

IMPRESSUM

Autoren

Reinhold Lazar und Wolfgang Sulzer
(Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz)

Projektgruppe

Projekt THERMAL 04

Projektkoordination

Winfried Ganster (Magistrat Graz,
A10/6-Stadtvermessungsamt)

Unter Mitwirkung von

Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz (Diplom-, Master- und Projektarbeiten): Michael Avian, Richard Böhm, Manuel Borovski, Thomas Fallinski, Julia Grafl, Irene Guzelnik, Karl Hubeny, Marc Muick, Lasse Kraack, Katharina Kern, Richard Pink, Evelin Pfaffinger, Stefan Rafelsberger, Andreas Salentini, Mark Staples, Peter Stiegler, Stefan Wrulich, Michael Wurm

TU Graz, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie: Viktor Kaufmann, Mathias Schardt

Joanneum Research, Fernerkundung und Geoinformation: Hannes Raggam, Mathias Schardt

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Zweigstelle Graz:
Alexander Podesser

Magistrat Graz, A10/6-Stadtvermessungsamt: Winfried Ganster

Abteilungsvorstände

Magistrat Graz, A14-Stadtplanungsamt: Bernhard Inninger
Magistrat Graz, A10/6-Stadtvermessungsamt: Günther Lorber

Unterstützt von

Magistrat Graz,
A10/6-Stadtvermessungsamt
Magistrat Graz,
A14-Stadtplanungsamt

Magistrat Graz, A23-Umweltamt:
Werner Prutsch
Holding Graz Services, Wasserwirtschaft vormals Magistrat Graz,
Kanalbauamt
Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A15 Energie,
Wohnbau, Technik: Gerhard Semmelrock

Grafische Bearbeitung

Institut für Geographie und Raumforschung
EN GARDE Interdisciplinary GmbH

Konzeption

Winfried Ganster (Magistrat Graz,
A10/6-Stadtvermessungsamt)
EN GARDE Interdisciplinary GmbH

Gestaltung und Satz

EN GARDE Interdisciplinary GmbH

Druck

Steiermärkische Landesdruckerei
GmbH

STADTKLIMA- ANALYSEN

1986, 1996, 2004 & 2011



INHALTSVERZEICHNIS

9

EINLEITUNG

11 1. BEFLIEGUNGEN UND DATENGRUNDLAGEN

- 14** 1.1 Der DAEDALUS-Multispektralscanner
- 21** 1.2 Der TABI-1800-Thermalsensor
- 24** 1.3 Die UltraCam-Befliegungen 2007 und 2011
- 27** 1.4 Sonstige Datengrundlagen
- 29** 1.5 Datenvorverarbeitung/
Data Preprocessing
- 29** 1.5.1 Datenvorverarbeitung
der DAEDALUS-Daten
1986 und 2004
- 30** 1.5.1.1 Radiometrische Korrektur
der DAEDALUS-Daten
1986 und 2004
- 32** 1.5.1.2 Entzerrung von DAEDALUS-
Bildstreifen 1986 und 2004
- 46** 1.5.2 Datenvorverarbeitung
der TABI-1800-Daten

47 2. VERSIEGELUNGS-KARTEN

- 47** 2.1 Einleitung
- 48** 2.2 Arbeitsablauf bei der
Erstellung der Versiege-
lungskarten
- 48** 2.2.1 DAEDALUS-Daten 1986,
1996 und 2004
- 57** 2.2.2 UltraCam-X-Daten
2004 und 2007
- 57** 2.2.2.1 Versiegelung UltraCam-X
2007
- 69** 2.2.2.2 Versiegelung UltraCam-X
2011
- 70** 2.2.2.3 Versiegelung im Change-
Detection-Verfahren

| | | |
|------------|-----------|--|
| 89 | 3. | KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN |
| 90 | 3.1 | Klimatische Messkampagnen 1986 |
| 90 | 3.1.1 | Wetterlage zum Aufnahmezeitpunkt 1986 |
| 95 | 3.2 | Klimatische Messkampagnen 2004 |
| 95 | 3.2.1 | Erläuterungen zur Wetter- lage vom 24.10.2004 (Berliner Wetterkarte) |
| 98 | 3.2.2 | Ballonsondierungen |
| 102 | 3.3 | Klimatische Messkampagnen 2011 |
| 102 | 3.3.1 | Wetterlage am 20.12.2011 |
| 107 | 3.3.2 | Ergebnisse der Messkam- pagnen am 20.12.2011 |

| | | |
|------------|-----------|--|
| 112 | 4. | ERSTELLUNG DER TEMPERATURKARTEN VON GRAZ |
| 112 | 4.1 | Einleitung |
| 113 | 4.2 | DAEDALUS-Befliegung 1986 |
| 120 | 4.3 | DAEDALUS-Befliegung 1996 |
| 121 | 4.4 | DAEDALUS-Befliegung 2004 |
| 122 | 4.4.1 | Erstellung der Strahlungs- temperaturkarte: Mittagsflug 2004 |
| 131 | 4.4.2 | Modellierung der Strahlungstemperaturkarte: Morgen 2004 |
| 148 | 4.5 | TABI-1800-Befliegung von 2011 |
| 169 | 4.6 | Einbindung von LANDSAT-Nachtaufnahmen |

| | | |
|------------|-----------|--|
| 179 | 5. | VERGLEICHENDE ANALYSE DER THER- MALBEFLIEGUNGEN 1986 – 1996 – 2004 – 2011 |
| 179 | 5.1 | Datengrundlagen |
| 186 | 5.2 | Möglichkeiten der Vergleichbarkeit |
| 188 | 5.3 | Vergleichende Analyse der Ergebnisse 1986 bis 2011 |
| 188 | 5.3.1 | Vergleich Nachtaufnahmen 1986 – 2011 |
| 191 | 5.3.2 | Vergleich der Mittagsauf- nahmen 1986 und 2004 |
| 202 | 5.4 | Analyse der Ergebnisse – Besonderheiten der Oberflächentemperaturen 1986 – 2004 |
| 202 | 5.4.1 | Besondere Oberflächen- temperaturstrukturen 1986 |
| 209 | 5.4.2 | Einflüsse von Bebauungs- veränderungen |
| 211 | 5.4.3 | Flughafen Graz |
| 212 | 5.4.4 | Thermale Stadtstruktur- analyse 2011 und 1986 |

| | | |
|------------|-----------|--|
| 218 | 6. | DIE DIGITALE KLIMATOPKARTE |
| 218 | 6.1 | Erläuterungen zur Klimatopkarte |
| 219 | 6.2 | Die ausgewählten Bau- körpertypen und ihre Rolle zur Definition der Stadt- klimatopkarte |
| 221 | 6.3 | Geländeklimatische Aspekte bei der Klimatop- abgrenzung |
| 222 | 6.4 | Besondere Oberflächen und ihre Zuordnung zu Klimatopen (als Sonder- klimatope in der Karte bezeichnet) |
| 223 | 6.5 | Erläuterungen zum Grund- konzept der kartographi- schen Gestaltung |
| 224 | 6.6 | Zusammenfassende Beschreibung der Stadtklimatope |
| 230 | 6.7 | Hinweise zu den Sonderklimatopen |

| | | |
|------------|-----------|--|
| 235 | 7. | DIE KARTE DER PLANE- RISCHEN HINWEISE |
| 235 | 7.1 | Vorbemerkungen |
| 236 | 7.2 | Einleitung |
| 236 | 7.3 | Planerische Empfehlungen |
| 236 | 7.3.1 | Zonen 1 und 2 (Dichte Ver- bauung mit ausgeprägtem Wärmeinseleffekt Nachts) |
| 241 | 7.3.2 | Wohnen – Vorranggebiete (Zonen 3 bis 9) |
| 243 | 7.3.3 | Wohnen mit Einschränkun- gen (Zonen 9 bis 18) |
| 249 | 7.3.4 | Eignungsbereich Erholung/ Klimaökologische Aus- gleichsräume („Grün- gürtel“) |
| 250 | 7.3.5 | Bereiche mit Industrie und Gewerbe (Wohnen mit Einschränkungen) |

| | | |
|------------|---|--|
| 253 | 8. | ANALYSE AUSGE- WÄHLTER KLIMA- ELEMENTE |
| 253 | 8.1 | Die Verhältnisse der Lufttemperatur in Graz in den Jahren 2004–2011 |
| 260 | 8.2 | Die Verhältnisse des Niederschlags in Graz in den Jahren 2004–2011 |
| 261 | 8.3 | Analyse der Besonderheiten der Lokalwinde |
| 261 | 8.3.1 | Allgemeines |
| 261 | 8.3.2 | Datenlage und Mess- methodik |
| 264 | 8.3.3 | Ergebnisse |
| 274 | 8.3.4 | Vergleichende Betrachtung bei Modellierungen für das Grazer Windfeld |
| 276 | 8.3.5 | Weitere Besonderheiten bei den Pseudoflurwinden |
| 285 | 8.3.6 | Besonderheiten der Pseudo- flurwinde im Westen von Graz |
| 292 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | |
| 292 | LITERATURVERZEICHNIS | |
| 296 | BIOGRAFIEN | |

EINLEITUNG

Graz kann im Vergleich mit anderen Städten in Mitteleuropa schon auf eine lange Tradition in Bezug auf Stadtklimaforschung verweisen. Am besten ist die Situation noch mit Stuttgart vergleichbar, die mit analoger Intensität stadtklimatischen Untersuchungen – unterstützt durch Thermalbefliegungen – durchführen ließ, am aktuellsten sind dort nach wie vor die Erhebungen um den ehemaligen Bahnhofsbereich („Stuttgart 21“). In Graz steht eine ähnlich große Studie bezüglich der Gestaltung der Reininghaus-Gründe auch aus stadtklimatologischer Sicht kurz bevor. Wenn wir zurückblicken, dann lassen sich die Anfänge in Graz in das Jahr 1974 (Mahringer, 1974) zurückverfolgen, wo erstmals Klimasonderstationen errichtet wurden, um über das Windfeld verbesserte Daten zu erhalten; in diese Zeit fällt auch die erste Thermalbefliegung (ZIRM 1977). Ab dem Jahre 1981 wurden dann wieder vermehrt Stationen errichtet und diesmal auch Messfahrten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden dann bei der Tagung „10 Jahre Grazer Luft beobachtet“ präsentiert. Mit der Intensivierung der Klimaforschung am Institut für Geographie der Universität Graz im Jahre 1983 durch Anschaffung einer aufwendigen Fesselballonsonde konnten neben Messfahrten auch vertikale Aufstiege realisiert werden, die bis in eine Höhe von maximal 700 m über Grund durchgeführt wurden. Der Wunsch nach einer Befliegung analog zu Stuttgart wuchs aber immer mehr, um nun auch tageszeitlich aufgelöst eine flächenhafte Aussage über das Stadtgebiet von Graz zu erhalten. Und somit gelang es mit dankbarer Unterstützung durch die Stadt Graz, eine einzigartige Befliegung mit drei Terminen [2. und 3.10.1986 (Morgen- und Mittag)] ins Leben zu rufen. Diese Einzigartigkeit stützt sich vor allem auf die teils völlig neuen Erkenntnisse in der Temperaturverteilung in Graz. So konnte beispielsweise der wichtige Düseneffektbereich im NW von Graz sehr anschaulich nachgewiesen werden; Analoges gilt für die Seitentäler im Osten von Graz mit dem Kältepol Mariatrost-Fölling,

wo schon zweimal die Minus-30-Grad-Marke unterschritten wurde. Im Jahre 1994 konnten dann die Ergebnisse endgültig publiziert werden (LAZAR et al. 1994). Die Ergebnisse – im speziellen mit der Klimatopkarte und der Karte der planerischen Hinweise – wurden im STEK 1992 eingearbeitet und im Flächenwidmungsplan berücksichtigt. In den Folgejahren hatten sich nun die technischen Möglichkeiten der Fernerkundung weiter verbessert, aber auch seitens der Stadtplanung bestand der Wunsch nach einer Aktualisierung der Daten bzw. der Studie aus dem 1994er Jahr (Basis: Flugdaten 1986). So wurde im Oktober 2004 die nächste Thermalbefliegung realisiert. Trotz sehr günstiger Prognoseaussichten gab es dann beim geplanten Morgenflug Probleme durch Talnebel, der schließlich weite Teile des Stadtgebietes erfasst hatte. Recherchen hatten ergeben, dass wider Erwarten der Murtalauswind sich zu schwach entwickelt und somit die Ausbildung von Talnebel begünstigt hatte. Der Mittagsflug verlief dann wie geplant. Die Ergebnisse dieser Studie mit sehr aufschlussreichen Teilen wie etwa die Erstellung einer Versiegelungskarte – inbegriffen Berichte über spezielle Themen wie Industrieschneefall und die Durchlüftung in Graz – wurden in einem eigenen Bericht dokumentiert. Schließlich kam es im Dezember 2011 zur Anfrage einer weiteren Befliegung – diesmal mit der Besonderheit eines Wintertermins. Dieser hatte den Vorteil, dass die Vegetation in „Ruhe“ war, und somit bestimmte Aspekte zum Tragen kamen wie beispielsweise der ungestörte Bodenwärmestrom auf freien Flächen (es gab zum Termin keine Schneedecke!) und die Erfassung der Wärmeverluste von Dächern, was bei Stadtklimauntersuchungen in Mitteleuropa einzigartig ist und wo wir mit Stolz sagen können, dass in Graz damit Pionierarbeit geleistet wurde. In Graz selbst hat sich klarerweise bezüglich der Bautätigkeit viel getan und deshalb wurden die Klimatopkarte und die Karte der planerischen Hinweise aktualisiert.

Warum die Stadt Graz sich derart für Stadtklimastudien anbietet – in Wien ist die Aktivität diesbezüglich weit geringer –, liegt wohl in ihrer klimatischen Sonderlage. Mit der Position südlich der Alpen (im südöstlichen Alpenvorland) am Fuße des Randgebirges mit dem Bogen von Koralpe über Gleinalpe und Grazer Bergland erfährt das Grazer Klima eine starke Prägung mit Windarmut, erhöhter Bereitschaft zu Inversionen (lokal bis über 80 % Inversionshäufigkeit) und Talnebel (vor allem im Süden mit über 120 d/a!), woraus klarerweise eine deutliche Benachteiligung für die Schadstoffausbreitung folgt. Dieser Umstand erklärt nun auch die Überschreitungen der Zahl der Tage mit Feinstaub über 50μ (Tagesmittelwert). Bei längeren Inversionswetterlagen kommt es auch zu Aufschaukelungseffekten im Sinne von Tag zu Tag zunehmend höherer Belastung. Nicht zuletzt wegen der möglichen Information an die Bevölkerung wurde es notwendig, mit aufwendigen Modellierungen (über die TU Graz, P. Sturm 1990) ein Prognosemodell zu erstellen. Damit dürfte Graz neben Stuttgart zu den am besten klimatologisch und auch immissionstechnisch untersuchten Städten in Europa zählen. Weiters kann im Vergleich mit anderen Städten vermerkt werden, dass sehr viel an klimatologischem Wissen in die Stadtplanung mit der Umsetzung über die einzelnen STEK-Berichte und den jeweils aktualisierten Flächenwidmungsplänen umgesetzt werden konnte – ganz im Sinne der Nachhaltigkeit zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Luftgüte. Zum Klima sei noch ergänzt, dass die abgeschirmte Lage am Südfuß der Alpen die Ausbildung von Lokalwinden stark

begünstigt, wobei im Raum Graz nicht weniger als vier unterschiedliche Systeme an der Schadstoffausbreitung und der Ausbildung sowie der Struktur der städtischen Wärmeinsel beteiligt sind. Graz weist nun auch diesbezüglich eine Besonderheit auf, dass im Vergleich mit anderen Städten in Mitteleuropa der Flurwind eine deutlich größere Mächtigkeit erreicht (zumeist 30–80 m, üblich sind 10–20 m). Dieser Aspekt wurde dann vor allem bei den Industriestandorten im Süden von Graz eigens berücksichtigt.

Abschließend sei noch im Zusammenhang mit den klimatischen Besonderheiten von Graz erwähnt, dass in den letzten 15 Jahren 8 Diplomarbeiten über Windverhältnisse, Industrieschneefall und Immissionen verfasst worden sind. Hervorzuheben sind dabei die Ergebnisse vor allem der für die Schadstoffausbreitung so wichtigen Flurwinde und der Immissionsbelastung durch Feinstaub. In diesem Bereich wurden ebenfalls 6 Diplom- und Masterarbeiten (zu den Themen: *Stadtentwicklung Graz, Thermalbefliegung 2004, Objektbasierte Klassifikation, Change Detection*) im Rahmen der Initiative betreut (siehe Literaturliste).

An diesem langjährigen Projekt zeigt sich die ausgezeichnete Zusammenarbeit zwischen der Stadt Graz und dem Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität bzw. mit dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung, der Technischen Universität Graz (Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie) und dem Joanneum Research (Institut für Digitale Bildverarbeitung).

1. BEFLIEGUNGEN UND DATENGRUNDLAGEN

Befliegungen von urbanen Räumen werden immer in Hinblick auf eine optimale Datennutzung organisiert. Vielfältige stadtplanerische Fragestellungen sollen mit den doch finanziell aufwendigen Befliegungen behandelt werden. Für die Erstellung einer Stadtklimaanalyse mit Unterstützung von flächenhaften Temperaturkarten müssen aber spezielle Sensoren im Thermalspektrum eingesetzt werden. So gab die Stadtverwaltung Graz spezielle Befliegungen in Auftrag: **1986, 1996 und 2004** wurde der **DAEDALUS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM)** der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR) eingesetzt. Der Sensor ist ein Multispektralscanner, der Analysen der thermalen Struktur und auch eine Analyse der Bodenbedeckung/Landnutzung (Versiegelung) im Sichtbarkeits- und Infrarotwellenbereich zulässt. Dadurch können Fragen des thermischen Stadtklimas und auch der Versiegelung mit einem einheitlichen System analysiert werden. 2011 wurden mit dem neuen **Sensor TABI 1800** ergänzende Analysen der Temperaturverteilung der Stadt durchgeführt.

Das Untersuchungsgebiet ist im Wesentlichen begrenzt durch die Stadt Graz. Da die Befliegungen auch die engeren Umlandbereiche erfassen, wurden die Analysen auf eine annähernd quadratische Form bei einer Seitenlänge von etwa 14×15 km und auf eine Fläche von ca. 210 km^2 erweitert. Dadurch können Beeinflussungen (z. B. klimatisch durch Seitentäler) und Entwicklungen (z. B. der Versiegelung) auch in stadtnahen Bereichen analysiert werden.

Abbildung 1:
Die Einbettung des
Untersuchungsgebietes
in das Grazer Umland



IM FOLGENDEN WERDEN DIE BEFLIEGUNGSKAMPAGNEN UND MEILENSTEINE DER STADTKLIMAANALYSEN VON GRAZ AUFGELISTET:

1986: **1. Thermalbefliegung** durch die DLR mit einem flugzeuggestützten Multispektralscanner (DAEDALUS) (Versiegelung 1986)

1994: Fertigstellung der Stadtklimaanalyse auf Basis der Befliegung 1986 und zusätzlicher klimatologischer Untersuchungen und Analysen

1990 und 2002: Revision des Stadtentwicklungsplanes unter Einbindung der Stadtklimaanalyse

1996: **2. Thermalbefliegung** (DAEDALUS-Sensor) durch die DLR und Stadtverwaltung (Versiegelung 1996)

2004: Revision der Stadtklimaanalyse (**3. Thermalbefliegung**) (DAEDALUS-Sensor) zur Neuerstellung von Klimatopkarten und Klimaeignungskarten (Versiegelung 2004)

2007: ULTRACAM-Befliegung für die Analyse der Versiegelung (Versiegelung 2007)

2011: ULTRACAM-Befliegung für die Analyse der Versiegelung (Versiegelung 2011)

2011/12: Revision der Stadtklimaanalyse (**4. Thermalbefliegung**) (TABI 1800 Sensor) zur Erstellung von Klimatop-/Klimaeignungskarten und Erfassung der Dachflächen

Somit stehen für die Stadtklimaanalyse vier Befliegungen (1986, 1996, 2004 und 2011) zur Verfügung, wobei die Befliegungen von 1996 nicht primär für die Stadtklimaanalyse organisiert wurden und es somit parallel zum Befliegungszeitraum keine ergänzenden klimatologischen Messkampagnen gab. Für die Versiegelungsanalyse wurden zusätzlich noch die UltraCam-X-Befliegungen aus den Jahren 2007 und 2011 miteinbezogen.

Die erste von Graz durchgeführte **Befliegung 1977** (Thermalstudie Grazer Becken) mit einem Thermalscanner ist ob der zahlreichen Komplikationen, unter anderem hervorgerufen durch die noch in einem frühen Entwicklungsstadium steckende Thermalbefliegung, nicht maßgeblich für weitere Auswertungen interessant, wird aber doch als „Pionierleistung“ in Österreich betrachtet. Ziel dieser Befliegung war die Untersuchung des Kleinklimas des Grazer Beckens mit den damals modernsten zur Verfügung stehenden Mitteln. Die Daten wurden mit dem optomechanischen Thermalscanner *RECONOFAX 13A* gewonnen, welcher für den militärischen Einsatz entwickelt wurde. Die Registrierung der aufgenommenen Thermalstrahlung erfolgte noch analog auf Endlos-Papier. Interessant zu erwähnen ist aber, dass bereits zu drei

unterschiedlichen Zeitpunkten geflogen wurde, welche aber aus klimatologischen Gesichtspunkten nicht die optimale Strahlungstemperaturverteilung über einen Tag aufzeigen. Meteorologische Messdaten wie Druck, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden während der Befliegung an mehreren Stationen, über das Untersuchungsgebiet verteilt, erhoben. Aufgrund von zu hohem Kostenaufwand wurden bei der Auswertung der Daten kaum bis gar keine radiometrischen und geometrischen Korrekturen durchgeführt. Die dargestellten Thermalbilder – es wurde keine Gesamtansicht des Messgebietes hergestellt – zeigen auch nur relative Messwerte, welche die Vergleichbarkeit untereinander nicht ermöglichen (KAUFMANN, 1989, S. 19).

Temperaturstrahlungswertekarte (Ausschnitt)

nach K. ZIRM 1977

(Versuch einer Synthese Nacht-/Tag-Aufnahme)

Abbildung 2: Ausschnitt der Thermalstudie 1977



■ „Kaltluftproduzenten“
(Wiesen, Parkanlagen)

■ Flächen mit durchschnittlicher
Wärmespeicherung

■ Flächen mit überdurchschnittlicher
Wärmespeicherung

■ „Wärmeproduzenten“
(Industriebetriebe, Bahnhof)

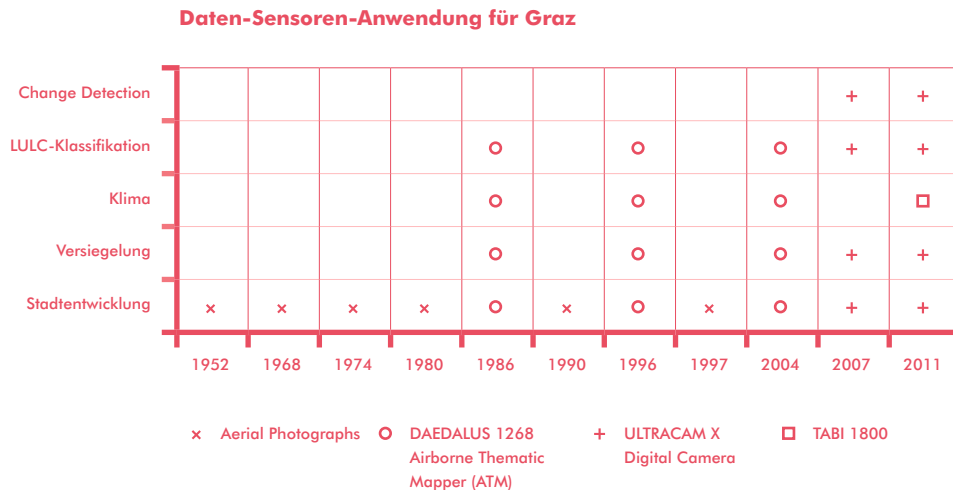


Abbildung 3:
Daten – Sensoren und
Anwendungen für Graz

1.1 DER DAEDALUS-MULTISPEKTRALSCANNER

Der Multispektralscanner **DAEDALUS AADS 1268** (besser bekannt unter der Bezeichnung „Airborne Thematic Mapper“) besteht aus einem rasch rotierenden Spiegel, kombiniert mit elf Detektoren, welche die vom Spiegel aufgefangene, reflektierte und in Spektralbereiche zerlegte Strahlung empfangen und in elektrische Impulse umwandeln. Die Impulse werden in bis zu 256 Graustufen quantisiert und auf einem Magnetband (1986) und später auf einen digitalen Datenträger abgespeichert. Der rotierende Spiegel besorgt die Abtastung der Erdoberfläche in einer einzelnen Zeile (Scan). Die gewünschte Flächenabtastung wird durch die Fortbewegung des Scanners parallel zur Rotationsachse, d. h. in Flugrichtung, erreicht. Ein Zeilenabtastbild ist also keine Momentaufnahme, wie in der konventionellen Photogrammetrie (Reihenmesskammerbild). Damit ist auch sofort erkennbar, dass jede Unregelmäßigkeit des Abtasters einen Einfluss auf die Qualität der Aufnahme besitzt. Jede Abweichung von der gleichmäßigen Flugzeugbewegung führt zu einer geometrischen Bildstörung. Die Detektoren des Scanners werden in regelmäßigen Abständen im Labor geeicht. Das Kalibrierungsprotokolle sind ebenfalls Bestandteil des Lieferumfangs der DLR. Im thermischen Bereich (thermales Infrarot) dienen zwei einstellbare und temperaturstabilisierte sogenannte Schwarzkörper als interne Eichquellen. In der Regel werden die Temperaturen der Schwarzkörper so eingestellt,

dass sie unterhalb und oberhalb der zu erwartenden Szenentemperaturen liegen und dabei eine Differenz von 25 K aufweisen. Die daraus resultierende Grauwertauflösung entspricht dann ca. 0,1 K (R. Lazar et al., 1994).

Das Arbeitsprinzip des DAEDALUS AADS 1268 unterscheidet sich in einigen wesentlichen Punkten von konventionellen Luftbildaufnahmen. Der Scanner ist ein optisch-mechanischer Abtaster (Scanner), welcher im Gegensatz zu analogen Aufnahmeprinzipien jeweils nur die von kleinen Flächenelementen ausgehende Strahlung detektiert (ALBERTZ, 2001, S. 45).

Abbildung 4:
Geometrie und
Funktionsweise eines
optisch-mechanischen
Scanners
(ALBERTZ 2001)

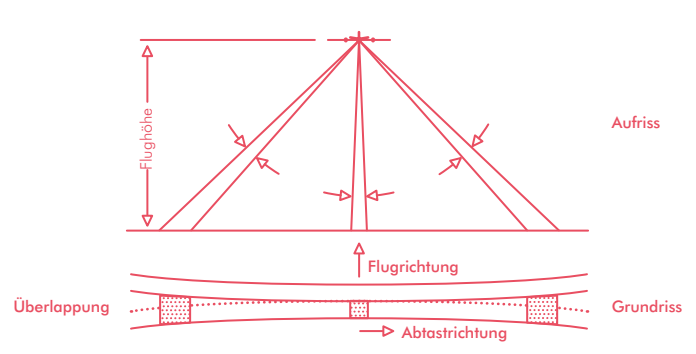
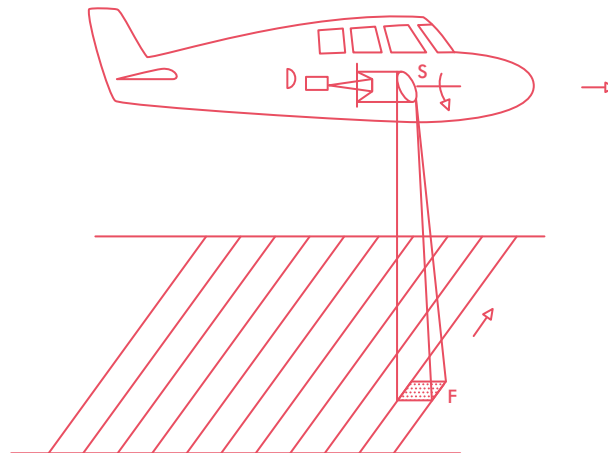
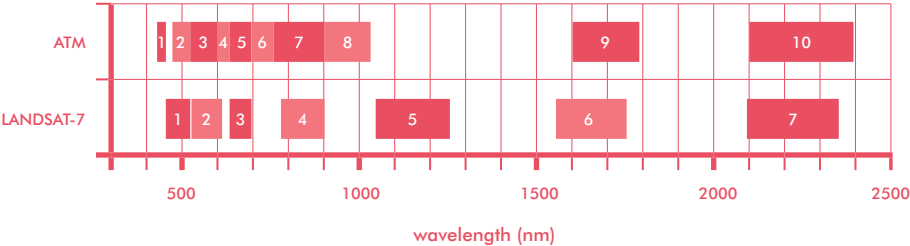


Abbildung 5:
Konfiguration des
Multispektralscanners
DAEDALUS
(Quelle: DLR)



| | |
|--|---|
|  | |
| Daedalus AADS 1268 | |
| Airborne Thematic Mapper | |
| <hr/> | |
| Abtastmodus | Weitwinkel |
| Gesichtsfeld, total | 85,92° |
| Streifenbreite (h 560 m) | ca. 1040 m |
| Gesichtsfeld, momentan | 2,5 mrad |
| Bodenaufbauenselement (h 560 m) | 1,4 x 1,4 m² im Nadir |
| Bildelemente pro Scanzeile | 718 |
| Abtastrate (h 560 m) | 66,7 Hz |
| Rollkompensation | de-aktiviert |
| Spektrale Kanäle | Thematic Mapper - kompatibel |
| Kanal-Nr. | Spektralband (µm) |
| 1 | 0,424 - 0,450 |
| 2 | 0,465 - 0,520 |
| 3 | 0,522 - 0,600 |
| 4 | 0,594 - 0,634 |
| 5 | 0,626 - 0,691 |
| 6 | 0,692 - 0,759 |
| 7 | 0,756 - 0,906 |
| 8 | 0,897 - 1,022 |
| 9 | 1,571 - 1,780 |
| 10 | 2,055 - 2,232 |
| 11 | 8,60 - 11,35 |
| 12 | wie 11 |
| <hr/> | |
| Radiometrie | 8 Bit |
| Digitalisierungstiefe | |
| Empfindlichkeit im Kanal 1-10 | angepasst an städtische Bebauung |
| Temperatur-Einstellwerte für Kanal 11, 12 | ca. +2°C Blackbody 1, ca. +42°C Blackbody 2 |
| Kalibrierstandard für Kanal 1-10 | Test Bench Daedalus AB 532 |
| Kalibrierstandards für Kanal 11, 12 | scanner-interne Schwarzkörperstrahler |



Die Aufnahmeeigenschaften des Sensors haben sich seit seinem Ersteinsatz im Oktober 1986 nicht verändert. Wie damals, wurde auch für den Einsatz im Oktober 2004 die Standardkonfiguration, d. h. der Weitwinkel-Abtastmodus und die „Thematic Mapper“-kompatible Wahl der Spektralkanäle, verwendet. In Abbildung 5 sind die wichtigsten Sensoreigenschaften des Instruments zusammen mit den messflugspezifischen Einstellparametern gelistet.

