abgeschätzt werden, ob das Klimamodell eine realistische Temperaturverteilung zwischen kühlen und warmen Standorten aufzeigt. Dies ist grundsätzlich der Fall. Das Modell überschätzt aber die Bandbreite zwischen Stadt und Land, was anhand der ähnlichen Krümmung der blauen Linie bei allen sechs Tagen gesehen werden kann.

Um zu untersuchen, ob das Klimaanalyse-Model in Abhängigkeit der Raumlage bessere oder schlechtere Vorhersagen macht, sind in Abbildung 20 die Differenzen zwischen Modell und Messwerten dargestellt. Positive Abweichungen entsprechen einer Überschätzung der Temperatur durch das Modell, negative Werte einer Unterschätzung. Die Standorte sind, aufgrund ihrer Abweichung, absteigend geordnet und nach Raumlage eingefärbt, um allfällige Muster zu erkennen.

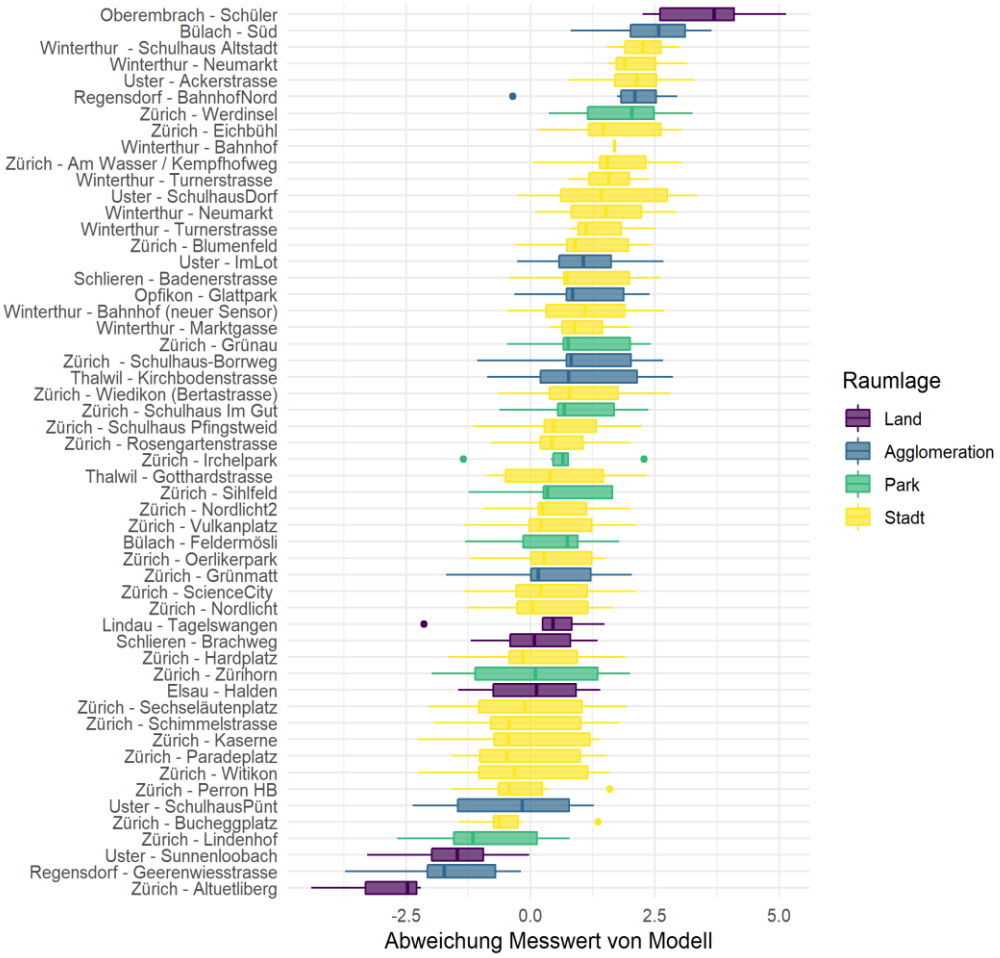

Abbildung 20: Temperaturabweichung Modellvorhersage / Messwert [°C], positive Werte entsprechen einer Überschätzung durch das Modell, absteigend geordnet.

