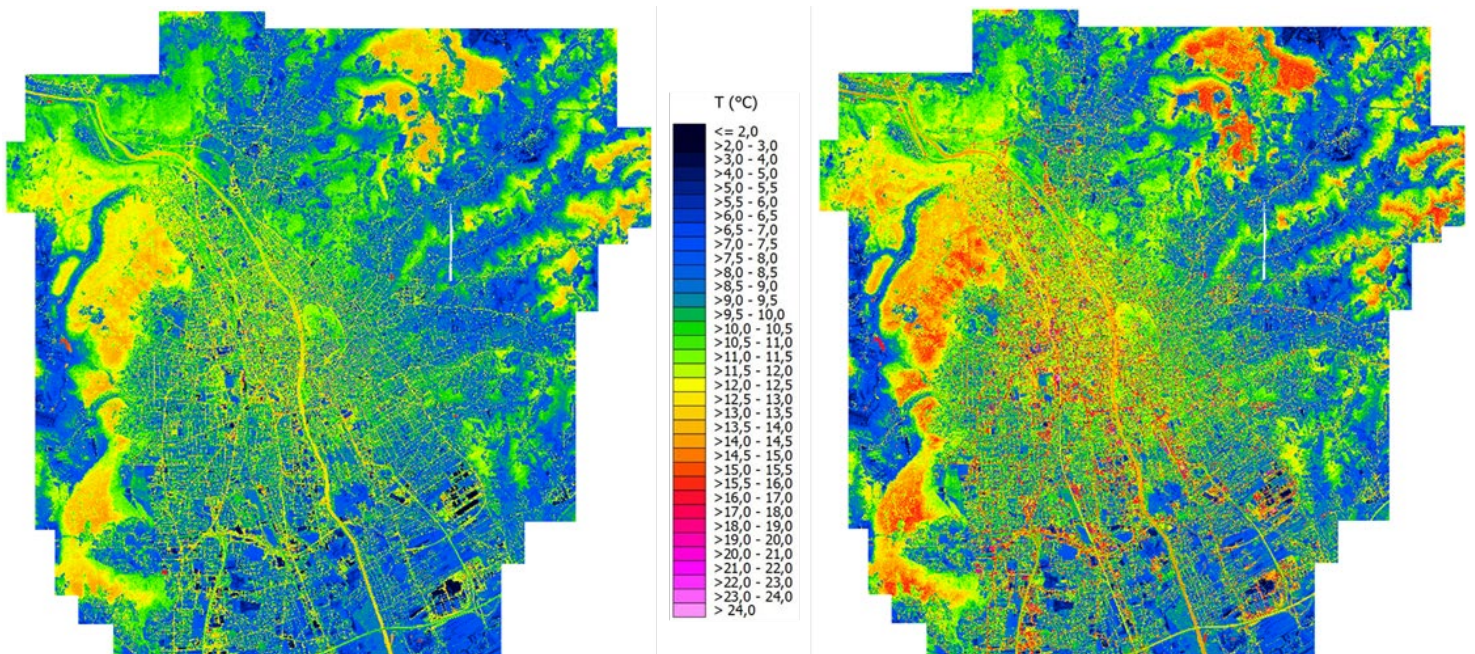


Analyse der Grazer Thermalbefliegungen 2021

Ao.Univ-Prof.Mag.Dr. Wolfgang SULZER
BSc. Thomas POSCH



Graz im Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

A) Dokumentation Jahreszeitliche Veränderung der Oberflächentemperatur im Großraum Graz von 1984 -2021 Mittels Satellitenbildaufnahmen

1. Korrektur der Grazer Thermalluftbilder 2021 – Methodik	4
2. Analysen	10
2.1. Mitteltemperatur unterschiedlicher Oberflächentypen	10
2.1.1. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ2 Tagaufnahme	10
2.1.2. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ2 Morgenaufnahme	13
2.1.3. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ1 Tagaufnahme	14
2.1.4. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ1 Morgenaufnahme	16
2.2. Temperaturdifferenzen der Tag- und Morgenflüge	18
2.3. Temperaturverhalten der Stadtstrukturen	22
2.3.1. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturen – FZ2 Tag	22
2.3.2. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturen – FZ2 Morgen	24
2.3.3. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturpolygone – Kartendarstellung	26
2.4. Klassifizierte Thermalkarte	30
2.5. Urban Heat Island	35
3. Referenzen	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der relevanten Strahlungskomponenten in der Luftbildthermographie. Die Formel sowie die Namensgebung der Komponenten ist angelehnt an Bitelli et al. 2015. Quelle der Abbildung: Posch 2023.	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Raytracing-Prozesses. Hintergrundbild zur Verfügung gestellt von Daniel Rüdiger.....	5
Abbildung 2: Vergleich der Murtemperatur.....	6
Abbildung 4: Unkorrigierte und korrigierte Morgenaufnahme vom 10.9.2021	7
Abbildung 2: Beispiel Solarpark Wasserwerk Andritz.....	8
Abbildung 2: Beispiel Plabutsch Südosthang.....	9
Abbildung 3: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Tagaufnahme.....	12
Abbildung 4: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Morgenaufnahme.	14
Abbildung 5: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Tagaufnahme.....	16
Abbildung 6: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Morgenaufnahme.	18
Abbildung 7: Die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen der jeweiligen Tag- und Morgenaufnahme, aufgegliedert nach verschiedenen Oberflächentypen.....	20
Abbildung 8: Darstellung der FZ2-Temperaturdifferenz (= FZ2-Tag minus FZ2-Morgen) für Ausschnitte des Innenstadt- bzw. Bahnhofbereichs.....	22
Abbildung 9: Mittlerer Temperaturunterschied der Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“, die in der korrigierten FZ2-Tagaufnahme eine mittlere Oberflächentemperatur von rund 33.8 °C aufweist.....	23
Abbildung 10: Mittlerer Temperaturunterschied der Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“, die in der korrigierten FZ2-Morgenaufnahme eine mittlere Oberflächentemperatur von rund 8.5 °C aufweist.....	25
Abbildung 11: Korrigierte Mitteltemperaturen (FZ2 Tag) der Stadtstrukturpolygone.....	28
Abbildung 12: Korrigierte Mitteltemperaturen (FZ2 Morgen) der Stadtstrukturpolygone.	29
Abbildung 13: Klassenmatrix zur Einteilung der Thermalpixel (bearbeitet nach Steinicke & Streifeneder 2010b).....	30
Abbildung 14: Klassifizierte Thermalkarte für das FZ2-Befliegungsgebiet (berechnet anhand der FZ1-Morgen- und FZ2-Tagaufnahme vom 9.9.21).	34
Abbildung 15: Inversionsbereinigte, klassifizierte Thermalkarte für das FZ2-Befliegungsgebiet.	34
Abbildung 16: Beispielhafte Abgrenzung der städtischen Wärmeinseln bzw. des Kältepol Mariatrost (schwarz-strichlierte Umrandungen). Die Hintergrundkarte gibt die mittleren FZ2-Morgentemperaturen der Stadtstrukturpolygone wieder	35

1. Korrektur der Grazer Thermalluftbilder 2021 – Methodik

Zur Bestimmung der Oberflächentemperaturen aus den Grazer Thermalluftbildern (2021) wurde in Kooperation mit **Daniel Rüdisser** ein neuartiger Korrekturansatz entwickelt, der eine Erweiterung bisheriger Korrekturmethode (z.B. Bitelli et al. 2015) darstellt. Neben der Berücksichtigung von Atmosphärenparametern und Emissionsgraden zeichnet sich die neu entwickelte Methode durch den Einsatz von Raytracing aus, wodurch eine genaue Bestimmung der thermalen Umgebungseinflüsse ermöglicht wird.

Wie folgende Abbildung zeigt, setzt sich das von der Thermalkamera registrierte Signal (l_S) aus mehreren Komponenten zusammen (vgl. Bitelli et al. 2015):

$$l_S = \varepsilon \cdot \tau \cdot l_B + \rho \cdot \tau \cdot l_{SR} + \rho \cdot \tau \cdot l_{sky} + l_u$$

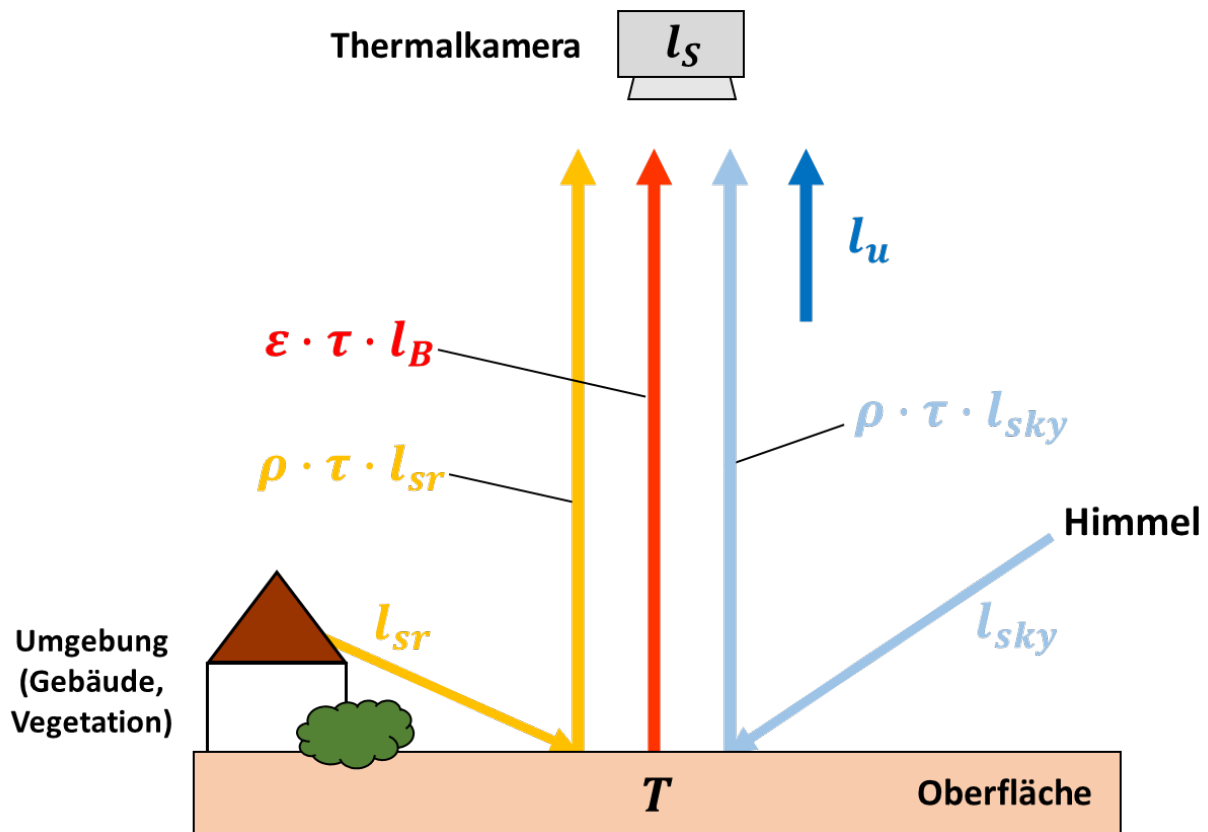


Abbildung 1: Schematische Darstellung der relevanten Strahlungskomponenten in der Luftbildthermographie. Die Formel sowie die Namensgebung der Komponenten ist angelehnt an Bitelli et al. 2015. Quelle der Abbildung: Posch 2023.

Eine Oberfläche mit der Temperatur T und dem Emissionsgrad ε sendet Thermalstrahlung ($\varepsilon \cdot l_B$) aus, welche auf ihrem Weg durch die Atmosphäre gemäß der Transmissivität τ abgeschwächt und schließlich von der Thermalkamera registriert wird (vgl. Mandanici et al. 2016). Hinzu kommen direkte Strahlungseinflüsse der Atmosphäre (l_u) sowie Strahlungskomponenten von der Umgebung (l_{sr}) bzw. vom Himmel (l_{sky}), welche auf die Oberfläche treffen und teilweise zur Thermalkamera reflektiert werden (in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad ρ der Fläche). Ziel der Korrektur ist dabei die möglichst genaue Bestimmung aller involvierten Komponenten sowie die Ableitung des Strahlungsanteils l_B , welcher über das Planck'sche Strahlungsgesetz in die gesuchte Oberflächentemperatur überführt werden kann (vgl. Bitelli et al. 2015).

Für den vorliegenden Fall wurde zur Bestimmung der Atmosphärenparameter die Software MODTRAN 6 (vgl. Berk et al. 2014 und Spectral Sciences Inc. 2016) verwendet. Die benötigten Reflexions- bzw. Emissionsgrade wurden mithilfe der ECOSTRESS spectral library (vgl. Meerdink et al. 2019; Baldrige et al. 2009) abgeschätzt und mittels weiterführender Literaturrecherchen ergänzt. Für die Bestimmung der Strahlungseinflüsse vom Himmel (l_{sky}) bzw. der Umgebung (l_{sr}) wurde zudem ein Raytracing-Ansatz implementiert (vgl. Rüdissler et al. 2021): Von einer Startposition ausgehend wird eine Vielzahl an (Cosinus-gewichteten)

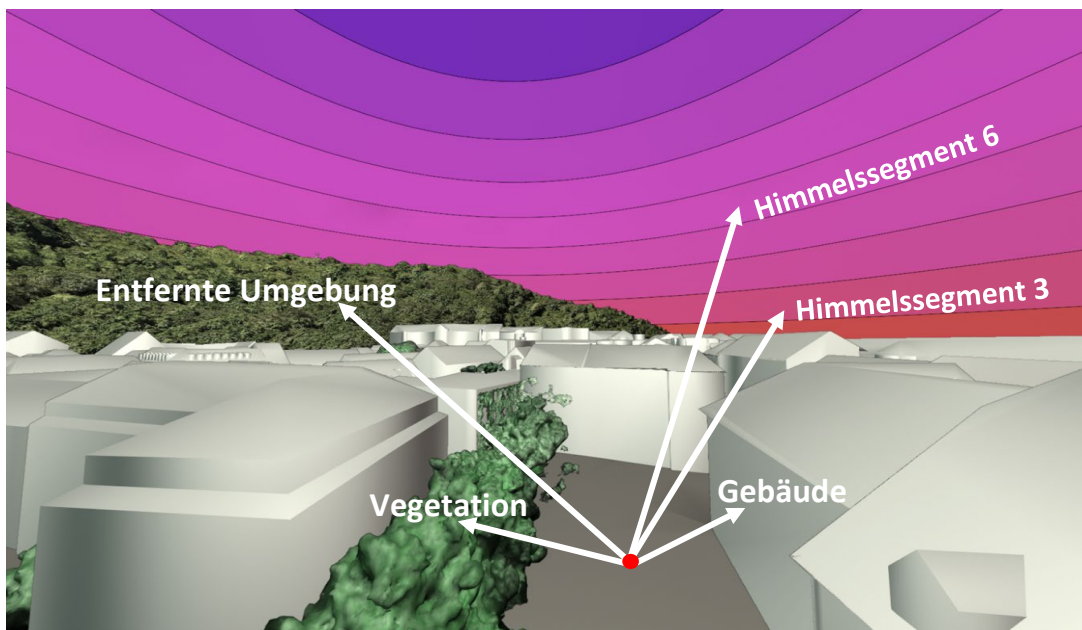


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Raytracing-Prozesses. Hintergrundbild zur Verfügung gestellt von Daniel Rüdissler.

