

Messung des Mikroklimas an zwei ausgewählten Friedhöfen der Stadt Wien (Mikro-Clim)

Universität für Bodenkultur, Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt,
Institut für Meteorologie und Klimatologie



MET 

Institut für
Meteorologie und
Klimatologie

Autoren:

Herbert Formayer, Fabian Lehner, David Leidinger und Philipp Mayer. Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität für Bodenkultur, Wien

Dieser Endbericht wurde im Rahmen des Projekts „Messung des Mikroklimas an zwei ausgewählten Friedhöfen der Stadt Wien (Mikro-Clim)“ im Auftrag der Friedhöfe Wien GmbH erstellt.

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Formayer H., Lehner F., Leidinger, D., Mayer, P. (2021): Messung des Mikroklimas an zwei ausgewählten Friedhöfen der Stadt Wien (Mikro-Clim). Forschungsbericht im Auftrag der Friedhöfe Wien GmbH.

Wien, im Dezember 2022

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
Daten und Methoden	4
Meteorologische Beobachtungsdaten	4
Untersuchungsgebiet	5
Albedomessungen	6
Messsystem	6
Auswahl Graboberflächen	7
Heller Kies	7
Heller Stein	8
Gras	8
Rindenmulch	9
Schwarzer Stein	10
Asphaltstraße	10
Messung der Oberflächentemperatur	11
Mobile Temperatur und Feuchtemessung	12
Ergebnisse	14
Albedomessungen	14
Oberflächentemperaturmessungen	15
Mobile Messungen mit dem Fahrrad	17
Auswertung der Permanentmessungen	17
Diskussion und Schlussfolgerungen	21

Einleitung

Der klimawandelbedingte Temperaturanstieg stellt vor allem Städte und deren Einwohner:innen vor (gesundheitliche) Herausforderungen, da die urbanen Strukturen (viel versiegelte Fläche, hoher anthropogener Wärmefluss, wenig grüne und blaue Infrastruktur) diesen zusätzlich verstärken. Als wirkungsvolle Maßnahmen kommen in den letzten Jahren immer mehr naturbasierte Lösungen (z.B. Bäume, Wasserflächen, Entsiegelung von Flächen) zum Einsatz, welche jedoch mit dem steigenden Platzbedarf durch den Zuzug in Städte konkurrieren.

Friedhöfe befinden sich an unterschiedlichsten Orten in Städten, oft auch in dicht besiedelten Gebieten. In Wien bedecken sie insgesamt mehr als 1% der Fläche und weisen aufgrund ihrer außergewöhnlichen Rolle nicht versiegelt werden zu können ein großes Potential für das lokale Mikroklima, sowie das der umliegenden Straßenzüge auf.

Hieraus ergibt sich die Frage, wie dieses mikroklimatische Potential der verfügbaren Grünflächen innerhalb der Stadt durch explizite Maßnahmen (Begrünung der Gräber, Entsiegelung der Wege, etc.) weiter gestärkt werden kann.

Aufbauend auf den mikroklimatischen Messungen wird in Zusammenarbeit zwischen dem AIT (Austrian Institute Of Technology), der BOKU sowie in Kooperation mit den Friedhöfen Wien ein Fallbeispiel für transformierte Friedhöfe erarbeitet. Hierfür werden vom AIT hochaufgelöste mikroklimatische Modellierungen in einem eigenständigen Forschungsprojekt durchgeführt. Innerhalb dieses Forschungsprojektes werden mikroklimatische Messungen direkt in zwei Friedhöfen durchgeführt. Diese Erhebungen sollen einerseits die räumlichen thermischen Verhältnisse innerhalb der Friedhöfe während Hitzewellen darstellen, andererseits die Ableitung der Materialeigenschaften (Albedo, Erwärmungsraten) von Grababdeckungen ermöglichen, um die mikroklimatischen Modelle für die Anwendung in Friedhöfen zu optimieren.

Daten und Methoden

Meteorologische Beobachtungsdaten

Basis der mikroklimatischen Analysen sind meteorologische Messungen welche an den beiden Wiener Friedhöfen Meidling und Sievering durchgeführt werden. Dabei werden sowohl Permanentmessungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte während der Sommermonate Juli und August 2022, als auch Intensivmessprogramme an einzelnen Schönwettertagen durchgeführt.

Bei den Permanentmessungen werden Sensoren der Firma HOBO, verbaut in einem Strahlungsschutz, eingesetzt. Am Friedhof Meidling wurden bereits 6 derartige Sensoren im Rahmen einer Vorstudie im Mai aufgestellt. Am Friedhof Sievering werden 5 derartige Sensoren Anfang Juli installiert werden, wobei hier Sensoren mit einfacheren Strahlungsschutz zum Einsatz kommen. Die Sensoren sind mithilfe von Holzpflocken (Schneestangen) in knapp 2 m Höhe montiert. Die Auswahl der Standorte erfolgt gemeinsam mit Bediensteten des Friedhofes und die Standorte sollen die Bandbreite der thermisch/hygrischen Verhältnisse an den beiden Friedhöfen abdecken.

Neben den Permanentmessungen erfolgen Intensivmessungen an Tagen mit besonders hoher Sonneneinstrahlung, da unter diesen Bedingungen die mikroklimatischen Eigenschaften besonders stark zur Geltung kommen. Hierbei werden einerseits Strahlungs- und Albedo-messungen, sowie Thermalbildaufnahmen in den Friedhöfen an Grabstellen mit unterschiedlicher Grababdeckung durchgeführt. Darüber hinaus werden mit einer mobilen Messeinrichtung die thermisch/hygrischen Eigenschaften in den benachbarten Straßenzügen gemessen. Die mobile Messeinrichtung ist auf einem Fahrrad montiert und zeichnet neben den meteorologischen Daten auch die GPS Koordinaten auf, was eine exakte Lokalisierung der Messungen ermöglicht. Diese Messungen werden an ausgesuchten Tagen im Juli und August durchgeführt

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie sind die beiden Friedhöfe Meidling (Abbildung 1) und Sievering (Abbildung 2). Meidling repräsentiert hierbei einen weitläufigen Friedhof mit sehr unterschiedlichen Strukturen und teilweise alten Baumbeständen. Der Friedhof Sievering hingegen hat einen sehr dichten Grabbestand, sodass das Mikroklima hier stärker von den Gräbern beeinflusst sein sollte als in Meidling



Abbildung 1: Luftbild des Friedhofes Meidling und Verortung der meteorologischen Stationen (rot).