Die beiden Messorte Oberembrach und Altuetliberg weisen die grössten Abweichungen auf. Beide Standorte sind aber auch durch spezielle geographische Gegebenheiten geprägt. Der Messort in Oberembrach befindet sich in einer Senke, in welcher sich nachts

kalte Luft ansammelt. Das Model zeigt zwar eine Kaltluftansammlung, allerdings befindet sich diese etwa 200 Meter südlich des Messortes (Abbildung 21). Der Sensor am Altuetliberg misst regelmässig höhere Temperaturen in der Nacht, als das Modell vorhersagt. Dies liegt daran, dass sich in der Nacht eine Inversion bildet: Die warme Luft über der Stadt steigt auf und die kühle Luft sinkt ab bis sich eine stabile Schichtung eingestellt hat. Abgesehen von diesen zwei Fällen liegen die Abweichungen zwischen Modell und Messung meist unter 2°C.

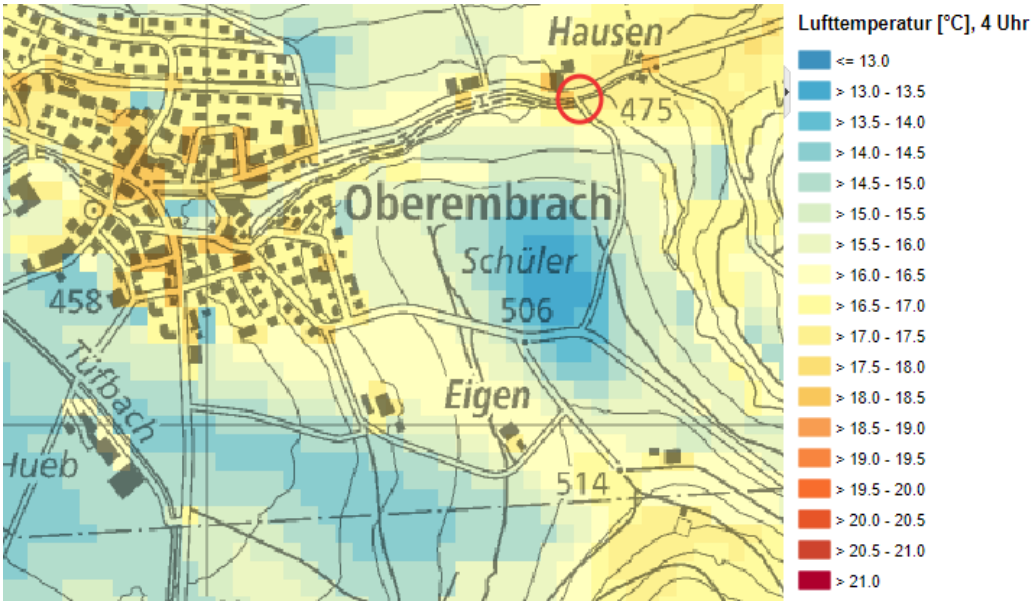

Abbildung 21: Auszug aus der Klimakarte: Messort in Oberembrach mit Kaltluftsee südlich davon

5.4.3. Wind

Die Klimamodellierung bietet zusätzlich eine Visualisierung der Luftströmungen während einer typischen Sommernacht. Um diese zu überprüfen, haben wir in Zürich-Friesenberg und in Thalwil an je zwei Messorten Windmessungen durchgeführt.