Abbildung 6:
Die Befliegungen
der DLR mit dem
DAEDALUS-Sensor

| | 1986 | 1996 | 2004 |
|--------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| Datum | 2./3.10.1986 | 20.4.1996 | 24.10.2004 |
| Zeitpunkt | 22.55–23.30 (Nachtflug) 05.52–06.26 (Morgenflug) 12.49–14.17 (Mittagsflug) | 11.00–13.00 (Mittagsflug) | 12.00–14.15 (Mittagsflug) |
| Höhe über Grund | 2000 m | 1100 m | 560 m |
| Aufnahme- richtung | NS | WE | NS |
| Überlappung | 10–40 % | 30–40 % | 30 % |
| Anzahl der Streifen | 13 | 12 | 21 |
| Kanäle | 11 | 11 | 11 |
| Pixelgröße | 5 × 5 m | 2,5 × 2,5 m | 1 × 1 m |
| Georeferen- zierung | JR/TU/UNI Graz | DLR | JR/UNI Graz |

Die **Befliegung 1986** des Großraumes Graz erfolgte am 2. und 3. Oktober. Dieser Aufnahmezeitpunkt (wie auch die Befliegung 2004 und 2011) wurde nicht willkürlich, sondern auf Grund meteorologischer und klimatischer Gesichtspunkte festgelegt. 1996 wurde am 20. April befliegen, 2004 wurde wieder aus klimatologischer Sicht ein Herbsttermin am 24. Oktober ausgewählt.

So stellte z. B. DLR-Flugabteilung für die **Messkampagne 2004** das Forschungsflugzeug vom Typ Cessna C 208 B bereit. Zur Grundausrüstung der ein-motorigen Turboprop-Maschine gehört ein integriertes, DGPS-gestütztes Positions- und Lagesystem, das 1986 noch nicht zur Verfügung stand. Dieser relativ späte Befliegungszeitpunkt im Oktober ergab Bereitstellungsprobleme für das Flugzeug durch das DLR. Die ursprünglich geplante Befliegung vor Sonnenaufgang konnte zudem aufgrund eindringenden Nebels im Süden von Graz nicht durchgeführt werden, deshalb wurde lediglich der Mittagsflug erfolgreich absolviert.

Abbildung 7:
Die 12 DAEDALUS-
Spektralbereiche
(siehe Abbildung 5)

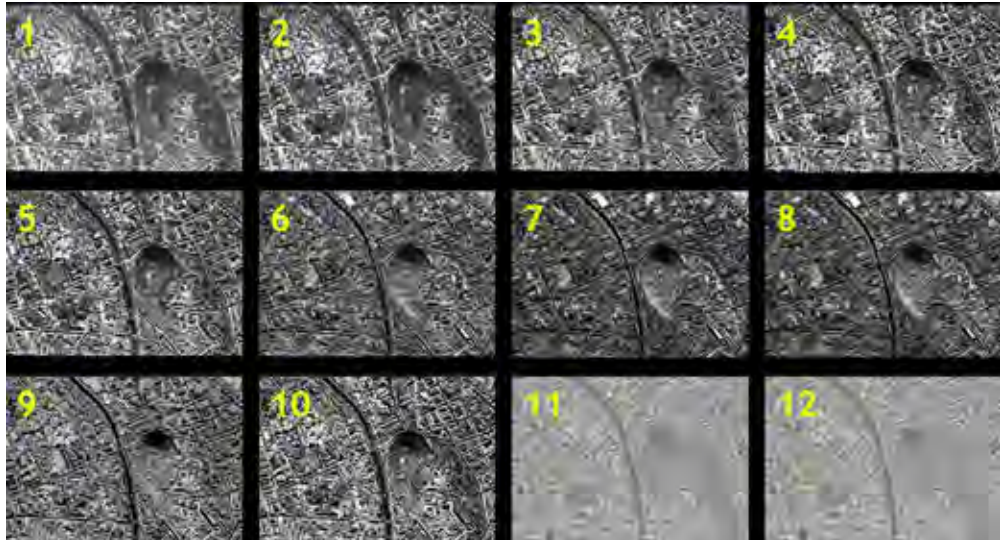
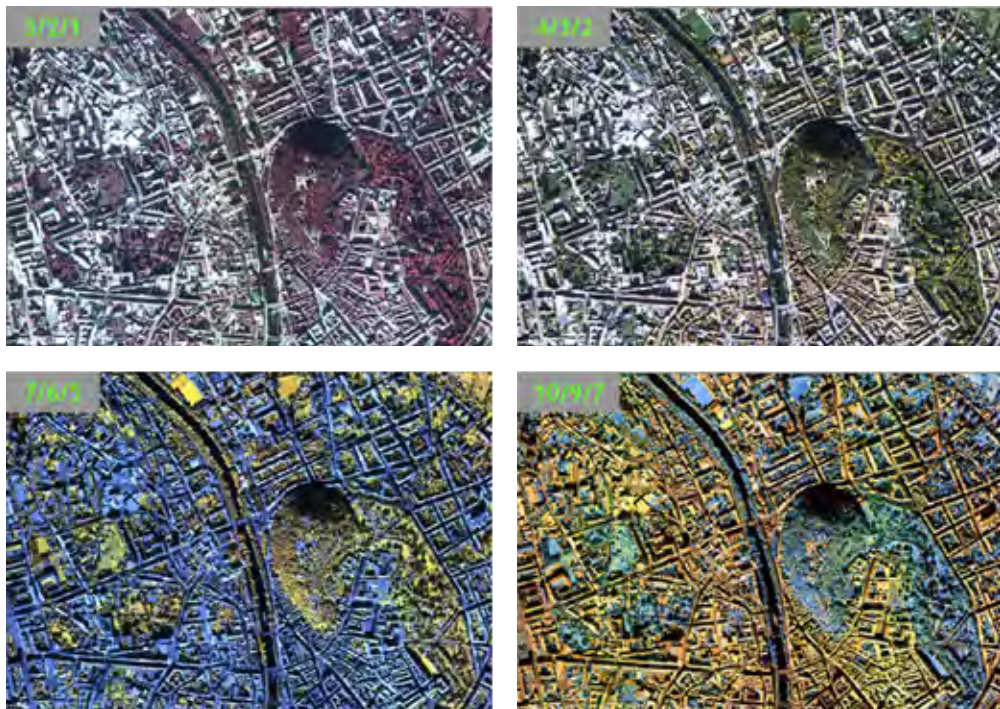


Abbildung 8:
Verschiedene RGB-
Darstellungsmöglich-
keiten bzw. Kanal-
kombinationen



Ursprüngliches Ziel des Vorhabens von 2004 war die Erfassung der thermalen Struktur des Stadtbereichs im Verlauf eines Tages, zum Zeitpunkt der stärksten Abkühlung vor der Morgendämmerung sowie in der Phase der größten Aufheizung am frühen Nachmittag. Dieses Ziel konnte nicht erreicht werden, da der Morgenflug wegen Nebels im Flughafenbereich mit Horizontalsichtweiten unterhalb von 100 Metern ausfallen musste.

Nach Auflösung des Nebels am frühen Vormittag konnte der Mittagsflug im geplanten Umfang (flächendeckende Kartierung des Stadtgebietes mittels räumlich hochaufgelöster, multispektraler Scanneraufnahmen) im Hinblick auf deren Nutzung für anderweitige Zwecke auf dem Sektor Raumplanung durchgeführt werden.

Abbildung 9:
Talnebelgrenzsituation
in St. Veit (Aufnahme
K. Hubeny, 08.04 Uhr)



Um die Mittagszeit am 24. Oktober 2004 konnte über dem erweiterten Stadtgebiet von Graz die „Flugmesskampagne Graz 2004“ durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Befliegung wurden insgesamt 20 in Nord-Süd- bzw. Süd-Nord-Richtung orientierte DAEDALUS-Bildstreifen aufgenommen. Die Befliegung erfolgte in einer Höhe von etwa 560 Metern über der mittleren Geländehöhe, was in einer Bildpunktauflösung von etwa 1,5 Metern für die DAEDALUS-Bildstreifen resultiert.

Abbildung 10:
DAEDALUS-Ausschnitt
(1986: oben;
1996: Mitte;
2004: unten)



1.2 DER TABI-1800-THERMALENSOR

Als Datengrundlage für die Erstellung von Strahlungs- und Oberflächentemperaturkarten für das Jahr **2011** dient der **TABI 1800**-„Airborne Wide-Array Broad-band Thermal Imager“ (TABI) der Firma ITRES Research Limited aus Calgary (Kanada). Dieser Scanner zeichnet Strahlung im thermalen Infrarot (zwischen 3,7 und 4,8 μm) mit einer radiometrischen Auflösung von 14 Bit auf. Je nach Flughöhe während der Aufnahme sind räumliche Auflösungen zwischen 0,1 m

und 1,25 m möglich (<http://www.itres.com/>). Zur Optimierung der Georeferenzierung ist ein GPS/IMU im Scanner integriert.

Der **TABI 1800** ist eine Weiterentwicklung des TABI-320 mit neuen Technologien, der den Aufnahmebereich von 320 auf 1800 Pixel erweitert. Die Sensitivität des gekühlten Sensors erlaubt es, kleinere Temperaturunterschiede als 0,1 K zu erfassen.



Abbildung 11:
TABI-1800-Spezifikationen/Auswahl
(Quelle: <http://www.itres.com/>)

FEATURES:

Achievable pixel resolution range (10 cm to 1.25 m possible with typical unpressurized fixed-wing aircraft; 2 cm resolution using a helicopter)

High thermal resolving power (0.05 degrees Celsius)

Wide imaging array (1800 pixels)

Simplified installation as the controller, digital recording system, and precision GPS/IMU are all built into the sensor head

Spectral Range: Midwave Infrared (3,700–4,800 NM)

Number of spectral bands: ONE (1)

Cooling: Stirling Cycle Cooler

Thermal Reference: Internal Black Body Measurements – collected on every flight line

Dynamic Range: 14 Bit

Standard Temperature Measurement Range: –20 to 150 °C

Die Befliegung wurde von der AVT – Vermessung AVT ZT-GmbH Ingenieurkonsulenten für Vermessungswesen aus Imst (Tirol, <http://www.avt.at>) – von Klaus Legat organisiert. Bei der Befliegung von Graz am 20. Dezember 2011 wurden die Daten aus einer mittleren Flughöhe von ungefähr 1850 Metern über

Grund aufgenommen. Daraus ergab sich eine räumliche Auflösung von 60 Zentimetern und ein thermales Auflösungsvermögen von 0,05 °C. Um das gesamte Stadtgebiet abdecken zu können, wurden 20 Flugstreifen benötigt.

Abbildung 12:
Messsystem TABI
1800 beim „Ground
TABI-1800“-Test
(Moskopp und Legat,
2013)



Folgende Ausführungen wurden aus dem Projektbericht von Edgar Moskopp und Klaus Legat (2013) übernommen: Der Einbau des Thermalsensors in die Cessna C303 der Terra Messflug erfolgte am 19. Dezember 2011 im Hangar des Flughafens Salzburg. Der Thermalsensor wurde auf einer eigens dafür angefertigten Bodenplatte fixiert, welche wiederum im Flugzeug montiert wurde. Das Offset zwischen GPS-Antenne und Sensormittelpunkt des Thermalsensors wurde durch geodätische Vermessung ermittelt. Mittels externer Stromversorgung wurde ein „Ground Test“ durchgeführt und das System komplett hochgefahren. Dabei traten keine Probleme auf.

Der Flug wurde am 20.12.2011 ausgehend vom Flughafen Graz Thalerhof durchgeführt. Die Startzeit war 19:38 MEZ. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Temperatur am Boden -6°C . Die Außentemperatur auf der

Flughöhe von ca. 2.200 m absolut bzw. 1.850 m über Grund betrug -10°C . Auf dieser Flughöhe wird mit dem Sensor eine Bodenauflösung von 75 cm erreicht. Die Befliegung wurde mit dem Streifen 1 um 19:52 von Norden begonnen. In Folge wurden die Streifen aufsteigend befliegen bis zum letzten Streifen 20 (südlichster Streifen). Dieser konnte um 21:51 abgeschlossen werden. Die Landung erfolgte um 22:02. Die Befliegung wurde weitgehend ohne besondere Vorkommnisse durchgeführt. Allerdings zogen ca. ab der Mitte der Befliegung langsam Wolken ins Gebiet. Diese führten zu geringfügigen Störungen in einzelnen Streifen im Südwesten des Flugblocks.

Nach der Landung wurde der Datenträger mit den aufgezeichneten Daten entnommen und im Anschluss überspielt und gesichert.

Abbildung 13:
Flugplanung in Google
Earth (Moskopp und
Legat, 2013)

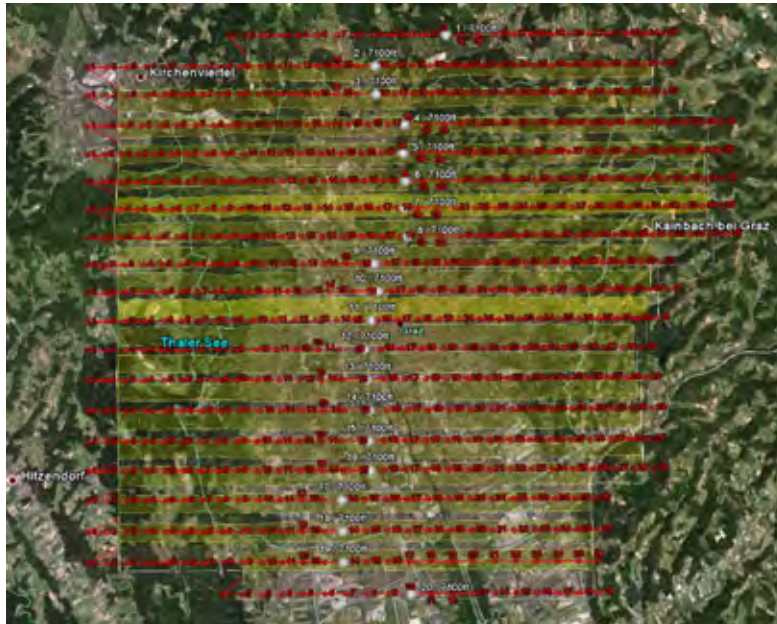


Abbildung 14:
TABl-1800-Aufnahme
vom 20.12.2011
(hell: warm, dunkel:
kalt)



1.3 DIE ULTRACAM-BEFLIEGUNGEN 2007 UND 2011

Die zwei **UltraCam-X-Befliegungen** (B, G, R und NIR; SCHNEIDER und GRUBER 2008, GRUBER et. al 2009) vom September 2007 (8 Bit) und Juni 2011 (16 Bit) wurden mit einer (resampled) geometrischen Auflösung von 25 cm (die Originalbilddaten von 2011 besitzen 7 cm Auflösung) verwendet. Aus diesen Befliegungen wurden *True Orthofotos* sowie digitale Oberflächenmodelle erstellt (BISCHOF 2011) und vom Magistrat Graz (Referat für Photogrammetrie des Stadtvermessungsamtes) bereitgestellt.

Die Originalauflösung der **2007-UltraCam-X-Daten** betrug zehn Zentimeter mit Ausnahme der Region Plabutsch, die mit einer Auflösung von 20 Zentimetern zur Verfügung stand. Projiziert ist das Datenmaterial auf das Gauss-Krüger-(GK)-M34-System. Sofern nicht anders zitiert, wurden die Informationen dies Kapitels aus BISCHOF 2011 übernommen.

Der Messbildflug UltraCam-X 2007 wurde in zwei Teilen am 22. und 23. September 2007 vom Unternehmen „FFM Forest Mapping Management“ durchgeführt. Als bildgebender Sensor kam die digitale Luftbildkamera UltraCam-X zum Einsatz. Während des Fluges wurden ebenfalls GPS- und IMU-Daten für die Referenzierung des Bildmaterials aufgezeichnet. Die UltraCam-X verfügt über eine Sensorgröße von 14430 x 9420 Pixel, was einem Auflösungsvermögen von rund 136 Megapixeln entspricht.

Es wurden dabei zwei Blöcke generiert, wobei der Großteil des Projektgebietes mit einer Bodenauflösung von acht Zentimetern aus einer Flughöhe von 1100 Metern über Grund aufgenommen wurde und die Region des Plabutsch mit 16-Zentimeter-Auflösung aus einer Flughöhe von 2200 Metern. Beflogen wurde der 8-Zentimeter-Block mit 37 West-Ost- bzw. Ost-West-Streifen mit einem Streifenabstand von rund 400 Metern, woraus eine Querüberdeckung von 60 Prozent und eine Längsüberdeckung von 80 Prozent resultierte. Der 16-Zentimeter-Block wurde mit sieben Nord-Süd- bzw. Süd-Nord-Streifen beflogen mit einem Streifenabstand von 900 Metern, woraus hier dieselben Überdeckungsgrade erreicht wurden. Dieser hohe Überdeckungsgrad wurde gewählt, um die geforderten Parameter des Auftraggebers für die Erstellung von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen zu erfüllen. Insgesamt wurden fünf Bänder aufgenommen.

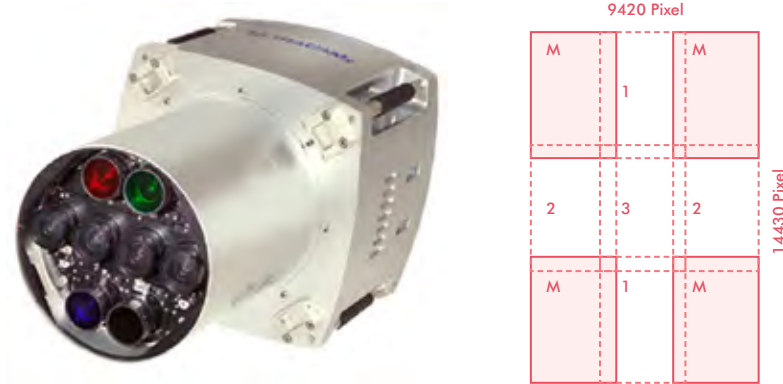
Panchromatisch

Echtfarben-RGB

Nahes Infrarot

Nativ werden die Bilder mit einer radiometrischen Auflösung von 16 Bit gespeichert. Aufgrund des Auftraggebers wurden jedoch nur 8 Bit geliefert. Laut dem Befliegungsbericht ließen sich die 16 Bit ohne merkliche Verluste auf 8 Bit herabskalieren.

Abbildung 15:
UltraCam-X
(GRUBER, o.j.)



FOLGENDE PRODUKTE ENTSTANDEN AUS DER ULTRACAM-X-BEFLIEGUNG:

Orthobilder und True Orthobilder im Blattschnitt der Grazer Mappe

Digitale Bilddaten in Color (RGB) und Color-Infrarot (CIR)

Orientierungsdaten aus Aerotriangulation und Bündelausgleich

Digitales Oberflächenmodell im Mappenblattschnitt 1:1000

Digitales Geländemodell im Mappenblattschnitt 1:1000

Digitale Orthobilder im Mappenblattschnitt 1:1000, 1:2000 und 1:5000

Digitale True Orthobilder im Mappenblattschnitt 1:1000, 1:2000 und 1:5000

DIE GENAUIGKEIT DER AEROTRIANGULATION WIRD IM BERICHT ZUR BEFLIEGUNG FÜR DEN 8-ZENTIMETER-BLOCK WIE FOLGT ANGEGEBEN:

Mittlere Residuen aus 91 Kontrollpunkten (X, Y, Z in mm) 81. 96. 55.

Mittlere Residuen aus 27 Passpunkten (X, Y, Z in mm) 106. 92. 91.

Mittlere Residuen aus GPS-Positionen (X, Y, Z in mm) 67. 77. 31.

DIE GENAUIGKEIT DER AEROTRIANGULATION WIRD IM BERICHT ZUR BEFLIEGUNG FÜR DEN 16-ZENTIMETER-BLOCK WIE FOLGT ANGEGBEN:

Mittlere Residuen aus 27 Passpunkten (X, Y, Z in mm) 188. 116. 65.

Mittlere Residuen aus GPS-Positionen (X, Y, Z in mm) 37. 52. 50.

Bezogen auf die Bodenauflösung, lässt sich festhalten, dass die Genauigkeit je nach Raumlage knapp außerhalb bzw. innerhalb des Subpixelbereiches liegt.

Die **UltraCam-Daten aus dem Jahr 2011** wurden vom Referat für Photogrammetrie des Stadtvermessungsamtes Graz zur Verfügung gestellt. Die Datenlieferung bestand aus einem Block Farbinfrarotluftbilder (CIR). Die Bodenauflösung betrug im Original 6 cm, für die Arbeiten wurden jedoch 25 cm verwendet. Projiziert ist das Datenmaterial auf das Gauss-Krüger (GK) M34 System.

Die Befliegung fand am 22. Mai 2011 statt. Die radiometrische Auflösung wurde mit 16 Bit optimal ausgenutzt. RGB- und CIR-Daten stehen zur Verfügung sowie ein photogrammetrisch abgeleitetes DSM.

Abbildung 16:
UltraCam-X-Ausschnitt
(2007: oben;
2011: unten)



1.4 SONSTIGE DATENGRUNDLAGEN

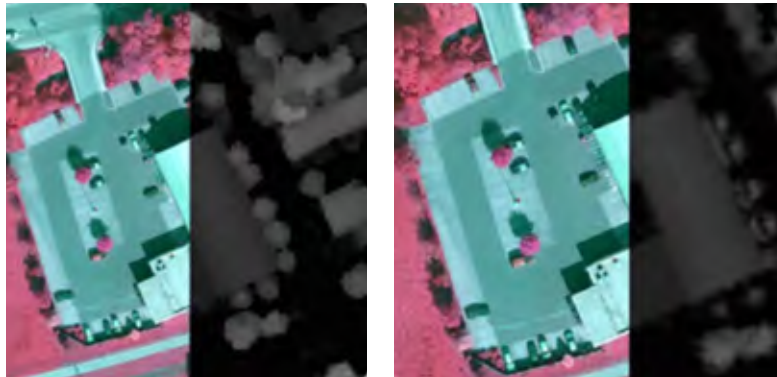
Für den Verarbeitungsprozess bzw. die Analyse der verschiedenen Befliegungen müssen zusätzliche Geodaten eingebunden werden, die größtenteils vom Vermessungsamt und der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt wurden.

Zusätzlich wurden in die Studien auch **Derivate** der UltraCam-X-Befliegungen eingebunden:

Photogrammetrisch erstellte Oberflächenmodelle (photogrammetrisches DOM): Dieses wurde im Rahmen der Prozessierungskette der UltraCam-Befliegung der Stadt Graz aus dem Jahre 2011 er-

stellt. Die Bodenauflösung dieser DOM liegt bei fünf Zentimetern. Für den Einsatz auf städtischem Niveau war jedoch eine Reduktion der Auflösung auf 25 Zentimeter notwendig. Hervorzuheben ist an dieser Stelle die sehr gute räumliche Lage in Bezug auf die UltraCam-Bilder. Diese Tatsache ergibt sich daraus, dass beide Datentypen (True Orthofotos und photogrammetrisches DOM) aus derselben Datengrundlage erstellt wurden. Genau wie die UltraCam-Daten waren auch diese Höheninformationsdaten ins Referenzsystem GK M34 projiziert.

Abbildung 17:
Photogrammetrisches
DOM (links) und
LAS DOM (rechts)
(Muick, 2011)



Digitales Geländemodell (DGM): Das digitale Geländemodell wurde auch vom Referat für Photogrammetrie des Stadtvermessungsamtes Graz mit einer geometrischen Auflösung von 1 Meter zur Verfügung gestellt. Das DGM wurde benötigt, um zusammen mit dem DOM ein NDSM (Normalized-Digital-Surface-Modell) zu erstellen. Ebenso kamen LiDAR-Daten von 2009 im originalen „LAS-Format“ zum Einsatz. Die LiDAR-Daten wurden vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung in einer Auflösung von 0,25 Metern zur Verfügung gestellt.

LiDAR-Daten: Die Laserscanning-Daten der Testgebiete wurden von der Abteilungsgruppe Landesbau-
direktion – Stabsstelle Geoinformation zur Verfügung gestellt. Die Aufnahme und Aufbereitung der Daten erfolgte von 2008 bis 2012. Aufgenommen wurden unterhalb von 2000 Metern vier Laserscanningpunkte pro Quadratmeter und über 2000 Meter 2 Punkte.

FOLGENDE LASERSCANNER WURDEN VERWENDET

(HERSTELLER ALLER GERÄTE: RIEGL GMBH):

LMS-Q560/200 kHz

LMS-Q560/240 kHz

LMS-Q680i/240 kHz

Die Datenlieferung umfasste ein DGMDOM der gesamten Testgebiete und Punktwolkendaten im LAS-Format für kleine Teilstücke der einzelnen Untersuchungsgebiete. Die Bodenauflösung der Gelände- modelle bzw. Oberflächenmodelle lag bei einem Me-

ter. Die zweite Datenlieferung umfasste die Punktwolkendaten für die gesamten Testgebiete. Die Daten lagen im Referenzsystem UTM WGS 84 Nord Zone 33 vor.

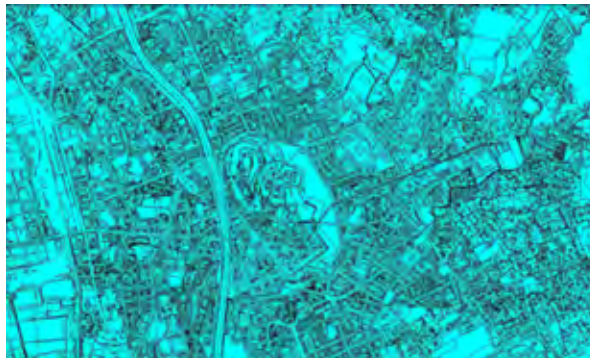
Abbildung 18:
Die Datengrundlagen:
INTENSITÄTSBILD
(LiDAR) – ULTRACAM –
DGM – NDSM
(von links nach rechts,
Quelle: SULZER et al.,
2013)



Digitaler Kataster von Graz: Als zusätzliche Informationsquelle wurde auch noch der Digitale Kataster der Stadt Graz zur Verfügung gestellt. Dieser erleich-

terte vor allem das Handling der Schattenflächen im Rahmen der Klassifikation enorm. Zum Einsatz kamen ausschließlich die Nutzungsflächen.

Abbildung 19:
Ausschnitt der digitalen
Katastermappe



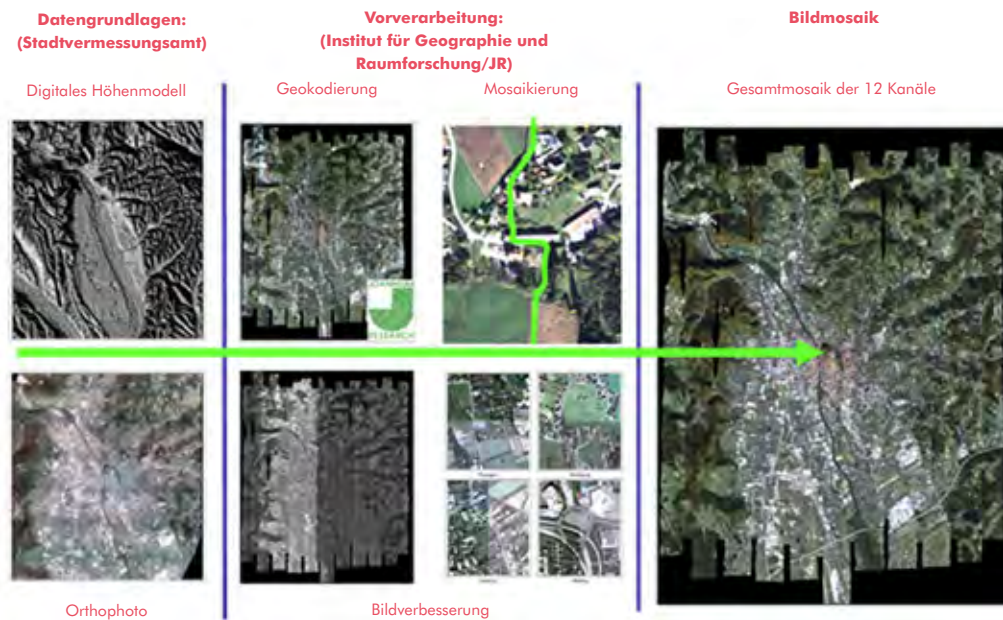
1.5 DATENVORVERARBEITUNG/ DATA PREPROCESSING

1.5.1 DATENVORVERARBEITUNG DER DAEDALUS-DATEN 1986 UND 2004

Für die Analyse der Befliegungsdaten müssen einige Vorverarbeitungsschritte/*Preprocessing* durchgeführt werden. Je nach Dateneigenschaften bzw. Sensor sind das **radiometrische und geometrische Bildverbesserungsoperationen**, die im Vorfeld der endgültigen Datenanalyse angewandt werden müssen.

Die **Befliegungsdaten von 1996** wurden bereits radiometrisch und geometrisch korrigiert zur Verfügung gestellt. Die Daten von 1986 und 2004 mussten noch diesem Vorverarbeitungsschritt unterzogen werden.