Strahlen in alle Richtungen entsandt. Für jeden Strahl wird bestimmt, ob er auf Gebäude, Vegetation, entfernte Erhebungen (z.B. Berge) oder einen bestimmten Abschnitt des Himmels trifft. Abbildung 2 veranschaulicht dieses Prinzip (dargestellt für einige wenige Strahlen). Mit Hilfe dieses Raytracing-Ansatzes können die Strahlungseinflüsse der umliegenden Vegetation, Gebäude sowie des Himmels abgeschätzt und in der Korrektur berücksichtigt werden.

Zu den notwendigen Raster-Inputdaten für den neu entwickelten Korrekturansatz zählen (neben den Thermalluftbildern) ein räumlich hochauflösendes (z.B. 1 m) digitales Oberflächenmodell sowie eine Landnutzungsklassifikation. Das Ergebnis der Korrektur ist ein TIFF-Raster der Oberflächentemperaturen (mit derselben räumlichen Auflösung und Ausdehnung wie das unkorrigierte Input-Thermalbild).

Murtemperatur (°C)		
Wassertemperatur (Messstation)	Korrigierte Thermalaufnahme	Unkorrigierte Thermalaufnahme
14,6	14,4	13,2

Abbildung 3: Vergleich der Murtemperatur

FZ2 Morgenaufnahme (10.09.21)

Unkorrigiert

Korrigiert

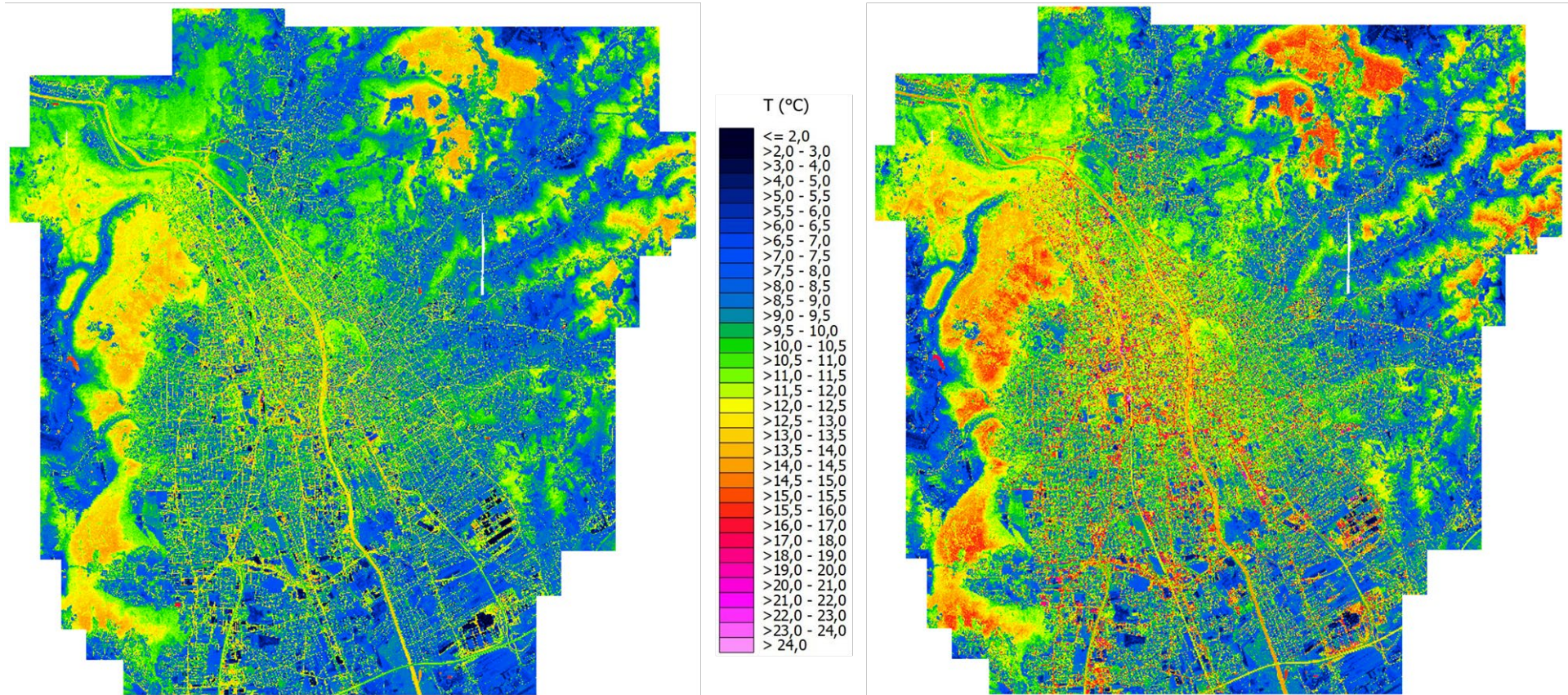
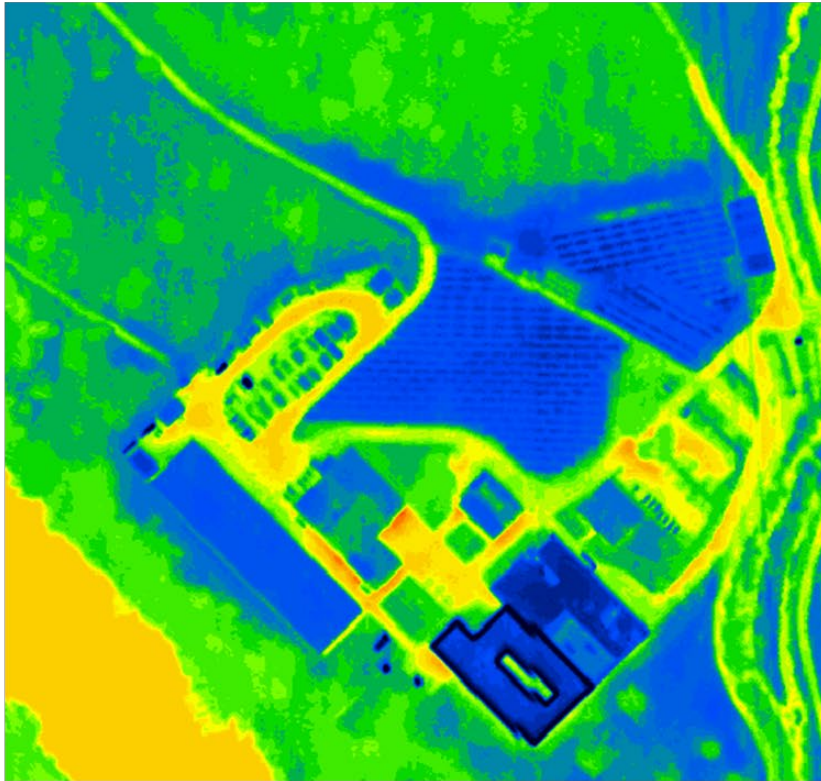


Abbildung 4: Unkorrigierte und korrigierte Morgenaufnahme vom 10.9.2021

FZ2 Morgenaufnahme - unkorrigiert



FZ2 Morgenaufnahme - korrigiert

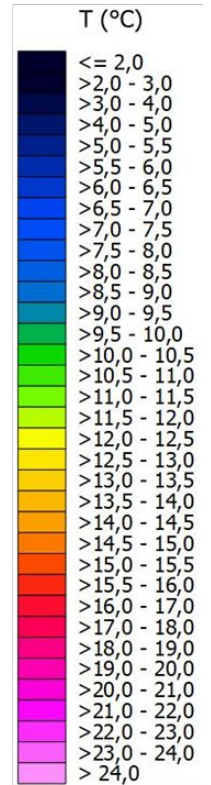
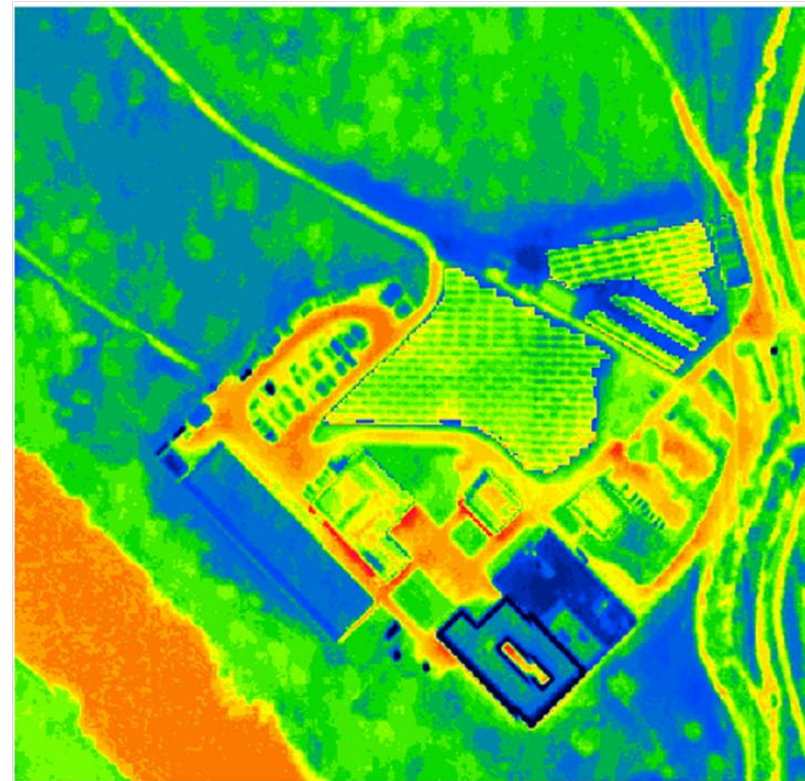


Abbildung 5: Beispiel Solarpark Wasserwerk Andritz.



Oberflächen-Temperaturprofil: Südosthang Plabutsch (FZ2 Morgen)

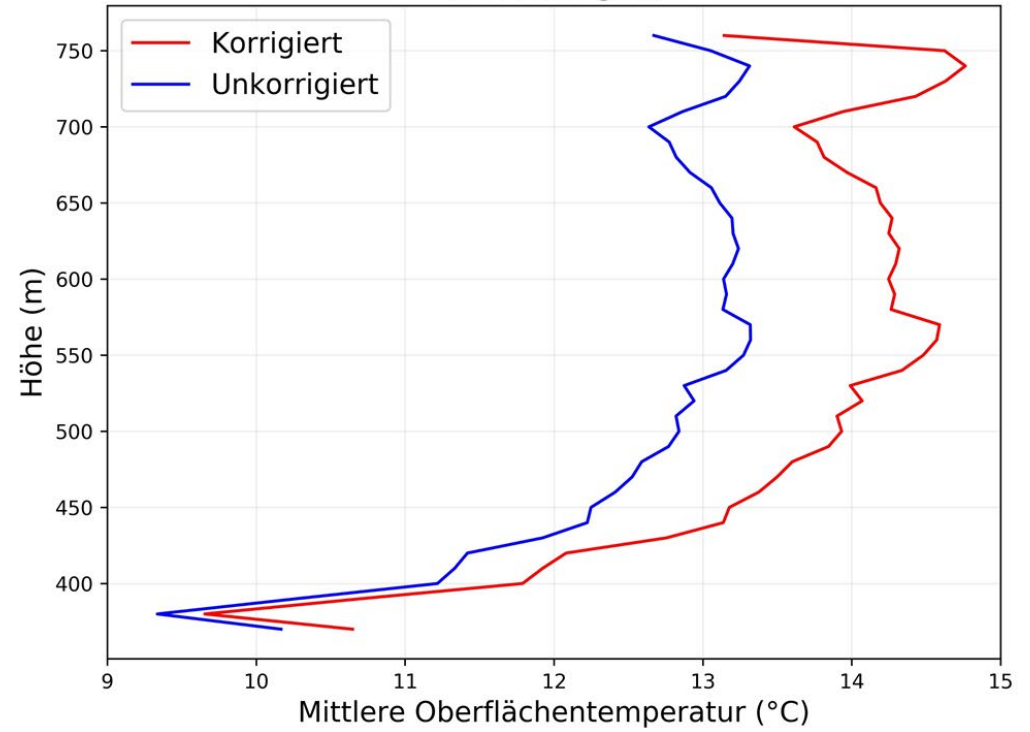


Abbildung 6: Beispiel Plabutsch Südosthang

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Deutliche Verbesserung durch Korrektur (bessere Absolutwerte, höherer „Kontrast“)
- Starke Abhängigkeit von Emissionsgrad
 - Bestimmung nicht trivial
- Anwendung Korrektur immer sinnvoll (auch bei nicht klassifizierten Emissionsgraden)
 - atmosphärische Korrektur immer relevant
 - Emissionsgrad von Vegetation und vielen Oberflächen ähnlich
- Metalloberflächen schwer bestimmbar (große Spanne an Emissionswerten)
- Bei zukünftiger Anwendung gezielte Messung von Wassertemperaturen zur Kalibrierung / Validierung

2. Analysen

2.1. Mitteltemperatur unterschiedlicher Oberflächentypen

Basierend auf der Hyperspektralklassifikation und einer ergänzenden Satellitenbild-Klassifikation konnte die mittlere Oberflächentemperatur verschiedener Bodenbedeckungen innerhalb des FZ2-Flugbereichs (= Stadtgebiet Graz und unmittelbare Umgebung) abgeleitet werden. Die Mitteltemperaturen wurden für die FZ2 sowie die FZ1 (zugeschnitten auf den FZ2-Flugbereich) bestimmt. Für Vergleichszwecke wurden die Berechnungen sowohl mit den korrigierten als auch den unkorrigierten Thermalrastern durchgeführt.