Abbildung 2: Luftbild des Friedhofes Sievering und Verortung der meteorologischen Stationen (rot) sowie der Albedomessungen (grün).

Albedomessungen

Ein wesentlicher Faktor für die Erwärmung von Oberflächen ist deren Fähigkeit, Sonnenstrahlung zu absorbieren. Als Kennzahl hierfür wird die Albedo verwendet. Diese gibt das Verhältnis zwischen einfallender und reflektierter Sonnenstrahlung an. So hat etwa frisch gefallener Schnee eine Albedo von rund 0.9. Damit reflektiert Schnee 90 % der einfallenden Sonnenstrahlung und nur 10 % werden absorbiert und in Wärme umgesetzt. Je höher die Albedo einer Oberfläche, umso weniger Sonnenenergie wird aufgenommen.

Messsystem

Kern des Albedomesystems ist der Sensor Apogee SN 500. Dies ist ein Gerät das die Nettostrahlungsbilanz sowohl im kurzwelligen, als auch im langwelligen Bereich misst. Hierbei misst je ein Sensor für kurzwellige und langwellige Strahlung einmal in Richtung Untergrund und einmal in Richtung Himmel. Spezifikationen des Sensors findet man unter <https://www.apogeeinstruments.com/sn-500-ss-net-radiometer/>. Die Messdaten werden mit einem Campbell Datenlogger CR 300 aufgezeichnet.

Für die Bestimmung der Albedo wird jeweils nur die kurzwellige Messung sowohl vom oberen als auch dem unteren Halbraum verwendet und das Verhältnis gebildet. Um wirklich nur die Albedo der Graboberfläche zu messen, wurde der Sensor auf einem Rollei Stativ montiert und mittels Libellen horizontal ausgerichtet und sehr knapp über der Oberfläche (rund 15 cm) angebracht. In Abbildung 3 ist eine Messung über einer Rindenmulch Oberfläche dargestellt.



Abbildung 3: Albedomesssystem im Einsatz auf einer Graboberfläche mit Rindenmulch.

Auswahl Graboberflächen

Die Auswahl an unterschiedlichen Graboberflächen für die Albedomessungen soll den ganzen Wertebereich der möglichen Albedowerte, von sehr hoch bis sehr niedrig, wiedergeben und den Großteil der Graboberflächen in Wiener Friedhöfen repräsentieren. Für die Messungen wurden folgende fünf Oberflächen ausgewählt:

- Heller Kies
- Heller Stein
- Gras
- Rindenmulch
- Schwarzer Granit

Heller Kies

Kiesbedeckte Grabstätten haben eine sehr helle Farbe und lassen auf hohe Albedowerte schließen. Der Kies ist überwiegend weiß, kann aber unterschiedliche Größe und auch Form (kantig, rund) haben. Für unsere Messungen haben wir mittelgroßen runden Kies verwendet. Da es in Friedhöfen teilweise auch kiesbestreute Wege gibt, kann diese Albedomessung auch für diese Wege verwendet werden.



Abbildung 4: Graboberfläche mit hellen Kies.

Heller Stein

Grabsteine aus hellem Stein oder Beton sind sehr häufig. Dabei gibt es natürlich eine Bandbreite an verschiedenen Schattierungen. Darüber hinaus kann Naturstein auch poliert sein, wodurch Spiegelungen möglich sind, welche einerseits die Albedo der Oberfläche real verändert (üblicherweise erhöhen) zudem aber auch zu Fehlern bei der Messung führen können. Für die Messung wurde eine unpolierte mittelgraue Oberfläche (siehe Abbildung 5) verwendet.



Abbildung 5: Graboberfläche mit hellen Stein

Gras

Natürliche Graboberflächen mit Gras werden immer relevanter, da diese Oberflächen von der Friedhofsverwaltung gefördert werden. Aufgrund der Verdunstungskühlung von Grasflächen, sollte keine nennenswerte Überhitzung durch Grasoberflächen erfolgen. Eine Albedomessung

fand aber dennoch statt, um die gemessenen Werte mit den in dem Mikroklimamodell unterstellen Albedo von Gras zu vergleichen.



Abbildung 6: Graboberfläche aus Gras

Rindenmulch

Rindenmulch stellt eine sehr pflegeleichte Graboberfläche dar und ist daher recht beliebt. Durch seine recht dunkle Färbung muss man hier von einer niedrigen Albedo ausgehen. Die Albedo wird sicherlich durch Nässe beeinflusst, ebenso die thermischen Eigenschaften.



Abbildung 7: Graboberfläche aus Rindenmulch

Schwarzer Stein

Schwarzer Stein, meist Naturstein aus Granit oder Marmor sind sehr häufige Graboberflächen. Aufgrund ihrer Farbe muss man hier von einer sehr niedrigen Albedo ausgehen. Der Großteil der dunklen Steine ist poliert. Dies verändert etwas die Albedo, kann aber auch die Albedo- und Infrarot-Temperaturmessungen verfälschen. Damit aber eine repräsentative Messung erfolgt, haben wir auch einen polierten Stein verwendet. Die Reflexionen auf der polierten Oberfläche sind auch in Abbildung 8 gut erkennbar.