Abbildung 20:
Datenvorverarbeitung
der DAEDALUS
Aufnahmen



1.5.1.1 RADIOMETRISCHE KORREKTUR DER DAEDALUS-DATEN 1986 UND 2004

ZU BEGINN DER RADIOMETRISCHEN KORREKTUR DER AUFNAHMEDATEN MÜSSEN FOLGENDE EINFLÜSSE BEACHTUNG FINDEN:

Kalibrierung der Rohdaten in reflektierten Wellenbereichen (Kanal 1–10).
Die für den Messflug gültigen Kalibrierwerte wurden im Labor ermittelt
(Kalibrierungsprotokoll der DLR)

Kalibrierung der Rohdaten im Thermalkanal 11 und 12 mittels der beiden
scanner-eigenen Schwarzkörper-Referenzstrahler

Untersuchung des Materials auf systembedingte Störungen einzelner Scanzeilen

Absorption der Strahlung durch Optik, Filter und Sensor

Absorption der Strahlung durch Atmosphäre (Druck, Temperatur,
Feuchtigkeit usw.)

Quantisierungsfehler nach Überschreiten der Sättigungsgrenze
(vgl. dazu Abbildung 21)

Dieser radiometrische Vorverarbeitungsschritt wird von der DLR routinemäßig bei einer Befliegung des DAEDALUS-Sensors durchgeführt wird.

Die Information, die auf den Scanner auftrifft, ist nie ausschließlich die Eigenstrahlung des aufzunehmenden Objektes, sondern durch Einflüsse in der Atmosphäre und Streustrahlungen von anderen Objekten beeinflusst. Die Aufgabe einer atmosphärischen Korrektur ist die Bereinigung dieser unerwünschten zusätzlichen Informationen, um die unbeeinflusste Eigenstrahlung der Objekte zu erlangen. Dies geschieht für gewöhnlich aufgrund von Korrekturmodellen, präzisen Informationen aus den Kalibrierungsprotokollen des Scanners und den Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Befliegung (RICHTER, 2004 und LAZAR & SULZER, 2006). Grundsätzlich kann man sich die atmosphärische Bearbeitung von thermalen Datensätzen als sehr komplizierte Aufgabenstellung vorstellen, bei der Unkenntnis des Bearbeiters oder mangelnde Qualität der Input-Datensätze zu ungenauen oder verfälschten Ergebnissen führen können. Die sogenannte „atmosphärische“ Korrektur der Temperaturstrahlung der **1986-Befliegung** erfolgte mit der

Software LOWTRAN 5. Damit wurde es mit dem möglich, die vom Sensor in Flughöhe gemessene Temperaturstrahlung auf scheinbare Oberflächentemperaturen umzurechnen. Eingabedaten für dieses Programm sind unter anderem alle Bodenmessdaten, die Messwerte der Radiosondenaufstiege und diverse Filterfunktionen. Die Umrechnung der Grauwerte in absolute Temperatureinheiten erfolgt mittels Referenzmessdaten zu den zwei Schwarzkörpern (LAZAR et al., 1994). Im Zuge der Bearbeitung der thermalen Daten von 2004 wurde die Software „ATCOR-4“ des DLR und *ReSe Applications Schläpfer* für die atmosphärische Korrektur eingesetzt. Der Thermalkanal (Kanal 11 bzw. 12) wurde über die beiden in den Scanner eingebauten Schwarzkörper von der DLR so kalibriert, dass in der Ausgabedatei jeder Grauwertunterschied einem Temperaturunterschied von 0,25 °C entspricht, wobei der Pixelwert 80 dem Temperaturwert 0 °C gleichgesetzt wurde (AMANN, 2004).

Der prinzipielle Ansatz führt über die bei dem jeweiligen Messflug spezifisch gewonnenen Informationen zum atmosphärisch korrigierten Ausgangsdatsatz.

**DIE ATMOSPHERISCHE KORREKTUR ERFÄHRT IHRE BERECHTIGUNG
AUS DEM GEGEBENEN GRUND, DASS DIE JEWEILIGE AM SCANNER
AUFTREFFENDE INFORMATION IMMER DURCH DREI FAKTOREN
DEFINIERT IST:**

Streustrahlung in der Atmosphäre

Reflektierte Strahlung des betroffenen Pixels

Reflektierte Strahlung von Pixeln aus der Nachbarschaft

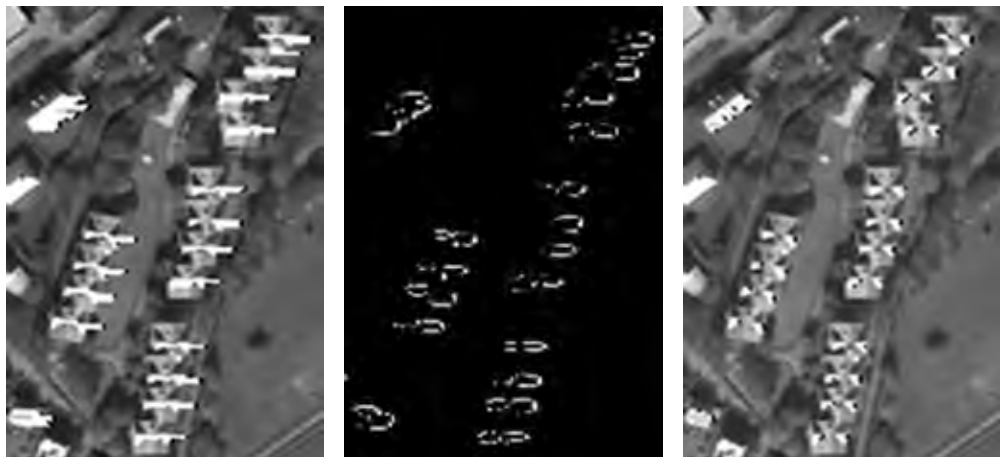
Bei der atmosphärischen Korrektur gilt es nun aufgrund von Korrekturmodellen, präzisen Informationen aus den Kalibrierungsprotokollen des Scanners und den gegebenen Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Befliegung, die unerwünschten Informationen 1 und 3 zu eliminieren, um ausschließlich die Strahlung des gewünschten Bildelementes zu extrahieren.

Eingabeparameter wurden unter anderem auch aus den zu den Befliegungszeitpunkten stattgefundenen Ballonsondierungen gewonnen.

Die DAEDALUS-Befliegungen besitzen zwei thermale Kanäle mit denselben Bandbreiten, welche mit dem Vermerk „high gain“ und „low gain“ versehen sind. Diese sogenannten „gain states“ werden auch bei kommerziellen Satelliten im reflektierten und im thermalen Wellenlängenbereich verwendet (z. B. LANDSAT, vgl. LANDSAT 7), um die radiometrische Auflösung des Sensors von 8 Bit optimal zu nutzen und eine Sättigung der Bilddaten zu vermeiden. Aus diesem Grund

wird auch beim thermalen Band vom ATM eine „high gain“- und eine „low gain“-Version des thermalen Kanals angeboten. Wie beschrieben, wurden die Rohdaten des Scanners bereits vor der Lieferung vom DLR kalibriert. Dies geschah über die beiden geeichten, scanner-internen Schwarzkörper, welche eine absolute Genauigkeit von 3 % aufweisen. Die Daten wurden in weiterer Folge so prozessiert, dass die Pixelwerte kodierte Temperaturwerte mit einer Auflösung von 0,25 °C pro Pixelwert sind, wobei der Pixelwert 80 dem Temperaturwert 0 °C entspricht. Inwiefern sich so eine Sättigung auf das Bild auswirkt, kann sehr augenscheinlich in Abbildung 21 betrachtet werden. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt zwischen der Ambrosigasse und dem Bannggrabenweg in St. Peter, wobei im linken Bereich der Kanal 11 dargestellt ist, im rechten Bereich Kanal 12 und in der Mitte eine Differenz aus den beiden Kanälen. In Kanal 11 kann man ganz deutlich die „fahnenartigen“ Strukturen erkennen, die von den einzelnen Hausdächern „wehen“.

Abbildung 21:
Die Auswirkungen
der „gain states“ im
thermalen Band
(Links: Kanal 11
(low gain), Mitte:
Differenz Kanal 12–11,
rechts: Kanal 12
(high gain); (WURM,
2007)



Die Übersättigung kann selbst nach der Kalibrierung der Daten nicht mehr korrigiert werden, da diese übersättigten Bereiche mit dem höchsten Pixelwert der 8-Bit-Auflösung (255) und demnach auch mit dem höchsten Temperaturwert besetzt werden, welcher aus dem Schwarzkörper mit dem oberen Temperaturlimit resultiert (ca. 42 °C). Die Temperatur der

beiden Schwarzkörper an Bord des Flugzeuges kann leicht schwanken, da sie von äußeren Temperatur- und Druckschwankungen beeinflusst wird (AMANN, 2004, S. 11). Außerhalb der übersättigten Bereiche sollten die beiden thermalen Kanäle nach der Kalibrierung aber die gleichen Werte aufweisen (vgl. Abbildung 21).

1.5.1.2 ENTZERRUNG VON DAEDALUS-BILDSTREIFEN 1986 UND 2004

Unter Entzerrung/geometrischer Korrektur (Orthobildherstellung) versteht man die Präzisionsentzerrung der (im vorliegenden Falle schon radiometrisch korrigierten) Bilddaten auf ein übergeordnetes Koordinatensystem.

Die Entzerrung dieser Bilddaten in das Landeskoordinatensystem nach Gauß-Krüger der Geometrie der Österreichischen Karte 1:50.000 und des Katasters erfolgt durch Anwendung der strengen photogrammetrischen Abbildungsgleichungen bzw. auch hybrider Methoden sowie durch Einbeziehung eines digitalen Höhenmodells (DHM). Infolge der sogenannten absoluten Entzerrung besteht die Möglichkeit, diese Temperaturstrahlungsdaten mit anderen Daten (Satellitendaten, thematischen Daten, Kartenwerken, digitalen Höhenmodellen usw.) direkt in einem Geoinformationssystem zu verknüpfen.

Das digitale Orthobild ist eine Orthogonalprojektion der Geländeoberfläche auf eine Referenzfläche, wobei die Bildelemente gleiche räumliche Auflösung besitzen. Die vom Sensor, vom Aufnahmevergange und vom Relief des Geländes hervorgerufenen Bildverzerrungen (Abweichungen von der Orthogonalprojektion) werden durch Umordnen bzw. Neuquantifizieren der Bildelemente, welche i. A. unterschiedliche Auflösung haben, auf rein digitale Weise im Computer beseitigt (LAZAR et al., 1994).

FOLGENDE URSACHEN KÖNNEN BILDVERZERRUNG BEDINGEN:

Schwankungen der Fluggeschwindigkeit

Kursabweichungen

Neigungsänderungen des Flugzeuges

Einflüsse der Geländeform

Sensorbedingte Panoramaverzerrung

Die **DAEDALUS-Daten von 1986** wurden mit dem damaligen Stand der Technik von KAUFMANN (TU Graz, LAZAR et al., 1994) entzerrt. Jedoch wurden nur die Thermalkanäle des Nacht-, Morgen- und Mittagsfluges bearbeitet. Die restlichen Kanäle waren noch auf den Originaldatenbändern gespeichert. Diese historischen Datenträger wurden von Herrn KAUFMANN (TU Graz) 2009 an einer alten Bandstation eingelesen und auf moderne Datenträger übertragen und zur Verfügung gestellt. Anschließend wurden vom Institut für Geographie und Raumforschung sämtliche Kanäle der Aufnahmen von 1986 georeferenziert. Dadurch können die Daten auch hinsichtlich der Versiegelung und der Landnutzung/Bodenbedeckung analysiert werden.

ZIELE DIESER ARBEITEN WAREN:

Sicherung und Aufbereitung des gesamten Datenmaterials

Bereitstellung einer möglichst genauen Georeferenzierung für alle Arten von analytischen Tätigkeiten, welche mit diesem Datenmaterial durchgeführt werden können

Erstellung einer Versiegelungskarte

Erstellung einer Landnutzungskarte

Da keine flugprotokoll- bzw. sensorspezifischen Parameter vorhanden waren, musste ein neuer Lösungsweg gefunden werden. Eine sehr praktikable Alternative bot das Softwarepaket *Remote Sensing Graz (RSG)* vom Institut für Digitale Bildverarbeitung der Forschungsgesellschaft Joanneum Research (Endbericht der Entzerrung der DAEDALUS-Daten von Graz 1986). In enger Zusammenarbeit mit Herrn Raggam vom Institut für Digitale Bildverarbeitung wurde ein zweistufiger Prozess entwickelt, um die DAEDALUS-Bildstreifen zu entzerren.

Die erste Stufe beinhaltete eine indirekte Sensormodellierung über *Ground Control Points (GCP's)*. Damit war es im Softwarepaket RSG möglich, eine annähernde Flugkurve, basierend auf Polynomfunktionen, zu erzeugen und zu georeferenzieren. Doch treten in einigen Streifen starke räumliche Verzerrungen, entstanden durch Bewegungen des Flugzeugs während der Aufnahme, auf.

Abbildung 22:
Verzerrungen in der
DAEDALUS-Aufnahme
von 1986



Als Referenzdaten dienten damals das Orthophotomosaik aus dem Jahr 1984 (um möglichst ähnliche Landnutzung zu gewährleisten, was die Passpunktsuche erleichterte) und das digitale Höhenmodell mit einer räumlichen Auflösung von 10 m, welches ausreichend für diese Fragestellung war. Insgesamt bleiben bei der Entzerrung der 1986er-Daten Fehler, bedingt durch die Aufnahmegeometrie des Scanners sowie durch die Bewegung des Trägerflugzeugs, erhalten. Die Daten liegen in einer geometrischen Auflösung von $2,5 \times 2,5$ m vor.

Die **DAEDALUS-Daten von 1996** wurden von der Stadt Graz bereits radiometrisch korrigiert und georeferenziert zur Verfügung gestellt und konnten somit direkt weiterverarbeitet werden. Bei diesem Flug kam ein integriertes GPS/IMU-System zum Einsatz.

Die **DAEDALUS-Daten von 2004** wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit Joanneum Research (Raggam) entzerrt und sollen hier beispielhaft näher erläutert werden. Verändert hat sich gegenüber den Jahren vor 1986 die Art der Ko-Registrierung mit Hilfe von Navigationsdaten. Im Zusatzdatenbereich der Scanner-Bilddaten werden seither sowohl die aktuell empfangene GPS-Zeit des IGI-Nav-Systems als auch der pixel-genaue Zeitpunkt des Sekundenwechsels eingetragen. Damit ist die Synchronisation zwischen den beiden auf separaten Speichermedien aufgezeichneten Datensätzen hergestellt.

ZUR GEOKODIERUNG DER DAEDALUS-BILDSTREIFEN VON 2004 WURDEN FOLGENDE SOFTWAREPAKETE VERWENDET:

Das Softwarepaket *RSG (Remote Sensing Software Package Graz)* wurde am Institut für Digitale Bildverarbeitung entwickelt. Dieses dient zum Import der Bilddaten, zum Aufbereiten (d. h. *Over-Sampling*) des Höhenmodells sowie zur Durchführung der geometrischen Verarbeitungsschritte, welche die Sensormodellierung, die Optimierung des Sensormodells und die Geokodierung der Bildstreifen umfassen

Die Bildverarbeitungssoftware *Erdas Imagine* zum Anzeigen der Bilddaten, zur Messung von Kontrollpunkten und anderweitig benötigten Punktdaten sowie zur visuellen Qualitätskontrolle

DIE ENTZERRUNG ERFOLGT MITTELS EINES PARAMETRISCHEN GEOKODIERUNGSVERFAHRENS UNTER EINBEZIEHUNG VON:

Navigations- bzw. Flugbahndaten (geographische Länge und Breite sowie barometrische Höhe) und Lage- bzw. Orientierungsdaten (Längsneigung, Querneigung und Azimut) des Sensors

Einem digitalen Höhenmodell

Passpunkten, welche zur Verbesserung der Flugbahn und der Orientierung des Sensors verwendet werden. Diese können aus dem Orthophotomosaik gemessen werden

DIE ENTZERRUNG UMFASST JE BILDSTREIFEN FOLGENDE GLOBALE ARBEITSSCHRITTE:

A: Einlesen der Bilddaten und der Positions- und Lagedaten sowie weiterführende Aufbereitung dieser Daten durch optionales Herausfiltern von Fehlmessungen, Interpolieren und Glätten der Messwerte, und abschließende Transformation bzw. Referenzierung in ein kartesisches Koordinatensystem

B: Messung von Passpunkten für die zu entzerrenden Bildstreifen einerseits in den Bilddaten, andererseits in Referenzdaten (Orthophotomosaik)

C: Optimierung der vorverarbeiteten Positions- und Lagedaten. Hierbei wird versucht, den globalen Trend dieser Daten mittels *Least-Squares*-Ausgleichung zu verbessern, während die darüber hinausgehenden Feinbewegungen des Sensors über die entsprechenden vorverarbeiteten Basisdaten vorgegeben sind

D: Entzerrung der Bilddaten in eine vorab definierte Ausgabegeometrie bzw. Ausgabeprojektion durch ein für Flugzeugscannerdaten adaptiertes indirektes Entzerrungsverfahren

Grundsätzlich wird eine Entzerrungsgenauigkeit im Subpixel-Bereich, d. h. im gegenständlichen Fall von weniger als 1,5 m angestrebt. In Abhängigkeit von der Qualität der verwendeten Referenzdaten wie Orthophotomosaik und digitalem Höhenmodell kann diese Zielsetzung nicht immer bedingungslos erreicht werden.

In der Flugmesskampagne „Graz 2004“ wurden 20 DAEDALUS-Bildstreifen alternierend in Nord-Süd- bzw. Süd-Nord-Richtung aufgenommen. Eine detaillierte Beschreibung der Flugmesskampagne ist im Bericht des DLR zu finden. Hier wird auch eine Bildpunktgröße von $1,4 \times 1,4$ m im Nadir der Bildstreifen angegeben.

Für die DAEDALUS-Bildstreifen liegen an sich recht genaue und detaillierte Aufzeichnungen der Flugbahn und der Lage des Sensors vor. Erfahrungsgemäß stecken in den daraus resultierenden Abbildungsvorschriften dennoch Restfehler, welche mittels Passpunkten eliminiert werden können. Auf Grund der hohen Auflösung der Bilddaten von weniger als 1,5 Metern müssen für die Passpunktmessung adäquate Referenzdaten, welche dieser Detailgenauigkeit entsprechen, verwendet werden. Vom Institut für Geographie wurde hierfür ein Orthophoto-Mosaik mit einer Bildpunktgröße von 1 Meter zur Verfügung gestellt. Dieses Orthophoto-Mosaik ist in Abbildung 26 dargestellt.

Für die Geokodierung ist weiters ein digitales Höhenmodell (Maschenweite von 10 m) zur Elimination der geländebedingten Bildverzerrungen erforderlich. Dieses wurde in weiterer Folge auf eine Maschenweite von 2 m *over-sampled*. Das resultierende digitale Höhenmodell ist in beleuchteter Darstellung in Abbildung 27 illustriert.

In diesem Zusammenhang ist zu vermerken, dass für die Entzerrung von Bilddaten mit derart hoher Bildpunktauflösung ein detailgenaues Oberflächenmodell, welches auch Gebäude und anderweitige von der Erdoberfläche abweichende Objekte beinhaltet, wünschenswert wäre. Die Verwendung von Oberflächenmodellen würde eine genauere Ortho-Rektifizierung solcher Objekte ermöglichen, während diese bei Verwendung eines Bodenmodells ihre abbildungsspezifischen Verzerrungen beibehalten. Allerdings können auch durch eine Entzerrung mittels Oberflächenmodell nicht alle für urbane Gebiete vorliegenden Probleme, wie z. B. die Präsenz sichttoter Räume und damit verbunden das Auftreten von Bildverdopplungen, mit Standard-Entzerrungsverfahren behoben werden.

Abbildung 23:
Ausschnitte der
geokodierten DAE-
DALUS-Bildstreifen 9,
10, 11 und 12 über der
Innenstadt von Graz



Abbildung 24:
Entzerrte DAEDALUS-
Bildstreifen der Innen-
stadt von Graz in
überlagerter
Darstellung



Abbildung 25:
DAEDALUS-Bildstreifen
der Flugmesskampagne
Graz 2004



Abbildung 26:
Orthophotomosaik
(Pixelauflösung
1 Meter)

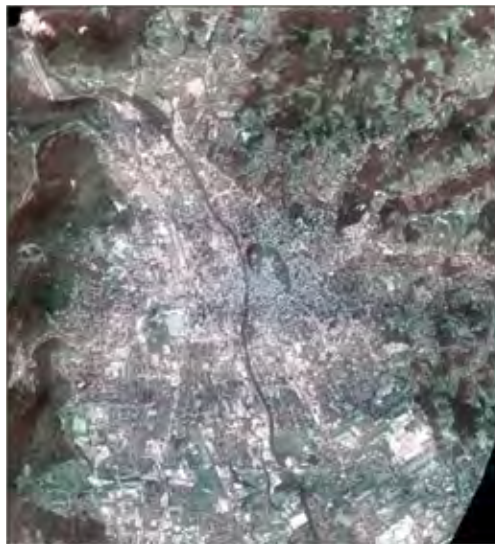


Abbildung 27:
Digitales Höhenmodell
(Pixelauflösung
2 Meter)



Für die Entzerrung der Bilddaten werden sogenannte *Sensormodelle* benötigt, mittels welcher Transformationen zwischen Bild- und Objektkoordinaten als eine Hauptaufgabe der Geokodierung ermöglicht werden. Für die DAEDALUS-Bilddaten umfassen diese Sensormodelle eine mathematische Beschreibung der Flugbahn sowie der Lage des Sensors für jede Bildzeile.

In RSG werden hierfür Polynome niedriger Ordnung verwendet, welche aus den Aufzeichnungen von Position und Lage des Sensors bestimmt werden und den generellen Trend der Sensor-Flugbahn und der Sensor-Lage für einen Flugstreifen beschreiben. Die darüber hinausgehenden positions- und lagemäßigen Abweichungen infolge der permanenten Schwankungen des Flugzeugs werden diskret für jede Bildzeile interpoliert und in allen auf dem Sensormodell basierenden Punkttransformationen berücksichtigt. Die so aufbereiteten Sensormodelle werden auch als A-priori-Sensormodelle bezeichnet. In der Regel sind die A-priori-Sensormodelle allerdings nicht ausreichend genau, um als Basis für eine zufriedenstellend präzise Geokodierung zu dienen. Es müssen daher Passpunkte gemessen werden, mit deren Hilfe die Sensormodelle in weiterer Folge verbessert werden können.

Abbildung 28:
Nominelle Punkt-
residuen

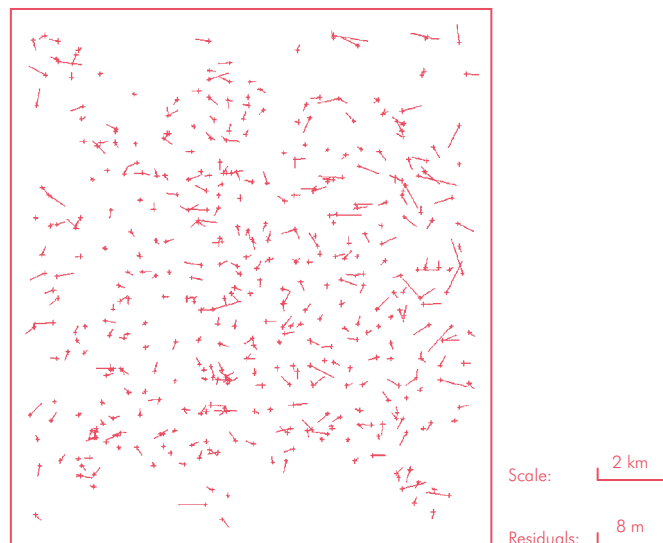
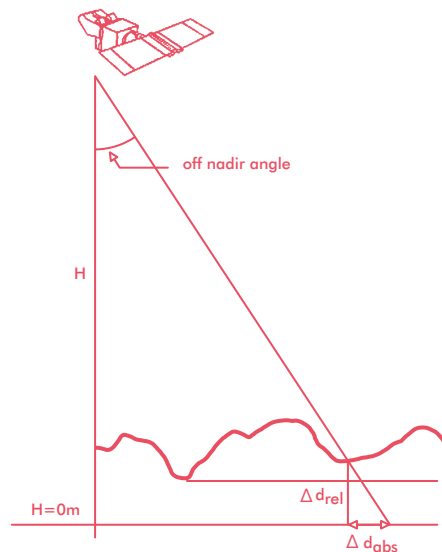


Abbildung 29:
Zusammenhang
zwischen Höhen- und
Punktlagefehler



Geokodierung: Die Geokodierung der DAEDALUS-Bildstreifen wurde mit dem Softwarepaket RSG durchgeführt. Die methodische Vorgangsweise des in RSG realisierten indirekten Geokodierungsverfahrens ist schematisch in Abbildung 30 dargestellt.

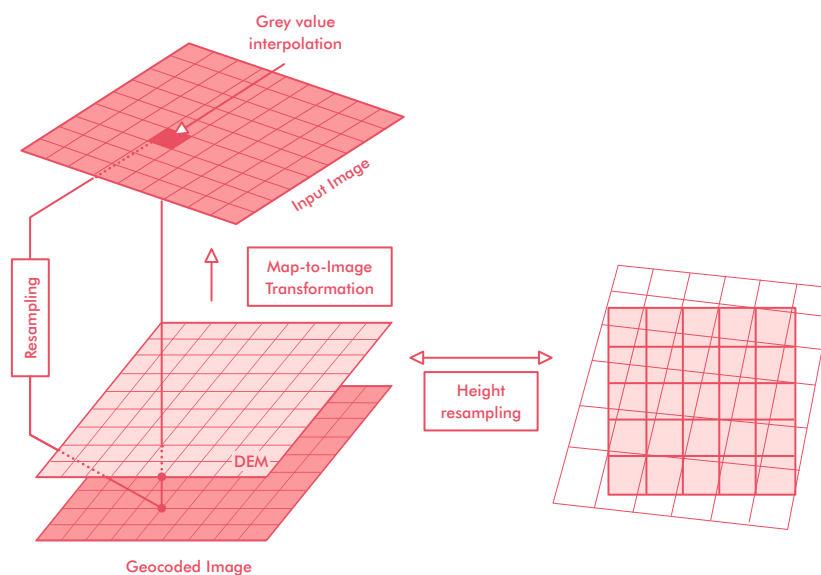
DIE ENTZERRUNG ERFOLGT PIXEL FÜR PIXEL UND UMFASST FOLGENDE PROZESSIERUNGSSCHRITTE:

A: Für ein durch seine in der Ausgabeprojektion vorliegenden Ost-/Nord-Koordinaten vorab definiertes Ausgabepixel wird aus dem Höhenmodell die zugehörige Höhe interpoliert (height resampling). Falls das Höhenmodell bzgl. Ausgabeprojektion und Ausgabepixelgröße dem avisierten Ausgabebild entspricht, ist dieses „Height Resampling“ obsolet und es wird dieser Schritt übersprungen

B: Für dieses Ausgabepixel wird eine Karte-Bild-Transformation (*map-to-image transformation*) durchgeführt, welche die zugehörigen Pixelkoordinaten im Eingabebild liefert. Diese Transformation beruht auf dem optimierten Sensormodell einschließlich der für jede Bildzeile vorliegenden diskreten Aufzeichnungen der positions- und lagemäßigen Abweichungen von den Sensormodell-Trendpolynomen und ist an sich ein iterativer Suchvorgang, welcher demnach mit einem vergleichsweise hohen Rechenaufwand verbunden ist

C: Für den errechneten Bildpunkt, welcher üblicherweise innerhalb einer Pixelzelle liegt, wird nach bestimmten Resampling-Verfahren aus den umgebenden Bildpunkten ein Grauwert interpoliert und dem entsprechenden Pixel des geokodierten Bildes zugewiesen. Im gegenständlichen Fall wurde durchwegs das „Cubic Convolution“-Resamplingverfahren verwendet

Abbildung 30:
Methodik der
Geokodierung
(RAGGAM, o. J.)



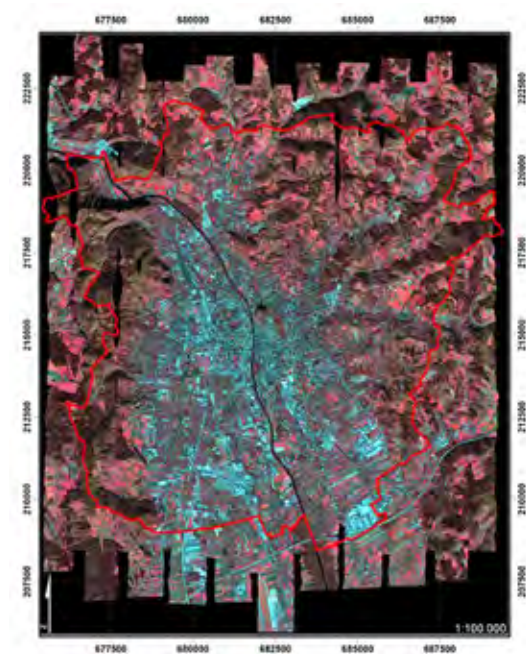
Die DAEDALUS-Bildstreifen wurden mit dem im vorigen Abschnitt skizzierten Verfahren entzerrt, wobei eine Ausgabe-Pixelgröße von 1 m gewählt wurde. Für die zentralen Bildstreifen 9, 10, 11 und 12 sind in Abbildung 23 Ausschnitte der entzerrten Produkte, welche unter anderem die Grazer Innenstadt abdecken, dargestellt. Der ungleichförmige Verlauf der Ränder dieser entzerrten Bildstreifen spiegelt hier einerseits die Schwankungen des Flugzeugs während des Überflugs und andererseits allfällige topographiebedingte Entzerrungseffekte wider.

Die Gesamtheit aller 20 entzerrten DAEDALUS-Bildstreifen zeigt die Abbildung 31, in welcher die Streifen systematisch von West nach Ost überlagert dargestellt wurden. Über dem hügeligen Bereich im Westen von Graz (Plabutsch) verbleiben auf Grund der niedrigen Flughöhe über Grund Lücken in diesem Streifenmosaik. In der Abbildung 24 ist ein Teilausschnitt dieser Überlagerung für die Innenstadt von Graz dargestellt. Entlang der in dieser Darstellung erkennbaren Streifenränder kann man auch visuell die Übereinstimmung der entzerrten Bildstreifen prüfen. Diese entspricht grundsätzlich der über die Passpunkt-Residuen prognostizierten Lagegenauigkeit im (Sub-) Pixelbereich. Allerdings ist schon diese visuelle Kontrolle in den Überlappbereichen problematisch, da es speziell in verbautem Gebiet in den Randbereichen der entzerrten Bildstreifen zu extremen und gegensätzlichen Bildverzerrungen kommt. Dies wird im nächsten Abschnitt weiter verdeutlicht.