Am Fusse des Uetliberges wurden anhand der Klimakarte zwei Standorte ausgewählt. Ein Sensor wurde auf dem Sportplatz bei den Schulhäusern Friesenberg / Borrweg frei anströmbar montiert, während der andere Windmesser innerhalb der Siedlung Grünmatt angebracht wurde. Die Resultate sind in Abbildung 22 dargestellt. Die Hintergrundkarte ist ein Ausschnitt aus dem Klimamodell. Die Windgeschwindigkeiten (um 04:00 Uhr) sind farblich gekennzeichnet, die Windrichtung durch Vektoren. Darüber gelegt sind die Windrosen der beiden Messungen mit den Daten der ausgewählten Tage für den Klimakartenvergleich (vgl. Kapitel 5.4.1) zwischen 00:00 bis 06:00 Uhr.

Hier bestätigen die Messungen die Klimakarte sehr gut. Der Sensor im Kaltluftstrom zeigt eine klar gerichtete Strömung aus Süd-West, was exakt der Vorhersage des Modells entspricht. Die Windverhältnisse in der Siedlung sind weniger gerichtet und enthalten einen hohen Anteil an praktisch windstillen Phasen. Man darf hierbei aber auch bemerken, dass es wenig überraschend ist, im Lee eines Gebäuderiegels weniger Wind zu messen, als bei gut anströmbaren Verhältnissen. Die Temperaturmessung zeigte keine signifikanten Unterschiede, weder tagsüber noch während der Nacht.

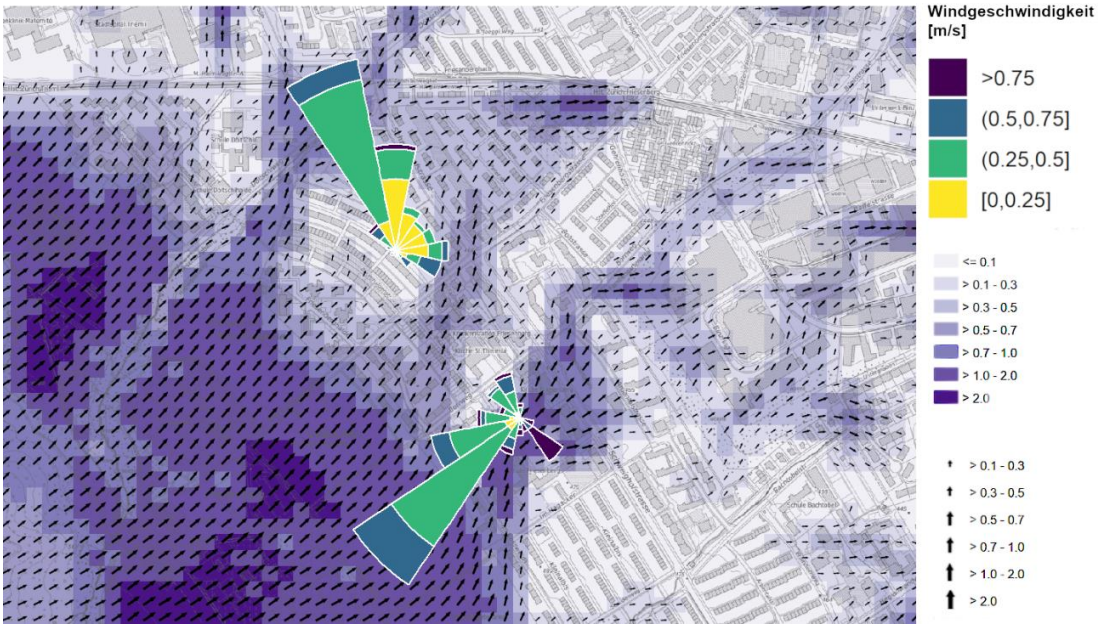

Abbildung 22: Windmessungen Friesenberg, Hintergrund: Windgeschwindigkeit (violett) und Richtung (Vektoren) um 04:00 Uhr aus Klimakarte. Windrosen: Windmessungen an ausgewählten Tagen zwischen 00:00 und 06:00 Uhr (10 Minuten Werte), Farbe: Windgeschwindigkeit gemessen

In Thalwil (Abbildung 23)sieht die Situation anders aus. Am Standort, an welchem gemäss der Klimakarte eine deutlich höhere Anströmung von kalter Luft vorhanden sein sollte, wurde während der ausgewählten Tage kaum Wind registriert. Im gleichen Zeitraum weist der Kontrollstandort, welcher nach Klimamodell windstill sein sollte, eine schwache, aber doch klar gerichteten Strömung hangabwärts auf. Auch hier sind keine nennenswerten Unterschiede der Temperatur zwischen den zwei Standorten vorhanden.