Abbildung 8: Graboberfläche mit dunklem Stein

Asphaltstraße

Neben den Graboberflächen haben natürlich die Wege innerhalb des Friedhofes auch einen Einfluss auf das Mikroklima. Die Messungen über Kies lassen auch Rückschlüsse für Kies und Schotter bedeckte Wege zu. Um zusätzlich Daten für asphaltierte Wege zu bekommen, wurden auch auf einer Asphaltstraße im Friedhof Messungen durchgeführt.



Abbildung 9: Asphaltstraße im Friedhof Sievering

Messung der Oberflächentemperatur

Die Messungen der Oberflächentemperaturen erfolgte mittels Infrarotkamera des Typs FLIR OSXL-TG165. Diese Kamera verfügt über eine absolute Messgenauigkeit von $\pm 1,5 \%$ oder $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die relative Genauigkeit ist jedoch wesentlich höher und die Auflösung beträgt $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Kamera erlaubt eine individuelle Einstellung des Emissionskoeffizienten, jedoch wurde für alle Oberflächen der Wert 0,96 verwendet.

Die Messungen erfolgten aus einem Abstand von rund 30 cm und aus dem von der Kamera gemessenen Temperaturfeld wurde der am häufigsten vorkommende Wert abgelesen (siehe Abbildung 10). Die Temperaturmessungen erfolgten in einem zeitlichen Abstand von 30 min und begannen um ~ 8 Uhr am Morgen und wurden kontinuierlich bis 12 Uhr durchgeführt. Dadurch kann die morgendliche Erwärmungsphase der Graboberflächen vollständig abgebildet werden.



Abbildung 10: Messung der Oberflächentemperatur mittels Infrarotkamera

Mobile Temperatur- und Feuchtemessung

Die mobile Temperatur- und Feuchtemessung erfolgt mittels einer Eigenskostruktion welche auf ein Fahrrad montiert werden kann (siehe *Abbildung 11*). Neben den meteorologischen Messungen ist ein GPS Sensor integriert, der eine räumliche Zuordnung der meteorologischen Messungen erlaubt. Alle Messungen wurden mittels eines CAMPBELL Datenlogger (CR 100) in 3 sec Intervallen abgespeichert. Bei einer mittleren Fahrradgeschwindigkeit von rund 3 m/s erfolgt damit die Messung alle 10 m entlang der Messstrecke. Da die Sensorik nur über einen einfachen Strahlungsschutz verfügt, kann hier ein Strahlungsfehler bei der Temperaturmessung nicht ausgeschlossen werden. Durch die Ventilation durch den Fahrtwind sollte bei einer Geschwindigkeit von ~ 3 m/s dieser Fehler gering sein, an Stellen an denen man langsamer fahren muss (z. B. an Ampeln), könnte dieser aber relevant werden.



Abbildung 11: Temperatur, Feuchte und GPS Sensorik am Fahrrad.

Ergebnisse

Albedomessungen

Die Albedomessungen zeigten sehr klare Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächen. Wie zu erwarten hat der weiße Kies die höchste Albedo von 0,49 und der polierte Stein die niedrigste mit 0,09. Alle anderen Oberflächen hatten sehr ähnliche Albedowerte zwischen 0,21 und 0,25. Die Messungen zeigen auch keine Abhängigkeit von der Uhrzeit bzw. dem Sonnenstand und waren sehr konstant. Die Schwankungsbreite (Standardabweichung) beträgt lediglich 0,01 bis 0,02. Diese geringe Standardabweichung zeigt die gleichbleibenden Bedingungen während der Messwiederholungen, obwohl die Sonneneinstrahlung natürlich während des Messzeitraumes aufgrund des Tagesganges von rund 260 W/m² um 8 Uhr auf rund 500 um 9:30 zugenommen hat. Dies erhöht die Glaubwürdigkeit der Messergebnisse. Alle Ergebnisse sind in *Tabelle 1* und *Abbildung 12* dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnis der Albedomessungen in absteigender Reihenfolge.

Oberfläche	Albedo	Standardabweichung
Weißer Kies	0,49	0,02
Stein	0,23	0,01
Rindenschnitzel	0,25	0,01
Gras	0,24	0,01
Asphalt	0,21	0,01
Poliert Schwarz	0,09	0,01

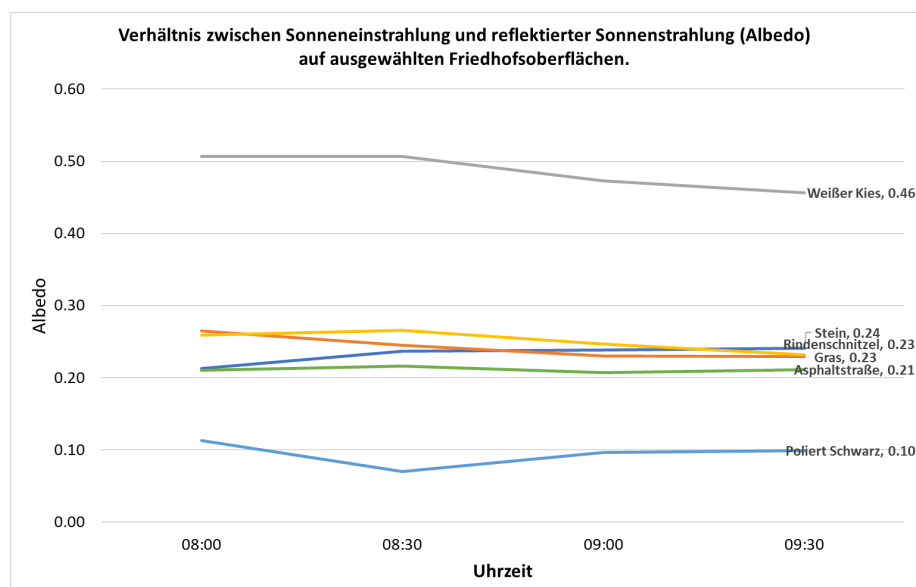


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Albedomessung an den unterschiedlichen Oberflächen.