2.1.1. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ2 Tagaufnahme

Folgende Tabelle zeigt die mittlere Temperatur verschiedener Oberflächentypen in der korrigierten FZ2-Tagaufnahme ($T_{korrigiert}$) sowie der unkorrigierten FZ2-Tagaufnahme ($T_{unkorrigiert}$). Der Unterschied zwischen den korrigierten und unkorrigierten Temperaturen wird in der ΔT -Spalte wiedergegeben.

Tabelle 1: Korrigierte bzw. unkorrigierte Mitteltemperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Tagaufnahme. Der höchste/niedrigste Wert jeder Spalte ist in rot/blau hervorgehoben.

Oberflächentyp	$T_{unkorrigiert}$ (°C)	$T_{korrigiert}$ (°C)	ΔT (korrigiert – unkorrigiert) (K)
Kunstrasen	40,92	53,37	12,45
Weißes Dach	36,24	50,79	14,54
Metalldach	30,29	48,76	18,47
Solar/PV	33,43	48,17	14,73
Graues Dach - Schindeln	34,75	46,41	11,66
Graues Dach - Kies	34,24	46,01	11,77
Rotes Ziegeldach	32,24	42,79	10,55
Extensive green roof	32,07	42,01	9,95
Gleisanlage - Kies	30,98	41,31	10,33
Schwarzes Dach	29,72	39,46	9,74
Asphalt/Beton	30,06	38,97	8,91
Glasdach	27,52	38,55	11,03
Sand	28,50	38,38	9,88
Sportplatz	29,71	37,69	7,98
Tennis-/Sandplatz	27,89	36,21	8,32
Offener Boden	26,03	32,76	6,74
Gras/Niedrige Veg.	24,82	30,87	6,04
Schatten	24,12	29,97	5,85
Bäume/Wald	21,34	25,73	4,39
Wasser	16,55	18,98	2,43

Wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, sind in der FZ2-Tagaufnahme die höchsten Mitteltemperaturen im Bereich von Kunstrasenflächen bzw. versiegelten Flächen (Dächer, Beton/Asphalt etc.) zu finden. Dabei zeigt sich eine deutliche Diskrepanz zwischen den korrigierten und unkorrigierten Temperaturen, wobei die korrigierten Mitteltemperaturen von versiegelten Flächen oft mehr als 10 K über den unkorrigierten Temperaturen liegen. Abbildung 3 veranschaulicht diese Unterschiede:

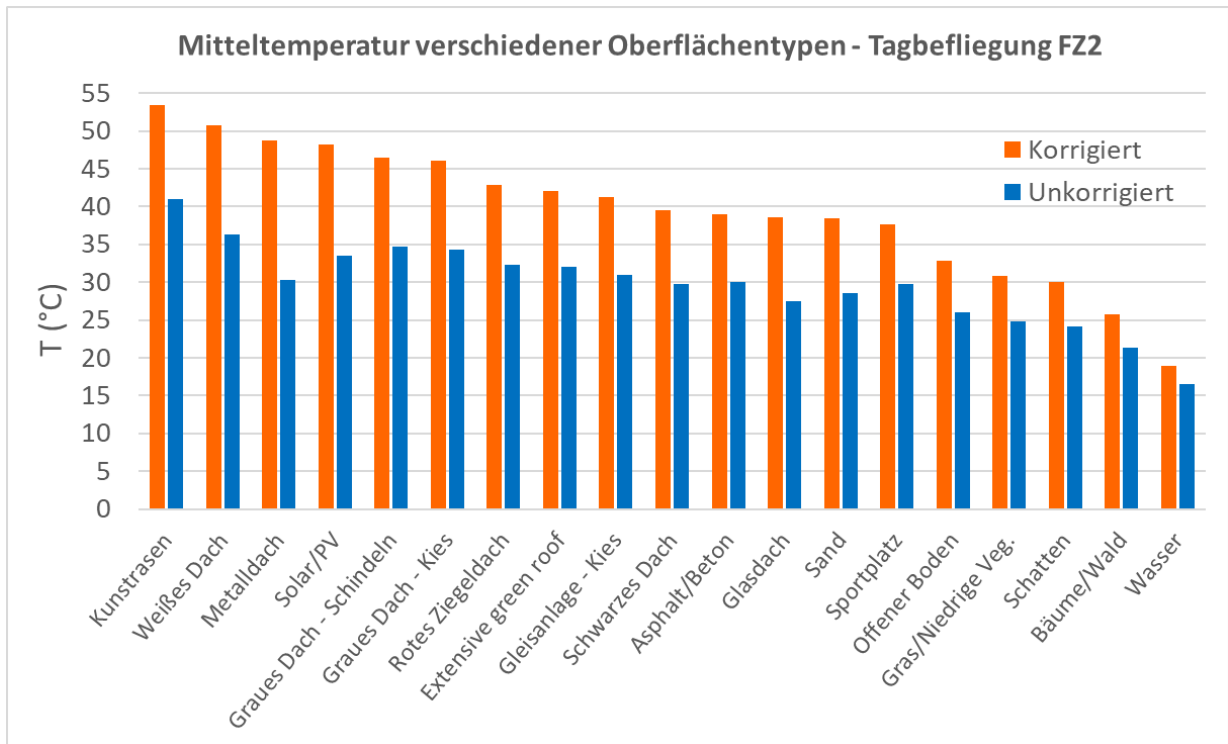


Abbildung 7: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Tagaufnahme.

Die meisten Dachflächen weisen (korrigierte) Mitteltemperaturen zwischen 40 und 50 °C auf, Asphalt/Beton etwas weniger als 40 °C. Deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen sind im Bereich von Vegetationsflächen zu finden (~ 31 °C für Gras bzw. niedrige Vegetation und ~ 26 °C für Bäume/Waldflächen). Mit ungefähr 19 °C weisen Wasserflächen im Mittel die niedrigsten Temperaturen auf. Zudem ist die Diskrepanz zwischen korrigierten und unkorrigierten Temperaturen für Wasserflächen am geringsten (~ 2.4 K), was unter anderem auf das hohe Emissionsvermögen ($\varepsilon \approx 0.98 - 0.99$) von Wasserflächen zurückgeführt werden kann (vgl. Lillesand und Kiefer 1994).

Insgesamt weisen versiegelte Flächen tagsüber die höchsten (korrigierten) Temperaturen auf (~ 40 – 50 °C), während Vegetation und insbesondere Wasserflächen durch deutlich niedrigere Temperaturen gekennzeichnet sind. Zudem verdeutlicht Abbildung 3 die Bedeutung der Thermalkorrekturen für urbane Bereiche: Insbesondere für versiegelte Oberflächentypen ergeben sich durch die Korrektur deutlich höhere, plausiblere Temperaturwerte, die z.T. mehr als 10 K über den unkorrigierten Werte liegen.

2.1.2. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ2 Morgenaufnahme

Im Gegensatz zur Tagaufnahme ergibt sich für die FZ2 Morgenaufnahme ein differenzierteres Bild, wie Tabelle 2 verdeutlicht. Wasserflächen, die mit ihrem trägen Temperaturverhalten im Vergleich zur Tagszene nur geringfügig abkühlen, zählen am Morgen zu den wärmsten Oberflächen (~ 14.3 °C). Hohe mittlere Temperaturen (~ 12.5 °C) ergeben sich zudem für Straßen (Asphalt/Beton), die nachts weniger stark auskühlen als beispielsweise Dachflächen, welche großteils mittlere Temperaturen unter 9 °C aufweisen. Hervorzuheben sind zudem die vergleichsweise warmen Waldflächen mit einer Mitteltemperatur von 10.5 °C. Diese hohe Temperatur ist u.a. auf Inversionseffekte an bewaldeten Hanglagen, etwa an den Hängen des Plabutsch oder der Riedel im Osten, zurückzuführen. Im Vergleich zu den Waldflächen kühlen (exponierte) Wiesenflächen oft deutlich stärker aus, und sind daher durch eine niedrigere mittlere Oberflächentemperatur (~ 7.5 °C) charakterisiert.

Tabelle 2: Korrigierte bzw. unkorrigierte Mitteltemperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Morgenaufnahme.

Oberflächentyp	$T_{unkorrigiert}$ (°C)	$T_{korrigiert}$ (°C)	ΔT (korrigiert – unkorrigiert) (K)
Wasser	13,24	14,26	1,02
Asphalt/Beton	11,56	12,47	0,91
Gleisanlage - Kies	10,61	11,71	1,10
Sand	10,27	11,59	1,31
Metалldach	6,86	10,73	3,86
Schatten	10,61	10,54	-0,07
Bäume/Wald	10,72	10,48	-0,25
Sportplatz	10,51	10,36	-0,15
Tennis-/Sandplatz	9,24	9,10	-0,14
Schwarzes Dach	8,93	8,98	0,05
Rotes Ziegeldach	8,76	8,60	-0,16
Graues Dach - Schindeln	8,69	8,56	-0,13
Glasdach	7,42	8,09	0,66
Offener Boden	8,84	7,93	-0,91
Kunstrasen	8,56	7,50	-1,06
Gras/Niedrige Veg.	8,61	7,45	-1,16
Solar/PV	6,55	7,36	0,81
Extensive green roof	8,13	7,31	-0,81
Graues Dach - Kies	7,65	7,10	-0,55
Weißes Dach	5,60	4,80	-0,80

Auch für die Morgensituation bestehen Unterschiede zwischen den korrigierten und unkorrigierten Temperaturen. Diese Unterschiede sind jedoch aufgrund des generell niedrigeren Temperaturniveaus weniger stark ausgeprägt als in der Tagsituation. Die Unterschiede der korrigierten und unkorrigierten Mitteltemperaturen bewegen sich für die meisten Oberflächentypen im Bereich von +/- 1 K. Auffallend sind jedoch die Metalldächer, die oft durch ein besonders niedriges Emissionsvermögen charakterisiert sind (vgl. Fouad und Richter 2012). Im Vergleich zur unkorrigierten Metalltemperatur ergibt sich im Zuge der (Emissionsgrad-)Korrektur eine plausiblere, um fast 4 K höhere Mitteltemperatur für Metalldächer. Abbildung 4 veranschaulicht nochmals die Unterschiede der korrigierten/unkorrigierten Mitteltemperaturen:

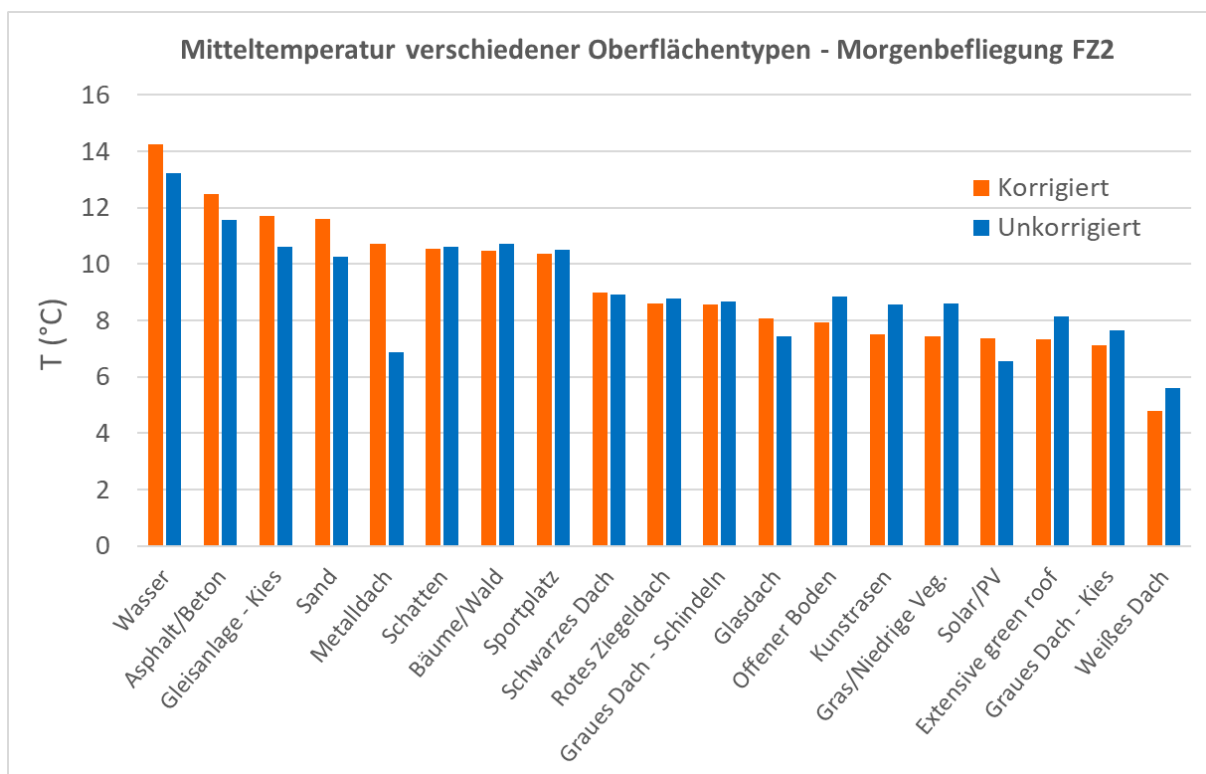


Abbildung 8: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ2-Morgenaufnahme.

2.1.3. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ1 Tagaufnahme

Verglichen mit der FZ2-Tagaufnahme ergibt sich für die FZ1-Tagaufnahme (zugeschnitten auf das FZ2-Befliegungsgebiet) ein sehr ähnliches Ergebnis (vgl. Tabelle 3): Die höchsten Mitteltemperaturen (~30 – 40 °C) sind wieder im Bereich von Kunstrasenflächen bzw.

versiegelten Flächen (Dächer, Beton/Asphalt etc.) zu finden, während Vegetationsflächen (~22.5 bzw. 25 °C) und Wasserflächen (~ 18.4 °C) zu den kühlfsten Oberflächen zählen:

Tabelle 3: Korrigierte bzw. unkorrigierte Mitteltemperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Tagaufnahme.