Abbildung 31:
Entzerrte
DAEDALUS-
Bildstreifen
in überlagerter
Darstellung



Abbildung 32:
Entzerrte und
mosaikierte
DAEDALUS-
Aufnahme
von 2004



Qualitätskontrolle der geokodierten Bilddaten: Grundsätzlich können die mit dem optimierten Sensormodell aus den Passpunkten ermittelten Punktlagefehler speziell im Falle einer ausreichenden gut verteilten Anzahl von Passpunkten als Repräsentativwerte für die Genauigkeit der entzerrten Bilddaten angesehen werden. Eine schlechtere Entzerrungsgenauigkeit kann dennoch in Bereichen auftreten, wo das zu Grunde liegende Höhenmodell die geforderte Qualität nicht aufweist. Dies trifft im abgewandelten Sinn auf die gegenständlichen Daten insofern zu, als für die Entzerrung ein Bodenmodell und nicht ein Oberflächenmodell verwendet wurde. Gebäude sind demnach in diesem Höhenmodell nicht präsent. Deren Oberfläche kann demnach nicht entsprechend orthorektifiziert werden und es bleiben die Perspektivverzerrungen solcher Objekte in den entzerrten Daten erhalten.

Die Lagegenauigkeit der entzerrten DAEDALUS-Bildstreifen wurde grundsätzlich durch visuellen Vergleich mit dem Orthophotomosaik geprüft. Dieser Vergleich wird durch den Umstand erschwert, dass die DAEDALUS-Daten im Herbst aufgenommen wurden und mit ausgedehnten Schattenbereichen behaftet sind. Weiters wurde die geometrische Übereinstimmung benachbarter Flugstreifen in deren Überlappbereich kontrolliert.

Die Geokodierungsgenauigkeit bzw. die problematischen Aspekte der Geokodierung sind in den nachstehenden Abbildungen dokumentiert. In der Abbildung 33 werden in der *Swipe*-Darstellung von *Erdas-Imagine* 4 Ausschnitte der entzerrten Bildstreifen (jeweils links bzw. oben) und des Orthophotomosaiks (jeweils rechts bzw. unten) gezeigt. Am Übergang zwischen den überlagerten Datensätzen kann man die Qualität der Übereinstimmung der Daten erkennen. Zumindest in unverbauten Bereichen kann diese als sehr gut eingeschätzt werden. Problematisch wird die Geokodierungsgenauigkeit, aber auch schon die visuelle Qualitätskontrolle als solche in verbauten Bereichen. Der Grund liegt in den Gebäudeschatten einerseits und in den unterschiedlichen Perspektivverzerrungen – sowohl in benachbarten Bildstreifen wie auch im Vergleich zum Orthophotomosaik – andererseits. Unter Ausklammerung dieser Effekte kann aber die Genauigkeit der entzerrten DAEDALUS-Bildstreifen durchwegs als zufriedenstellend angesehen werden.

Abbildung 33:
Qualitätskontrolle durch
Überlagerung
mit Orthophotos



Puntigam



Straßgang



Liebenau



Webling

Abbildung 34:
Visueller Daten-
vergleich
(Jakominiplatz)



Graz 10



Graz 11



Ortho-Photo

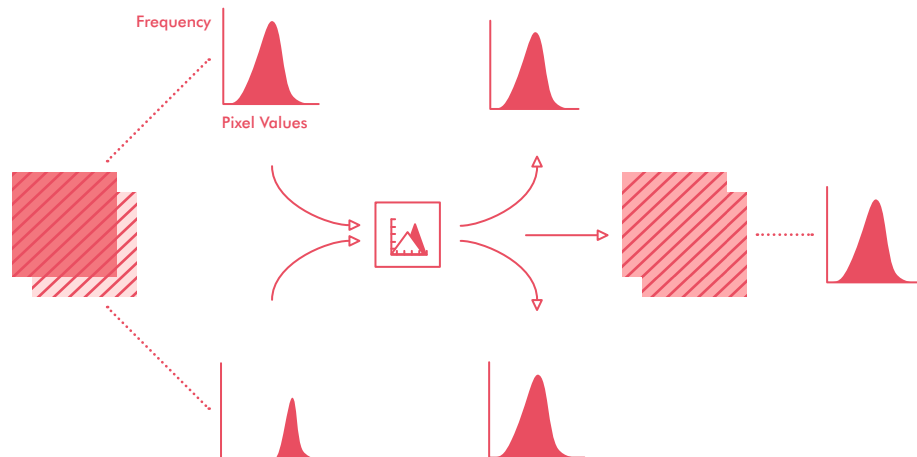
Abbildung 35:
Visueller Daten-
vergleich (Liebenau)



Mosaikierung der Scanstreifen: Nach der Entzerrung wurden am Institut für Geographie und Raumforschung die einzelnen Flugstreifen mit dem „Mosaic Tool“ in *Erdas Imagine* zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Dieses Tool verfügt über mehrere Möglichkeiten des Mosaikierens, in diesem Fall wurde aber nur mit Cutlines (digitalisierten Trennlinien) gearbeitet, wodurch die einzelnen Grauwerte der Originaldaten nicht verändert werden. Dies ist nötig, um eine weitere Analyse (Klassifizierung) der Bilddaten nicht zu beeinflussen. So wurden die Streifen ohne eine Histogrammanpassung (*Histogram Matching*) zusammengefügt.

Bilder mit unterschiedlicher Helligkeit und Kontrast müssen ausgeglichen werden, um einen nahtlosen Übergang zu gewährleisten. Das Histogramm eines Bildes wird so verändert, dass es dem Histogramm des zweiten Bildes ähnelt. Eine Histogrammanpassung benachbarter Streifen ergäbe ein visuell besseres Bild hinsichtlich des Kontrastes und Erscheinungsbildes, hätte aber zur Folge, dass sich die Originalpixelwerte sehr stark veränderten und eine digitale Weiterverarbeitung behindern würden.

Abbildung 36:
Histogrammanpassung
in ERDAS-IMAGINE
(Quelle: Geosystems,
Deutschland)



Digitalisieren der Cutlines: Die einzelnen, entzerrten Streifen wurden in das Mosaic Tool geladen und danach wurde individuell für jedes Streifenpaar eine Cutline manuell digitalisiert. Die automatischen Möglichkeiten zur Generierung einer Cutline im Mosaic Tool ergaben keine befriedigenden Lösungen. Die folgenden Beispiele dokumentieren dies:

Abbildung 37:
Verschiedene
Möglichkeiten der
Cutline-Setzung



Geometry-based Cutline



Digitalisierte Cutline



Weighted Cutline

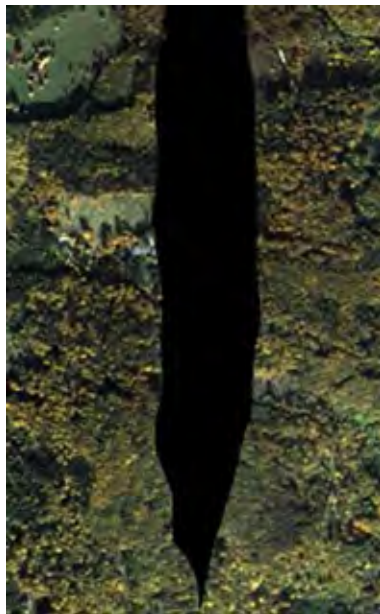


Digitalisierte Cutline

Nur durch die oft sehr aufwendige Führung der einzelnen *Cutlines* konnte der recht gute visuelle Eindruck des Gesamtbildes, soweit möglich, erreicht werden. Wo der Überlappungsbereich nur sehr schmal war (einige Meter), konnte natürlich auch kein gutes Ergebnis erzielt werden, denn der Spielraum für eine optimale Digitalisierung der *Cutlines* war einfach zu klein. Wo überhaupt keine Überlappung vorhanden war, sind natürlich Löcher mit „no data“ geblieben.

„Löcher“

Abbildung 38:
Datenlöcher



1.5.2 DATENVORVERARBEITUNG DER TABI-1800-DATEN

Die **radiometrische Bildverbesserung** (Kalibrierung) der **TABI-1800-Rohdaten** wird flugstreifenweise in einem Post-Akquisitionsprozess durch die Firma ITRES durchgeführt. Dabei werden die im Labor ermittelten Sensorkalibrationskoeffizienten und die während der Befliegung (am Anfang und am Ende jedes Flugstreifens) erhobenen Schwarzkörpermessungen verwendet.

Die **photogrammetrische Aufbereitung** der Daten übernahm die Firma Vermessung AVT ZT-GmbH. Folgende Ausführungen wurden aus dem Projektbericht von Edgar Moskopp und Klaus Legat (2013) übernommen:

Die Prozessierung der Roh-Thermaldaten erfolgte bei dem Hersteller des Thermalsensors (ITRES Research). Die Prozessierung wurde in enger Rücksprache und nach technischen Vorgaben der Vermessung AVT in Calgary (Kanada) am Hauptsitz von ITRES durchgeführt. Für die Prozessierung des GPS/INS-Flugpfades

wurden APOS-Daten der Station Graz Lustbühel bestellt. Die Berechnungen erfolgten im Bezugssystem ETRS89 mit Kartenabbildung UTM33.

Für die Orthorektifizierung wurde das digitale Oberflächenmodell der Stadt Graz aus der Laserscanning-Befliegung der Steiermark von 2009 verwendet. Die Bodenauflösung der entzerrten Bilddaten wurde auf 60 cm festgelegt. Durch die Verwendung des Oberflächenmodells werden die Gebäudedächer lagerichtig dargestellt. Nachteilig ist jedoch, dass bei korrekter *Line-of-Sight*-Verschneidung bei hohen Gebäuden im Übergangsbereich zwischen den einzelnen Flugstreifen entweder sichttote Räume ohne Bildinformation oder Doppelabbildungen von Gebäudeteilen entstehen. Aufgrund der relativ geringen Bodenauflösung wurden letztere in Kauf genommen.

Die *Seamline*-Erzeugung wurde vollautomatisch durchgeführt. Die Bilddaten wurden in den Datenformaten ERDAS Imagine (IMG) und GeoTIFF geliefert.

2. VERSIEGELUNGSKARTEN

2.1 EINLEITUNG

Unter Bodenversiegelung, auch Oberflächenversiegelung, Flächenversiegelung oder Versiegelung genannt, ist die auf anthropogene Einflüsse zurückzuführende Unterbrechung oder Behinderung der vielfältigen Austauschprozesse zwischen Atmosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre sowohl im abiotischen (z. B. Wasserkreislauf) als auch im biotischen (als Lebensraum von Pflanzen und Tieren) Bereich zu verstehen. Die Austauschvorgänge werden unterbunden durch Abdichtung mit undurchlässigen Substanzen (z. B. Teer, Beton oder Gebäude), extreme Verdichtung (z. B. durch Befahren) und unterirdische Baukörper (Tiefgaragen, Tunnel u. Ä.). Der Versiegelungsgrad dient der quantitativen Bestimmung und meint den Anteil der versiegelten Fläche zu einer Bezugsfläche.

Die Bodenversiegelung stellt eine der bedeutendsten Gefährdungsursachen für Böden dar. Die Bestimmung des Bodenversiegelungsgrads ist für die Modellierung des Bodenwasserkreislaufs eminent wichtig. Dabei liegt der Schwerpunkt i. d. R. auf der Bereitstellung von Informationen für die Berechnung der Grundwasserneubildung und des Oberflächenwasserabflusses. Häufig wird der Grad der Versiegelung in Prozentstufen angegeben, wobei ein Boden versiegelt ist, wenn er ganz oder zum Teil von undurchdringlichem Material abgedeckt wird – entweder durch Überbauung (Gebäude, Straßen) oder infolge anderer bodenversiegelnder Ursachen. Insbesondere in Ballungsräumen unterliegt der Boden einer hohen Nutzungsdynamik. Um hier lenkend eingreifen zu können, stellen Erhebungen zur Flächeninanspruchnahme für die Kommunen eine wichtige Planungsgrundlage dar.

Ursache der zunehmenden Versiegelung ist die fortschreitende Siedlungstätigkeit, also der Bau von Gebäuden, Straßen und sonstigen Anlagen. Unbebauter Boden wird dabei umgewandelt in Wohnflächen, Verkehrsfläche (z. B. Straßen und Eisenbahnnetz), Industrie- und Gewebefläche, Fläche für die soziale Infrastruktur (Krankenhäuser, Schulen) sowie Fläche für die Freizeitinfrastruktur (z. B. Sportstadien). Neben dem Neubau von Siedlungen werden Freiflächen in bestehenden Städten und Gemeinden nachversiegelt: ehemals unbebautes Land wird zu Stadt- oder Autostellplätzen, auf Privatgrundstücken entstehen Terrassen oder Swimmingpools. Auch die Unterflurversiegelung nimmt durch den Bau neuer Tiefgaragen oder Kanalisationen o. Ä. immer weiter zu.

Versiegelte Flächen heizen sich bei Sonneneinstrahlung stärker auf als offene Böden. Das ist auch der Grund dafür, dass es in den Innenstädten wärmer ist als in ihrer Umgebung, denn die gespeicherte Sonnenenergie wird vor allem Nachts an die Luft abgegeben. Es kommt zur Ausbildung von städtischen Wärmeinseln – Städte sind um einige Grad wärmer als ihr Umfeld. Während es in den größeren Städten Klimaelemente gibt, die sich im Stadtgebiet nur wenig unterscheiden (z. B. Sonnenstrahlung, Niederschlag), weisen andere, wegen der Wärmespeicherkraft der Baustoffe, der Versiegelung der Fläche, dem veränderten Wasserhaushalt sowie der Wärmeabgabe, teilweise ziemlich große flächendeckende Unterschiede auf (z. B. Temperatur, Windverhältnisse). Kleinräumige Unterschiede sind in Gegenden von Gebäuden, Straßenzügen und freien Landschaften zu finden.

Die Analyse von Versiegelungskarten kann u. a. für klimabezogene Fragestellungen eingesetzt werden, sei es um Grundwasserinfiltrationen zu bestimmen oder auch um Wärmeinseleffekte zu untersuchen.

2.2 ARBEITSABLAUF BEI DER ERSTELLUNG DER VERSIEGELUNGSKARTEN

2.2.1 DAEDALUS-DATEN 1986, 1996 UND 2004

Da die Aufnahmen in den Untersuchungszeiträumen zu unterschiedlichen Tages- und teilweise auch Jahreszeiten gemacht wurden, musste eine individuelle Bearbeitung der Grundlagendaten erfolgen. Für alle Zeitpunkte wurde für die Erfassung der Versiegelung ein objektbasierter Ansatz der Klassifikation mit dem Softwareprogramm *Definiens* (je nach Bearbeitungsjahr mit unterschiedlichen Versionen) durchgeführt. Die Erfassung der Versiegelung wurde als Teilprodukt einer Landnutzungsklassifikation durchgeführt.

Multispectral
image 2004

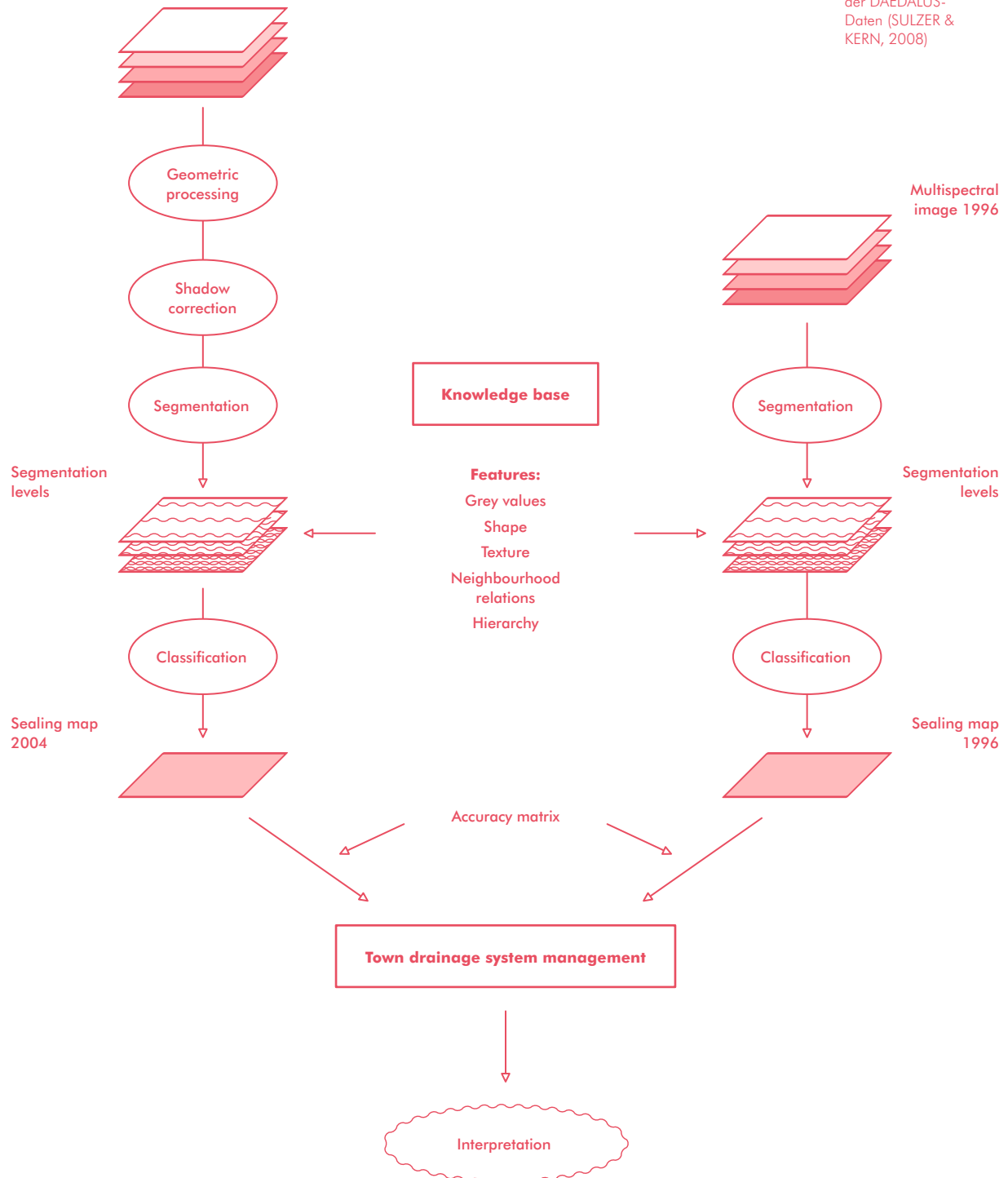
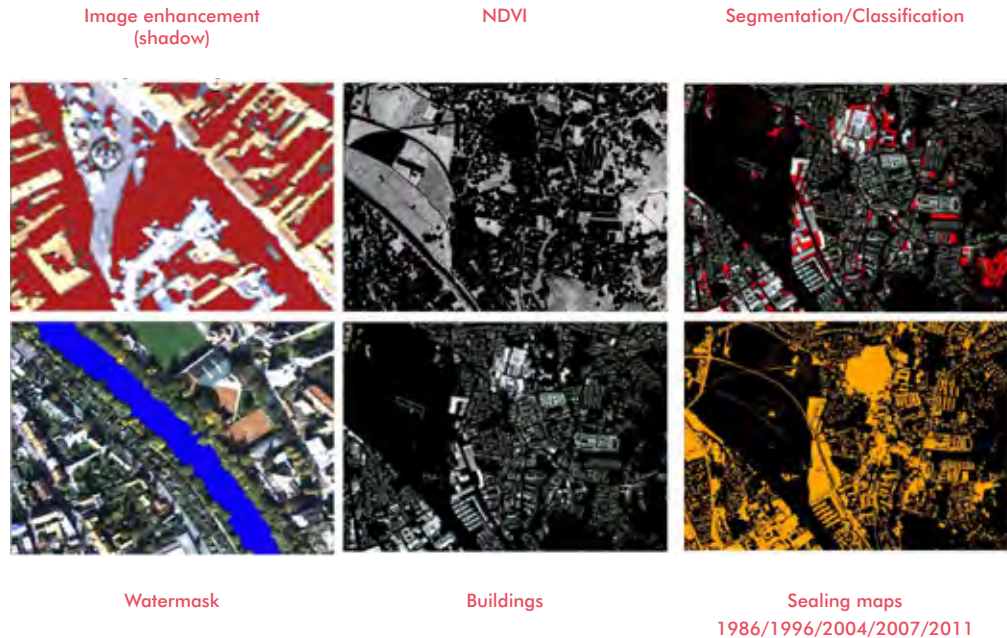


Abbildung 1:
Workflow der
Versiegelungsanalyse
der DAEDALUS-
Daten (SULZER &
KERN, 2008)

Abbildung 2:
Workflow der
Versiegelungsanalyse
der DAEDALUS-Daten



Im Gegensatz zur Methodik der pixelbasierten Klassifikatoren wird bei der objektbasierten Klassifikation nicht mit Pixeln gearbeitet, sondern mit Objekten. Diese Herangehensweise ist in sehr vielen Teilen eine Adaption des Prozesses des menschlichen Sehens und des daraus resultierenden Verständnisses. Gerade diese Verständnisbildung ist ein komplexer Ablauf, der uns ermöglicht aus dem Gesehenen Objekte zu bilden, diese zu analysieren, zu verstehen, mit anderen Objekten in Beziehung zu setzen und damit auch eine räumliche Vorstellung zu ermöglichen. Die objektbasierte Klassifizierung nutzt genau diesen Ansatz der Objektbildung.

Verdeutlicht wird dies in Abbildung 6, in welcher zu Beginn nicht-interpretierbare Pixel durch Veränderung des Raumbezuges verständlich werden. Die letzten Bilder zeigen weiters, wie wichtig der Maßstab für die Objektbildung innerhalb der objektbasierten Klassifikation ist.

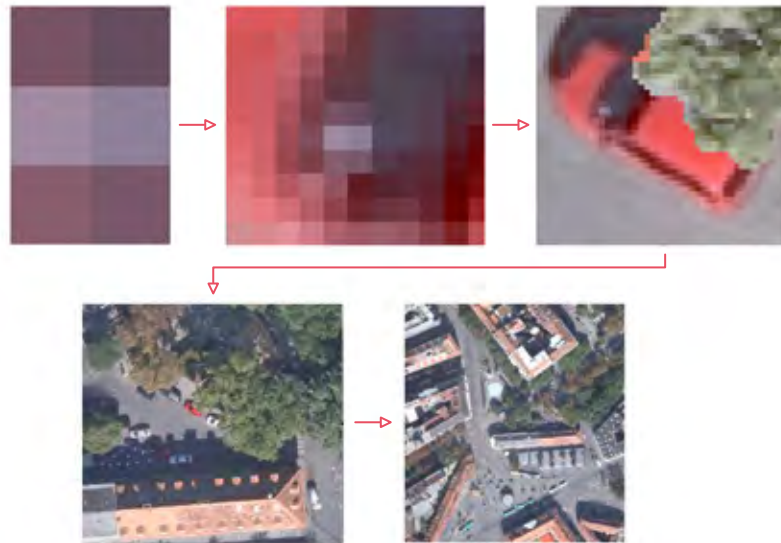
Hier werden nun Pixel zu nicht-überlappenden Pixelgruppen (Segmenten bzw. Objekten) zusammengefasst.

DIE OBJEKTBASIERTE KLASSIFIKATION LÄSST SICH IN ZWEI BLÖCKE AUFSPALTEN:

Segmentierung

Klassifikation

Abbildung 3:
Vom Einzelpixel ohne
Bildverständnis zu
zusammenhängender/
objektbasierter
Information
(nach MUICK, 2011)



Dieser Ansatz der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten existiert schon seit einiger Zeit. Doch erst durch die enorme Steigerung der Auflösungsleistung diverser Fernerkundungssensoren gewann diese Herangehensweise an Bedeutung. Der Grund dafür liegt unter anderem darin, dass bei besserer Bodenauflösung auch die Problematik, dass in einem Pixel mehrere Klassen gespeichert sind, deutlich abnimmt bzw. ganz verschwindet. Daraus lässt sich ableiten, dass die absolute Notwendigkeit nur auf Pixel-Ebene zu arbeiten, nicht länger gegeben ist. Bei den heute verfügbaren Daten mit Bodenauflösungen im Zentimeterbereich, haben objektbasierte Klassifikatoren bei vielen wissenschaftlichen Untersuchungen ihre Überlegenheit demonstriert (CHEN et al. 2005). Dabei ist aber nicht nur das schlussendliche Ergebnis und dessen Genauigkeit von Interesse, sondern auch der Weg zu diesem. Im Gegensatz zu den pixelbasierten Ansätzen ist die Integration von zusätzlichem, unterstützendem Datenmaterial wesentlich einfacher, da nahezu jede Information, die in ein lesbares Raster- oder Vektorformat gespeichert werden kann, auf einfache Art und Weise nutzbar wird. Die Basis des objektbasierten Ansatzes bildeten, wie bereits erwähnt, Bildsegmente bzw. Objekte, für deren Erzeugung diverse Segmentierungsalgorithmen zur Verfügung stehen, welche in der Folge näher besprochen werden sollen. Dabei wird der Fokus auf jene in der Programmumgebung *Ecognition Developer 8.64* realisierten Methoden gelegt.

Die **Segmentierung von Bilddaten** stellt den ersten Schritt der objektorientierten Bildanalyse dar. Da die Gewichtung der Aufgabenstellung primär auf der Erstellung einer Versiegelungskarte und nur sekundär auf der Erstellung einer Landnutzungskarte lag, wurde vor der Segmentierung noch ein Vorverarbeitungsschritt durchgeführt. Dieser basierte auf der Überlegung, dass der *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* aufgrund des hohen Kontrastes zwischen versiegelten Flächen und der restlichen Umgebung in die Segmentierung einfließen sollte. Zu diesem Zweck wurde mit

Hilfe des *Modell Makers* der Software *Erdas Imagine* ein Modell erstellt, welches diese Berechnung erlaubte. Das war notwendig, da sich die spektrale Bandbreite der Kanäle des Airborne Scanners **DAEDALUS** nicht mit den vordefinierten Sensortypen in *Erdas Imagine* deckten. Danach wurde eine *Layerstackoperation* durchgeführt und so der *NDVI* als zwölfter Kanal angehängt.

Für die Bearbeitung der **DAEDALUS**-Daten wurde wie bei KERN (2007) eine **drei-stufige Segmentierungshierarchie** verwendet. Das bedeutet, dass auf drei Stufen segmentiert wurde (von fein nach grob). Was die Einstellungen der Farb-, Scale- sowie der Formparameter angeht, wurden bei gleicher räumlicher Auflösung ähnliche Einstellungen verwendet. Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Segmentierungsparameter, die in der Analyse der 1986er-Befliegung angewandt wurde.

Tabelle 1:
Segmentierungs-
parameter von
1986

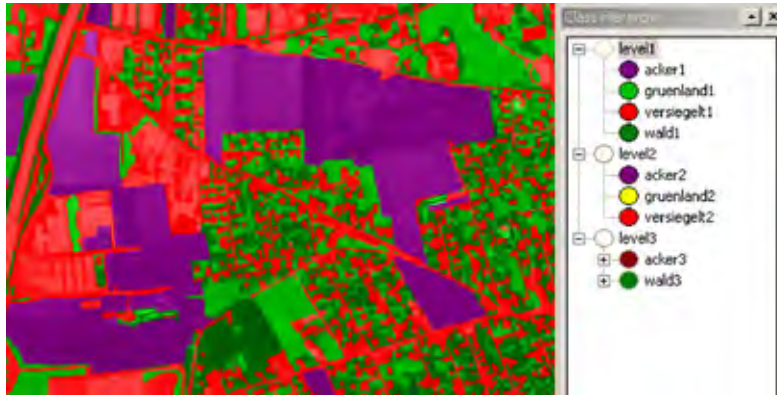
| Level | Scale- Parameter | Colour | Shape | Compact- ness | Smooth- ness |
|-------|---------------------|--------|-------|------------------|-----------------|
| 1 | 6 | 0,8 | 0,2 | 0,2 | 0,8 |
| 2 | 20 | 0,7 | 0,3 | 0,3 | 0,7 |
| 3 | 45 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |

Der Level 1 musste aufgrund der limitierten Bildobjektzahl in Professional 5.0 mit der *Large-Data-Handling-Version* (LDH) Version des Programms berechnet werden. Diese Version ist, was die Rechenzeit anbelangt, zwar wesentlich langsamer, besitzt aber keine Obergrenze an Bildobjekten. Durch diesen Ansatz war es möglich, große zusammenhängende Flächen, wie zum Beispiel Wald- und Ackerflächen, relativ einfach zu erfassen. Durch den gleichzeitig sehr kleinen *Scalefaktor* von sechs auf dem ersten Level war es auch möglich, Einzelhäuser gut zu klassifizieren.

Abbildung 4:
Beispiel für die
Segmentierungs-
ebenen



Abbildung 5:
Klassifikationshierarchie



Objektorientierte Klassifikation: Der hierarchische Ansatz der Segmentierung fand im Rahmen der Klassifikation seine Fortführung, da auch die Klassen den jeweiligen Levels zugeordnet wurden, wie in Abbildung 22 ersichtlich. Diejenigen Klassen, vor deren Klassenfarbensymbol sich in Abbildung 5 ein Plus befindet, bestehen noch aus Unterklassen.

FÜR ALL DIESE KLASSEN WURDEN BEDINGUNGEN DER ZUGEHÖRIGKEIT AUFGESTELLT, WELCHE SICH IM WESENTLICHEN AUF DIE BEREITS BESCHRIEBENEN FUNKTIONEN ZUSAMMENFASSEN LASSEN:

Spektrale Eigenschaften

Form-Parameter

Beziehungen zu Nachbarobjekten

Beziehungen zu übergeordneten Objekten

Beziehungen zu untergeordneten Objekten

Beziehungen zu anderen Klassen

FOLGENDE KLASSEN WURDEN IM RAHMEN DIESER KLASSTIFIKATION ERSTELLT:

Ackerflächen

Grünflächen

Wald

Wasserflächen

Abbaufächen

Versiegelte Flächen

Diese Bedingungen der Klassenzugehörigkeit wurden über Schwellwerte der einzelnen Funktionen definiert.