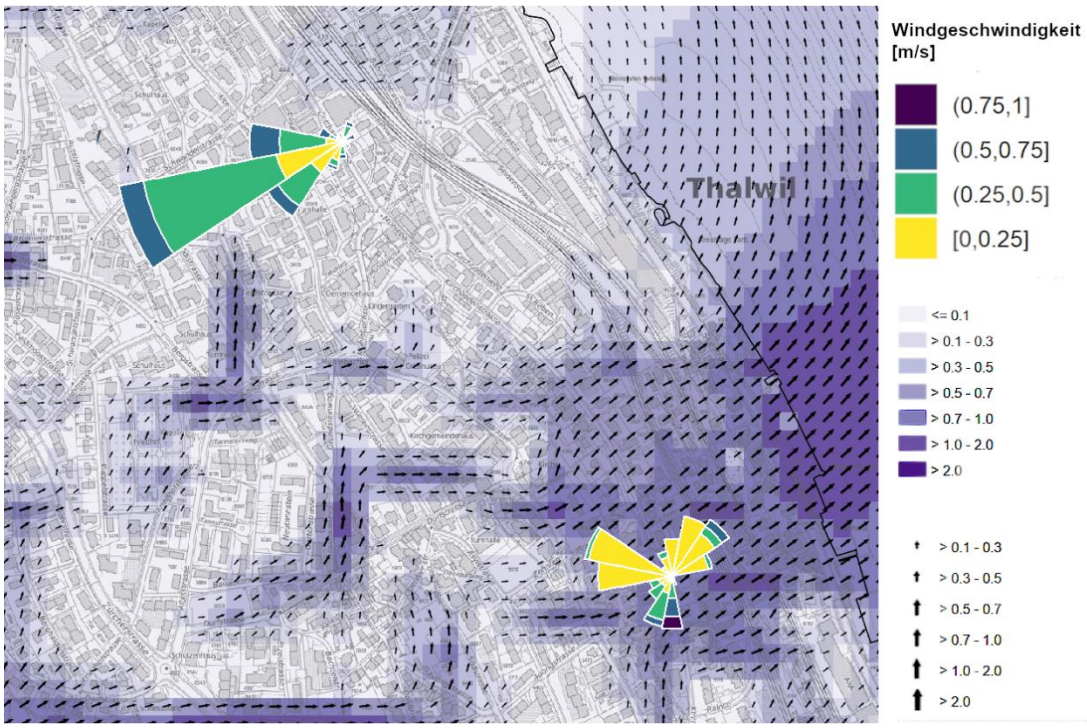

Abbildung 23: Windvergleichsmessung Thalwil, Hintergrund: Windstärke (Violett) und Richtung (Vektoren) um 04:00 Uhr aus Klimakarte. Windrosen: Windmessungen an ausgewählten Tagen zwischen 00:00 und 06:00 Uhr (10 Minuten Werte), Farbe: Windgeschwindigkeit gemessen

6. Fazit und Ausblick

Der Sommer 2019 war in der Schweiz der drittheisseste seit Messbeginn 1864. Mit den beiden Hitzewellen boten sich gute Messbedingungen, um stadtklimatische Hitzeeffekte aufzuzeigen. Die Sensoren funktionierten einwandfrei, es gab nur einzelne Fälle von Vandalismus und das LoRa WAN der Swisscom war mit einer Ausnahme stabil. Die städtische Wärmeinsel konnte mit den Messungen gut abgebildet werden. Insgesamt ist der Wärmeinseleffekt während der Nacht stärker ausgeprägt als tagsüber. Nächtliche Unterschiede zwischen verschiedenen Bebauungssituationen und Raumlagen betragen 2 bis 4 °C. Über die Erreichung der in Kapitel 2 beschriebenen Ziele wird im Folgenden berichtet.