Oberflächentemperaturmessungen

Die Oberflächentemperaturmessungen erfolgten während der morgendlichen Erwärmungsphase von 8:00 bis 12:00 Uhr (Mitteleuropäische Sommerzeit). Während der Messungen herrschte ungestörte Sonneneinstrahlung (siehe *Abbildung 14*) mit einem Strahlungsfluss von rund 250 W/m^2 am Beginn und rund 750 W/m^2 am Ende der Messung. Der Strahlungsanstieg war zwischen 8:00 und 11:00 Uhr in etwa linear und danach flachte er deutlich ab, und um 12:00 wurde annähernd die maximale Einstrahlung dieses Tages erreicht.

Auch der Temperaturanstieg der Graboberflächen erfolgte in etwa linear (siehe *Abbildung 13*, jedoch zeigen die verschiedenen Anstiegskurven zwischen einzelnen Messungen, also bei 30 min Zeitabständen, geringere Anstiege, welche aber häufig durch stärkere Anstiege im nächsten Zeitschritt kompensiert wurden. Dies könnte daran liegen, dass die Temperaturmessungen nicht exakt an den selben Stellen durchgeführt wurden. Die mittleren Erwärmungsraten (siehe *Tabelle 2*) wurden daher zuerst auf Stundenbasis ermittelt und danach gemittelt.

Die niedrigsten Erwärmungsraten weist wie zu erwarten die Grasoberfläche auf. Aufgrund der Transpirationskühlung beträgt diese im Mittel nur $2,8 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Stunde und die Maximaltemperatur beträgt $32,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und dies obwohl die Albedo in etwa gleich hoch ist wie beim Asphalt und den Rindenschnitzeln. Dies bei einer Lufttemperatur von rund $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine ähnlich niedrige Maximaltemperatur erreicht lediglich die weiße Kiesoberfläche mit $34,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Oberflächen Stein, polierter schwarzer Stein und Asphalt reagieren thermisch sehr ähnlich. Alle drei erreichen eine Maximaltemperatur von rund $43 \text{ }^\circ\text{C}$ und haben Erwärmungsraten von etwa $5 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Stunde. Die ähnliche Reaktion des polierten schwarzen Steins ist etwas verwunderlich, da die Albedo doch wesentlich niedriger ist als bei den anderen Oberflächen. Eventuell beeinflusst die polierte Oberfläche die Infrarot- Temperaturmessung. Es zeigten sich im Infrarotbild immer wieder Spiegelungseffekte, welche die Temperaturmessung stören können.

Am stärksten erwärmen sich die Rindenschnitzel. Diese erwärmen sich im Mittel um $6,7 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Stunde und erreichen eine Maximaltemperatur von $54,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Dies liegt daran, dass Rindenschnitzel in etwa dieselbe Albedo wie Stein bzw. Asphalt haben, jedoch eine wesentlich geringere Masse aufweisen und durch die Lufteinschlüsse zwischen den Rindenschnitzeln ist zudem eine gute Isolierung gegeben. Dies gilt natürlich nur für trockene Rindenschnitzel. Solange diese durch Niederschlag nass sind, sollten sie in etwa wie Grasoberflächen reagieren, da dann auch eine Transpirationskühlung eintritt. Die Benetzung von Rindenschnitzeln sollte auch etwas länger andauern als bei den glatten Oberflächen aus Stein, da Rindenschnitzel Wasser aufsaugen können. Während sommerlicher Schönwetterperioden zeigen sie jedoch dieses extreme Temperaturverhalten.

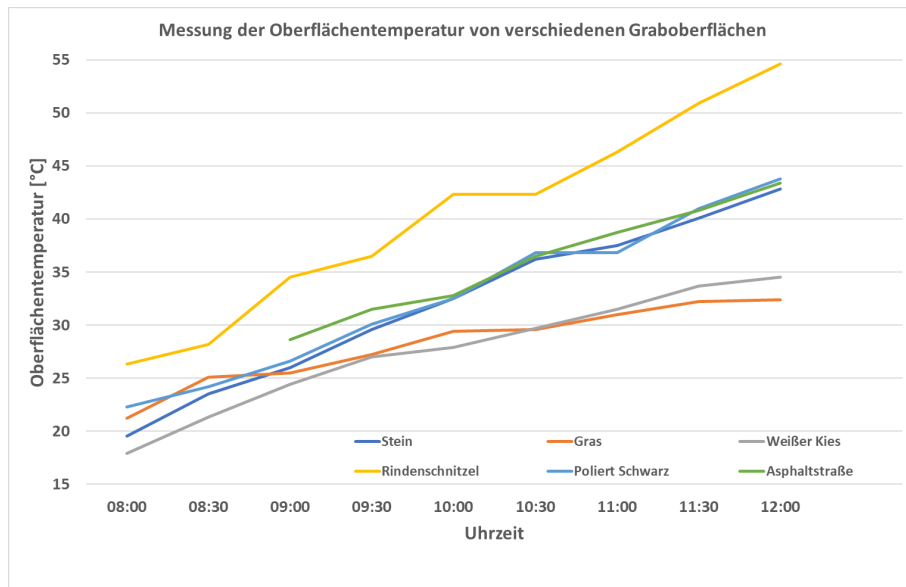


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperaturen am Sieveringer Friedhof am 30. August 2022.