Oberflächentyp	$T_{unkorrigiert}$ (°C)	$T_{korrigiert}$ (°C)	ΔT (korrigiert – unkorrigiert) (K)
Kunstrasen	29,05	38,62	9,57
Metалldach	22,34	38,12	15,78
Weißes Dach	26,10	37,91	11,80
Solar/PV	24,71	36,70	12,00
Graues Dach - Kies	25,81	35,72	9,91
Graues Dach - Schindeln	25,77	35,41	9,63
Rotes Ziegeldach	24,59	33,62	9,03
Gleisanlage - Kies	24,24	33,32	9,08
Extensive green roof	24,23	32,68	8,45
Asphalt/Beton	24,08	32,16	8,08
Schwarzes Dach	23,07	31,63	8,56
Glasdach	21,19	31,02	9,83
Sand	22,25	30,91	8,66
Sportplatz	23,12	30,16	7,03
Tennis-/Sandplatz	21,78	29,12	7,34
Offener Boden	21,07	27,36	6,29
Schatten	21,00	27,14	6,14
Gras/Niedrige Veg.	19,39	24,81	5,42
Bäume/Wald	17,95	22,49	4,54
Wasser	15,20	18,44	3,25

Abbildung 5 gibt eine graphische Darstellung der Tabellenwerte wieder. Hinzuweisen ist jedoch darauf, dass die FZ1-Tagaufnahme im Vergleich zur FZ2-Tagaufnahme ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau aufweist. Die niedrigeren Temperaturen sind in erster Linie auf die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte zurückzuführen: Während die FZ2-Tagszene am frühen Nachmittag (~ 13:00 – 15:00) aufgenommen wurde, erfolgte die FZ1-Tagbefliegung am späten Nachmittag/frühen Abend (~ 15:00 – 18:00). Mit diesem zeitlichen Versatz geht eine entsprechende Abkühlung einher, weshalb die Mitteltemperaturen der FZ1-Tagszene stets unter jenen der FZ2-Tagszene liegen. Der Unterschied zwischen FZ1 und FZ2 ist am deutlichsten an den Dachflächen zu erkennen, wobei die meisten Dachtypen in der FZ1-Tagaufnahme um rund 10 K kühler sind als in der FZ2-Tagszene.

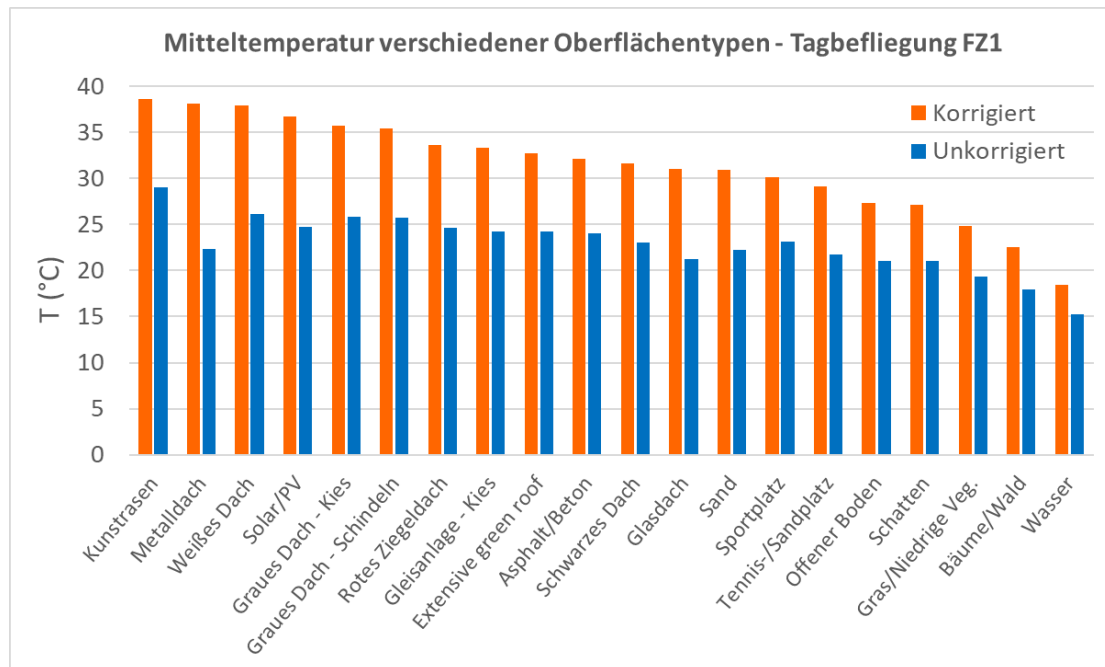


Abbildung 9: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Tagaufnahme.

2.1.4. Mittlere Oberflächentemperaturen – FZ1 Morgenaufnahme

Dabei ist anzumerken, dass die Mitteltemperaturen der FZ1-Morgenszene weitgehend mit den Mitteltemperaturen der FZ2-Morgenszene übereinstimmen (Abweichungen < 1 K). Dementsprechend weisen Wasserflächen wieder die höchste Mitteltemperatur auf (~ 14.6 °C), gefolgt von Straßen bzw. Asphalt/Beton (~ 11.8 °C). Mit Mitteltemperaturen unter 9 °C kühlen die meisten Dachflächen nachts vergleichsweise stark aus, wobei weiße Dächer die niedrigste Temperatur mit rund 4.5 °C aufweisen. Hervorzuheben sind zudem die Waldflächen, die u.a. bedingt durch Inversionseffekte an bewaldeten Hanglagen (ähnlich wie in der FZ2-Morgenaufnahme) eine vergleichsweise hohe Mitteltemperatur (~ 10.2 °C) aufweisen.

Tabelle 4 gibt die Mitteltemperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Morgenaufnahme (zugeschnitten auf das FZ2-Befliegungsgebiet) wieder:

Tabelle 4: Korrigierte bzw. unkorrigierte Mitteltemperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Morgenaufnahme.

Oberflächentyp	$T_{unkorrigiert}$ (°C)	$T_{korrigiert}$ (°C)	ΔT (korrigiert – unkorrigiert) (K)
Wasser	12,33	14,60	2,27
Asphalt/Beton	9,85	11,75	1,90
Gleisanlage - Kies	8,98	11,15	2,17
Sand	8,66	11,03	2,37
Metалldach	5,32	10,68	5,36
Schatten	9,29	10,39	1,10
Bäume/Wald	9,33	10,21	0,89
Sportplatz	8,87	9,77	0,90
Schwarzes Dach	7,46	8,73	1,27
Tennis-/Sandplatz	7,68	8,61	0,94
Rotes Ziegeldach	7,16	8,15	0,99
Graues Dach - Schindeln	7,05	8,03	0,98
Glasdach	5,72	7,62	1,90
Offener Boden	7,34	7,53	0,19
Gras/Niedrige Veg.	7,06	7,02	-0,04
Extensive green roof	6,52	6,85	0,33
Solar/PV	5,00	6,75	1,75
Kunstrasen	6,84	6,73	-0,11
Graues Dach - Kies	6,10	6,73	0,62
Weißes Dach	4,00	4,48	0,48

Abbildung 6 veranschaulicht die Mitteltemperaturen für die FZ1-Morgenaufnahme:

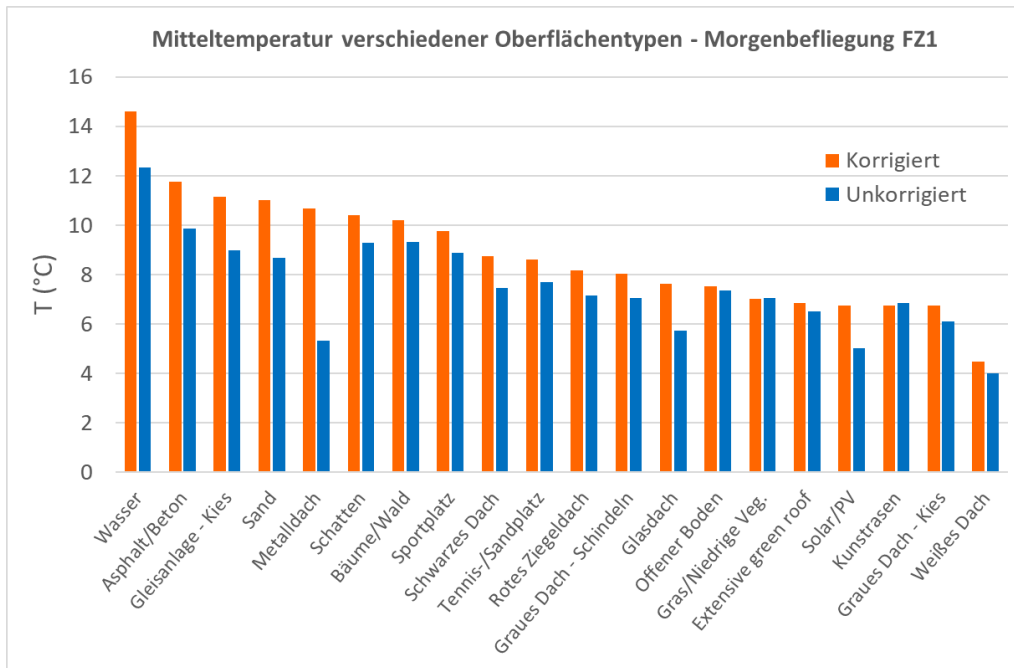


Abbildung 10: Korrigierte bzw. unkorrigierte Temperaturen verschiedener Oberflächentypen in der FZ1-Morgenaufnahme.

2.2. Temperaturdifferenzen der Tag- und Morgenflüge

Um weiteren Einblick in das Temperaturverhalten verschiedener Oberflächentypen zu erhalten, wurden Temperaturdifferenzen (Tag – Morgen) mit Hilfe der korrigierten Temperaturraster berechnet. Sowohl für die FZ1- als auch die FZ2-Flugzone fand die Morgenbefliegung jeweils am Morgen nach der Tagbefliegung statt. Das bedeutet, dass die Temperaturdifferenzen nicht das Erwärmungsverhalten der Oberflächen, sondern deren Abkühlungsverhalten widerspiegeln. Die mittleren Temperaturdifferenzen bzw. Abkühlungsintensitäten verschiedener Oberflächentypen sind in folgender Tabelle für FZ1 und FZ2 gegeben:

Tabelle 5: Mittlere Temperaturdifferenz zwischen der jeweiligen Tag- und Morgenaufnahme, aufgliedert nach verschiedenen Oberflächentypen. Der höchste/niedrigste Wert jeder Spalte ist in rot/blau hervorgehoben.

Oberflächentyp	<u>FZ2-Tag minus FZ2-Morgen</u> (K)	<u>FZ1-Tag minus FZ1-Morgen</u> (K)
Weißes Dach	45,99	33,43
Kunstrasen	45,87	31,89
Solar/PV	40,80	29,95
Graues Dach - Kies	38,91	28,99
Metалldach	38,03	27,44
Graues Dach - Schindeln	37,86	27,38
Extensive green roof	34,70	25,83
Rotes Ziegeldach	34,19	25,47
Schwarzes Dach	30,48	22,90
Glasdach	30,46	23,40
Gleisanlage - Kies	29,61	22,18
Sportplatz	27,33	20,39
Tennis-/Sandplatz	27,11	20,50
Sand	26,79	19,89
Asphalt/Beton	26,49	20,41
Offener Boden	24,83	19,83
Gras/Niedrige Veg.	23,42	17,79
Schatten	19,43	16,75
Bäume/Wald	15,25	12,28
Wasser	4,71	3,84

Dabei fällt auf, dass die FZ2-Differenzen deutlich über den FZ1-Differenzen liegen. Dieser Unterschied zwischen FZ1 und FZ2, der je nach Oberflächentyp etwas mehr als 10 K betragen kann, ist wiederum auf die unterschiedlichen Zeitpunkte der Tagbefliegungen zurückzuführen. Da die FZ2-Tagszene am frühen Nachmittag (~ 13:00 – 15:00) aufgenommen wurde, die FZ1-Tagszene jedoch am späten Nachmittag (~ 15:00 – 18:00), sind die FZ1-Tagtemperaturen aufgrund der fortschreitenden Abkühlung entsprechend niedriger. Folglich ergeben sich für FZ1 niedrigere Temperaturdifferenzen (Tag – Morgen). Dieser Unterschied zwischen FZ1 und FZ2 wird in Abbildung 7 nochmals veranschaulicht:

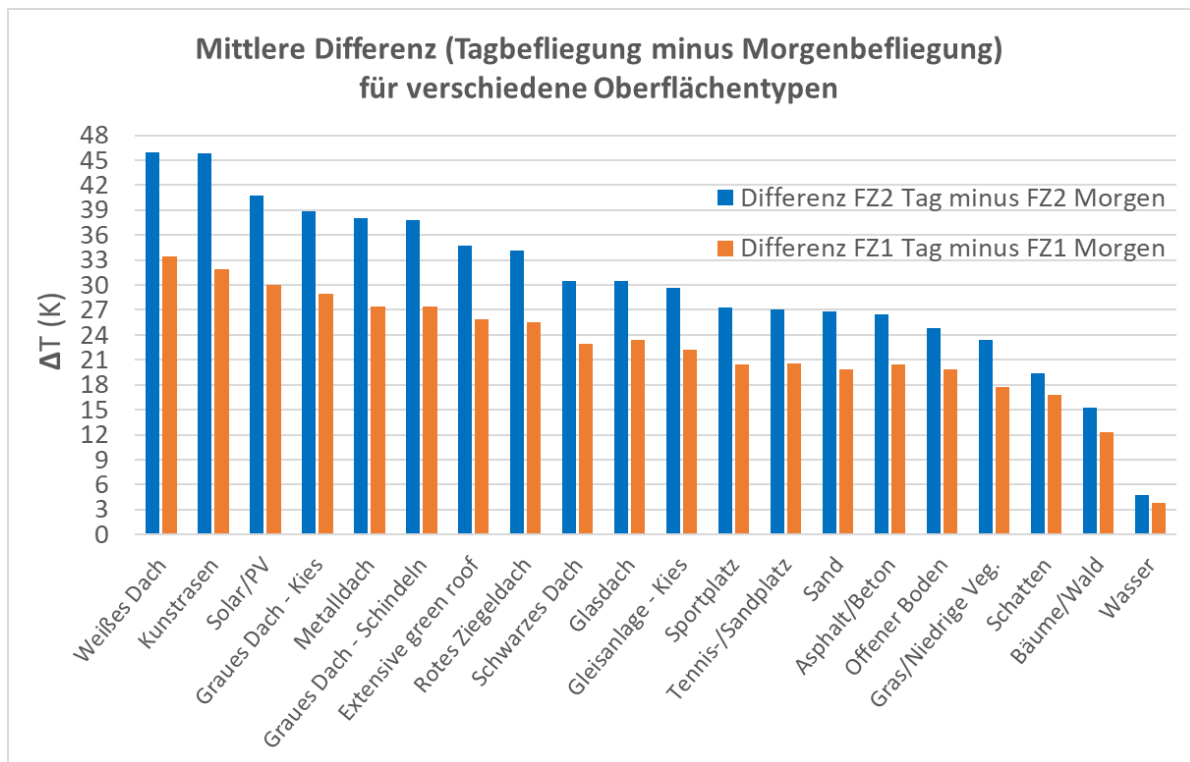


Abbildung 11: Die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen der jeweiligen Tag- und Morgenaufnahme, aufgliedert nach verschiedenen Oberflächentypen.