Versiegelte Flächen: Die versiegelten Flächen waren die letzte Klasse, welche im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. Der Ansatz, die Versiegelung erst am Ende des Klassifizierungsprozesses zu bearbeiten, basierte auf folgender Überlegung. Aufgrund der sorgfältigen Klassifizierung der restlichen Klassen sollten eigentlich nur versiegelte Flächen übrig bleiben.

Gebäude, Straßen, Abstellflächen, Bahn- und Sportanlagen sind Teil der Klasse „Versiegelt“. Größere versiegelte Flächen wurden auf Ebene 2, kleinere auf Ebene 1 klassifiziert. Die Klassifikation auf Ebene 2 erfolgte mit Hilfe des NDVI, denn versiegelte Flächen weisen bei diesem Index erfahrungsgemäß niedrige Werte auf. Lediglich blau gedeckte Dächer konnten mit dem NDVI nicht als versiegelt erkannt werden. Da dieser Fall aber nur sehr selten auftrat, konnte er vernachlässigt werden. Zu Fehlklassifikationen kam es vor allem bei Laubbäumen und Ackerflächen (siehe entsprechende Klasse), aber auch im südlichsten Bereich der Szene. Hier waren die Grauwertunterschiede sehr gering, wodurch vor allem im Schatten liegende Dachhälften schlecht bis gar nicht erfasst werden konnten.

Dennoch wurde eine Klassenbeschreibung über Zugehörigkeitsfunktionen vorgenommen. Für diese Aufgabe wurde der NDVI verwendet, welcher die Versiegelung bis auf die brachen Äcker, die auch dieser Klasse zufielen, hervorragend erfassen konnte. Diese Problematik wurde aber durch das vorzeitige Erfassen der Ackerflächen umgangen. Mögliche Fehlklassifizierungen wurden auch durch die Verwendung von hierarchischen Funktionen weiter minimiert.

Korrektur: Die abgeschlossene Klassifikation wurde im letzten Arbeitsschritt noch von Hand nachbearbeitet, um letzte Fehler auszubessern. Danach wurde aus der fertig gestellten Landnutzungskarte noch die Versiegelung extrahiert, um eine eigene Darstellung zu ermöglichen.

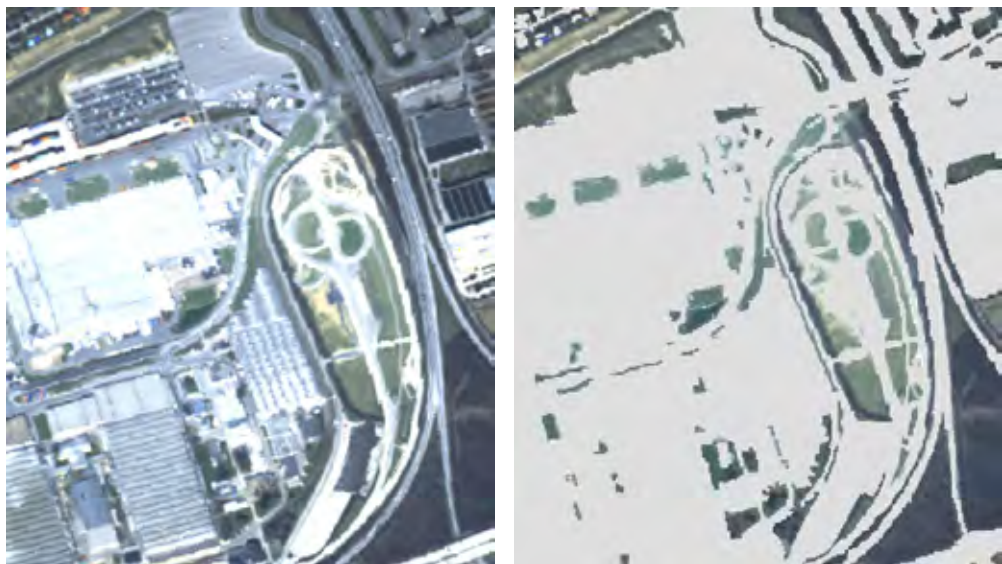
Abbildung 6:
Versiegelte Flächen
1986



Für **1986** wurde nur der Mittagsflug für die Erstellung der Versiegelungskarte herangezogen, da dieser im vollen spektralen Bereich (11 Kanäle) aufgezeichnet wurde. Nacht- und Morgentermin hingegen nahmen nur im thermalen Bereich auf. Die versiegelten Flächen wurden im Rahmen einer allgemeinen Bodenbedeckungsklassifikation ermittelt. Im zeitlichen Projektablauf wurden die Daten von 1986 erst 2009 bearbeitet. Trotz der geringeren geometrischen Auflösung von $2,5 \times 2,5$ m konnten durch den objektbasierten Klassifikationsansatz gute, mit den anderen Klassifikationen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Der frühe Aufnahmezeitpunkt im April **1996** zeigt eine völlig andere phänologische Entwicklung als die Daten vom Oktober 1986 und 2004. Dadurch mussten in dem vorher beschriebenen Arbeitsablauf der objektbasierten Klassifikation leicht andere Zugänge bzw. Schwellwerte umgesetzt werden.

Abbildung 7:
Beispiel einer
versiegelten Fläche
von 1996

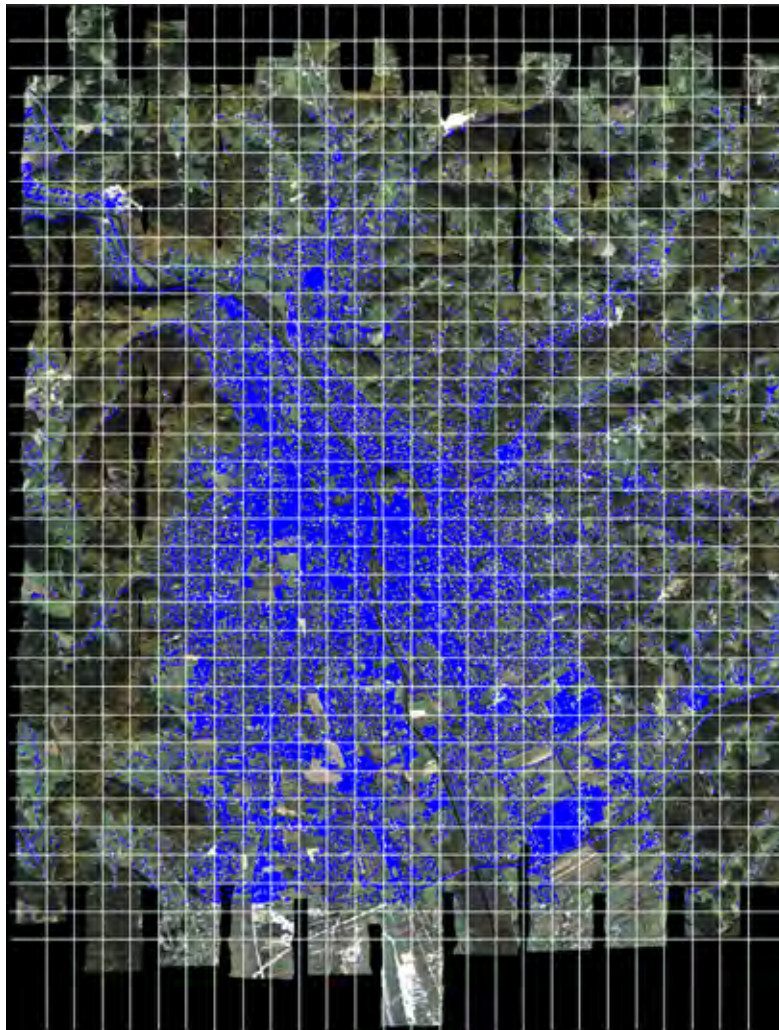


Auf Grund des jahreszeitlich späten Befliegungszeitpunktes (24. Oktober **2004**) zeigt sich trotz Mittagszeit deutlich der Schattenwurf von Bäumen und Gebäuden. Um diese relativ dunklen Flächen sowohl visuell als auch digital zu verbessern, wurde eine radiometrische Korrektur der Schatten durchgeführt. Im ersten Schritt wurde über Schwellwerte eine Schattenmaske erstellt. Die Schwellwerte in den für die Schattenmaske verwendeten Spektralkanälen 5 (sichtbares Rot) und 7 (nahes Infrarot) konnten interaktiv ermittelt werden. Unter Zuhilfenahme dieser Maske wurden im Schatten liegende Bereiche aus dem Gesamtbild extrahiert und nach erfolgter radiometrischer Verbesserung in das ursprüngliche Bild rückgeführt. Dadurch konnte der Einfluss der Schatten vermindert und die nachfolgende Klassifikation unterstützt werden.

Die Genauigkeiten der Versiegelungskarte von 1986, 1996 und 2004: Für die Qualitätsbeurteilung der Versiegelungskarten wurden eine visuelle Kontrolle und eine quantitative Genauigkeitsabschätzung durchgeführt. Für 1986 und 1996 wurden 25 Musterflächen mit vor Ort abgeschätzten Befestigungsgraden für die Abschätzung herangezogen. Das Mittel der absoluten Differenzbeträge ist 57-%-Punkte bei einer Standardabweichung von 62-%-Punkten. Die Ergebnisse der Versiegelungsklassifikation wurden 1996 als hinreichend genau angesehen.

Für 2004 wurde ein regelmäßiges Gitter (500 m Abstand) mit 754 Punkten über das Befliegungsgebiet gelegt und auf die Richtigkeit der Klassifikation untersucht. Dabei wurde ein Fehler von 21 Punkten ermittelt, was 2,8 % der untersuchten Punkte entspricht.

Abbildung 8:
Gittermaske für
die Genauigkeits-
abschätzung der
Versiegelungskarte
2004



2.2.2 ULTRACAM-X-DATEN 2004 UND 2007

Die Daten von 1986, 1996 und 2004 wurden mittels eines Multispektralscannersystems **DAEDALUS** mit 11 Kanälen aufgenommen. Die 2007 und 2011 zur Verfügung gestellten **UltraCam-X-Daten** besitzen die Kanäle RGB bzw. einen Infrarotkanal. Durch die höhere Auflösung der UC Befliegungen und die geringere spektrale Information musste der objektbasierte Ansatz neu erarbeitet werden.

2.2.2.1 VERSIEGELUNG ULTRACAM X 2007

Die Analyse der Versiegelung in den **UltraCam-X-Daten von 2007** geschah im Rahmen einer Masterarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung durch MUICK (2011). Die Fragestellung dieser Arbeit lautete inwieweit, die Integration von Höheninformation in den Vorgang der objektbasierten Klassifizierung zu einer Verbesserung der Genauigkeit führt, und ob durch diese zusätzliche Informationsquelle auch weitere neue Klassen über Höhenfeatures stabil abgeleitet werden können. Die Hypothese besteht darin, UltraCam-X-Bilder mit zweierlei Höheninformation zu fusionieren, um so neue Informationen und Klassen zu generieren. Erreicht werden sollten ein hochgenaues Klassifikationsergebnis sowie über Höheninformation abgeleitete Klassen. Außerdem soll die Auswirkung der Einbindung verschiedener Höheninformationsquellen auf die Klassifikation qualitativ beschrieben werden. Ebenfalls ein Ziel dieser Masterarbeit ist die Erstellung von Regelsätzen, mit welchen die Klassifikation, welche im Rahmen dieser Arbeit nur auf drei Testgebiete beschränkt ist, für das gesamte Stadtgebiet von Graz angewandt werden soll. Darauf aufbauend soll eine komplette „Best off“-

Methodik für eine Landbedeckungsklassifikation des Grazer Stadtgebietes erarbeitet werden.

Die drei für die Regelsatzentwicklung verwendeten Testgebiete befinden sich in Graz (47,05 Grad nördlicher Breite, 15,22 Grad östlicher Länge). In ihr leben auf einer Fläche von 127,58 Quadratkilometern 268.502 Menschen [ständiger Wohnsitz, (299.212 Haupt- und Nebenwohnsitz/Stand 01.07.2013)]. Die Testgebiete sind inhaltlich wie räumlich gut verteilt, um bei der Erstellung der Regelsätze für eine Landbedeckungsklassifikation des gesamten Grazer Stadtgebietes alle Klassen bestmöglich abzudecken. Im Bezirk Innere Stadt liegt Testgebiet 1, welches den urbanen innenstädtischen Charakter repräsentiert. Testgebiet 2 im Bezirk Mariatrost stellt die Übergangszone zwischen der dicht verbauten Innenstadt zum lockerer verbauten Gebiet mit hohem Grünflächenanteil und geschlossenen Waldflächen dar. Testgebiet 3, welches sich in den Bezirken Liebenau sowie Puntigam befindet, spiegelt auch den lockerer verbauten Typus wider, jedoch im Gegensatz zu Testgebiet 2 in Mariatrost sind hier auch landwirtschaftliche Flächen vorhanden.

Abbildung 9:
Die Lage des
Untersuchungs-
gebietes innerhalb
der Steiermark
(Österreich), die
Bezirke der Stadt
Graz und die Lage
der Testgebiete
(MUICK 2011)

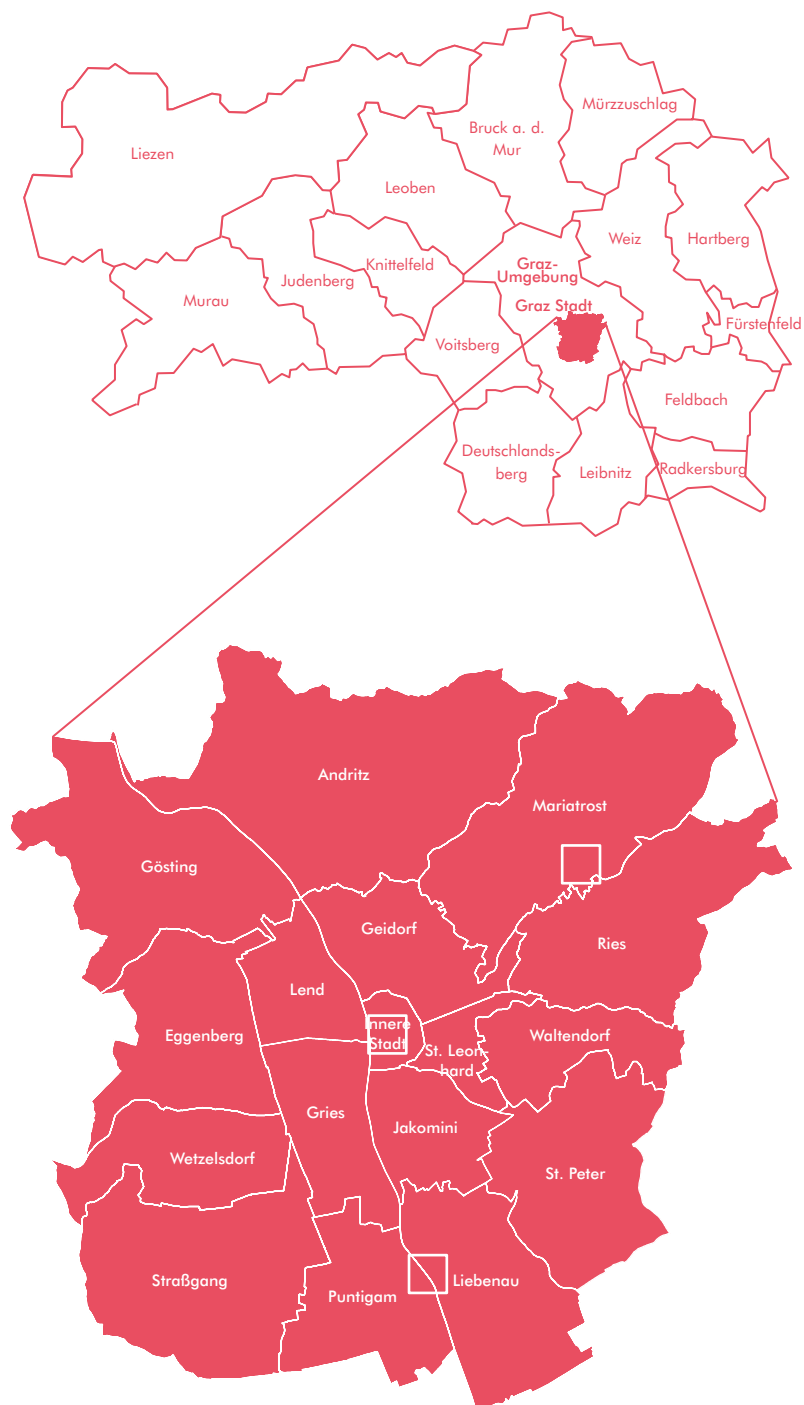


Abbildung 10:
Die Untersuchungs-
gebiete, 1 Mariatrost,
2 Zentrum Innere Stadt,
3 Liebenau-Puntigam
(MUICK 2011)



Preprocessing: Der erste Arbeitsschritt umfasste die Homogenisierung der Projektion der zur Verfügung gestellten ULTRACAM-Orthofotos insofern, da noch nicht alle Bilder über eine korrekte Georeferenzierung verfügten. Dies geschah durch die Definition eines *Map Models* im Programm *ERDAS IMAGINE*. Hier wurden die Koordinaten der Ankerpunkte sowie die Auflösung der Bilder festgelegt. Die Werte der Ankerpunkte wurden aus der Mappenblattübersicht Graz-Karte im Maßstab 1:60.000 übernommen. Diese Homogenisierung wurde sowohl bei den RGB- wie auch bei den CIR-Datensätzen durchgeführt.

Im Anschluss wurde das Stadtgebiet in 15 Bildblöcke aufgeteilt und mosaikiert. Dabei wurde auch gleich ein „upsampling“ auf 30 cm durchgeführt. Aus den nun entstandenen Blöcken (RGB und CIR) wurde der *NDVI* (Normalized Vegetation Index) berechnet. Diese gesammelte Information aus RGB, CIR und NDVI wurde nun in einem *Layerstack* zusammengefügt. Der *NDVI* ermöglicht eine sehr gute Differenzierung zwischen Acker- und Versiegelungsflächen.

BESONDERES AUGENMERK WURDE AUF DIE EINBINDUNG VON ZUSÄTZLICHEM DATENMATERIAL GELEGT. DIESE UMFASSTEN FÜR DIE KLASSIFIKATION DER 2007-DATEN:

Ndsm aus LiDAR-Daten

Ndsm, welches aus UltraCam-Daten auf photogrammetrischen Wege erzeugt wurde

Intensitätsbild aus LiDAR-Daten

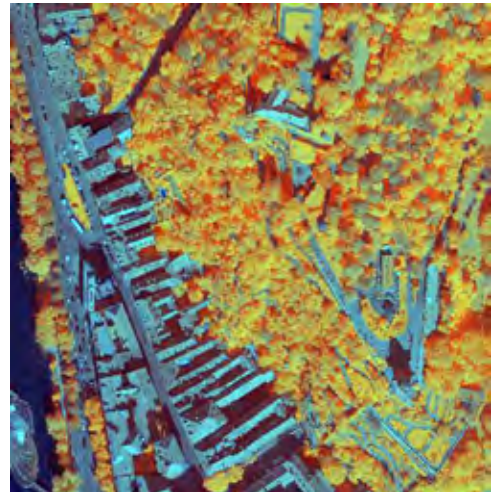
Return Layer aus LiDAR-Daten

Intensitätsbild der mittleren und hohen Vegetation

Berechnung des NDVI

Slope Layer

Abbildung 11:
NDVI links,
Layerkombination
aus R (NDVI), G (NIR),
B (RED)



Dieser *Layerstack* stellt nun jene Datengrundlage dar, mit welcher die tatsächliche Prozessierung der Daten beginnen konnte. Die Bearbeitung der Vektordaten (Digitaler Kataster) bestand lediglich darin, aus dem

Gesamtgebiet die gleichen 15 Blöcke mit Hilfe einer *Clip-Funktion* zu erzeugen, wie das im Rasterfall geschehen war.

Processing: Für die Erstellung einer Klassifikation aus so hoch auflösenden Daten wie zum Beispiel jene der UltraCam-X bot sich hier die Anwendung eines objektorientierten Ansatzes an. Softwareseitig wurden zu Beginn dieses Arbeitsabschnittes einige Segmentierungstests durchgeführt. Das Resultat dieser Versuche schlug sich in der Wahl der Softwareumgebung

Definiens Professional 5.0 LDH nieder. Diese Version des Programmes bekam auf Grund der Tatsache, dass diese in der zu erstellenden Segmentzahl nicht begrenzt ist, den Vorzug gegenüber der aktuelleren Variante *Definiens Developer*. Dennoch musste der Gesamtdatensatz in 15 Teile aufgesplittet werden, wie in Kapitel „Preprocessing“ beschrieben.

EINEN KURZEN ÜBERBLICK ÜBER DIE ARBEITSSCHRITTE GIBT FOLGENDE AUZÄHLUNG:

| | |
|----|---|
| 1. | Segmentierung der Rasterdatenlayerstacks |
| 2. | Erstellen eines Klassifikationsregelsatzes |
| 3. | Anwendung des Regelsatzes auf alle 15 Teilstücke |
| 4. | Manuelle Kontrolle und Überarbeitung |
| 5. | Exportieren des Ergebnisses und Erstellung einer binären Maske (0 = nicht-klassifiziert, 1 = Versiegelung) |
| 6. | Mosaik aller Masken und Clipping mit der Stadtgrenze von Graz |

Segmentierung der Rasterdatenlayerstacks:

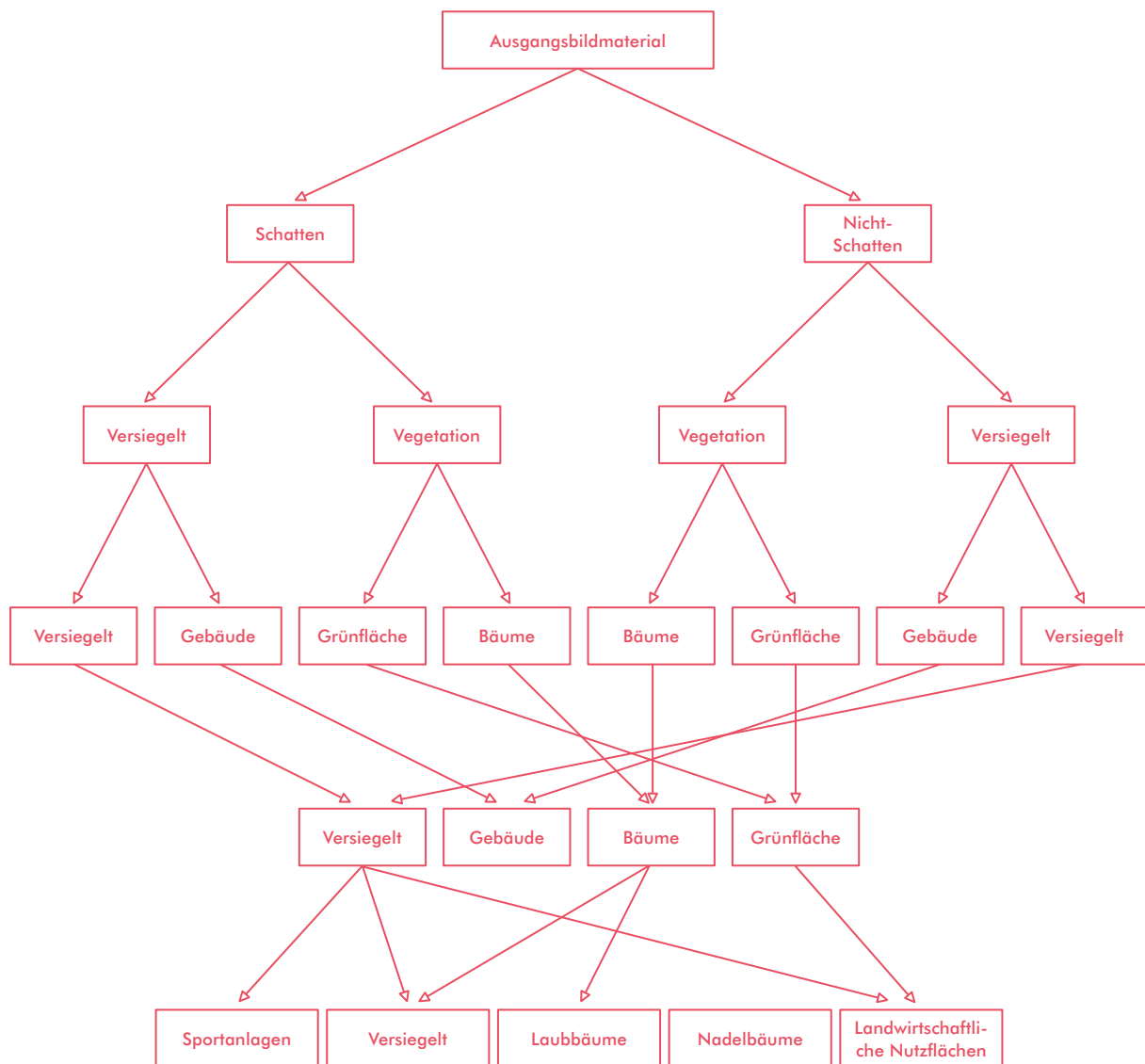
Um die geeigneten Einstellungen für die Segmentierung zu ermitteln, wurde eine große Anzahl an Testsegmentierungen durchgeführt, da es für die korrekte Erstellung einer Segmentierung keine echte Anleitung gibt. Dies resultiert daraus, dass bereits die Segmentierung auf den jeweiligen Anwendungszweck der Klassifikation abgestimmt werden kann. Wie bereits für die Versiegelungskarte der Stadt Graz von 1986 geschehen, wurde auch hier ein mehrstufiger Ansatz verwendet.

Dies bedeutet, dass mehrere Segmentierungsebenen erzeugt wurden, um große zusammenhängende Ge-

biete besser klassifizieren zu können. Weiters wurde der *NDVI* Layer im Rahmen der Segmentierung stärker gewichtet als die restlichen spektralen Kanäle, da hier der Unterschied der Grauwerte zwischen Vegetation und Versiegelung maximal sind.

Erstellung eines Klassifikationsregelsatzes: Die Reihenfolge der Erstellung richtete sich hierarchisch betrachtet von den Großen Segmenten in Layer 3 bis zu den kleinsten in Layer 1. Eine Sonderstellung nimmt hier Layer 4 ein, welcher dazu diente, die Information der digitalen Katastermappe in die Klassifikation zu integrieren.

Abbildung 12:
Prozessierungskette
für die Klassifizierung
der UltraCam-X-Daten
(MUICK 2011)



Nach der Fertigstellung des Regelwerkes konnte dieser „Prozesstrees“ nun auf alle 15 Blöcke angewandt werden. Dadurch wird trotz der Aufteilung der Datengrundlage ein äußerst homogenes Klassifikationsergebnis ermöglicht.

Schattenflächen: Um der Problematik der Schattenflächen in urbanen Räumen Rechnung zu tragen, wurden zunächst die Schattenflächen klassifiziert. Aus Untersuchungen im Vorgängerprojekt dieser Arbeit, der Erstellung einer Versiegelungskarte von Graz aus UltraCam-X-Daten von 2007, ging hervor, dass etwa 30 Prozent des gesamten Untersuchungsgebietes, also des Stadtgebietes von Graz, der Klasse Schatten zufallen würde. Für die urbanen Entscheidungsträger, für welche diese Landbedeckungsklassifikation ein sehr gutes Werkzeug sein kann, ist dieser Prozentsatz

natürlich nicht tragbar (ZHOU 2009). Gerade wenn städtische Parameter, wie zum Beispiel das Verhältnis von Grünflächen zu versiegelten Flächen, abgeleitet werden sollen, wird deutlich, dass den Schattenflächen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Abbildung 18 verdeutlicht diese Problematik. Diese Aufgabe wurde mit Hilfe der **Brightness-Funktion** realisiert. Die *Brightness-Funktion* ist ein *Feature*, welches die Grauwerte zuerst summiert und durch die Anzahl der verwendeten Summanden dividiert. Die Voreinstellung des *Ecognition Developer* sieht vor, alle zur Verfügung stehenden Layer innerhalb eines Projektes für diese Berechnung heranzuziehen. Dies ist aber durch die Tatsache, dass auch *Intensitäts-* sowie *NDSM Layer* vorhanden waren, auf keinen Fall praktikabel.

Abbildung 13:
Schattenflächen im
Bezirk Innere Stadt
(MUICK 2011)



Aus diesem Grund wurde die Voreinstellung dahingehend verändert, dass nun nur mehr die Bänder Blau, Grün und Rot für die *Brightnessberechnung* Verwendung fanden. Um auf den durchaus aufwendigen

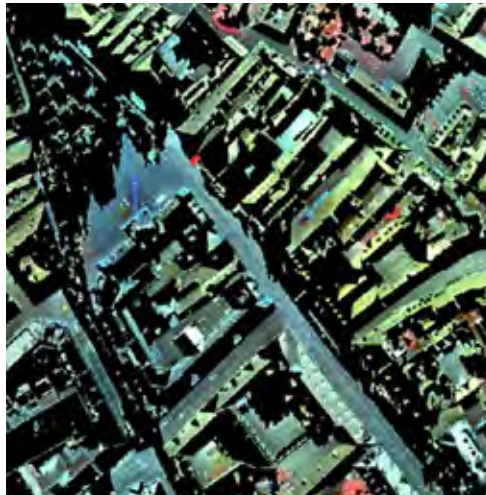
Schritt der Schattenkorrektur verzichten zu können, wurden in weiterer Folge zwei unterschiedliche Regelsätze erstellt, welche folgende Klassen enthielten:

| |
|--------------------|
| Versiegelt |
| Gebäude |
| Vegetation (allg.) |
| Waldflächen |

Um die visuelle Interpretation für die Klassifizierung der Schattenflächen zu erleichtern, wurden mit Hilfe des Programmes *Erdas Imagine 2010* alle Nicht-Schat-

tenflächen entfernt, um so Schattenflächen aufzuspreizen und damit interpretierbar zu machen.