Plausibilisierung / Verifikation Klimaanalysemodell:
Die räumliche Verteilung der während sommerlichen Hitzeperioden modellierten Lufttemperatur konnte an rund 50 Messpunkten überprüft werden. Im grossen Ganzen stimmt das Klimaanalysemodell mit den Messungen gut überein (Differenz meist < 2 °C (siehe Kapitel 5.4.2).

Messungen sind grundsätzlich eine wertvolle Ergänzung zu einem Klimamodell, da sie, je nach Messort, Extremwerte für besondere Situationen liefern, die mit den Klimakarten nicht abgebildet werden können. Die Messungen helfen hier die Bandbreite der realen Bedingungen aufzuzeigen.

Verbesserung der Grundlagen zur Wirkungsbeurteilung von Massnahmen
Die Messwerte verbessern die Grundlagen zur Wirkungsbeurteilung von Massnahmen klar. Mit den Messwerten können nicht nur die typischen Facetten der städtischen Wärmeinsel erfasst und illustriert werden. Auch kleinsträumige Besonderheiten wie etwa unterschiedliche Temperaturverhältnisse in verschieden gestalteten Innenhöfen können dargestellt werden (siehe z.B. Messungen in Oerlikon, Kapitel 5.2.2.). Um über gute Grundlagen zur Wirkungsbeurteilung von künftigen Massnahmen zu verfügen, ist es wichtig ein Stadtklimamessnetz kontinuierlich, zumindest während der Sommermonate, zu betreiben. Eine weiterführende statistische Analyse der Temperaturdaten wird die Effekte verschiedener für die Massnahmenplanung relevanten Raumelemente noch breiter abstützen.

Kommunikation
Mit den erhobenen Daten lassen sich nahezu alle Ausprägungen der städtischen Wärmeinsel darstellen. In diesem Bericht werden hierfür einige Beispiele aufgezeigt. Die Messdaten werden auch anderweitig verwendet. So fliessen sie zum Beispiel in ein statistisches Modell der ETHZ (Professur für Wetter- und Klimarisiken, marius.zumwald@usys.ethz.ch) ein, welches primär der Vorhersage der Temperaturverteilung in der Stadt Zürich dient. Die Messdaten werden zudem als open data der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (www.opendata.swiss)