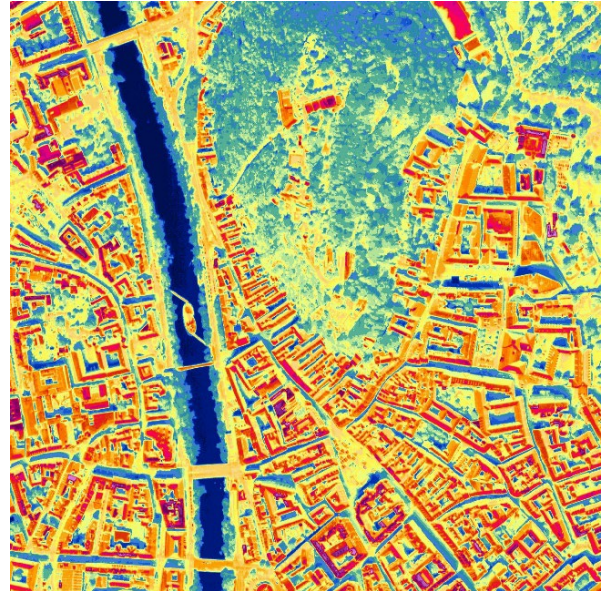
Da für die FZ2 die Temperaturunterschiede stärker ausgeprägt sind, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die FZ2-Temperaturdifferenzen. Dabei ist zunächst auf Wasserflächen (z.B. Mur) hinzuweisen, die mit ihrem trägen Temperaturverhalten die mit Abstand geringsten Temperaturschwankungen zwischen den Tag- und Morgenaufnahmen aufweisen (im Mittel rund 4.7 K) und somit nur geringfügig abkühlen. Vegetationsflächen bzw. städtische Grünflächen sind ebenfalls durch vergleichsweise niedrige Temperaturdifferenzen gekennzeichnet, wobei Bäume/Waldflächen in der Regel weniger stark auskühlen (~ 15 K) als Wiesen bzw. Grasflächen (~ 23 K). Demgegenüber sind besonders hohe Temperaturdifferenzen bzw. Abkühlungsintensitäten in dicht verbauten Gebieten (insbesondere Gewerbe-/Industrieflächen, Bahnhofsbereich, Altstadt etc.) zu erkennen. Diese versiegelten Flächen sind tagsüber durch eine starke Erwärmung und nachts durch intensive Abkühlung charakterisiert. Dächer weisen dabei besonders starke Abkühlungsintensitäten (meist zwischen 30 und 40 K) auf. Während Dachflächen besonders stark auskühlen, zeichnen sich Straßen bzw. Asphalt-/Betonflächen durch besseres Wärmespeichervermögen aus, kühlen dementsprechend weniger stark ab (~ 26.5 K) und zählen daher am Morgen zu den wärmsten Oberflächen. Das oben beschriebene Abkühlungsverhalten verschiedener

Oberflächentypen wird in der folgenden Abbildung, welche die FZ2-Temperaturdifferenzen für Ausschnitte des Innenstadt- bzw. Bahnhofbereichs wiedergibt, nochmals veranschaulicht:

Orthophoto - Innenstadt



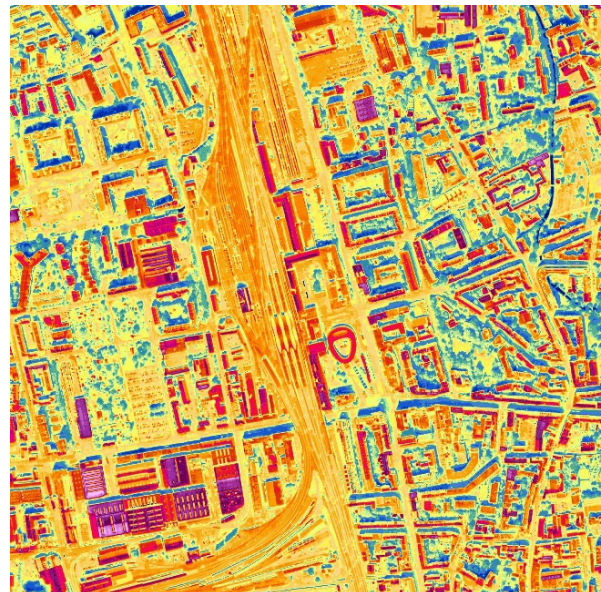
FZ2-Temperaturdifferenz - Innenstadt



Orthophoto - Bahnhofbereich



FZ2-Temperaturdifferenz - Bahnhofbereich



Temperaturdifferenz (K)

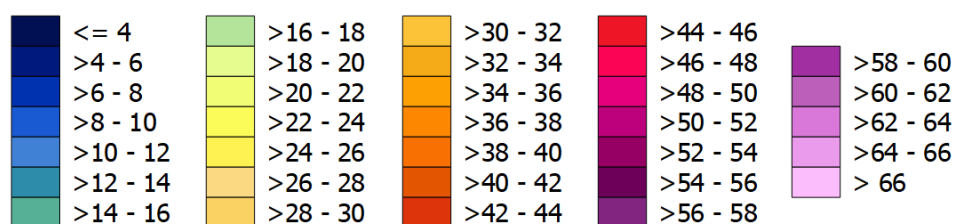


Abbildung 12: Darstellung der FZ2-Temperaturdifferenz (= FZ2-Tag minus FZ2-Morgen) für Ausschnitte des Innenstadt- bzw. Bahnhofbereichs.

2.3. Temperaturverhalten der Stadtstrukturen

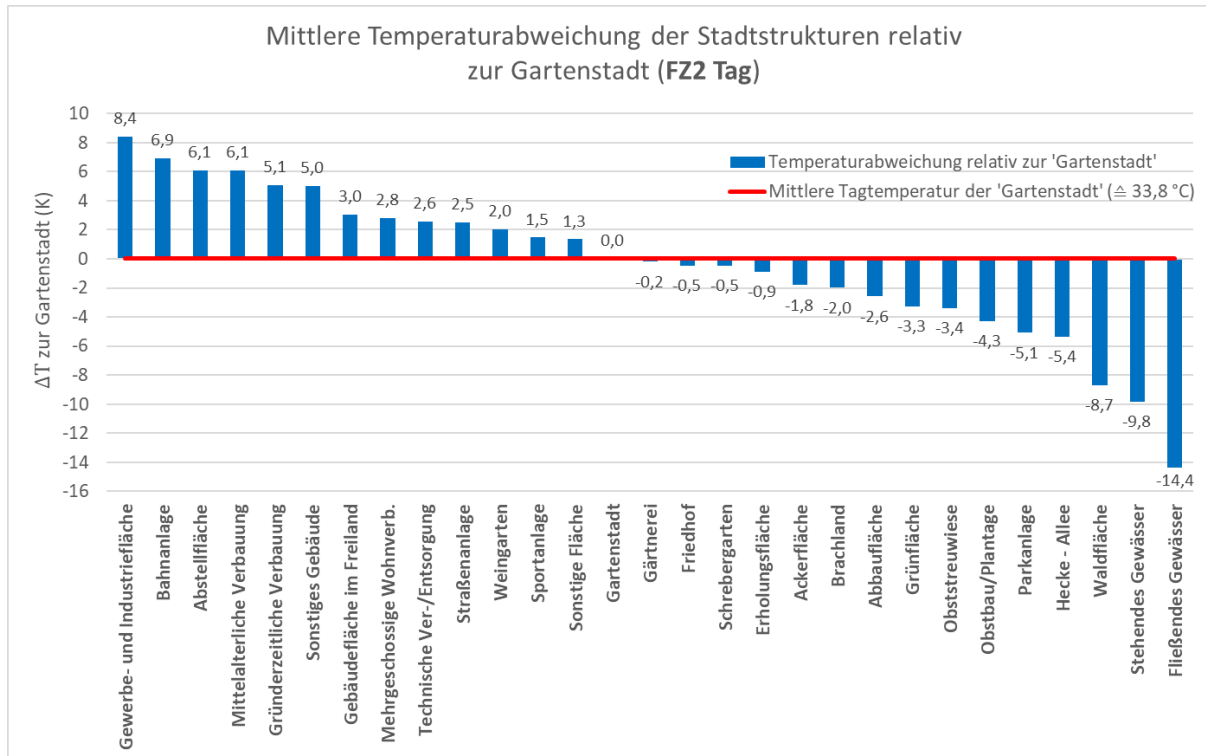
In einem weiteren Schritt konnten die Mitteltemperaturen der Grazer Stadtstrukturen abgeleitet werden. Aufgrund des günstigeren Befliegungszeitpunktes der FZ2-Tagaufnahme (im Vergleich zur FZ1-Tagaufnahme) beziehen sich die folgenden Ausführungen stets auf die korrigierten FZ2-Oberflächentemperaturen.

2.3.1. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturen – FZ2 Tag

Tabelle 6: Mitteltemperaturen (FZ2 Tag) der Stadtstrukturen und Temperaturunterschiede zur „Gartenstadt“.

Stadtstruktur	Mitteltemperatur (°C)	Unterschied zur „Gartenstadt“ (K)
Gewerbe-/Industriefläche	42,21	8,39
Bahnanlage	40,73	6,91
Abstellfläche	39,92	6,10
Mittelalterliche Verbauung	39,91	6,09
Gründerzeitliche Verbauung	38,90	5,08
Sonstiges Gebäude	38,84	5,02
Gebäudefläche im Freiland	36,85	3,03
Mehrgeschossige Wohnverb.	36,62	2,80
Technische Ver-/Entsorgung	36,40	2,58
Straßenanlage	36,35	2,53
Weingarten	35,85	2,02
Sportanlage	35,29	1,47
Sonstige Fläche	35,16	1,34
Gartenstadt	33,82	0,00
Gärtnerei	33,62	-0,20
Friedhof	33,35	-0,48
Schrebergarten	33,34	-0,48
Erholungsfläche	32,95	-0,87
Ackerfläche	32,02	-1,81
Brachland	31,83	-1,99
Abbaufläche	31,24	-2,58
Grünfläche	30,54	-3,28
Obststreuwiese	30,42	-3,40
Obstbau/Plantage	29,53	-4,29
Parkanlage	28,74	-5,08
Hecke - Allee	28,46	-5,37
Waldfläche	25,13	-8,69
Stehendes Gewässer	23,99	-9,83
Fließendes Gewässer	19,43	-14,39

Die o.a. Tabelle gibt die mittleren Oberflächentemperaturen (FZ2 Tag) der verschiedenen Stadtstrukturen wieder. Zudem wird der Temperaturunterschied der jeweiligen Stadtstruktur zur „thermisch günstigen“ Gartenstadt (lockere Ein-/Zweifamilien-Wohnverbauung mit



hohem Anteil an Grünflächen) wiedergegeben.

Abbildung 13: Mittlerer Temperaturunterschied der Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“, die in der korrigierten FZ2-Tagaufnahme eine mittlere Oberflächentemperatur von rund 33.8 °C aufweist.

Die Temperaturunterschiede der Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“ werden in Abbildung 9 nochmals veranschaulicht:

Stadtstrukturen, die durch hohe Anteile versiegelter Flächen charakterisiert sind, weisen im Vergleich zur Gartenstadt ($\approx 33.8 \text{ °C}$) deutlich höhere Mitteltemperaturen auf. Mit einem besonders hohen Versiegelungsgrad zählen Gewerbe-/Industrieflächen zu den wärmsten Stadtstrukturen ($\sim 42.2 \text{ °C}$), und sind im Mittel um rund 8.4 K wärmer als die Gartenstadt. Auch Bahnanlagen bzw. Parkplätze/Abstellflächen sind durch eine deutliche Überwärmung (7 bzw. 6 K) im Vergleich zur Gartenstadt charakterisiert. Mit ihrem hohen Versiegelungsgrad ist

die Altstadt (~ 39.9 °C) ebenfalls um rund 6 K wärmer als die Gartenstadt, gefolgt von der Gründerzeitlichen Verbauung (38.9 °C) mit einer Überwärmung von rund 5 K. Mehrgeschossige Wohnverbauung (~ 36.6 °C) sowie Straßenflächen (~ 36.3 °C) weisen hingegen eine schwächer ausgeprägte Überwärmung (2.8 bzw. 2.5 K) auf. Niedrigere Temperaturen finden sich u.a. im Bereich von Ackerflächen (~ 32 °C) sowie Grünflächen (~ 30.5 °C), die im Vergleich zur Gartenstadt um rund 1.8 bzw. 3.3 K kühler sind. Mit einer Mitteltemperatur von rund 28.7 °C sind Parkanlagen (z.B. Stadtpark) um etwa 5 K kühler als die Gartenstadt. Die geringsten Temperaturen finden sich schließlich im Bereich von Waldflächen (~ 25.1 °C) sowie Wasserflächen (rund 19.4 °C für fließende Gewässer).