Abbildung 14:
Gespreizte Schatten-
flächenmaske
(MUICK 2011)



Besonders die Einbindung des *LiDAR-Intensitätslayers* war eine äußerst wertvolle Ergänzung für kritische Schattenflächen, die durch ein erhöhtes Signalrauschen in Erscheinung traten. Dieses Rauschen resultiert aus der Aufspreizung der Grauwerte durch die Eliminierung aller nicht-abgeschatteten Bildbereiche. Wodurch die restlichen Werte im Histogramm neu verteilt werden und in manchen Fällen auch derart überstreckt wurden, dass es zum vorher angesprochenen Bildrauschen kommt. Diese Objekte wurden zunächst in einer eigenen temporären Hilfsklasse zwischengespeichert und anschließend weiter aufgeteilt. Durch die isolierte Handhabung dieser Flächen ist eine weit bessere Zuteilung in die vier Klassen der

obigen Aufzählung möglich, als dies mit der Gesamtheit der Schattensegmente möglich wäre. Um die Prozessierung der Klassifikation in einem Projekt File (.dpr) von *Ecognition Developer 8.64* abwickeln zu können, wurden nach der Erstellung des Schattenregelsatzes beide Regelsätze in einem neuen Projekt hintereinander ausgeführt. Anschließend wurden noch die Klassen homogenisiert. Das bedeutet, dass die Klassen Gebäude und Gebäude/Schatten in eine neue Klasse Gebäude überführt wurden. Diese Methodik wurde für alle Klassen durchgeführt. Dieser Schritt war notwendig, um die räumlichen Beziehungen der Klassen zueinander für die Software nutzbar zu machen.

FÜR DIE KLASSIFIKATION WURDEN FOLGENDE LAYERZUSAMMENSTELLUNGEN INNERHALB VON ECOGNITION DEVELOPER 8.64 VERWENDET:

UltraCam-X: roter Kanal

UltraCam-X: grüner Kanal

UltraCam-X: blauer Kanal

UltraCam-X: roter Kanal

UltraCam-X: naher Infrarot Kanal

NDVI

Ndsm Photogrammetrie

Ndsm LiDAR

Intensität LiDAR allgemein

Intensität LiDAR nur Bäume

Returnnummer LiDAR

Versiegelte Flächen: Die Klassifikation der versiegelten Flächen geschah auf der zweiten Ebene sowohl für die Schatten wie auch für die Nicht-Schattenbereiche. Die versiegelten Flächen stellen, wie in Abbildung 15 ersichtlich, den Gegenspieler der Klasse Grünflächen dar. Die Zuteilung der versiegelten Flächen erfolgte ebenfalls unter Verwendung des NDVI-Wertes. Nachdem zuvor die Grünflächen bestmöglich klassifiziert wurden, bildeten die verbleibenden Segmente bereits die Klasse der versiegelten Flächen. Diese Flächen wurden im Anschluss auf die Fehlklassifikation von trockenen Grasflächen untersucht und korrigiert. Weiters von Interesse waren Segmente, die Mischinformation aus den Klassen versiegelter Flächen und Bäume enthielten. Dieses Phänomen trat vor allem bei durch Bäume überschirmten Straßenzügen wie zum Beispiel Alleen im Bereich des

Stadtparks, also im zentralen Testgebiet, auf. Ebenfalls ist diese Bildung von Mischinformation bei überschirmten Dachflächen zu beobachten. Im Regelfall ist dies bei Einfamilienhäusern in Waldnähe oder mit Nähe zu größeren Einzelbäumen feststellbar. Diese Tatsache führt dazu, dass die Randsegmente von Baumkronen der Klasse der versiegelten Flächen zufließen. Diese Problematik hat noch weitere Auswirkungen, auf welche in der Beschreibung der Gebäudeklasse weiterführend eingegangen wird. Im südlichen Testgebiet gab es bei der Klassifikation der landwirtschaftlich genutzten Flächen Fehlzusweisungen, die die Klasse der versiegelten Flächen betraf. Die beiden eben beschriebenen Klassen bilden die Basis der Klassifikation, auf welcher die Ableitung sämtlicher anderer Klassen aufbaut.

Abbildung 15:
Die Klasse „versiegelte Fläche“ im Innenstadtbereich (MUICK 2011)



Die **Klasse der Gebäude** zählt physiognomisch auch zur allgemeinen Versiegelung, sie unterscheidet sich zur Klasse der versiegelten Flächen lediglich in der Ausprägung der absoluten Höhe der Segmente. Diese simple Unterscheidung funktioniert für den Großteil der Segmente sehr gut. Problematisch sind jedoch jene Flächen, die auf Grund der Mischinformationsbildung bei der Mittelwertberechnung der Objektfeatures der Klasse Versiegelte Flächen zufallen, eigentlich aber der Grünflächen-Klasse zugeordnet werden müssten. Eine gewisse Anzahl an Segmenten ließ sich aufgrund ihrer relativ geringen Größe einfach korrigieren. Dafür wurden die Gebäudesegmente verschmolzen (*merging*), um so dieses Größenattribut nutzen zu können. Die größten Schwierigkeiten gab es bei Segmenten, welche eine Höheninformation enthielten, obwohl dies aus einer rein visuellen Interpretation der UltraCam-X-Daten, bedingt durch die teilweise sehr starke Abschattung, nicht unbedingt nachvollziehbar war. Im Besonderen ist hier das Zusammenwachsen von Baumkronen in starken Schattenbereichen gemeint. Dies führt dazu, dass diese Segmente, die zwar bei der Zuweisung aus den Schattenflächen richtiger Weise als versiegelte Flächen klassifiziert worden sind, durch ihre Höhenwerte aber der Gebäudeklasse zufallen, was nicht der Realität entspricht. Diese Problemstellen konnten automatisiert nicht vollständig behoben werden. Teilweise konnte dieser Effekt über Nachbarschaftsbeziehungen und über die Verwendung von Höheninformation aus den

LiDAR-Daten reduziert werden. Hierzu sei erwähnt, dass die LiDAR-Befliegung zu einem Zeitpunkt ohne Belaubung erfolgte. Diese Tatsache äußert sich in der unterschiedlichen Ausdehnung der Baumkronen, im LiDAR-Bild einerseits und in den Kanälen der UltraCam-X andererseits, was eine komplette Korrektur aller Segmente nicht erlaubt. Eine weitere Fehlerquelle lag in der Miteinbeziehung von Baumkronensegmenten bei Einzelhäusern im südlichen Testgebiet sowie im Testgebiet von Mariatrost (Roseggerweg). Diese falschen Einbindungen konnten mit Hilfe des *Returnnumberlayers* behoben werden. Der Ansatz der Korrektur lag darin, dass die Gebäude, die Teile einer Baumkrone beinhalteten, einen höheren Wert besitzen als jene, bei denen der Mittelwert des Segmentes nur aus „echten“ Dachflächenpixeln berechnet wurde. Das Attribut der *Returnnumber*, welches standardmäßig in den LAS Files gespeichert wird, besitzt die Werte 0, 1 und 2. Dabei würde 0 bedeuten, dass aus irgendeinem Grund keine Reflexion den Aufnahmesensor erreicht hat. Im Falle von 1 wurde bereits der erste Puls des Sensors reflektiert und im Falle von 2 wurden mehrere Pulse benötigt, um ein Signal an den Sensor zurückzusenden. Da es bei der Aufbereitung der Daten aber zu Filterungen und beim Bestimmen des *Segmentfeatures* zur Mittelwertbildung kommt, wird dieser Idealfall nur selten erreicht. Nichtsdestotrotz ist dieser Ansatz sehr gut geeignet, um solche Fehler zu erfassen.

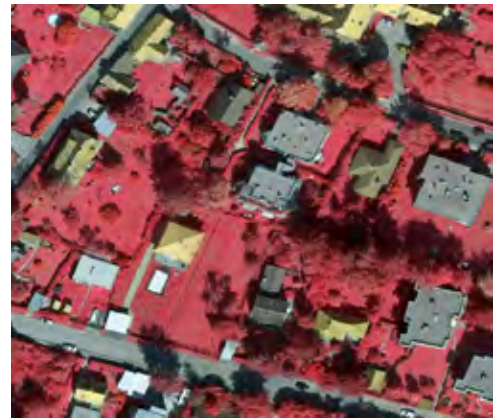
Abbildung 16:
Die Klasse „Gebäude“
im Innenstadtbereich
(MUICK 2011)



Die derart lokalisierten Gebäude, welche bereits in einem vorangegangenen Arbeitsschritt „merged“, also verschmolzen wurden, mussten deshalb in einer temporären Hilfsklasse untergebracht werden. Diese Aufteilung der Gebäude erlaubte eine erneute Segmentierung mit Hilfe eines sehr feinen *Chessboard Algorithmus*. Diese sehr kleinen quadratischen Objekte bildeten die Basis für eine ebenfalls sehr feine *Multiresolution Segmentation*. Diese neu generierten Segmente wurden im Anschluss mit dem *Returnnumber Feature* in die korrekten Klassen aufgeteilt und im Falle der Gebäude wieder verschmolzen. Aufgrund der relativ hohen Gebäude im innerstädtischen Bereich war diese Fehlerquelle im zentralen Testgebiet (Abbildung 16) nicht augenscheinlich.

Manuelle Kontrolle und Überarbeitung: Obwohl das Ergebnis des Klassifikationsregelsatzes bereits sehr zufriedenstellend wirkte, waren noch immer kleine Fehler vorhanden. Diese wurden manuell korrigiert, um so die Genauigkeit noch weiter zu verbessern. Größere Fehler entstanden in Teilen des Blockes 9 und 10, welche in etwa das Gebiet des Plabutsch abdecken. Hier war ein sehr viel höherer Zeitaufwand bei der manuellen Kontrolle und Überarbeitung notwendig. Diese Fehler resultieren aus den Unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten der CIR- und RGB-Bilder. Dies lässt sich durch die in Abbildung 7 gezeigten unterschiedlichen Schattenstände beweisen.

Abbildung 17:
Unterschiedlicher
Schattenwurf, RGB
links, CIR rechts



Exportieren der Ergebnisse und Binärmaskenerstellung: Die Ergebnisse der Klassifikation wurden aus der Softwareumgebung von *Definiens Professional 5.0 LDH* in das Dateiformat *IMG* exportiert. Anschließend wurden die Ergebnisse *rekodiert*, um so eine binäre Maske erzeugen zu können. Aus den einzelnen Binärmasken wurde nun eine komplette Versiegelungsmaske *mosaikiert*, welche im Anschluss noch mit der Stadtgrenze von Graz ausgeschnitten wurden.

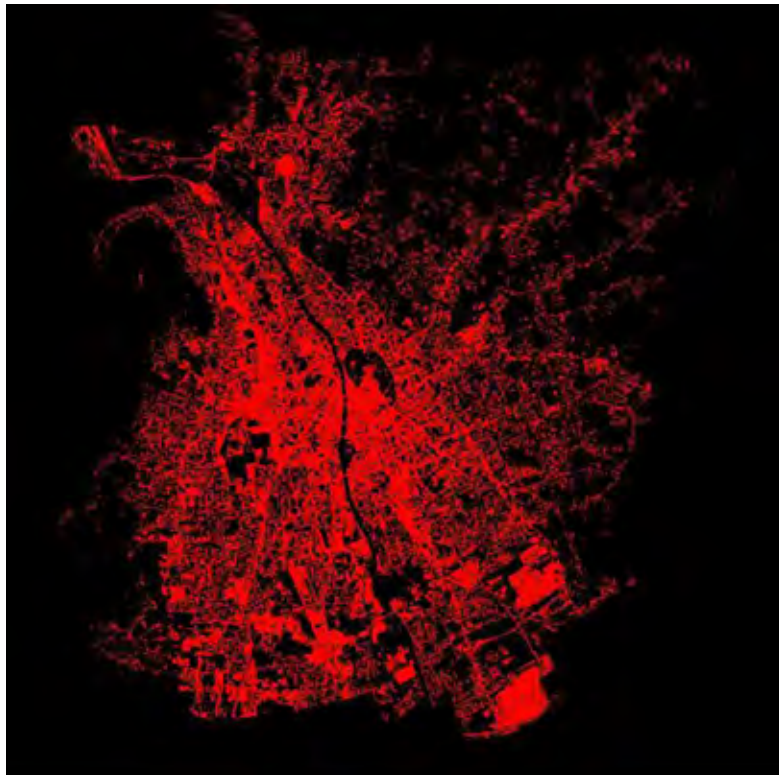
Resultat: Das Resultat zeigt eindeutig, dass die Wahl eines objektorientierten Ansatzes für diese Problemstellung die richtige war. Denn selbst die auf hochauflösende Daten geeignete Software kommt mit der bestehenden Blockgröße und einer bereits reduzierten Auflösung von 30 cm an ihre Grenzen. Eine Möglichkeit wäre die Blockgröße noch weiter zu reduzieren, was aber den Nachteil mit sich bringt, dass damit eine noch höhere Anzahl an Blockkanten entsteht.

Abbildung 18 zeigt einen Detailausschnitt etwas östlich der Karl-Franzens-Universität.

Abbildung 18:
RGB links, RGB plus
Versiegelungsmaske
rechts (Muick, 2011)



Abbildung 19:
Versiegelungsmaske
der Stadt Graz 2007



2.2.2.2 VERSIEGELUNG ULTRACAM-X 2011

Für die Erstellung der Landbedeckungsklassifikation 2011 konnten bereits einige Erfahrungswerte der Klassifizierung der 2007er-Daten in der Datenaufnahme umgesetzt werden. So wurden die ULTRACAM-X-Daten mit 16 Bit an das Referat für Photogrammetrie des Stadtvermessungsamtes Graz geliefert, und auch der Befliegungszeitpunkt wurde auf Juni verschoben.

Abbildung 20:
Schattenflächen
(links 2007,
rechts 2011)



Daraus resultierten im Besonderen zwei Vorteile. Die nun kleineren Schattenflächen konnten ohne die zusätzlich Nutzung der Intensitätswerte sehr gut klassifiziert werden und auch die spektralen Unterschiede innerhalb der Waldklassen wurden deutlich gesteigert, sodass hier auf die Einbindung von Zusatzinformation verzichtet werden konnte. Auf Grund der Steigerung der radiometrischen Auflösung auf 16 Bit und des damit einhergehenden Verzichts auf die Nutzung der Intensität und des LiDAR-NDSM's mussten einige Teilbereiche des Regelwerkes abgeändert werden. Von diesen Änderungen waren vorrangig sämtliche Schwellwerte, die Schatten- und die Baumklassifikation betroffen.

GENAUIGKEITSABSCHÄTZUNG 2011:

Versiegelte Flächen 92,7 Prozent

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen deutlich, dass die Erstellung von Regelsätzen für Klassifikationen von Stadtgebieten anhand repräsentativer Testgebiete möglich ist. Diese Einschätzung basiert zum einen auf den Erfahrungswerten der Landbedeckungsklassifikation 2007 und zum anderen auf den Ergebnissen von qualitativen und quantitativen Genauigkeitsuntersuchungen 2011. Für die quantitative Abschätzung der Ergebnisse kam für beide Zeitpunkte eine Fehlermatrix zum Einsatz. Diese ergaben eine Gesamtgenauigkeit von 92,3 Prozent für das Klassifikationsergebnis 2007 und 94,0 Prozent für 2011. Die höchste Fehleranfälligkeit wiesen die Klassen Nadelbäume und Laubbäume auf, welche eine Genauigkeit um die 87 Prozent erreichten. Dass die beiden Klassen in diesem Fall die gleiche Genauigkeit besitzen, ist ein eher kurioser Zufall, verdeutlicht aber umso mehr, dass diese Zahlenwerte als Richtlinie aufgefasst werden können, aber nicht als absolute Wahrheit. Ein qualitatives Indiz, welches sich auch auf der quantitativen Ebene widerspiegelt, ist der geringere Anteil der Schattenflächen in den Daten von 2011. Durch den vier Monate früheren

Befliegungszeitpunkt konnte der Anteil der Schattenflächen in etwa halbiert werden (ca. 15 % statt 30 %). Somit ist der Trend, welcher bereits im quantitativen Teil der Qualitätsuntersuchung nachgewiesen wurde, auch durch qualitative Vergleiche wie in diesem Beispiel der Schattenflächen überprüfbar und damit konsistent. Aufgrund der Reduktion der Anzahl der *Inputlayer* und der Weiterentwicklung der verwendeten Software war es darüber hinaus möglich, die Schattenflächen 2011 noch feiner zu segmentieren, als dies 2007 der Fall war. Diese Methodik der separaten feineren Segmentierung von Problemstellen wurde ebenfalls für die Klasse der Gebäude verwendet. Diese Herangehensweise ermöglichte eine nochmalige Aufwertung des Klassifikationsergebnisses.

Abbildung 21:
Veränderung in der
Bebauung (links 2007,
rechts 2011)



2.2.2.3 VERSIEGELUNG IM CHANGE-DETECTION-VERFAHREN

Wie das Beispiel Versiegelung zeigt, befinden sich urbane Räume im stetigen Wandel. Informationen über Art und Ausmaß dieser Veränderungen sind immens wertvoll für verschiedenste stadtgeographische Fragestellungen und ein fundamentaler Faktor für eine nachhaltige Stadtentwicklung. Die Fernerkundung stellt ein mächtiges Tool zur Erkennung, Quantifizierung und Visualisierung dieser Veränderungen dar.

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung eines (semi-)automatischen *Change-Detection-Algorithmus* und dessen Anwendung auf das gesamte Grazer Stadtgebiet. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Veränderungen der Bebauungs- bzw. Vegetationsstruktur gelegt. Die Daten aus den UltraCam-X-Befliegungen aus den Jahren 2007 und 2011 werden dabei analysiert und verglichen. Die klassische Methode der Veränderungsdetektion, bei der die Daten der Aufnahmezeitpunkte einzeln klassifiziert und im Anschluss miteinander verglichen werden („Post Classification

Comparison“) wird bewusst nicht verwendet. Der Algorithmus soll die Veränderungskartierung in einem einzigen Klassifikationsschritt bewerkstelligen, um die Genauigkeit zu verbessern und die Bearbeitungszeit und den Rechenaufwand zu minimieren. Lediglich zu Vergleichszwecken wird eine *Post-Classification-Comparison* für ein Teilgebiet durchgeführt und mit den Ergebnissen des entwickelten Algorithmus verglichen.

FOLGENDE FORSCHUNGSFRAGEN SOLLEN IM ZUGE DIESES ARBEITSPAKETS BEANTWORTET WERDEN:

Ist der vorliegende Datensatz (UltraCam-X-Datensätze aus 2007 und 2011) für eine akkurate Kartierung der Veränderungen der Grazer Bebauungs- und Vegetationsstruktur geeignet?

Kann der für zwei Testgebiete entwickelte *Change-Detection-Algorithmus* auf das gesamte Stadtgebiet angewandt werden?

Liefert der Algorithmus bessere Ergebnisse als die klassische *Post-Classification-Comparison*-Methode im Hinblick auf Klassifikationsgenauigkeit und Arbeitsaufwand?

Für die Entwicklung der *Change-Detection-Methodik* wurden im Grazer Stadtgebiet zwei Testgebiete, die jeweils für eine bestimmte Bebauungsstruktur repräsentativ sind, ausgewählt. Abbildung 22 zeigt die räumliche Lage der beiden Testgebiete.

Abbildung 22:
Räumliche Lage der
Testgebiete in Graz



Testgebiet 1 –**Bereich der neuen Technik, Bezirk Jakomini**

Testgebiet 1 wird durch eine hohe Bebauungsdichte mit größtenteils gründerzeitlichen Gebäuden charakterisiert. Blockverbauung mit begrünten Innenhöfen ist die vorwiegende Bebauungsstruktur im Untersuchungsgebiet. Zusätzlich sind einige neue Gebäude, die hauptsächlich zu der TU Graz gehören, evident. Durch visuelle Interpretation der UltraCam-X-Daten aus den Jahren 2007 bzw. 2011 wird ersichtlich, dass einige neue Gebäude im Untersuchungszeitraum erbaut worden sind. Änderungen in der Vegetation, die hauptsächlich durch Bebauung, Baumschnitt und Baumkronenerweiterungen bzw. Reduktionen entstanden sind, sind ebenfalls ersichtlich.

Abbildung 23:
Testgebiet 1,
links: 2007,
rechts: 2011

**Testgebiet 2 –****Bereich um den Sternäckerweg, Bezirk St. Peter**

Testgebiet 2 wird durch Wohnflächen und landwirtschaftlich genutzte Flächen charakterisiert. Die Bebauungsstruktur weist hauptsächlich Ein- und Mehrfamilienhäuser auf, die von begrünten Hinterhöfen und Äckern umrandet werden. Innerhalb des Untersuchungszeitraums wurden mehrere Wohnkomplexe erbaut und die Vegetationsstruktur veränderte sich teils beträchtlich.

Abbildung 24:
Testgebiet 2,
links: 2007,
rechts: 2011



Change-Detection-Methodik – Allgemein

Die fernerkundungsgestützte Veränderungsdetektion ist ein probates Mittel – um Veränderungen der Erdoberfläche großflächig, schnell und akkurat zu detektieren, quantifizieren und visualisieren. Die Anzahl der im Laufe der Jahrzehnte entwickelten Methoden und Algorithmen ist enorm. Eine Klassifikation der Methoden ist äußerst schwierig und es gibt verschiedenste Ansätze zur Erstellung des „state of the art“ der Change-Detection-Algorithmen. Für eine gründliche Beschreibung der bis dato verwendeten Methoden siehe SALENTINIG (2012).

Um eine sinnvolle Change-Detection-Analyse durchführen zu können, müssen einige sensor- und umwelteinflussspezifische Voraussetzungen erfüllt werden. Die offensichtlichste und grundlegendste Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von zumindest zwei, zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Fernerkundungsbildern, die dasselbe Gebiet abdecken.

LU (2004) HAT DIE ÜBRIGEN BEDINGUNGEN TREFFEND ZUSAMMENGEFASST:

Präzise (Co-)Registrierung des multitemporalen Datensatzes

Sorgfältige radiometrische und atmosphärische Kalibrierung zwischen den Daten des multitemporalen Datensatzes

Ähnliche phänologische Stufen zu den Aufnahmezeitpunkten

Gleiche oder zumindest ähnliche räumliche und spektrale Auflösungen der Daten des multitemporalen Datensatzes

In der Praxis ist es nicht immer möglich, alle Bedingungen für eine Change-Detection-Analyse zu erfüllen. Durch die zeitliche Verfügbarkeit der Sensoren und Umweltfaktoren ist es kaum möglich perfekte Daten zur Verfügung zu haben. Durch verschiedenste Bildverarbeitungsschritte können Mängel in den Daten teilweise behoben werden.

Change-Detection-Analysen in urbanen Gebieten sind besonders anspruchsvoll. Durch das kleinräumige Zusammenspiel verschiedenster natürlicher und künstlicher Oberflächen entstehen besondere Anforderungen an die Fernerkundungsdaten. Obwohl Luft- und Satellitenbilder immer bessere räumliche und spektrale Auflösungen aufweisen, ist es immer noch schwierig, akkurate Informationen über Veränderungen in Städten abzuleiten. Durch die Sub-Meter-Fernerkundungsdatengeneration haben sich neue Möglichkeiten in der Datenanalyse aufgetan. Allerdings sind dadurch auch neue Herausforderungen entstanden. Durch die hohen räumlichen Auflösungen tritt das „spectral noise“-Phänomen

vermehrt auf. Da die klassische pixelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten im Hochauflösungsfall vermehrt zu starken „Salz und Pfeffer“-Effekten führt, kam es in den letzten anderthalb Jahrzehnten zu einem Paradigmenwechsel in der Bildklassifikation. Objektbasierte Klassifikationsmethoden stellen eine gute Methode der Klassifikation von hochauflösenden Fernerkundungsdaten dar. Des Weiteren können Form-, Lage- und Topologieparameter in die Analysen inkludiert werden. Eine weitere Herausforderung ist der immens gesteigerte Rechenaufwand und die Datenmengen die entstehen. Aufgrund der hohen Qualität der UltraCam-X-Daten, wurde für die vorliegende Change-Detection-Analyse des Grazer Stadtgebiets ein objektbasierter Ansatz gewählt.

Sensor- und umwelteinflussspezifische Betrachtung: Da zu beiden Befliegungszeitpunkten eine UltraCam-X-Luftbildkamera verwendet wurde, war keine radiometrische Normalisierung der Daten notwendig. Lediglich die radiometrische Auflösung der Datenlieferungen war nicht identisch, die Unterschiede konnten allerdings in der *Bildvorprozessierung* ausgeglichen werden. Durch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der Luftbilddaten (22./23. September 2007 und 22. Juni 2011) sind einige Probleme im Hinblick auf eine *Change-Detection*-Analyse entstanden. Diese werden in den folgenden Absätzen betrachtet. Die offensichtlichsten Unterschiede im multitemporalen UltraCam-X-Datensatz sind Schattenflächen. Die Luftbilder wurden 2007 Ende September und 2011 einen Tag nach Mittsommer, dem längsten Tag des Jahres (jeweils zwischen ca. 9 und 14 Uhr), aufgenommen.

Abbildung 25:
Einfluss des Sonnenstands auf Schattenflächen, links: September 2007, rechts: Juni 2011



Ein weiterer Faktor, der das Erscheinungsbild von Fernerkundungsdaten bestimmt, ist die Phänologie. Während die Daten aus 2007 im Frühherbst aufgenommen wurden, befindet sich die Natur bei der Aufnahme 2011 erst im Vorfrühling. Dadurch entstehen beträchtliche Unterschiede im Erscheinungsbild der Vegetation.

Datenvorprozessierung/Preprocessing: Die UltraCam-X-Daten wurden mit verschiedenen räumlichen Auflösungen aufgenommen (6, 8 und 16 cm). Da eine ähnliche bzw. konstante räumliche Auflösung eine Voraussetzung für eine sinnvolle *Change-Detection*-Analyse ist, wurden alle Daten auf 25 cm „resampled“. Ein weiterer Grund dafür, dass nicht mit der Originalauflösung gearbeitet wurde, ist eine beträchtliche Reduktion der Rechenzeit. In Betracht der geometrischen Eigenschaften von Objekten in urbanen Gebieten ist die Auflösung von 25 cm noch mehr als ausreichend. Die Daten aus dem Jahr 2007 wurden mit einer radiometrischen Auflösung von 8 Bit geliefert. Diese wurden auf 16 Bit ausgespreizt, um mit den Daten aus 2011 zusammenzupassen.

Um die Daten auch statistisch vergleichbar zu machen und um die Erscheinung der Luftbilder aus den beiden Aufnahmezeitpunkten besser anzupassen, wurde ein „histogramm matching“ durchgeführt.

Aus (Co-)Registrierungssicht passten die Daten perfekt zueinander und somit mussten diesbezüglich keine weiteren Vorprozessierungsschritte durchgeführt werden.

Change-Detection-Algorithmus: Wie bereits erwähnt, wurde keine „post classification comparison“ durchgeführt weil die ULTRACAM-X-Daten im Zuge vorangegangener Projekte ohnehin hochgenau klassifiziert worden sind. Ziel ist es, mit nur einer Klassifikation die Veränderungen im Stadtgebiet zu detektieren.

Aus diesem Grund wurde der Ansatz einer spektral-temporal-kombinierten Analyse angewandt. Dabei werden die Kanäle beider Aufnahmezeitpunkte zu einem Datensatz zusammengefügt. Dadurch entstand (im CIR-Fall) aus zwei Luftbildern mit je drei Kanälen ein Luftbild mit sechs Kanälen. Dieser erzeugte „layer stack“ wird daraufhin im Hinblick auf veränderte Objekte klassifiziert. Zusätzlich wurden klassische Change-Detection-Methoden wie „image differencing“, „image rationing“ und „principal component analysis“ in den Algorithmus integriert.

Im Vorfeld wurde eine Wissensbasis, die Regeln für die Zugehörigkeit von Objekten zu bestimmten Veränderungsklassen definiert, entwickelt. Diese wurde dann in der eCognition-Developer-Software auf den multitemporalen ULTRACAM-X-Datensatz angewandt.

Der entwickelte Algorithmus kann keine komplette Veränderungsmatrix liefern. Wenn man bedenkt, dass die räumliche Ausdehnung der Veränderungen sehr gering ist im Vergleich zu den

Gesamtflächen der Untersuchungsgebiete, ist das auch nicht erforderlich. Des Weiteren sind die meisten Klassen einer kompletten Veränderungsmatrix ohnehin sehr unwahrscheinlich (z. B. Wasser zu Versiegelung, Versiegelung zu Wald oder Gebäude zu Wasser). Die vorliegende Change-Detection-Methode zielt auf die Detektion der Veränderungen von Gebäuden, Bäumen und versiegelten Flächen ab. Diese Landnutzungs-/Landbedeckungsklassen werden separat behandelt, da bestimmte Flächen zu mehreren Veränderungsklassen gehören können (z.B.: Ein Baum wird im Untersuchungszeitraum gefällt und an der gleichen Stelle wird ein Gebäude errichtet, somit gehört diese Fläche sowohl zu der Klasse „demolished tree“ als auch zu der Klasse „new building“). Die Software *eCognition Developer* wurde verwendet, um eine objektbasierte Change-Detection-Analyse durchzuführen. In diesem Programm besteht der Analyseprozess immer aus zwei Stufen: Segmentierung und Klassifikation. Für den entwickelten Algorithmus wurde die Multiresolution-Segmentierung verwendet. Dabei werden Pixel basierend auf relativen Homogenitätskriterien zu Objekten zusammengefasst. Im Anschluss werden dann die erstellten Objekte als Ganzes für die weiteren Analyseschritte weiterverwendet.