Im Jahr 2020 werden die Messungen an den meisten Messorten fortgesetzt. Zusätzlich werden im Raum Regensdorf fünf Windmesser montiert, um hier die modellierten Kaltluftströme zu überprüfen.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit am Messort Bülach-Süd 4
Abbildung 2: Vergleich von 4 Sensirion Temperatur-Feuchte-Sensoren. Die Grafik zeigt die Abweichung der Temperatur [°C] vom Median aller Sensoren. Messperiode: 01.12.2017 – 12.06.2018 4
Abbildung 3 Vergleich von 4 Sensirion Temperatur-Feuchte-Sensoren. Die Grafik zeigt die Abweichung vom Median. Messperiode: 01.12.2017 – 12.06.2018 4
Abbildung 4: Vergleichsmessungen Temperatur ATMOS22 / Referenzgerät. Links mit Strahlungseinfluss, rechts ohne (nur Nacht) 6
Abbildung 5: Windmessungen mit dem ATMOS22 im Irchelpark (links) und in Zürich Wiedikon, Bertastrasse (rechts). 6
Abbildung 6: AWEL LoRa-Sensormessnetz im Sommer 2019 7
Abbildung 7: Temperaturverlauf und Niederschlag an der Messstation Zürich-Kaserne. Gut zu sehen sind die beiden Hitzewellen Ende Juni und Ende Juli mit Höchsttemperaturen von teilweise über 35 Grad. 8
Abbildung 8: Zwei Hotspots: Links Messstelle Schlieren - Badenerstrasse (höchste Anzahl Hitzetage, rechts Zürich Paradeplatz (höchste Anzahl Tropennächte) 10
Abbildung 9: Zusammenfassung der Anzahl Hitzetage bzw. Tropennächte nach Raumlage. Die Anzahl Hitzetage ist aufgrund der unterschiedlichen Bestrahlungssituation der Messstellen mit Vorsicht zu interpretieren. 11
Abbildung 10: Zeitreihe der Temperatur während der zweiten Hitzeperiode und die Standorte Schlieren-Badenerstrasse (rot) und Schlieren Brachweg (blau) 12
Abbildung 11: Drei Messungen auf engen Raum in Oerlikon (Messpunkt rot: Zürich – Nordlicht, Messpunkt grün: Nordlicht2, Messpunkt blau: Oerlikerpark), Zeitreihe während der zweiten Hitzewelle 13
Abbildung 12: Temperaturmessung in Seenähe während der zweiten Hitzewelle am Sechseläutenplatz (rot) und am Zürihorn (bau) 14
Abbildung 13: Die Messstellen Hardplatz (rot) und Friedhof Sihlfeld (blau) 15
Abbildung 14: Drei Temperaturmessstellen in Uster: Uster – Sunnenloobach (blau), Uster – Ackerstrasse(rot), Uster - Schulhaus Dorf (grün) 16
Abbildung 15: Transekte «Zürich - Limmattal», von Schlieren bis zum Zürihorn (links) und «Zürich-Nord - Ost», von Oberembrach in den Friesenberg (rechts) 17
Abbildung 16: Transekt Limmattal, X-Achse zeigt Boxplots der Tagestiefsttemperaturen während Tropennächten am Paradeplatz, die grauen Linien verbinden die Nächte gleichen Datums. 17
Abbildung 17: Transekt Zürich Nord – Ost; X-Achse zeigt Boxplots der Tagestiefsttemperaturen [°C]. Für die Analyse wurden nur Nächte verwendet, in welchen am Paradeplatz nicht unter 20 Grad gemessen wurden (Tropennächte). Einzelne Nächte sind durch die grauen Linien verbunden. 18
Abbildung 18: Vergleich zwischen den MeteoSchweiz-Stationen (ZH-Affoltern und ZH-Fluntern) und innerstädtischen Messungen. Gezeigt wird die Abweichung der Tiefsttemperatur der Standorte gegenüber Zürich-Affoltern. Positive Werte entsprechen einer höheren Tagestiefsttemperatur als derjenigen von Zürich-Affoltern. 19
Abbildung 19: Scatterplot: Vergleich Temperaturmessungen / Werte aus Klimaanalyse - Modell (04:00 Uhr) [°C], schwarze Linie: Verhältnis 1:1, blaue Linie: LOESS Smoother durch Punkte, schattiert: Vertrauensintervall für Smoother 20

Abbildung 20: Temperaturabweichung Modellvorhersage / Messwert [°C], positive Werte entsprechen einer Überschätzung durch das Modell, absteigend geordnet. ... 21
Abbildung 21: Auszug aus der Klimakarte: Messort in Oberembrach mit Kaltluftsee südlich davon 22
Abbildung 22: Windmessungen Friesenberg, Hintergrund: Windgeschwindigkeit (violett) und Richtung (Vektoren) um 04:00 Uhr aus Klimakarte. Windrosen: Windmessungen an ausgewählten Tagen zwischen 00:00 und 06:00 Uhr (10 Minuten Werte), Farbe: Windgeschwindigkeit gemessen 23
Abbildung 23: Windvergleichsmessung Thalwil, Hintergrund: Windstärke (Violett) und Richtung (Vektoren) um 04:00 Uhr aus Klimakarte. Windrosen: Windmessungen an ausgewählten Tagen zwischen 00:00 und 06:00 Uhr (10 Minuten Werte), Farbe: Windgeschwindigkeit gemessen..... 24

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikationen Ultraschall-Anemometer ATMOS22.....5
Tabelle 2: Anzahl Hitzetage und Tropennächte im Sommer 2019……9