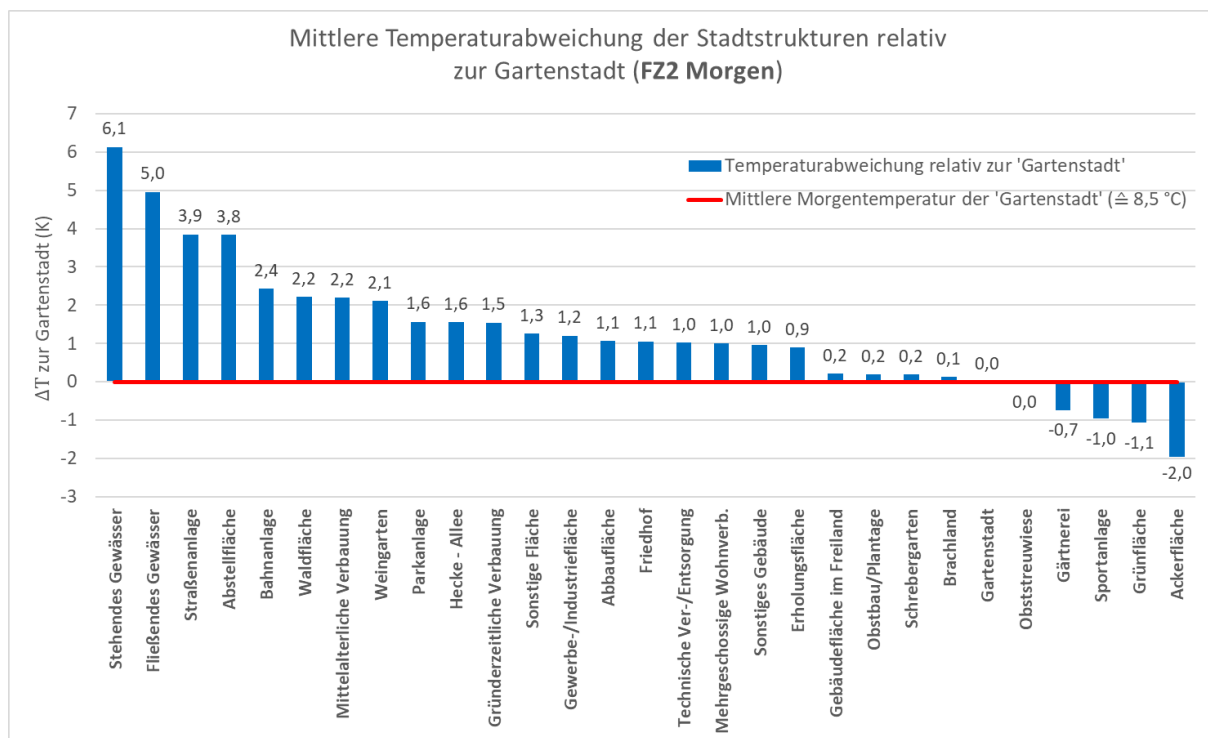
2.3.2. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturen – FZ2 Morgen

Folgende Tabelle gibt die mittleren Oberflächentemperaturen (FZ2 Morgen) der verschiedenen Stadtstrukturen sowie den Temperaturunterschied der jeweiligen Stadtstruktur zur „Gartenstadt“ wieder:

Tabelle 7: Mitteltemperaturen der Stadtstrukturen (FZ2 Morgen) und Temperaturunterschiede zur „Gartenstadt“.

Stadtstruktur	Mitteltemperatur (°C)	Unterschied zur „Gartenstadt“ (K)
Stehendes Gewässer	14,62	6,13
Fließendes Gewässer	13,45	4,96
Straßenanlage	12,34	3,85
Abstellfläche	12,33	3,84
Bahnanlage	10,92	2,43
Waldfläche	10,71	2,22
Mittelalterliche Verbauung	10,69	2,20
Weingarten	10,59	2,11
Parkanlage	10,05	1,56
Hecke - Allee	10,04	1,55
Gründerzeitliche Verbauung	10,03	1,54
Sonstige Fläche	9,75	1,26
Gewerbe-/Industriefläche	9,69	1,20
Abbaufäche	9,56	1,07
Friedhof	9,54	1,05
Technische Ver-/Entsorgung	9,51	1,02

Mehrgeschossige Wohnverb.	9,49	1,00
Sonstiges Gebäude	9,45	0,96
Erholungsfläche	9,39	0,90
Gebäudefläche im Freiland	8,70	0,21
Obstbau/Plantage	8,69	0,20
Schrebergarten	8,68	0,19
Brachland	8,62	0,13
Gartenstadt	8,49	0,00
Obststreuwiese	8,48	-0,01
Gärtnerei	7,74	-0,75
Sportanlage	7,53	-0,96
Grünfläche	7,42	-1,07
Ackerfläche	6,53	-1,96



Zusätzlich veranschaulicht Abbildung 10 die Temperaturunterschiede der einzelnen Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“:

Abbildung 14: Mittlerer Temperaturunterschied der Stadtstrukturen relativ zur „Gartenstadt“, die in der korrigierten F22-Morgenaufnahme eine mittlere Oberflächentemperatur von rund 8.5 °C aufweist.

Die Gartenstadt weist in der F22-Morgenaufnahme mit rund 8.5 °C eine vergleichsweise niedrige Mitteltemperatur auf. Nur wenige andere Oberflächentypen bzw. Stadtstrukturen haben am Morgen eine niedrigere Mitteltemperatur, wobei Grünflächen (~ 7.4 °C) und

Ackerflächen ($\sim 6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) im Mittel um rund 1.1 bzw. 2 K kühler sind als die Gartenstadt. Stärker versiegelte Stadtstrukturen sind in der Regel durch höhere Mitteltemperaturen charakterisiert. Für mehrgeschossige Wohnverbauung ($\sim 9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) sowie Gewerbe-/Industrieflächen ($\sim 9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) ergibt sich eine Überwärmung von rund 1 K im Vergleich zur Gartenstadt. Die Altstadt mit ihrem hohen Versiegelungsgrad ($\sim 10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) sowie die gründerzeitliche Verbauung ($\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) sind um rund 2.2 bzw. 1.5 K „überwärmt“. Straßenanlagen sowie Abstellflächen/Parkplätze ($\sim 12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) sind am Morgen um fast 4 K wärmer als die Gartenstadt, und zählen damit zu den wärmsten Stadtstrukturen. Die höchsten Temperaturen finden sich am Morgen naturgemäß im Bereich der stehenden bzw. fließenden Gewässer, die aufgrund des guten Wärmespeichervermögens eine Mitteltemperatur von rund 14.6 bzw. 13.5 $^{\circ}\text{C}$ aufweisen.

2.3.3. Mitteltemperaturen der Stadtstrukturpolygone – Kartendarstellung

Zusätzlich zu den oben präsentierten Statistiken wurden die Stadtstrukturen in (isolierte) Einzelpolygone aufgespalten. Dadurch konnte für jedes Einzelpolygon die mittlere FZ2-Oberflächentemperatur berechnet werden. Die Ergebnisse daraus können kartographisch dargestellt werden (vgl. Abbildungen 11 und 12 auf den folgenden Seiten) und vermitteln einen aggregierten Überblick über die Temperaturverteilung bzw. Bereiche mit besonders hohen/niedrigen Temperaturen.

Betrachtet man die Karte der Tag-Mitteltemperaturen (Abbildung 11), so finden sich die niedrigsten Temperaturen im Bereich der Wasser-/Waldflächen, wobei sich auch die städtischen Grünflächen (z.B. Schlossberg/Stadtpark, Augarten, Volksgarten) als kühlere Bereiche von der relativ warmen Umgebung abheben. Demgegenüber stehen „Hotspots“ mit besonders hohen Temperaturen (dunkelrote bzw. lila Farbtöne), die oft im Bereich der stark versiegelten Gewerbe-/Industrieflächen identifiziert werden können (z.B. Bahnhofsbereich, Webling etc.). Auch im Gebiet der dicht verbauten Altstadt sowie Teilen der gründerzeitlichen Verbauung sind besonders hohe Mitteltemperaturen zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu finden sich niedrigere Temperaturen beispielsweise im Bereich der lockeren Ein-/Zweifamilien-Wohnverbauung (Gartenstadt), welche in der Karte oft in gelblich-orangen Farbtönen ($\sim 30 - 36\text{ }^{\circ}\text{C}$) erscheint.

Abbildung 12 gibt zudem die Morgen-Mitteltemperaturen wieder. Dabei ist die (zweigeteilte) städtische Wärmeinsel klar ersichtlich. Die zentrale Wärmeinsel hebt sich mit orangenen Farbtönen (~ 10-13 °C) deutlich von den umliegenden Gebieten ab, und erstreckt sich im Wesentlichen über die Innere Stadt sowie Teile der Bezirke Gries, Lend und Jakomini. Neben dieser innerstädtischen Wärmeinsel ist zudem eine „sekundäre“ Wärmeinsel im Bereich Gösting zu erkennen (vgl. Lazar et al. 1994; siehe auch Kapitel 2.5). Bedingt durch Inversionseffekte während der Morgenbefliegung weisen außerdem Erhebungen (z.B. Plabutsch-Buchkogel-Zug, Platte, Hauenstein, Riedel im Osten) besonders hohe Temperaturen auf. Die niedrigsten Temperaturen (blaue Farbtöne; < 6 °C) finden sich meist im Bereich von Grünflächen bzw. (abgeernteten) Ackerflächen, u.a. in den Seitentälern (z.B. Mariatrost) sowie den südlichen Bereichen des Befliegungsgebietes. Auch Bereiche mit lockerer Ein-/Zweifamilien-Wohnverbauung sind meist durch relativ niedrige Temperaturen charakterisiert (grüne/beige Farbtöne; ~ 7-10 °C).

Mitteltemperatur der Stadtstrukturpolygone - FZ2 Tag

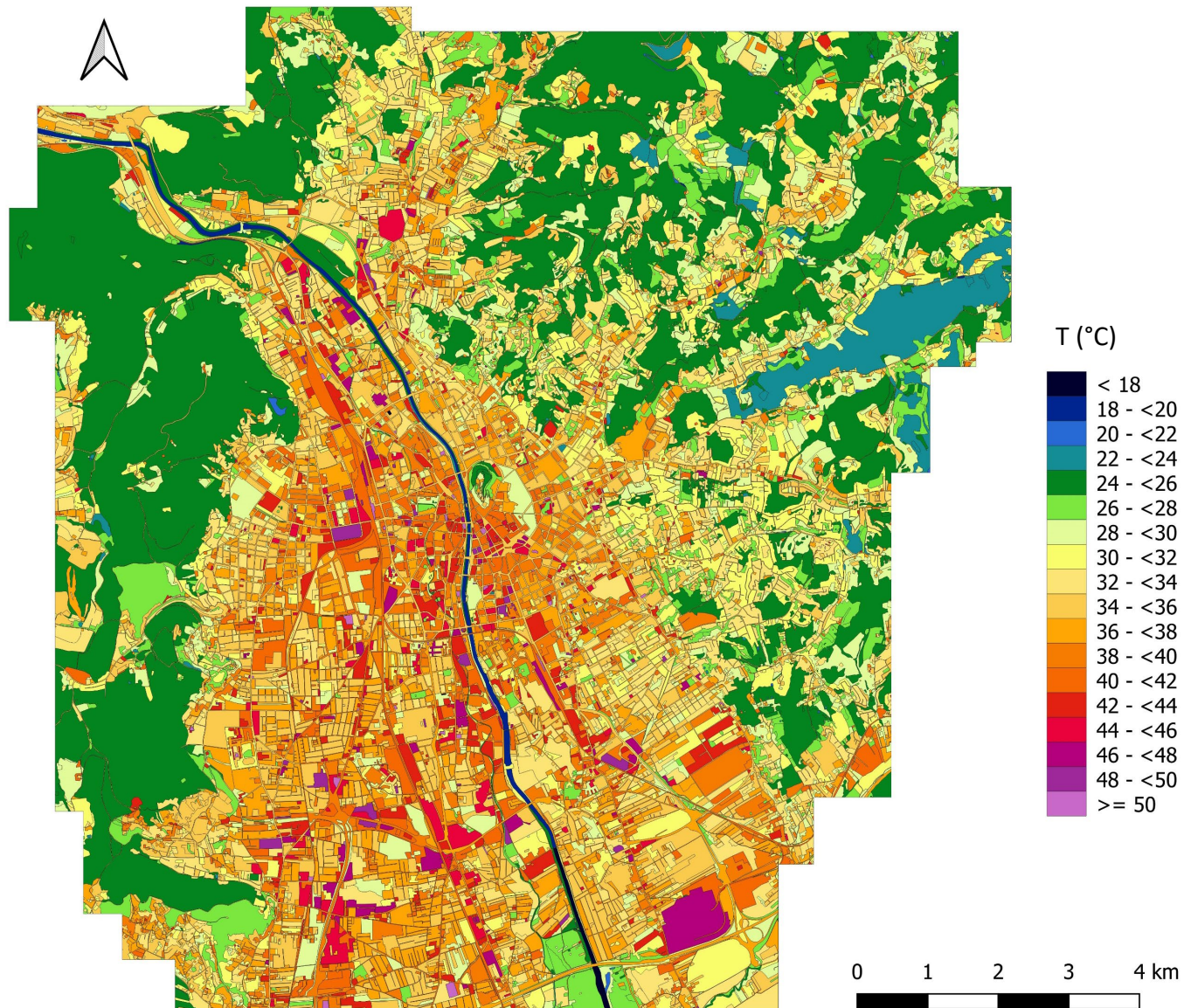


Abbildung 15: Korrigierte Mitteltemperaturen (FZ2 Tag) der Stadtstrukturpolygone.

Mitteltemperatur der Stadtstrukturpolygone - FZ2 Morgen

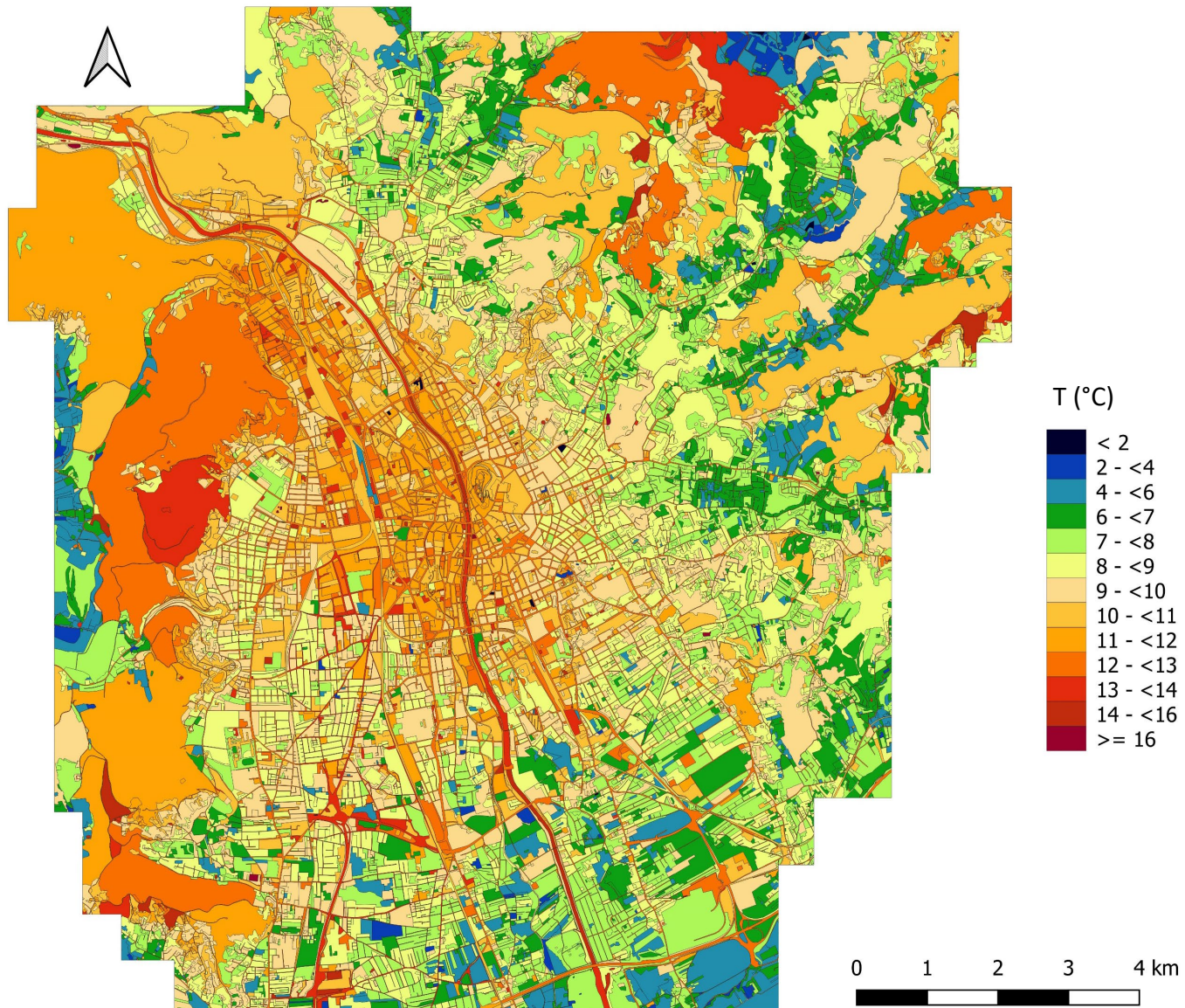


Abbildung 16: Korrigierte Mitteltemperaturen (FZ2 Morgen) der

2.4. Klassifizierte Thermalkarte

Angelehnt an Steinicke & Streifeneder (vgl. Steinicke & Streifeneder 2010a, 2010b) wurden klassifizierte Thermalkarten erstellt. Dafür wurden die FZ1-Morgenaufnahme (9.9.21, 04:16 – 06:43) und die FZ2-Tagaufnahme (9.9.21, 13:10 – 15:04) verwendet. Die Klassifikation basiert auf der mittleren Temperatur \bar{T} (= Mittel der FZ1-Morgen- und FZ2-Tagaufnahme)