Tabelle 2: Mittlere Erwärmungsraten der verschiedenen Graboberflächen

Oberfläche	Mittlere Erwärmungsraten [°C/h]	Standardabweichung
Weißer Kies	4,2	1,4
Stein	5,8	0,7
Rindenschnitzel	7,1	1,8
Gras	2,8	1,3
Asphalt	4,9	1,1
Poliert Schwarz	5,4	1,1

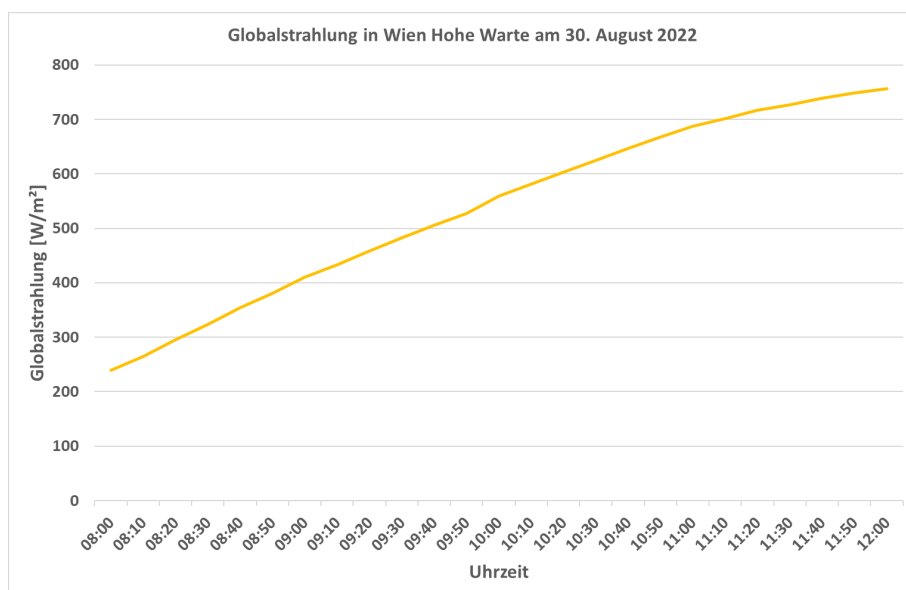


Abbildung 14: Verlauf der Globalstrahlung an der Station Wien Hohe Warte während der Oberflächentemperaturmessungen.

Mobile Messungen mit dem Fahrrad

Die mobilen Fahrradmessungen von Temperatur und Feuchte dienen in erster Linie zur Bestimmung der Temperaturverhältnisse zwischen den meteorologischen Stationen innerhalb der Friedhöfe und der Fernwirkung außerhalb der Friedhöfe. In *Abbildung 15* sind die Messfahrten von beiden Friedhöfen um 8 Uhr am Morgen am Tag der Messkampagne, dem 30. August dargestellt. Man erkennt ganz klar wärmere und kühlere Abschnitte, wobei zu diesem Zeitpunkt der Temperaturunterschied entlang der Fahrroute am Meidlinger Friedhof etwas mehr als 3 °C beträgt und am Sievinger Friedhof in etwa 2,5 °C. Die Daten der Messfahrten wurden dem AIT für die Evaluierung der mikroklimatischen Bedingungen zur Verfügung gestellt.

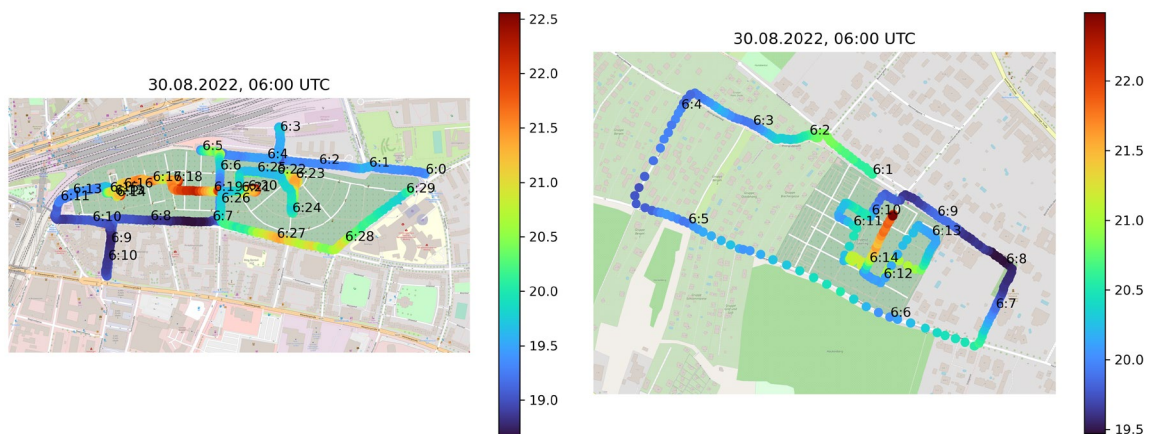


Abbildung 15: Messfahrt am Meidlinger Friedhof (links) und am Sievinger Friedhof (rechts) am 30. August um 8 Uhr Ortszeit.

Auswertung der Permanentmessungen

Die Auswertungen der Permanentmessungen fokussieren sich auf die mikroklimatischen Unterschiede zwischen den einzelnen meteorologischen Stationen innerhalb der Friedhöfe. Da die mikroklimatischen Unterschiede an windschwachen und wolkenlosen Tagen (Strahlungstagen) am stärksten ausgeprägt sind, wurden aus den mehrere Monate dauernden Messungen genau diese Tage ausgewählt und für die weitere Analyse verwendet.

Zeitreihe der Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen an beiden Friedhöfen (*Abbildung 16*) zeigen, dass die Temperaturen innerhalb der Friedhöfe einen sehr ähnlichen Verlauf haben. In der Abbildung sind alle Stationen eingezeichnet, aber bei dieser Darstellungsart überdecken sich die Messreihen größtenteils und es sieht fast wie eine Kurve aus. Grundsätzlich sieht man, dass der Sommer 2022 mehrere heiße Phasen hatte. Am Meidlinger Friedhof sieht man, dass bereits im Mai Temperaturen von 30 °C überschritten wurden. Im Juni erfolgte dies mehrmals und im Juli und August wurden an beiden Friedhöfen Temperaturmaxima über 35 °C gemessen.