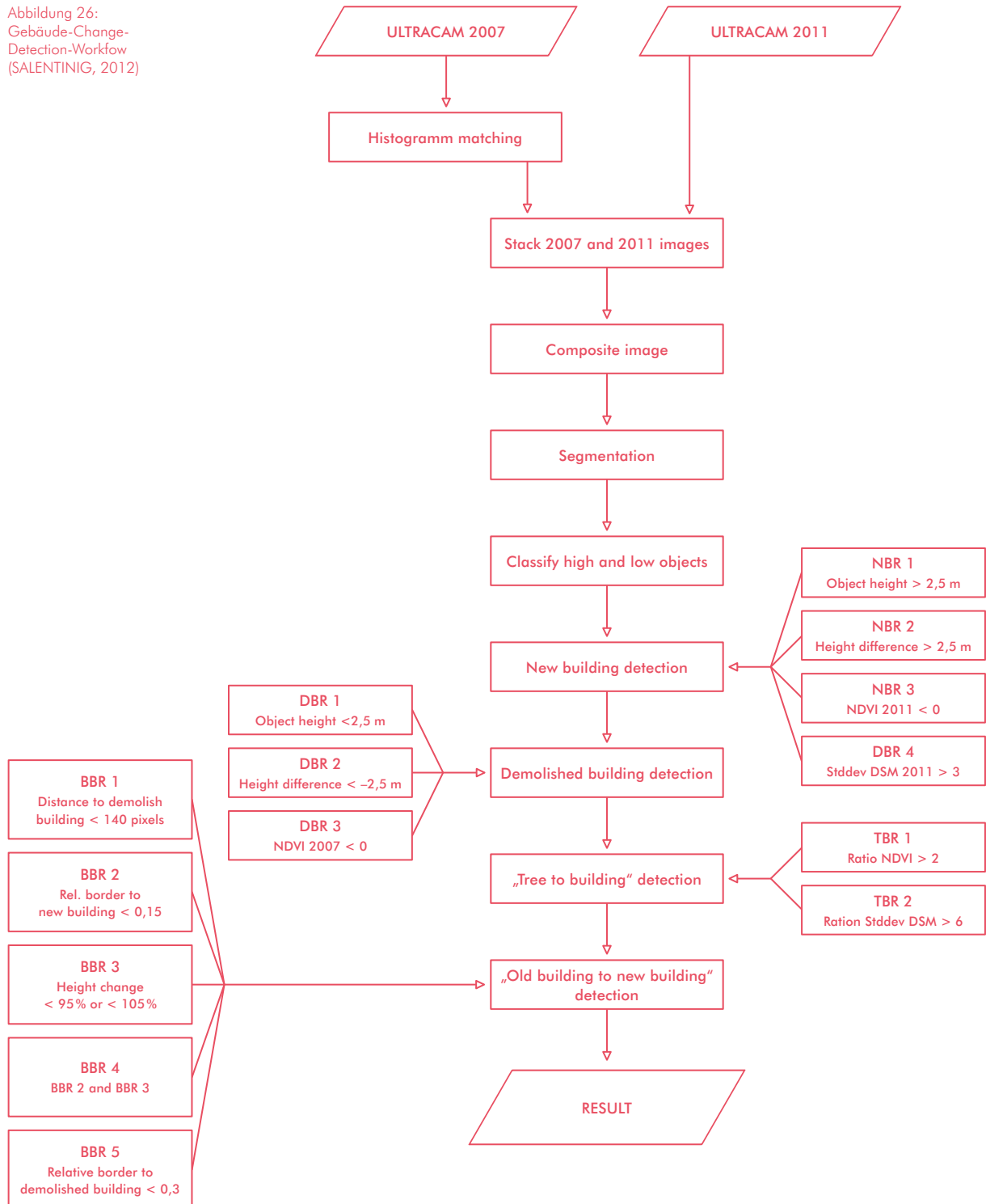
Für die Segmentierung des multitemporalen Datensatzes wurden die CIR-Daten sowie die DSMs beider Aufnahmezeitpunkte miteinbezogen. Somit wurde gewährleistet, dass veränderte Objekte möglichst gut abgegrenzt werden konnten. Tabelle 2 zeigt die Segmentierungsparameter.

Tabelle 2:
Parameter für die
Multiresolution-
Segmentierung

| Segmentation parameter | Building change | Vegetation change | Impervious change |
|---------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Scale | 50 | 10 | 50 |
| Shape | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| Compactness | 0,8 | 0,5 | 0,8 |

Versiegelte Flächen: Die schnelle Urbanisierung führt zu einer starken Zunahme an versiegelten Flächen wie Straßen und Parkplätzen. Sobald eine Fläche versiegelt ist, ist es höchst unwahrscheinlich, dass sie wieder zu einer natürlichen Oberfläche transformiert wird. Aus diesem Grund wurden nur neue versiegelte Flächen mit dem Algorithmus behandelt.

Abbildung 26:
Gebäude-Change-
Detection-Workflow
(SALENTINIG, 2012)



Versiegelte Flächen sind niedrige Objekte. Daher wurden für die Detektion von neuen versiegelten Flächen nur Objekte mit einer minimalen Höhe von 2,5 m behandelt. Versiegelte Flächen weisen keine Photosyntheseaktivität auf. Für die Ausnutzung dieser Tatsache wurde wiederum der NDVI verwendet ($\text{NDVI } 2011 < 0$). Die Hauptkomponentenanalyse („*principal component analysis*“) ist unter Umständen eine sehr gut geeignete Methode, um Informationen über Veränderungen von versiegelten Flächen zu extrahieren. Die Verwendbarkeit ist allerdings stark von den Charakteristika des Untersuchungsgebiets abhängig. Im vorliegenden Fall eignete sich die Hauptkomponentenanalyse hervorragend, um neue versiegelte Flächen zu detektieren. Die vierte und fünfte Hauptkomponente wurde hierfür verwendet. In diesen Kanälen werden Veränderungen in der Versiegelung gut hervorgehoben. Die Schwellwerte für die Hauptkomponenten wurden durch „*trial and error*“ bestimmt, da die Werte in den Hauptkomponenten schwer zu interpretieren sind, weil sie keine realen Parameter darstellen. Der Schwellwert für die vierte Hauptkomponente wurde auf > 11 und der Schwellwert für die fünfte Hauptkomponente wurde auf > 0 gesetzt.

Probleme: Bei der Entwicklung des *Change-Detection*-Algorithmus sind mehrere Probleme aufgetreten. Diese werden in den nächsten Abschnitten erläutert.

Alle *Change Detection* Methoden, die im vorliegenden Algorithmus integriert wurden, haben gemeinsam, dass Schwellwerte für die Abgrenzung von veränderten und nicht-veränderten Flächen bestimmt werden müssen. Daher kann die Veränderungskartierung bestenfalls semiautomatisch erfolgen, weil der Interpret die Schwellwerte selbst suchen muss. Das wiederum hat zur Folge, dass eine gewisse Unsicherheit über die Genauigkeit der Ergebnisse entsteht, da die Qualität der Schwellwerte stark von der Erfahrung des Interpreten abhängt.

Das größte Problem bei der Entwicklung der *Change-Detection-Methode* waren Schattenflächen. In der Fernerkundung stellen Schatten immer ein Problem dar. Diese Problematik wird in der *Change Detection* noch verstärkt, da mindestens zwei Fernerkundungsbilder mit (in der Regel) verschiedenen Schattenwürfen integriert werden. Bei der Klassifikation von nur einem Datensatz (z. B. nur 2007) können Schattenflächen ausgeschnitten, mit Bildverbesserungsmethoden bearbeitet und separat behandelt werden (siehe MUICK 2011). Im multitemporalen Fall könnten auf diese Weise allerdings nur Flächen, die zu beiden Aufnahmezeitpunkten im Schatten sind, analysiert werden. Da die Ausdehnung dieser Flächen im für die Entwicklung dieses Algorithmus verwendeten UltraCam-X-Datensatz sehr klein ist, wurden die Schattenflächen nicht weiter berücksichtigt. In Zukunft besteht diesbezüglich noch weiterer Forschungsbedarf.

Wie schon zuvor erwähnt, befinden sich die Aufnahmezeitpunkte in verschiedenen phänologischen Jahreszeiten. Dadurch kam es zu weiteren Problemen bei der *Change-Detection-Analyse*. Die photosynthetische Aktivität von Pflanzen befindet sich im Frühsommer am Höhepunkt und nimmt im Laufe der folgenden phänologischen Stufen ab. Aus der Fernerkundungssicht bedeutet das, dass sich die NDVI-Werte verringern. Der NDVI spielt eine tragende Rolle in der entwickelten Methode. Neben der Höheninformation ist er der wichtigste Parameter. Aufgrund der niedrigeren NDVI-Werte in der September-Aufnahme (2007) wurden einige Flächen, die zur „tree to building“-Klasse gehören, fälschlicherweise nicht als solche klassifiziert (siehe Abbildung 27). Aus diesem Grund mussten zusätzliche Nachbarschaftsparameter verwendet werden, um die Ergebnisse zu verbessern.



Abbildung 27:
Teilweise fehlende
Detektion eines
neuen Gebäudes
aufgrund verschiedener
phänologischer
Stufen (SALENTINIG,
2012)

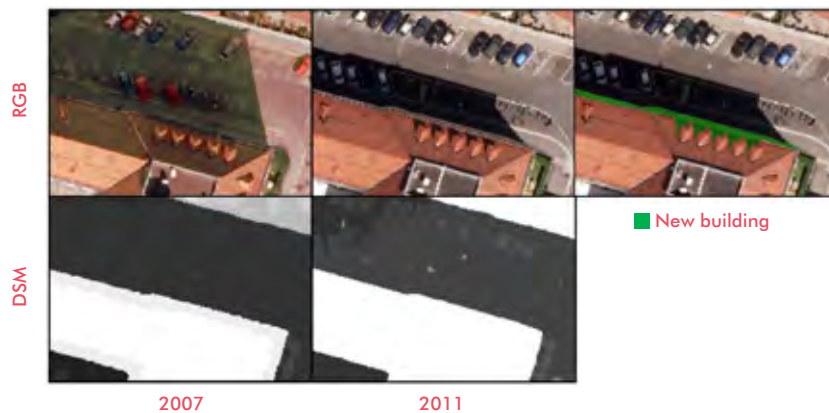


Abbildung 28:
Falsche
Klassifikation
aufgrund VON
DSM-Unterschieden
(SALENTINIG,
2012)



Abbildung 29:
Ein Lastwagen, der
fälschlicherweise als
neues Gebäude
klassifiziert wurde

Die photogrammetrisch erstellten DSMs aus 2007 und 2011 waren qualitativ äußerst hochwertig. Allerdings konnten geringfügige Unterschiede, vor allem an Hauskanten, beobachtet werden. Einige Objekte an Hauskanten wurden falsch klassifiziert, weil die Kriterien für die Klasse „new building“ aufgrund der geringfügig unterschiedlichen DSMs erfüllt wurden (Abbildung 28).

Der Verkehr stellte ein weiteres Problem dar. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der ULTRACAM-X-Daten können kleine Objekte wie Lastwagen oder Autos aufgelöst werden. Lastwagen können ähnliche Objekthöhen wie Gebäude erreichen und deren Oberfläche kann spektral durchaus mit Dachoberflächen verglichen werden. Dadurch wurden einige Fahrzeuge fälschlicherweise als neues Gebäude klassifiziert (siehe Abbildung 29).

Anwendung auf das gesamte Stadtgebiet: Der für zwei Testgebiete entwickelte Algorithmus wurde in weiterer Folge auf das gesamte Grazer Stadtgebiet angewandt.

Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass hauptsächlich relative Werte für die einzelnen Parameter integriert werden. Das hat den Vorteil, dass die Schwellwerte bei der Anwendung auf ein größeres Gebiet nicht neu bestimmt werden müssen. So ist beispielsweise die relative Veränderung des NDVI sowohl für die Testgebiete als auch für das gesamte Untersuchungsgebiet aussagekräftig und kann ohne Adaption verwendet werden.

Die Höheninformation aus den *n*DSMs ist ohnehin nicht variabel, da diese auf dieselbe Weise photogrammetrisch erstellt worden sind. Somit mussten die Parameter Objekthöhe und Höhendifferenz auch nicht für die Change-Detection-Analyse der gesamten Stadt verändert werden.

Wie vorhin präsentiert, wurden für die Detektion von neuen versiegelten Flächen nur die Höheninformation und die Hauptkomponenten vier und fünf aus der Hauptkomponententransformation verwendet. Bei der Anwendung der Methode auf das gesamte Stadtgebiet entstanden dabei große Probleme. Die Verwendbarkeit der Hauptkomponentenanalyse für eine Change-Detection-Analyse hängt stark von den Charakteristika des Untersuchungsgebiets ab. Die Bebauungsstrukturen und deren Veränderungen in den Testgebieten begünstigten eine Verwendung dieser Methode. Die spektralen Eigenschaften der Oberfläche und das Verhältnis von veränderten und nicht veränderten Flächen führten dazu, dass in den Komponenten vier und fünf die neuen versiegelten Flächen stark hervorgehoben wurden. Um großflächig gültige Schwellwerte zu finden, wurde die Hauptkomponententransformation für ganz Graz durchgeführt. Keine der dabei entstandenen Hauptkomponenten lieferte für eine Detektion von versiegelten Flächen brauchbare Ergebnisse. Das Verhältnis von veränderten und nicht veränderten Flächen änderte sich drastisch bei der Betrachtung

des gesamten Datensatzes. Aus diesem Grund ist die Hauptkomponentenanalyse nicht geeignet für die Analyse der Versiegelungsveränderung für das gesamte Grazer Stadtgebiet. Um trotzdem Ergebnisse für Veränderungen der versiegelten Flächen zu liefern, wurde eine *Post Classification Comparison* mit den Klassifikationsergebnissen aus 2007 bzw. 2011 versucht. Die Ergebnisse waren allerdings nicht besonders zufriedenstellend.

Die riesigen Datenmengen, die bei der Bearbeitung des gesamten Stadtgebiets angefallen sind, führten zu weiteren Problemen. Für die Bildsegmentierung wurden die CIR-Daten und die DSMs aus beiden Befliegungszeitpunkten miteinbezogen. Die *Scale-Parameter* mussten deshalb vergrößert werden, um die Rechenzeit einigermaßen in Grenzen zu halten. Der ursprüngliche Plan, die Analyse bezirksweise durchzuführen, konnte nicht umgesetzt werden, da die zur Verfügung stehenden Computer den Rechenaufwand nicht bewältigen konnten. Aus diesem Grund mussten die Bezirke noch in kleinere Teilbereiche unterteilt werden. In Summe wurde das Stadtgebiet für die Detektion von Gebäudeveränderungen in 26 Teilbereiche und für die Detektion von Vegetationsveränderungen in 42 Teilbereiche unterteilt. Nur durch diese Aufteilung des Gebietes und die Vergrößerung des *Scale-Parameters* bei der Segmentierung konnte der Rechenaufwand bewältigt werden. Der veränderte *Scale-Parameter* hatte größere Segmente zur Folge. Somit konnten nicht alle Details so gut wie in den Testgebieten detektiert werden. Für eine gesamtstädtische Betrachtung sind die Ergebnisse allerdings sehr zufriedenstellend.

Ergebnisse: Die Ergebnisse des *Change-Detection*-Algorithmus werden in den folgenden Unterkapiteln präsentiert. Aufgrund fehlender Referenzdaten und der Komplexität der Genauigkeitsbeurteilung von *Change-Detection* Analysen wurde nur ein visuelles „Accuracy Assessment“ durchgeführt.

Gebäudeveränderungen: Das erste Programmpaket des Gebäudealgorithmus widmete sich der Detektion von neuen Gebäuden an vormals unbebauten Stellen. Der Schwellwert für die Höhe wurde auf $> 2,5\text{ m}$ gesetzt. Objekte mit einer geringeren Höhe wurden nicht berücksichtigt, weil sie nicht als Gebäude im traditionellen Sinn bezeichnet werden können. Der Algorithmus lieferte im Grunde sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Aufgrund der hohen Qualität der ULTRACAM-X-Daten konnten auch neue kleine Objekte wie Garagen oder Gartenhütten richtig detektiert werden (siehe Abbildung 30).

Abbildung 30:
Richtig detektierte
neue Gebäude



Abbildung 31:
Ein richtig
klassifizierter
Gebäudezubau



Auch zerstörte Gebäude wurden sehr zufriedenstellend klassifiziert.

Die weiteren Programmabläufe widmeten sich der Detektion von „tree to building“- und „old building to new building“-Objekten. Aufgrund der höheren Komplexität wurden minimal schlechtere Ergebnisse erzielt. Trotzdem wurden die meisten Objekte, die zu einer dieser Klassen gehören, richtig klassifiziert. Abbildung 32 zeigt korrekt detektierte neue Gebäude.

Abbildung 32:
Korrekt klassifizierte
Objekte der Klasse
„old building to
new building“



In den Untersuchungsgebieten wurden nur wenige Objekte fälschlicherweise als neue Gebäude klassifiziert. In den meisten Fällen kann das mit verschiedenen äußeren Bedingungen zu den Befliegungszeitpunkten erklärt werden. Der Swimmingpool des ATG Trainingszentrums im Bezirk Jakomini war im Jahr 2007 leer und im Jahr 2011 mit Wasser gefüllt. Durch diesen künstlich erzeugten Höhenunterschied und die ähnlichen spektralen Eigenschaften von Wasser und Dächern wurden diese Objekte als neue Gebäude klassifiziert (siehe Abbildung 33).

Abbildung 33:
Falsche Klassifikation
aufgrund unterschied-
licher Bedingungen zu
den Befliegungszeit-
punkten



Veränderungen von versiegelten Flächen: Auch der Algorithmus für die Detektion von Versiegelungsveränderungen lieferte für die Testgebiete gute Ergebnisse. Neue versiegelte Flächen wie Straßen wurden sehr zufriedenstellend detektiert. Kleinere Ungenauigkeiten entstanden durch Fahrzeuge auf den Straßen und durch Gebäudeschatten. Abbildung 34 zeigt neue Straßen, die im Untersuchungszeitraum gebaut worden sind.

Durch die hohe Qualität der UltraCam-X-Daten konnten sogar sehr kleine Veränderungen wie Straßenverbreiterungen detektiert werden.

Abbildung 34:
Korrekt klassifizierte
neue Straßen



Abbildung 35:
Korrekt klassifizierte
Straßenverbreiterungen



Vergleich mit Ergebnissen aus einer „Post Classification Comparison“: Um die Ergebnisse des entwickelten Algorithmus zu verifizieren bzw. zu falsifizieren, wurde für ein Testgebiet (Bezirk Jakomini) eine Post Classification Comparison durchgeführt. Hierzu wurden die Klassifikationen der ULTRACAM-X-Daten 2007 bzw. 2011, die auch am Institut für Geographie und Raumforschung

der Universität Graz erstellt worden sind, miteinander verglichen. Die Ergebnisse des vorgestellten Algorithmus zur Detektion von neuen und zerstörten Gebäuden zeigen kleinere Unterschiede zu den Ergebnissen der *Post Classification Comparison*. Im Gegensatz zur *Post Classification Comparison* vermag es die entwickelte Methode, alle möglichen Szenarien der Gebäudeveränderungen zu detektieren. Falls ein Gebäude im Untersuchungszeitraum abgerissen und an der gleichen Stelle ein neues Gebäude erbaut wurde, wird es durch die Post-Classification-Methode nicht als neues Gebäude ausgewiesen.

Der größte Nachteil der Post-Classification-Methode ist, dass die Genauigkeit des Endergebnisses direkt von den Genauigkeiten der Einzelklassifikationen abhängt. Durch die Fehlerfortpflanzung ist die Qualität der Veränderungskartierung schon im Vorhinein begrenzt. Abbildung 35 zeigt ein Beispiel einer falschen Veränderungsdetektion aufgrund der ungenauen Klassifikation eines Zeitpunktes im multitemporalen Datensatz.

Abbildung 36:
Vergleich der CD-
Verfahren



Ein weiteres Phänomen der *Post Classification Comparison* sind sehr schmale, längliche Objekte, die definitiv keine Veränderung darstellen. Da die Objekte (z. B. Gebäude), die sich im Untersuchungszeitraum nicht verändert haben, nicht hundertprozentig identisch sind, bleiben bei der Differenzenbildung der Einzelklassifikationen längliche Artefakte übrig.

Eine gründliche visuelle Interpretation der Ergebnisse (neue und zerstörte Gebäude) beider Methoden wurde für das Testgebiet durchgeführt. Grundsätzlich lieferte der entwickelte *Change-Detection-Algorithmus* bessere Ergebnisse. Das ist einerseits bedingt durch die Abdeckungen aller möglichen Gebäudeveränderungsszenarien und dadurch, dass nur eine Klassifikation notwendig ist, um Ergebnisse zu generieren. Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der jeweiligen *Change-Detection-Methode* für neue Gebäude im Bezirk Jakomini.

Abbildung 37:
Artefakte bei der
Post Classification
Comparison

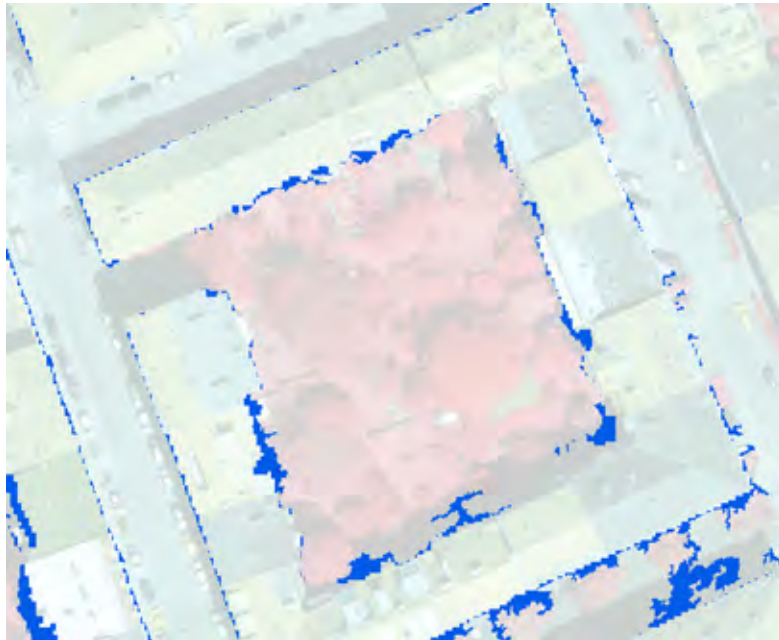


Abbildung 38:
Ergebnisse der
Gebäude-Change-
Detection;
links: Post Classification
Comparison,
rechts: entwickelter
Algorithmus



Conclusio: Urbane Räume verändern sich rasant und im großen Ausmaß. Information über Art und Ort dieser Veränderungen sind sehr wertvoll für verschiedenste stadtgeographische Fragestellungen und ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Stadtentwicklung. Die Fernerkundung eignet sich hervorragend, um diese Informationen zu generieren. Durch die ständige Verbesserung von Fernerkundungsdaten können immer genauere und zuverlässigere Ergebnisse bei *Change-Detection*-Analysen erzielt werden.

Ziel war es, eine *Change-Detection*-Methode zu entwickeln, die gute, akkurate und schnelle Ergebnisse liefert, ohne die Daten beider Aufnahmezeitpunkte einzeln klassifizieren zu müssen.

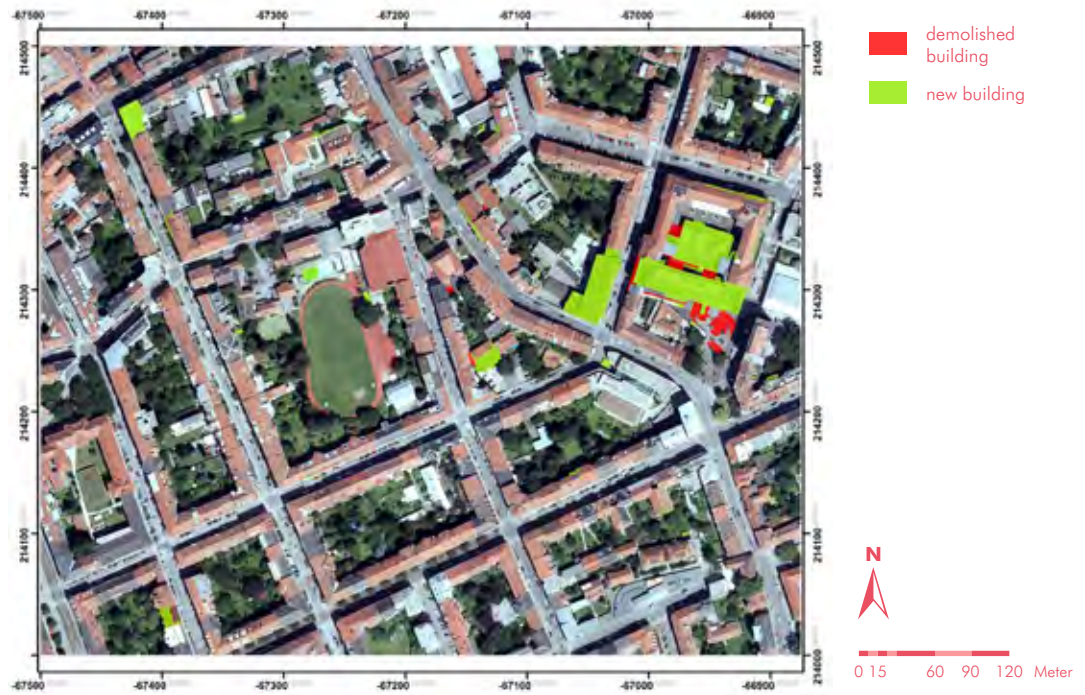
Die zur Verfügung gestandenen UltraCam-X-Daten sind „High End“-Luftbilddaten. Durch die sehr hohe räumliche Auflösung und die Aufnahme sowohl im sichtbaren als auch im nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums des Lichts eignen sie sich hervorragend für die Anwendung für eine *Change Detection* im städtischen Bereich. Nichtsdestotrotz könnte mit einer gezielten Auswahl der Befliegungszeitpunkte das gesamte Potential der Daten ausgeschöpft werden. Vor allem die Umwelteinflüsse wie der Sonnenstand und die verschiedenen Phänologiestadien zu den Aufnahmezeitpunkten agierten als limitierender Faktor für die Genauigkeit der *Change-Detection*-Ergebnisse. Im Falle ähnlicher Aufnahmezeitpunkte und somit ähnlicher Schattenwürfe könnten auch Veränderungen in Schattenbereichen sinnvoll und zufriedenstellend detektiert werden. Des Weiteren könnten auch genauere Aussagen über die tatsächliche Veränderung der Vegetationsstruktur getroffen werden, da sich Bäume und Sträucher in derselben phänologischen Jahreszeit befinden.

Der Algorithmus konnte für die Detektion von Gebäude- und Vegetationsveränderungen problemlos auf das gesamte Grazer Stadtgebiet angewandt werden, weil bei der Entwicklung des Algorithmus darauf ge-

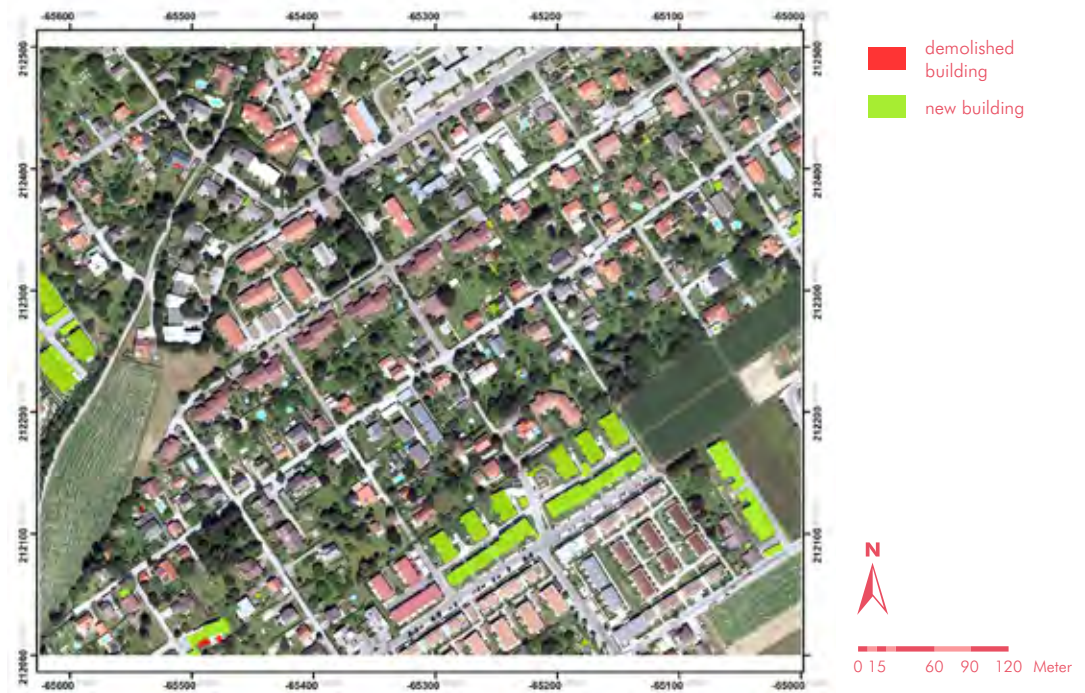
achtet wurde, dass Relativwerte als Schwellwerte für die Parameter integriert wurden. Die für die Testgebiete entwickelte Methode, die sich auf zwei Komponenten einer Hauptkomponententransformation stützt, konnte nicht auf das gesamte Gebiet angewandt werden. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Verwendbarkeit der Hauptkomponentenanalyse stark von der Charakteristik des Untersuchungsgebiets abhängig ist. Das Verhältnis von veränderten und nicht-veränderten Flächen in den Testgebieten ermöglichte zufällig die Nutzung der Information in den Hauptkomponenten zur Detektion von neuen versiegelten Flächen. Für das gesamte Grazer Stadtgebiet war das nicht der Fall. Diesbezüglich besteht zukünftig noch Forschungsbedarf. Die Voraussetzungen für eine sinnvolle Nutzung der Hauptkomponentenanalyse im Hinblick auf eine Detektion von neuen versiegelten Flächen müssen noch eruiert werden. Auch die Extraktion von Versiegelungsveränderungen mittels einer *Post Classification Comparison* führte nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Grund dafür war die unterschiedliche Genauigkeit der beiden Einzelklassifikationen.

Grundsätzlich lieferten die entwickelte Methode und die klassische Methode der *Post Classification Comparison* ähnliche Ergebnisse. Da die Genauigkeit der *Post Classification Comparison* direkt von der Qualität der Einzelklassifikation abhängig und das Ergebnis einer Veränderungsanalyse somit schon im Vorhinein begrenzt ist, kann davon ausgegangen werden, dass die vorgestellte Methode akkuratere Ergebnisse generiert. Des Weiteren werden auch alle möglichen Szenarien von Gebäudeveränderungen abgedeckt. Der Arbeitsaufwand ist bei der vorgestellten Methode sicherlich geringer, da der Prozess nur eine Klassifikation benötigt. Bei der *Post-Classification-Comparison*-Methode ist neben der Klassifikation beider Aufnahmezeitpunkte noch ein GIS-basierter Vergleich der Klassifikationsergebnisse notwendig.