$$\bar{T} = \frac{FZ1_{Morgen} + FZ2_{Tag}}{2}$$

und der Differenz ΔT , welche das Erwärmungsverhalten der Oberflächen beschreibt:

$$\Delta T = FZ2_{Tag} - FZ1_{Morgen}$$

Die Einteilung der Pixel in Klassen (Abbildung 13) wurde basierend auf Quantilen getroffen. Pixel, deren mittlere Temperatur im ersten bzw. untersten Quartil ($\leq 25\%$) der Mitteltemperatur liegt, wurden als Kaltluftfläche klassifiziert und den Klassen K/L/M zugewiesen. Pixel im zweiten Mitteltemperatur-Quartil (> 25 und $\leq 50\%$) wurden als schwache Kaltluftflächen (H/I/J) klassifiziert, jene im dritten Quartil (> 50 und $\leq 75\%$) als schwache Wärmeinsel (E/F/G) und jene im vierten Quartil ($> 75\%$) als Wärmeinsel (B/C/D). Analog dazu wurden die Tertile der Erwärmung, d.h. ob ein Pixel im unteren Tertil ($\leq 33\%$), mittleren Tertil (> 33 und $\leq 66\%$) oder oberen Tertil ($> 66\%$) liegt, verwendet. Dadurch konnte jedes Bildelement einer Klasse (B bis M) zugeordnet werden. Wasserflächen, mit ihren besonderen thermischen Eigenschaften, sind als eigene Klasse (A) gesondert hervorgehoben (vgl. Steinicke & Streifeneder 2010b):

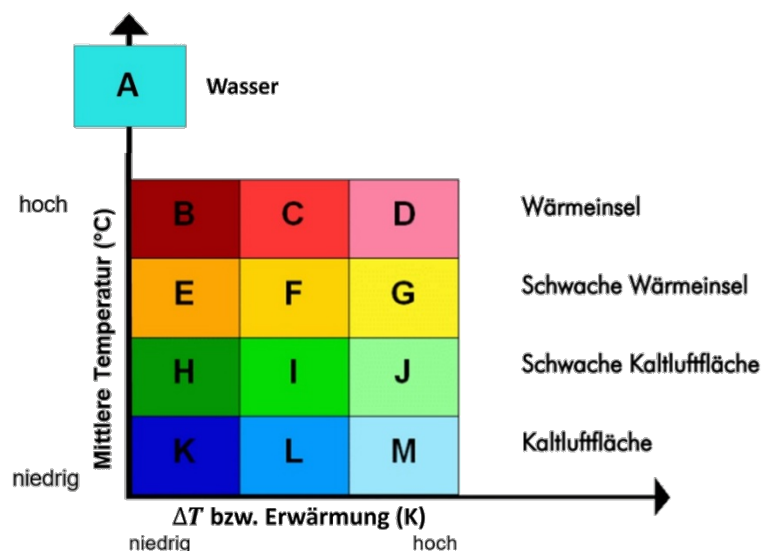


Abbildung 17: Klassenmatrix zur Einteilung der Thermalpixel (bearbeitet nach Steinicke & Streifeneder 2010b).

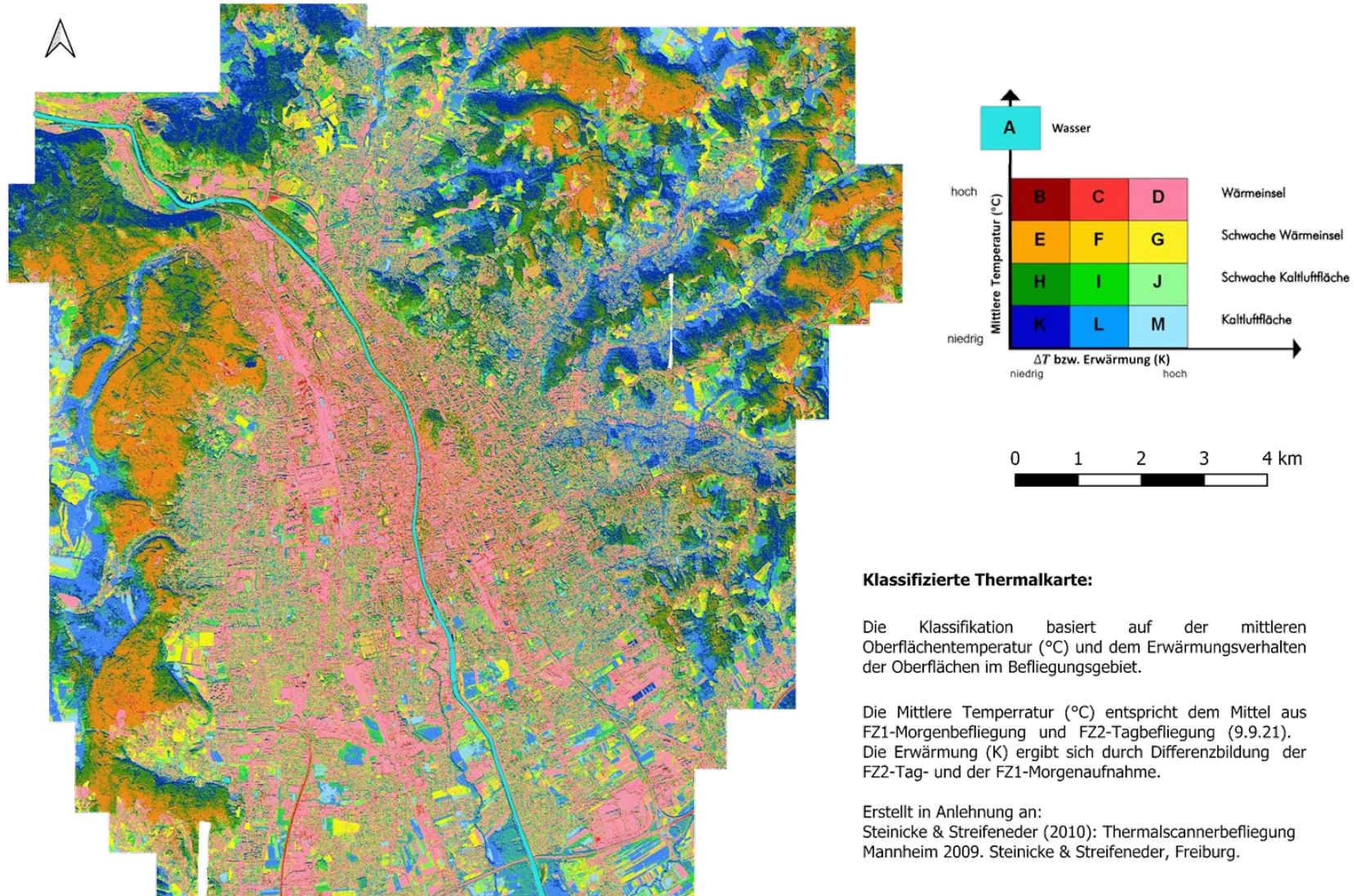
Abbildung 14 gibt die so erstellte klassifizierte Thermalkarte wieder. Die als Wärmeinseln (B/C/D) klassifizierten Bereiche (= Pixel mit sehr hoher mittlerer Temperatur) finden sich insbesondere in dicht verbauten, stark versiegelten Gebieten. Hierzu zählen u.a. die Altstadt, gründerzeitliche Bebauung, sowie der Bahnhofsbereich und Industrie-/Gewerbeflächen, die in erster Linie als Wärmeinsel mit hohem Erwärmungsgrad (D) klassifiziert werden. Vereinzelt fallen hierunter auch abgeerntete Ackerflächen, die sich tagsüber intensiv erwärmen und nachts stark auskühlen. Auch Teile der Gartenstadt (v.a. Straßen- und Dachflächen) werden oft als Klasse D ausgewiesen. Innerstädtische Straßenschluchten werden teilweise als B/C klassifiziert (sie weisen also hohe Mitteltemperaturen und vergleichsweise geringe Erwärmungsintensitäten zwischen Morgen- und Tagbefliegung auf). Schwache Wärmeinseln mit (relativ) hohem Erwärmungsgrad (Klassen F/G) finden sich u.a. im Bereich von abgeernteten Acker- bzw. frisch gemähten Grünflächen.

Zu den schwachen Kaltluftflächen (Klassen H/I/J) zählen zum Teil Waldflächen in niederen Lagen bzw. bewaldete Nordhänge, aber auch Teile von innerstädtischen Grünflächen (z.B. Stadtpark, begrünte Innenhöfe, Schlossberg), Teile von Schrebergärten, der Gartenstadt sowie Acker-/Grünflächen. Kaltluftflächen (K/L/M) finden sich u.a. an Nordhängen sowie Grün-/Ackerflächen im südlichen Bereich des Befliegungsgebiets. Hinzuweisen ist zudem auf das Thaler Becken westlich des Plabutsch, welches teilweise als Kaltluft-Gebiet klassifiziert wurde. Auch in Richtung des Föllinger-Beckens bzw. Mariatrost sind größere Kaltluftflächen zu erkennen. Allerdings sind hier durch fortgeschrittene Verbauung auch die Klassen D/G (Wärmeinsel/schwache Wärmeinsel) vermehrt anzutreffen.

Hinzuweisen ist zudem darauf, dass einige Erhebungen (z.B. Plabutsch-Buchkogel-Zug, Riedelrücken) in Abbildung 14 teilweise als schwache Wärmeinseln (v.a. Klasse E) ausgewiesen werden. Grund hierfür sind ausgeprägte Inversionseffekte zum Zeitpunkt der Morgenbefliegung. Um potentiell verfälschende Einflüsse dieser Inversionseffekte bei der Erstellung der klassifizierten Thermalkarten zu kompensieren, wurde zusätzlich eine „inversionsbereinigte“ klassifizierte Thermalkarte erstellt (vgl. Abbildung 15). Hierfür wurden mit Hilfe der Klimatopkarte von Graz inversionsbeeinflusste Hang- und Kammlagen identifiziert und von der Berechnung bzw. Klassifikation ausgeschlossen.

An den grundlegenden, auf der vorigen Seite beschriebenen Zusammenhängen ändert sich durch die „Inversionsbereinigung“ jedoch nichts. Dicht verbaute, stark versiegelte Gebiete werden in erster Linie als Wärmeinseln (B/C/D) klassifiziert. Allerdings ergibt sich durch die Inversionsbereinigung ein etwas differenzierteres Bild, wobei insbesondere in innerstädtischen bzw. verbauten Gebieten die Wärmeinsel-Klassen B/C/D zugunsten der schwachen Wärmeinseln (E/F/G) einen geringeren Anteil einnehmen. Auch kommt der kühlende Effekt von städtischen Grünflächen, etwa im Bereich des Stadtparks oder von begrünten Innenhöfen, stärker hervor (mit größerem Anteil an schwachen Kaltluftflächen (H/I/J)). Kaltluftflächen (K/L/M) finden sich in der inversionsbereinigten Klassifikation ebenfalls an (bewaldeten) Nordhängen, Grünflächen und (bestellten) Ackerflächen, sowie den Seitentälern (u.a. Thal, Mariatrost/Fölling).