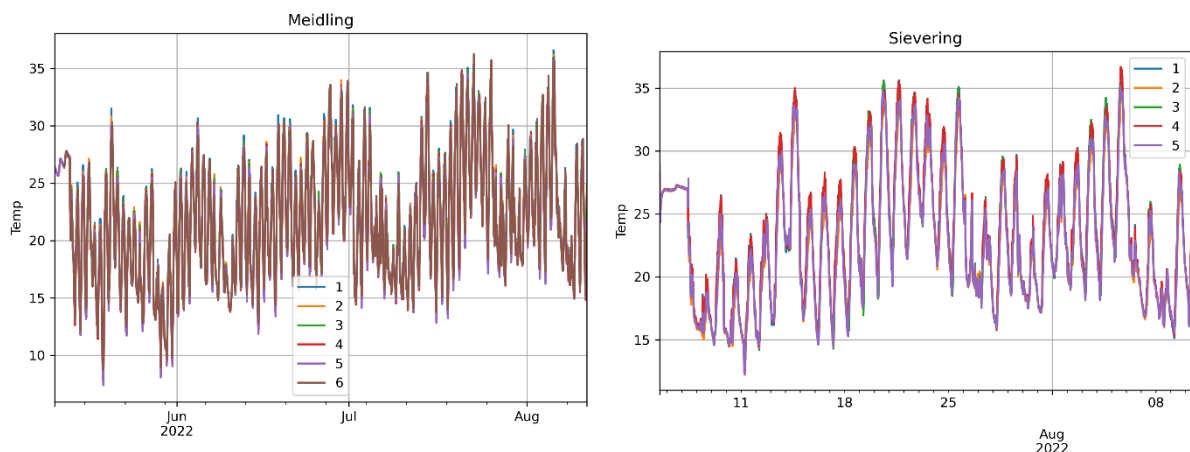


Abbildung 16: Temperaturverlauf während der Permanentmessungen am Meidlinger Friedhof (links) sowie am Sieveringer Friedhof (rechts)

Für die Untersuchung der unterschiedlichen Mikrokimate innerhalb der Friedhöfe wurde eine feinere Differenzierung gewählt, wobei wie oben beschrieben nur die Strahlungstage berücksichtigt werden.

Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur

Der mittlere Tagesgang beträgt an beiden Friedhöfen in etwa 10 Grad. Das Temperaturniveau ist am Meidlinger Friedhof um etwa 2 Grad niedriger, dies liegt aber in erster Linie daran, dass dort die Messungen bereits im Mai begonnen wurden und daher auch die kühleren Monate Mai und Juni in die Berechnung mit eingeflossen sind. Am Meidlinger Friedhof sind die Unterschiede zwischen den Standorten in der Nacht mit nicht ganz einem Grad Temperaturunterschied zwischen der wärmsten und der kältesten Station deutlich stärker ausgeprägt als in Sievering. Dies dürfte daran liegen, dass der Meidlinger Friedhof flach ist und sich hier die mikroklimatischen Unterschiede in der Nacht gut entwickeln können. Der Sieveringer Friedhof hat eine Hanglage und hier kann es in der Nacht durch katabatische Kaltluftflüssen zu einer Durchmischung und damit geringeren Temperaturunterschieden kommen. Untertags sind die Unterschiede wiederum am Sieveringer Friedhof stärker ausgeprägt. Jedoch zeigen hier die Stationen wesentlich stärker Schwankungen im zeitlichen Verlauf an. Dies könnte darauf hindeuten, dass bei den Messungen in Sievering doch noch ein gewisser Einfluss durch Strahlungsfehler gegeben sein könnte. Der in Sievering verwendete Strahlungsschutz für die Messungen war von etwas geringerer Qualität als jener an den Stationen im Meidlinger Friedhof. Generell sieht man an beiden Friedhöfen, dass es beim Tagesmaximum nicht nur einen Unterschied von etwa einem Grad gab, sondern auch eine zeitliche Verschiebung des Zeitpunktes des Tagesmaximums. Dieses kann innerhalb eines Friedhofes um etwa eine Stunde variieren.

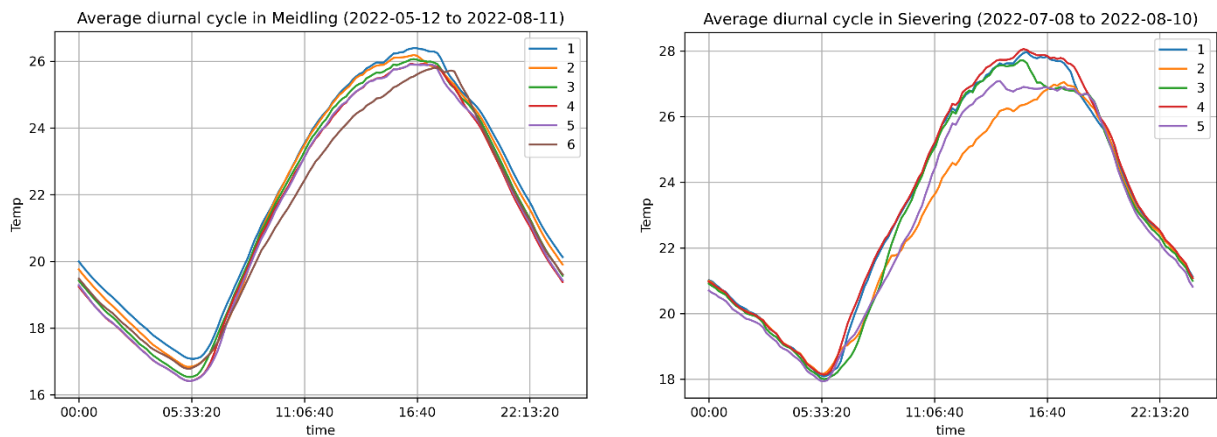


Abbildung 17: Mittlerer Tagesgang an den Stationen am Meidlinger Friedhof (links) und am Sieveringer Friedhof (rechts).

Minimumtemperaturen

An Strahlungstagen erstreckt sich die Bandbreite der Minimumtemperaturen am Meidlinger Friedhof von 7,5 °C an der kältesten Station in der kältesten Nacht bis zu 25 °C an der wärmsten Station in der wärmsten Nacht. In Sievering ist diese Bandbreite deutlich geringer von etwa 14,2 °C bis 24,4 °C. Dies liegt aber daran, dass in Meidling bereits im Mai mit den Messungen begonnen wurde. Die Mittelwerte für die Minimumtemperaturen streuen in Meidling um 0,7 °C zwischen 15,7 an der kältesten und 16,4 an der wärmsten Station. In Sievering ist diese Streuung mit 0,5 °C geringer. Dies dürfte an der Hanglage liegen.

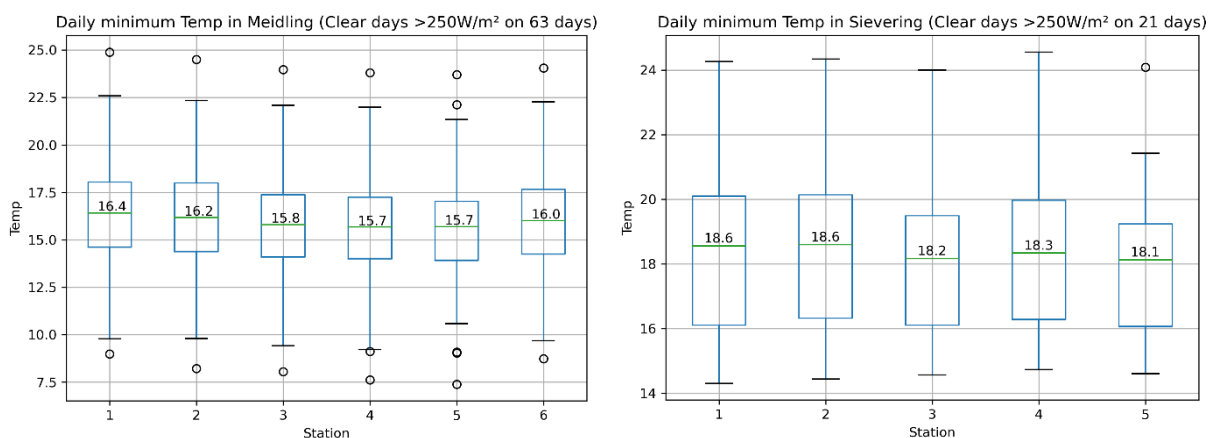


Abbildung 18: Minimumtemperaturen an Strahlungstagen am Meidlinger Friedhof (links) und am Sieveringer Friedhof (rechts)

Maximumtemperaturen

Bei den Maximumtemperaturen reicht das Temperaturniveau in Meidling von knapp unter 20 °C bis über 36 °C und in Sievering von knapp über 22 °C bis ebenfalls über 36 °C. Die Schwankungsbreite der mittleren Tagesmaxima beträgt in Meidling 0,6 °C von 27,7 °C an der kühlssten Station bis 28,3 an der wärmsten Station. In Sievering ist der Unterschied deutlich stärker und beträgt 1,3 °C mit 30,6 °C an der kühlssten Station und 31,9 °C an der wärmsten Station. Dieser größere Unterschied kann aber eventuell an einem Strahlungsfehler liegen, da in Sievering etwas einfachere Strahlungsschutze verwendet wurden. Es ist aber schon auch möglich, dass durch die deutlich dichtere Besetzung des Sieveringer Friedhofes mit Gräbern, es zu einer stärkeren Überhitzung und damit größeren Unterschieden bei den Tagesmaxima kommt. Hier wird ein Vergleich mit der Modellierung interessant.

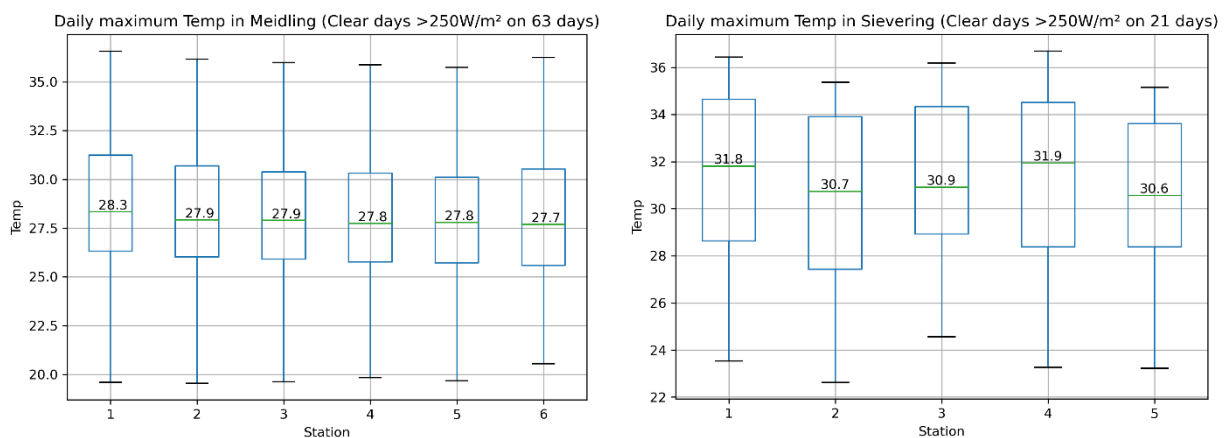


Abbildung 19: Maximumtemperaturen an Strahlungstagen am Meidlinger Friedhof (links) und am Sieveringer Friedhof (rechts)

Luftfeuchtemessungen

Die Luftfeuchtemessungen zeigten keinerlei mikroskalige Unterschiede an beiden Friedhöfen bei der absoluten Luftfeuchtigkeit. Die gemessenen Unterschiede bei der relativen Luftfeuchtigkeit können Großteils durch die Unterschiede bei der Lufttemperatur erklärt werden.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit den Permanentmessungen und der Intensivmesskampagne am 30. August 2022 in den beiden Friedhöfen Meidling und Sievering konnten wertvolle Erkenntnisse über das Mikroklima innerhalb der Friedhöfe gewonnen werden. Grundsätzlich war der Sommer 2022 sehr gut für mikroklimatische Temperaturmessungen geeignet. Mehrere Schönwetterperioden führten bereits im Mai zu ersten Tagesmaxima über 30 °C und im Juni und Juli wurden in beiden Friedhöfen Tagesmaxima über 35 °C gemessen.