Klassifizierte Thermalkarte (Auflösung: 1 m)



Klassifizierte Thermalkarte:

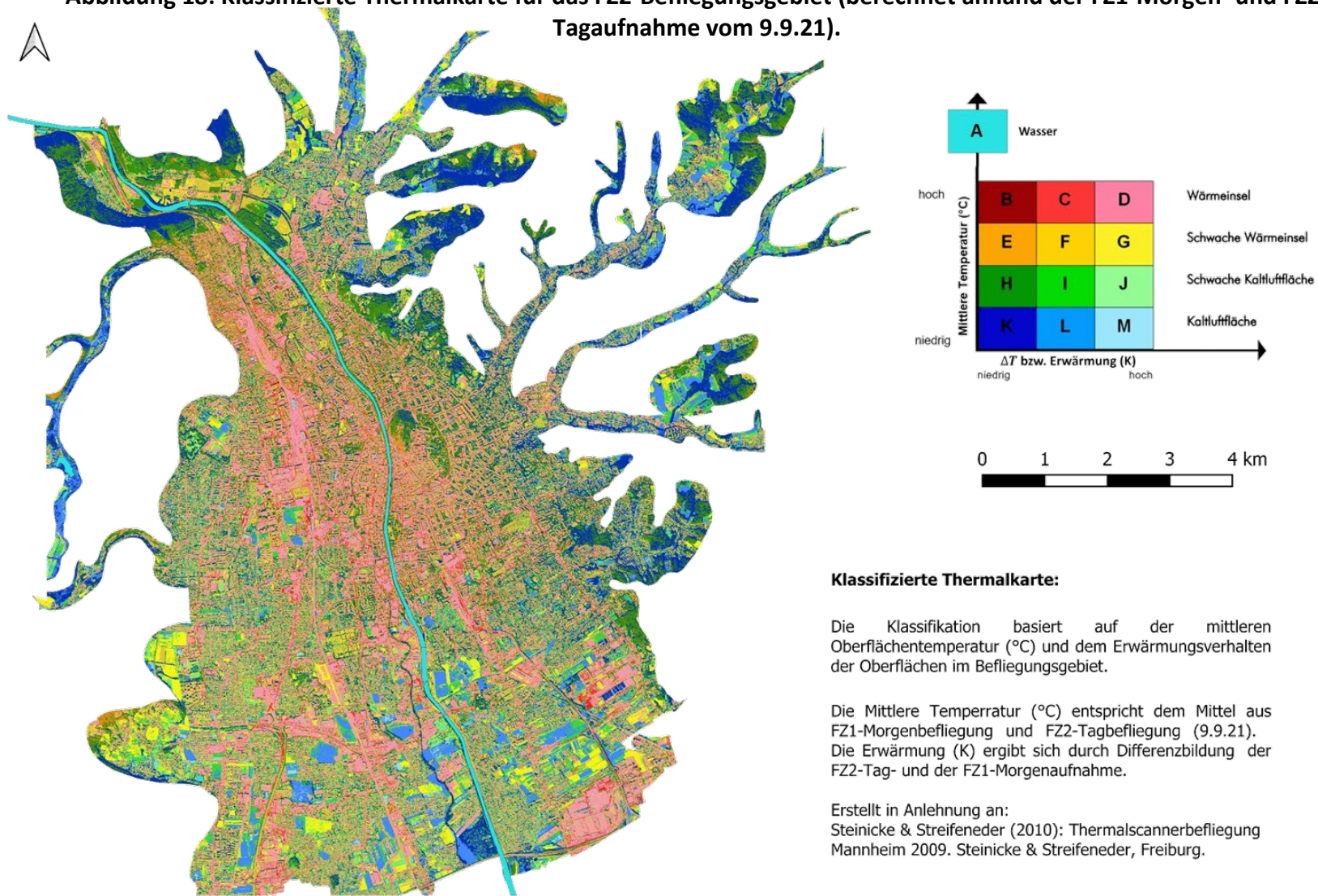
Die Klassifikation basiert auf der mittleren Oberflächentemperatur (°C) und dem Erwärmungsverhalten der Oberflächen im Befliegungsgebiet.

Die Mittlere Temperratur (°C) entspricht dem Mittel aus FZ1-Morgenbefliegung und FZ2-Tagbefliegung (9.9.21). Die Erwärmung (K) ergibt sich durch Differenzbildung der FZ2-Tag- und der FZ1-Morgenaufnahme.

Erstellt in Anlehnung an:
Steinicke & Streifeneder (2010): Thermalscannerbefliegung Mannheim 2009. Steinicke & Streifeneder, Freiburg.

Klassifizierte Thermalkarte - ohne inversionsbeeinflusste Bereiche (Auflösung: 1 m)

Abbildung 18: Klassifizierte Thermalkarte für das FZ2-Befliegungsgebiet (berechnet anhand der FZ1-Morgen- und FZ2-Tagaufnahme vom 9.9.21).



Klassifizierte Thermalkarte:

Die Klassifikation basiert auf der mittleren Oberflächentemperatur (°C) und dem Erwärmungsverhalten der Oberflächen im Befliegungsgebiet.

Die Mittlere Temperratur (°C) entspricht dem Mittel aus FZ1-Morgenbefliegung und FZ2-Tagbefliegung (9.9.21). Die Erwärmung (K) ergibt sich durch Differenzbildung der FZ2-Tag- und der FZ1-Morgenaufnahme.

Erstellt in Anlehnung an:
Steinicke & Streifeneder (2010): Thermalscannerbefliegung Mannheim 2009. Steinicke & Streifeneder, Freiburg.

Abbildung 19: Inversionsbereinigte, klassifizierte Thermalkarte für das FZ2-Befliegungsgebiet.

2.5. Urban Heat Island

Aufbauend auf den mittleren Temperaturen der Stadtstrukturen, der klassifizierten Thermalkarte sowie einer visuellen Analyse der korrigierten Thermaldaten wurde die städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island) manuell abgegrenzt. Das Ergebnis dieser exemplarischen Abgrenzung wird in Abbildung 16 veranschaulicht. Dabei wird zwischen der zentralen Wärmeinsel sowie der sekundären Wärmeinsel (Bereich Götting) unterschieden. Zum Vergleich wurde zusätzlich ein bedeutender Kältepol im Bereich Mariatrost (vgl. auch Lazar et al. 1994) grob abgegrenzt:

Mitteltemperatur der Stadtstrukturpolygone - FZ2 Morgen

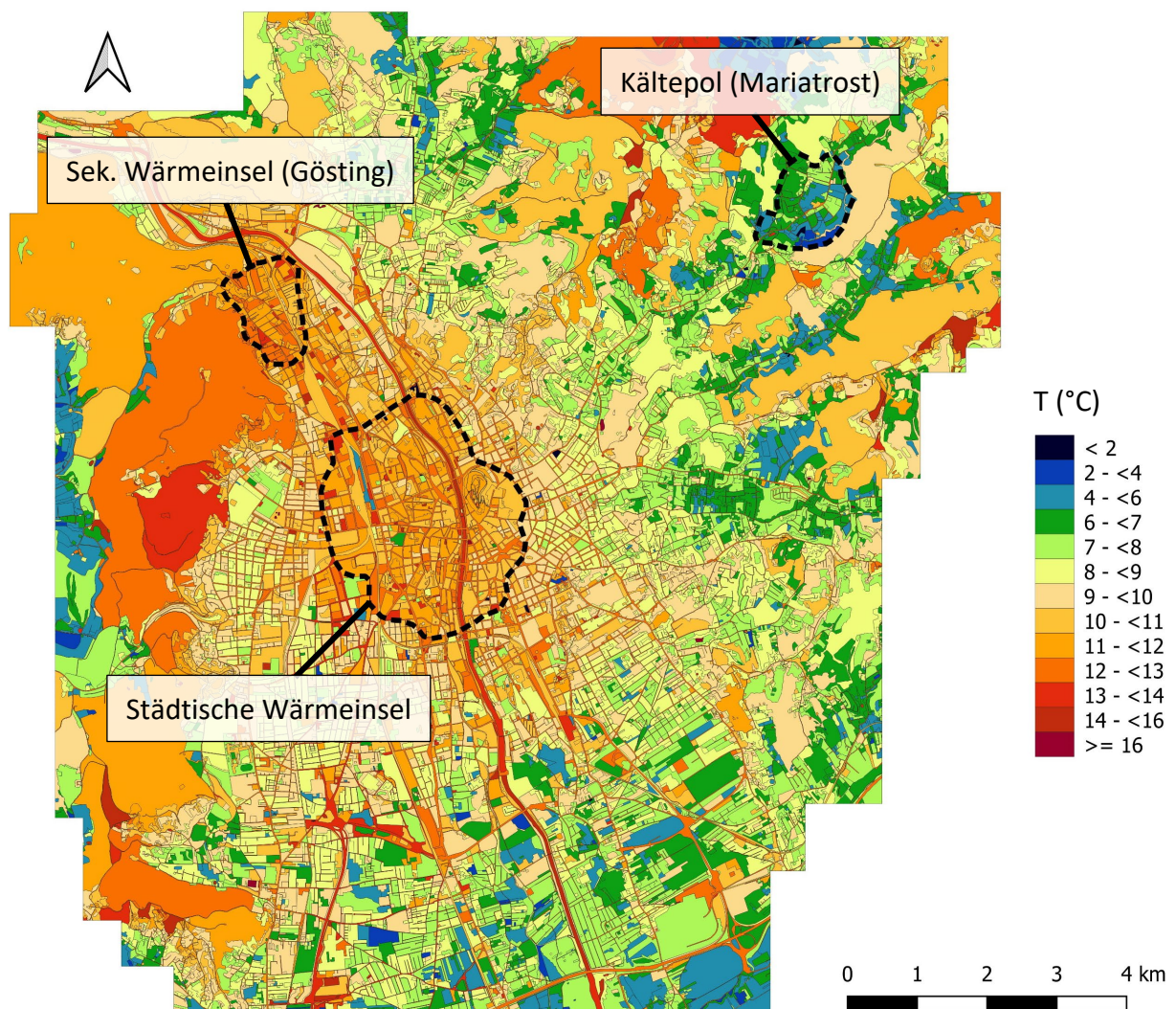


Abbildung 20: Beispielhafte Abgrenzung der städtischen Wärmeinseln bzw. des Kältepols Mariatrost (schwarz-strichlierte Umrandungen). Die Hintergrundkarte gibt die mittleren FZ2-Morgentemperaturen der Stadtstrukturpolygone wieder

Da die Wärmeinseln in erster Linie nachts bzw. am Morgen auftreten (vgl. Lazar und Sulzer 2013), beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die thermalen Morgenaufnahmen. Für die in Abbildung 16 ausgewiesenen Bereiche wurden folglich die mittleren Morgen-Oberflächentemperaturen berechnet, sowohl für die FZ1- als auch die FZ2-Morgenaufnahme.

Die Tabellen 8 und 9 geben die Ergebnisse dieser Berechnungen wieder, wobei die Spalten T_{FZ1} und T_{FZ2} die mittlere FZ1- bzw. FZ2-Morgentemperatur der Wärmeinseln bzw. des Kältepol (Mariatrost) enthalten. Der Temperaturunterschied ΔT zwischen der Wärmeinsel (Stadtzentrum) und dem Mariatrost-Kältepol beträgt in der FZ1-Morgenaufnahme rund 4.7 K und in der FZ2-Morgenaufnahme 5.4 K, wie Tabelle 8 zeigt:

Tabelle 8: Mittlere Morgentemperaturen der in Abbildung 16 ausgewiesenen Wärmeinsel (Stadtzentrum) sowie des Mariatrost-Kältepol. ΔT gibt dabei den Temperaturunterschied zwischen Wärmeinsel und Kältepol wieder.

	T_{FZ1} (°C)	T_{FZ2} (°C)
Wärmeinsel (Stadtzentrum)	11.29	11.66
Mariatrost	6.61	6.24
ΔT (Stadtzentrum – Mariatrost)	4.68 K	5.42 K

Für die sekundäre Wärmeinsel (Gösting) ergeben sich im Vergleich zur „zentralen“ Wärmeinsel sowohl für die FZ1- als auch die FZ2-Morgenaufnahme geringfügig höhere Mitteltemperaturen (~ 11.7 bzw. 12.1 °C), wie Tabelle 9 zeigt. Damit ist die sekundäre Wärmeinsel im Mittel um rund 5.1 K (FZ1) bzw. 5.9 K (FZ2) wärmer als der Mariatrost-Kältepol (vgl. Abb. 16):

Tabelle 9: Mittlere Morgentemperaturen der sekundären Wärmeinsel (Gösting) sowie des Mariatrost-Kältepol. ΔT gibt den Temperaturunterschied zwischen sekundärer Wärmeinsel und Kältepol wieder.

	T_{FZ1} (°C)	T_{FZ2} (°C)
Sek. Wärmeinsel (Gösting)	11.66	12.12
Mariatrost	6.61	6.24
ΔT (Gösting – Mariatrost)	5.05 K	5.88 K

Die Tabellen 8 und 9 geben somit einen beispielhaften Einblick in die Intensität der Wärmeinsel/städtischen Überwärmung zum Zeitpunkt der Thermalbefliegungen, wobei die in Abbildung 16 ausgewiesenen Wärmeinsel-Gebiete im Vergleich zum Mariatrost-Kältepol eine ungefähr 5 K höhere Oberflächenmitteltemperatur aufweisen.

3. Referenzen

- Baldrige, A.M.; Hook, S.J.; Grove, C.I.; Rivera, G. (2009): The ASTER spectral library version 2.0. In: *Remote Sensing of Environment* 113, 4, S. 711–715.
- Berk, A.; Conforti, P.; Kennett, R.; Perkins, T.; Hawes, F.; van den Bosch, J. (2014): MODTRAN® 6: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code. In: 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), IEEE, S. 1-4.
- Bitelli, G.; Conte, P.; Csoknyai, T.; Franci, F.; Girelli, V.A.; Mandanici, E. (2015): Aerial Thermography for Energetic Modelling of Cities. In: *Remote Sensing* 7, 2, S. 2152- 2170.
- Fouad, N.A. und Richter, T. (2012): Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. Vierte Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- Lazar, R.; Buchroithner, M.F.; Kaufmann, V. (1994): Stadtklimaanalyse Graz. Graz: Magistrat Graz, Stadtplanungsamt.
- Lazar, R. und Sulzer, W. (2013): Stadtklimaanalysen 1986, 1996, 2004 & 2011. Graz: Magistrat Graz.
- Lillesand, T.M. und Kiefer, R.W. (1994): Remote sensing and image interpretation. Dritte Auflage. New York: John Wiley & Sons.
- Mandanici, E.; Conte, P.; Girelli, V.A. (2016): Integration of Aerial Thermal Imagery, LiDAR Data and Ground Surveys for Surface Temperature Mapping in Urban Environments. In: *Remote Sensing* 8, 10, S. 880-898.
- Meerdink, S.K.; Hook, S.J.; Roberts, D.A.; Abbott, E.A. (2019): The ECOSTRESS spectral library version 1.0. In: *Remote Sensing of Environment* 230 (111196), S. 1–8.
- Posch, T. (2023): Modelling of surface temperatures from airborne thermal imagery. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Geographie und Raumforschung, Graz.
- Rüdiger, D.; Weiss, T.; Unger, L. (2021): Spatially Resolved Analysis of Urban Thermal Environments Based on a Three-Dimensional Sampling Algorithm and UAV-Based Radiometric Measurements. In: *Sensors* 21, 14, S. 4847-4878.
- Spectral Sciences Inc. (Hg.) (2016): MODTRAN®. <http://modtran.spectral.com/>, zuletzt geprüft am 29.08.2023.
- Steinicke & Streifeneder (Hg.) (2010a): Thermalscannerbefliegung Mannheim 2009. Steinicke & Streifeneder, Freiburg.
- Steinicke & Streifeneder (Hg.) (2010b): Stadtklimauntersuchung Leipzig. Steinicke & Streifeneder, Freiburg.