Am Tagen mit geringer Bewölkung und möglichst ungestörter Einstrahlung, sowie geringen Windgeschwindigkeiten (Strahlungstagen) treten die größten mikroklimatischen Unterschiede auf. Nur Strahlungstage wurden für die detaillierte Analyse des Mikroklimas herangezogen und stellen daher die maximale räumliche Differenzierung des Temperaturfeldes dar. Im Mittel über alle Tage ist der Temperaturunterschied daher geringer.

Bei den Minimumtemperaturen beträgt der mittlere Unterschied zwischen den wärmsten und den kältesten Stationen 0,7 °C in Meidling und 0,5 °C in Sievering. Der etwas geringere Unterschied in Sievering kann durch die Hanglage und katabatischen Kaltluftflüssen erklärt werden, welche zu einer Durchmischung führen.

Bei den Maximumtemperaturen beträgt der mittlere Unterschied zwischen den wärmsten und den kältesten Stationen 0,6 °C in Meidling und 1,3 °C in Sievering. Da untertags üblicherweise mehr Wind geht als in der Nacht sollte hier eine bessere Durchmischung gegeben sein und dadurch die räumlichen Unterschiede im Temperaturfeld etwas geringer. Dies ist in Meidling auch der Fall, in Sievering hingegen sind die Unterschiede faktisch doppelt so hoch wie in der Nacht. Hier kann leider ein Strahlungsfehler nicht ganz ausgeschlossen werden, der gerade die Maximaltemperatur verfälscht. Durch die deutlich dichtere Verbauung des Sieveringer Friedhofes mit Gräbern, kann aber ein realer mikroklimatischer Effekt auch einen Beitrag zu diesem Unterschied leisten.

Die Messungen der Luftfeuchtigkeit zeigen, dass innerhalb der Friedhöfe eine sehr homogene absolute Luftfeuchtigkeit herrscht. Die gemessenen Unterschiede bei der relativen Luftfeuchtigkeit können zum Großteil durch die Temperaturunterschiede erklärt werden.

Die Albedomessungen der verschiedenen Graboberflächen zeigen sehr robuste und plausible Ergebnisse. Asphalt, Gras, grauer Stein und Rindenschnitzel zeigen sehr ähnliche Albedowerte zwischen 0,20 und 0,25. Weißer Kies hat mit 0,46 eine deutlich höhere Albedo und polierter schwarzer Stein mit 0,10 eine deutlich niedrigere.

Diese Albedowerte sind ein wichtiger Faktor bei der Erwärmung und Abkühlung der Graboberflächen, da damit die Energieaufnahme durch die Sonneneinstrahlung gesteuert wird. Die Albedo ist aber nicht der einzige Faktor. Wie stark sich eine Oberfläche erwärmt, hängt auch von der Gesamtmasse und der Wärmekapazität des Materials, und bei Pflanzen zusätzlich noch von der Transpirationskühlung ab. Aufgrund der Transpirationskühlung erwärmt sich die Grasoberfläche am geringsten und erreicht eine Maximaltemperatur von etwa 32 °C. Nur wenig wärmer wird die weiße Kiesoberfläche mit 34 °C. Hier ist die hohe Albedo die Ursache für

die geringe Erwärmung. Die Oberflächen Asphalt, grauer und schwarzer polierter Stein erreichen jeweils rund 43 °C sind also in etwa 10 Grad wärmer als die beiden kühleren Oberflächen. Es ist etwas verwunderlich warum der schwarze polierte Stein sich gleich erwärmt wie der graue Stein, obwohl die Albedo des schwarzen Steines deutlich niedriger ist. Eigentlich müsste er sich stärker erwärmen. Entweder hatte die schwarze Grabplatte deutlich mehr Masse als die graue, oder die Wärmekapazität der verschiedenen Steine hat einen größeren Unterschied. Es kann aber auch sein, dass die Politur der Oberfläche die Messung mit der Infrarot Wärmebildkamera verfälscht. Bei der Messung am schwarzen Stein waren im Infrarotbild durchaus Spiegelungen zu erkennen. Insofern kann hier ein Messfehler bei der Temperaturmessung nicht ganz ausgeschlossen werden.

Die stärkste Erwärmung erfolgte bei den Rindenschnitzeln. Dies erreichten eine Maximaltemperatur von 54.6 °C und waren damit um 20 °C heißer als die kühleren Materialien und immer noch um 10 Grad wärmer als Stein- und Asphaltoberflächen. Diese starke thermische Reaktion von Rindenschnitzeln kann durch die geringe interne Wärmeleitfähigkeit und geringe Masse erklärt werden. Dies gilt jedoch nur für trockene Rindenschnitzel. Solange Rindenschnitzel feucht sind, was aufgrund der Saugfähigkeit durchaus mehrere Tage nach einem Niederschlagsereignis sein kann, reagieren Rindenschnitzel ähnlich wie Grasoberflächen. Während länger andauernder Hitzewellen, tragen sie jedoch zu einer Überhitzung innerhalb des Friedhofes während des Tages bei.

Die Albedomessungen, zusammen mit den Erwärmungsraten der verschiedenen Graboberflächen, liefern die Basis für die Parametrisierung der verschiedenen Graboberflächen für ein mikrometeorologisches Modell. Diese Ergebnisse, zusammen mit den permanenten Temperatur- und Luftfeuchtemessungen sowie der mobilen Messung mit dem Fahrrad, wurden dem AIT für die Optimierung und Evaluierung des mikrometeorologischen Friedhofmodells zur Verfügung gestellt.