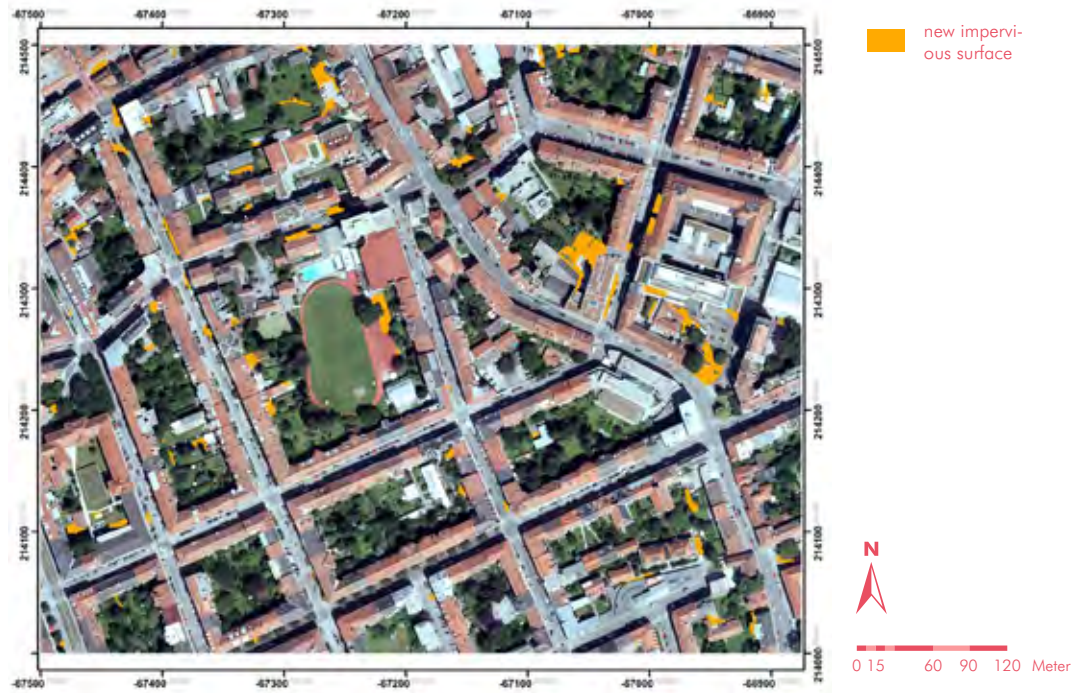
Result of the building change detection – Study area 1



Result of the building change detection – Study area 2



Result of the impervious surface change detection – Study area 1



Result of the building change detection – Study area 1



3. KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN

Bei allen 3 Thermalbefliegungen wurden auch begleitende Messkampagnen am Boden durchgeführt, die mittels Fesselballonsondierungen ergänzt wurden. Am besten waren die meteorologischen Rahmenbedingungen bei der 1. Befliegung vom 2. auf den 3.10.1986. Im Oktober 2004 gab es überraschenden Talnebeleinfeld auch im Stadtgebiet; ein Morgenflug war deshalb nicht möglich. Im Jahre 2011 erschwerten logistische Probleme die Durchführung der Fesselballonsondierungen, da eine maximale Steighöhe von 200 m aus Gründen der Flugsicherung vorgegeben wurde. Im Jahre 1986 konnten ungehindert bis ca. 500 m ü. Grund Messungen durchgeführt werden. Bei der Befliegung im Dezember 2011 war zwar die Temperaturverteilung innerhalb des Stadtgebietes recht typisch, nur die Überwärmung im Nordwesten mit dem „Düseneffekt“ entsprach nicht ganz den Erwartungen, da der Murtalauswind erst später einsetzte bzw. infolge aufziehender Bewölkung nicht so gut entwickelt war.

Insgesamt zeigt sich, dass für derartige Thermalbefliegungen die Prognose der meteorologischen Verhältnisse (bis hin in Details wie Nebelverhältnisse) einerseits und die Abstimmung mit den zeitlichen Optionen der Flugunternehmung eine große Herausforderung darstellt. Grundsätzlich eignet sich andererseits der Herbst sehr gut für solche Messkampagnen und die Zuverlässigkeit der Wetterlagen ist besser als etwa im Sommer, wo nächtliche Wärmegewitter bzw. Restbewölkung von Gewittern empfindlich stören können. Ein Aspekt der Unsicherheit verbleibt mit der hohen Nebelbereitschaft am Grazer Flughafen, womit dann das Risiko für Behinderungen für einen Start auftreten können (eine gewisse Mindestsichtweite ist auch für Messflugzeuge erforderlich).

Die Durchführung der Messkampagnen in allen Fällen erfolgte mit einer räumlichen Aufteilung für 3–4 Fahrzeuge – jeweils mit einem Thermistorfühler ausgestattet mit einer Fahrzeit, die sich parallel mit der jeweiligen Befliegung deckte. Weiters wurden vor allem im Dezember 2011 auch Infrarotmessungen durchgeführt, um noch mehr Referenzwerte für die Korrektur der Flugzeugmessungen zu erhalten. Als Standort für die Fesselballonsondierungen fungierte jeweils ein Platz im Wasserwerk Andritz im Norden von Graz.

3.1 KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN 1986 (LAZAR ET AL., 1994)

Gleichzeitig mit der Scannerbefliegung erfolgten Messfahrten durch Messtrupps auf vordefinierten Fahrtstrecken, um in Abständen von ca. 200 Meter Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zu messen. Die Windrichtung wurde ebenfalls beobachtet. Die Messergebnisse wurden in vergrößerte Teilausschnitte der OK 1:50.000 eingetragen. Zusätzlich erfolgten durch den militärischen Wetterdienst am Fliegerhorst Nittner südlich von Graz drei Radiosondenaufstiege, welche genauen Aufschluss über Temperatur- und Druckverteilung in allen Höhenlagen (350 bis 4000 m) zu den Messterminen geben. Die Bodenmessdaten und Radiosondenwerte sind für eine genaue Interpretation der Thermalinfrarotdaten unerlässlich.

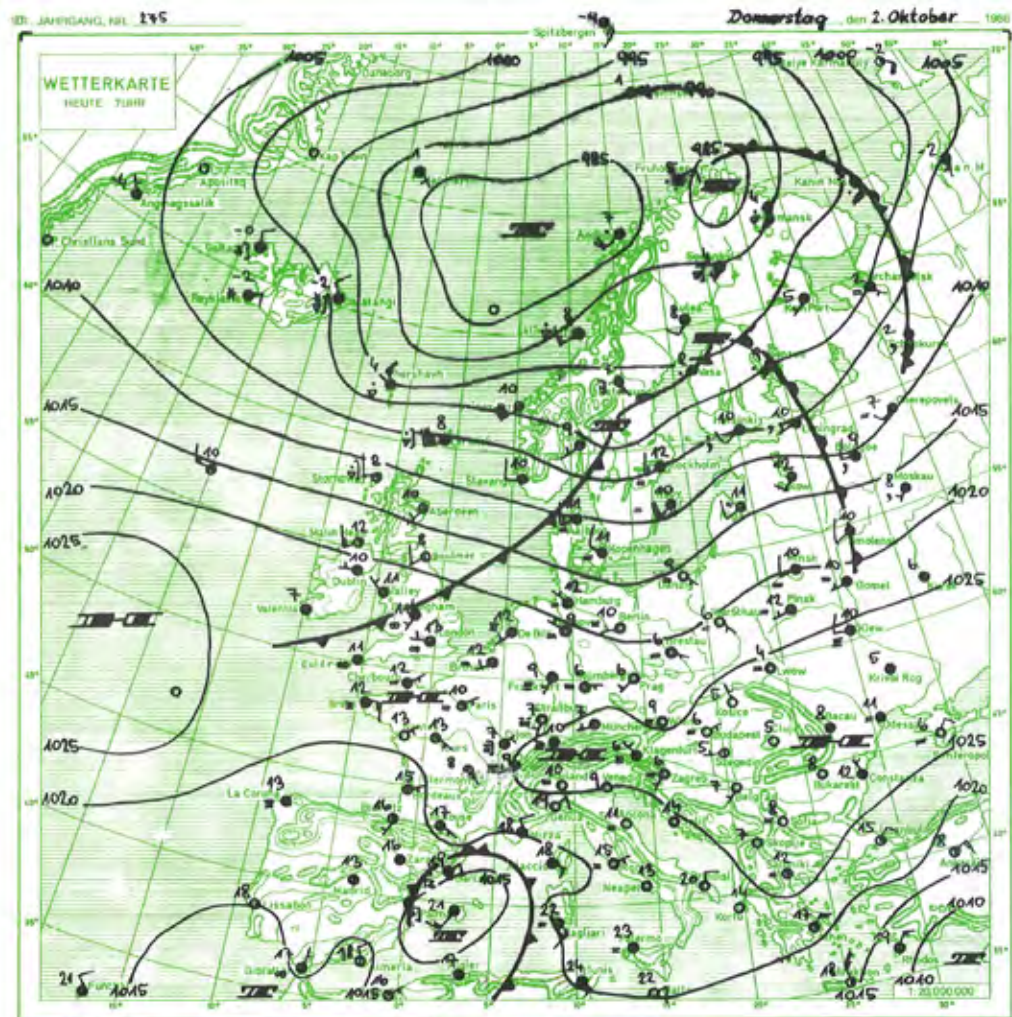
3.1.1 WETTERLAGE ZUM AUFNAHMEZEITPUNKT 1986

Die Voraussetzungen für eine Thermalbefliegung werden bei stabilen Hochdruckwetterlagen im Herbst am besten erfüllt, wobei die einzige Gefahr in der möglichen Tal- und Hochnebelbildung besteht. Diese ist bei Wetterlagen mit dem Hochdruckschwerpunkt im östlichen Mitteleuropa am größten, da mit bodennahen Strömungen aus östlichen bis südöstlichen Richtungen rasch alternde Luftkörper herangeführt werden, welche sich zusätzlich am südöstlichen Alpenrand stauen. Für die Befliegung am 2. und 3. Oktober 1986 waren die Bedingungen geradezu ideal: Eine zonale Hochdruckbrücke von den Britischen Inseln bis zu den Karpaten im Bodendruckfeld wurde von einem Höhenhochkeil aus dem Mittelmeerraum überlagert (Abbildung 1).

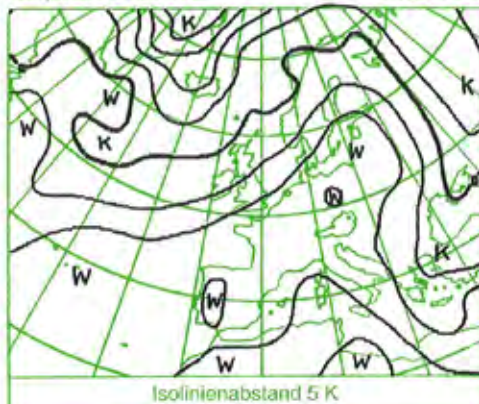
In der dabei herangeführten Warmluft (0-°C-Grenze in ca. 4000 m) sank infolge des freien Absinkens im

Hoch die relative Feuchte auf Werte zwischen 20 und 30 %. Hinsichtlich der Strömungsverhältnisse herrschten am 2. Oktober noch mit der „Vorderseitenstruktur“ einer im Norden Mitteleuropas sich nähernden Kaltfront südliche Winde vor, während am 3. Oktober im Zuge der Bodendruckänderung mit Verlagerung des Hochdruckschwerpunktes in Bereiche nordwestlich unseres Raumes (Abbildung 2) eine markante Winddrehung auf West bis Nordwest erfolgte. Diese westlichen Winde führten zu einer Warmluftadvektion im Bereich zwischen 500 und 2000 m, was eine Verstärkung der Inversion zwischen Mariatrost und Platte von 13 K am 2. auf 15 K am 3. Oktober (6 Uhr) bewirkte. Selbst der Schöckl (1442 m) war noch um 3 K wärmer.

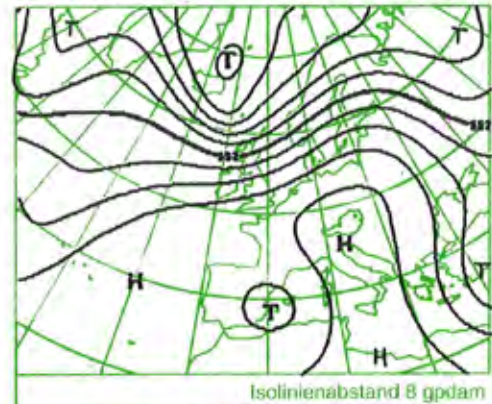
Abbildung 1:
Bodenwetterkarte
der Zentralanstalt
für Meteorologie
und Geodynamik in
Wien – Hohe Warte
vom 2. Oktober 1986,
7 Uhr (ergänzt durch
die Temperaturverteilung
in der 850-hPa-
Fläche und die absolute
Topographie in der
500-hPa-Fläche für
1 Uhr)



Temperatur in 850 hPa heute 1 Uhr



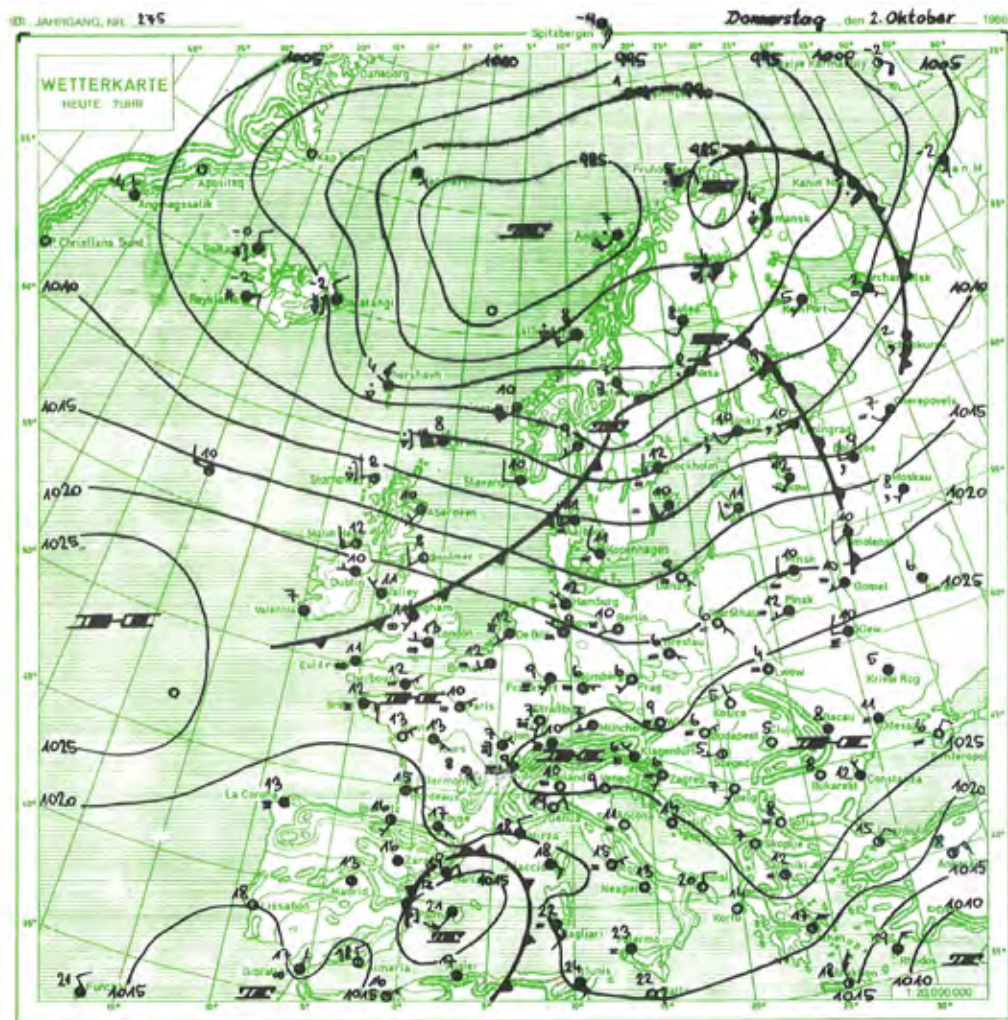
ABS - TOP 500 hPa heute 1 Uhr

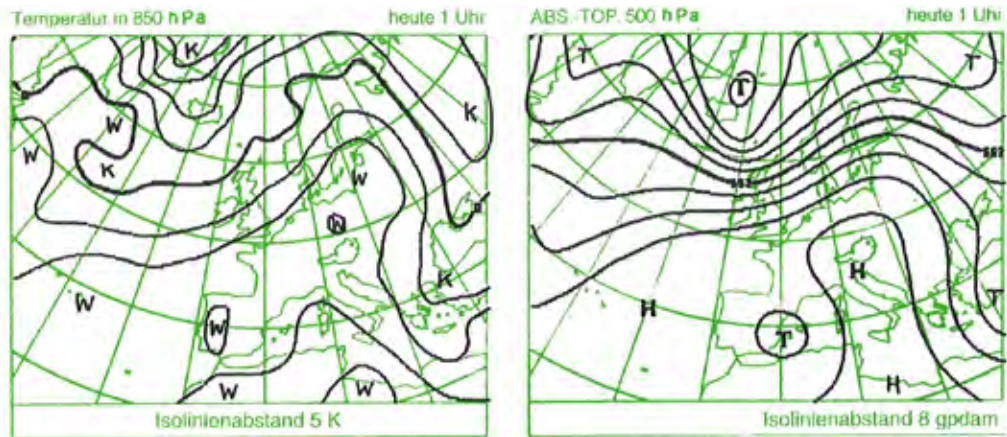


Zusätzlich zu den an den Flugterminen durchgeführten Sondaufstiegen am Thalerhof wurde noch am 3. Oktober am Vormittag ein Messflug mit einem Motorsegler durchgeführt. Der in Abbildung 3 dargestellte vertikale Temperaturverlauf zeigt um 6 Uhr eine kräftige Bodeninversion mit 12 K bis ca. 400 m über Grund (wärmste Zone demnach in der Höhe des Plabutschgipfels), die im Laufe des Vormittags abgebaut wurde. Die Mischungsschicht steigt dabei rasch auf über 100 m an und lässt sich zum 13-Uhr-Aufstieg mit ca. 600 m veranschlagen, denn ab dieser Höhe

(950 m NN) sinkt die relative Feuchte (Abbildung 4) von 45 % auf ca. 30 % ab, und die Temperatur bleibt bis ca. 1200 m NN annähernd konstant. Die Mischungsschicht selbst ist durch eine praktisch trockenadiabatische Temperaturabnahme charakterisiert; innerhalb dieser Grundsicht dominieren Winde aus südlichen Richtungen (Murtaleinwind mit überlagertem Antirandgebirgswind aus Südost), darüber stößt man wieder auf modifizierte Gradientwinde aus westlichen Richtungen.

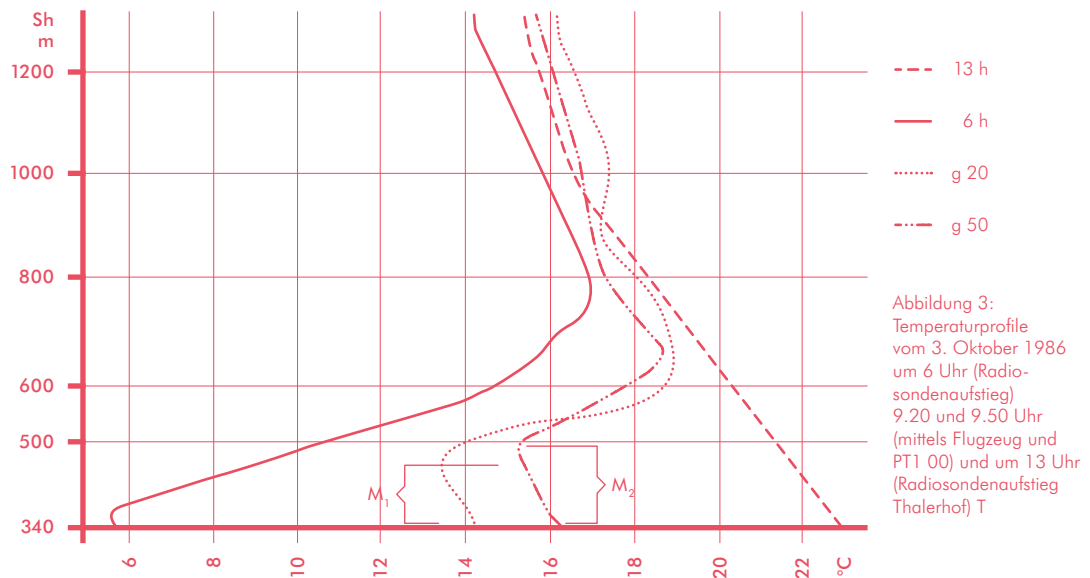
Abbildung 2:
Bodenwetterkarte der
Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik in Wien-
Hohe Warte vom 3.
Oktober 1986, 7 Uhr
(Zu beachten ist die
Schwerpunktverlage-
rung des Bodenhochs
nach NW)





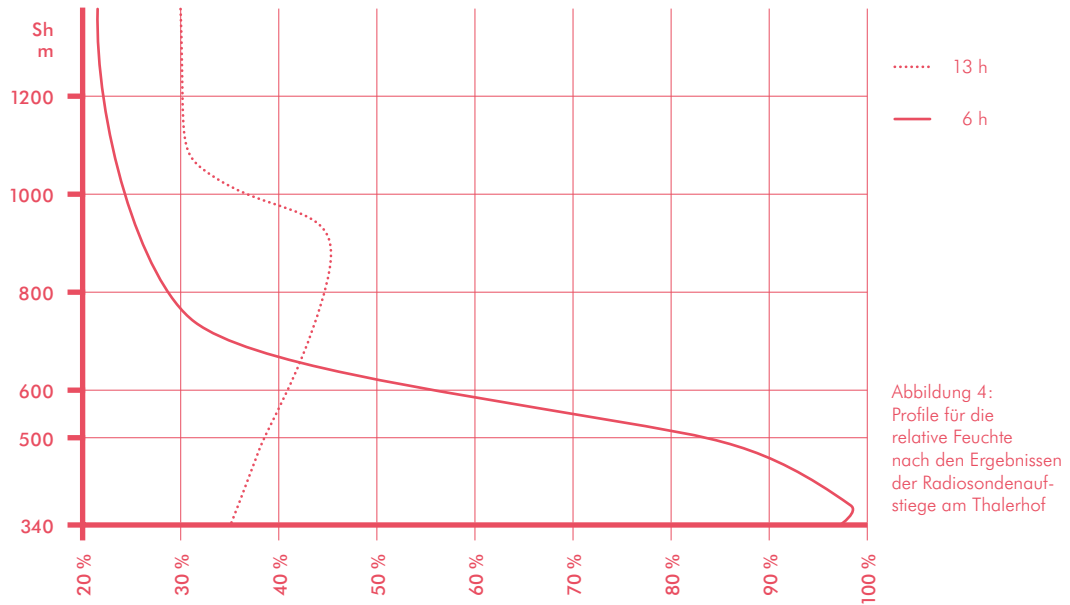
Abgesehen von leichter Cirrusbewölkung (maximal 3/8) war in der Messnacht vom 2. zum 3. Oktober die Ausstrahlung kaum behindert. Als Folge der kräftigen Abkühlung bildeten sich in den Seitentalbecken

sehr seichte Bodennebelfelder aus. Auch die Einstrahlung tagsüber wurde nur durch vereinzelte Girren geringfügig gemindert; zum Zeitpunkt des Mittagsfluges war es wolkenlos, und die Sicht betrug etwa 30 km.



Zu beachten ist der fortschreitende Abbau der Bodeninversion (mit Talnebel, deshalb der kleine Knick um 6 Uhr) mit den Mischungsschichthöhen M und M2;

um 13 Uhr herrscht eine annähernd trockenadiabatische Schichtung bis ca. 950 m über Grund, darüber ist noch ein kleiner Rest.



Die Zunahme der relativen Feuchte innerhalb der Grundschicht um 13 Uhr deckt sich recht gut mit den zugehörigen Temperaturprofilen.

3.2 KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN 2004

3.2.1 ERLÄUTERUNGEN ZUR WETTERLAGE VOM 24.10.2004 (BERLINER WETTERKARTE):

Nachdem am Vortag, dem 23.10.2004, eine Warmfront Mitteleuropa passiert hatte, verstärkte sich der Hochdruckeinfluss weiter, so dass die Voraussetzungen für eine Thermalbefliegung als sehr günstig einzustufen waren. Selbst für das Bodendruckfeld (24.10.2004) waren Bedingungen prognostiziert, die nur eine eingeschränkte Talnebelbildung erwarten ließen (z. B. südliches Grazer Feld).

Die Wetterkarte vom 24.10. für das 500-hPa-Niveau (Abbildung 5) zeigt nun, dass der Alpenraum mit unserem Messgebiet im Hochkeil liegt, wobei mit Strömungen aus dem Sektor W bis SW relativ und sehr milde Luft (Luftmasse x S, subtropische Warmluft, 0 °C Grenze bei ca. 3800 m!) herangeführt wird.

Abbildung 5:
Höhenwetterkarte
vom 24.10.2004
(Quelle: Berliner
Wetterkarte)

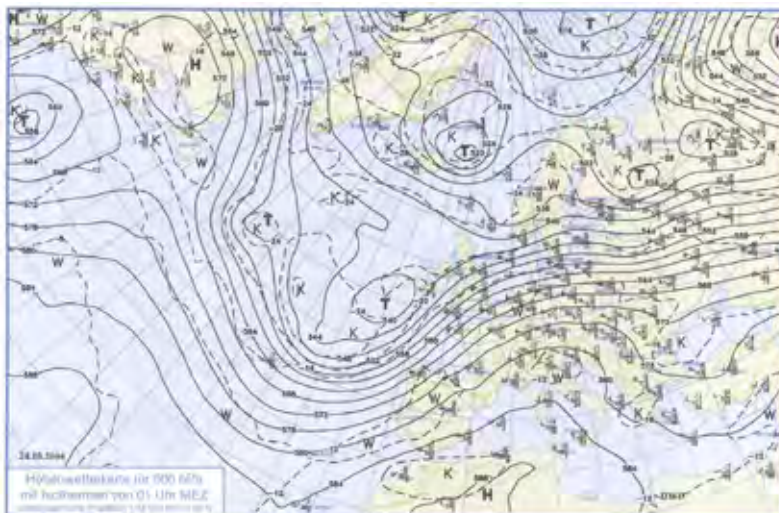
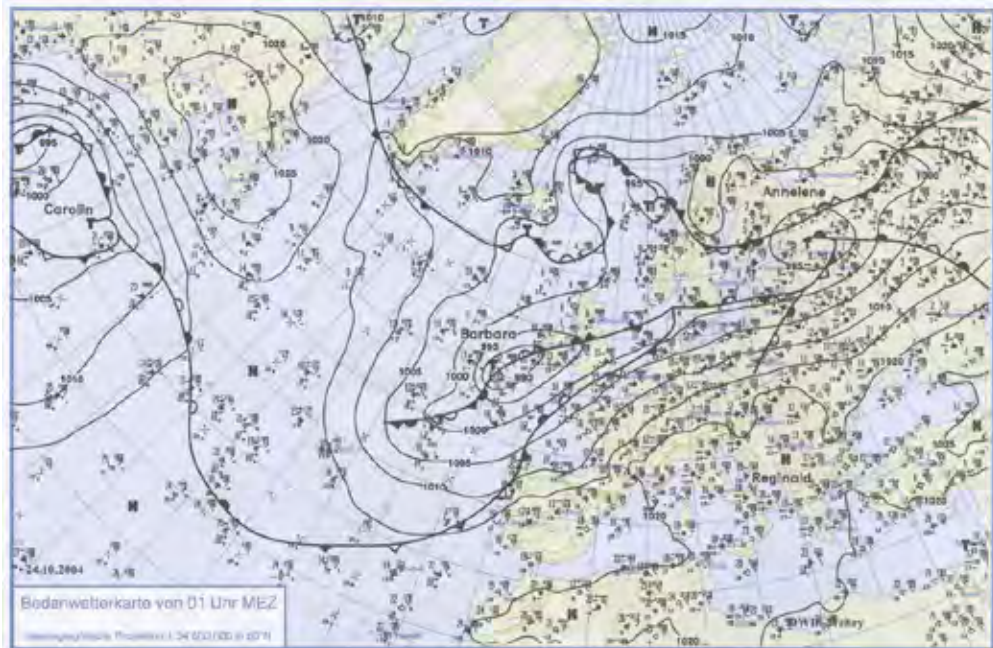


Abbildung 6:
Bodenwetterkarte
vom 24.10.2004
(Quelle: Berliner
Wetterkarte)



Die Bodenwetterkarte (Abbildung 6) zeigt ein ausgedehntes Hoch über Südeuropa bis zu den Alpen und der Balkanhalbinsel; die Fronten einer Tiefdruckrinne von den Britischen Inseln bis Finnland ziehen weit im Norden von uns vorbei. Demnach waren auch bezüglich der Bodenverhältnisse bis auf Unsicherheiten in der Nebelbildung die Voraussetzungen für eine Flugkampagne erfüllt. Für die Prognostik wurden im Übrigen sämtliche Vorhersagekarten der GFS-Modelle verwendet und klarerweise auch die Auskünfte von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Zweigstelle Steiermark (ZAMG) am Thalerhof (Aladinmodell) eingeholt. An dieser Stelle sei besonders Herrn Mag. Dr. Alexander Podesser für die fruchtbare Zusammenarbeit gedankt, ohne die die Messkampagnen nicht durchgeführt hätten werden können.

Die Radiosondierung vom Sonntag, dem 24.10. um 5 Uhr zeigt, dass die bei uns lagernde Luftmasse im unteren Bereich noch relativ feucht war und der Absinkprozess sich erst bis etwa 800 m Seehöhe – demnach knapp über dem Plabutsch – durchgesetzt hat (rel. Feuchte bei ca. 70 %, darüber bis 1000m rasch abfallend auf 40 %!). Wie aus dem Diagramm mit dem Taupunkt bzw. der Tabelle entnommen werden kann, sinkt die relative Feuchte bis auf 3–7 % in ca. 3000 m Seehöhe ab, verharrt dann weiter oberhalb bei 20–30 %. Die Temperatur weist eine Inversion auf,

deren Obergrenze bei 1100 m liegt, wo eine Temperatur von 16 °C gemessen wird. Die Inversion zeigt im Übrigen an der Basis eine Isothermie zwischen 600 m und 800 m (um 12,4 °C). Darüber sinkt die Temperatur recht langsam und die 0-°C-Grenze wird erst in ca. 3800 m erreicht.

Die Windrichtungen weisen auf eine Anströmung aus vorherrschend westlicher Richtung hin (Sektor W bis WNW), wobei die Windgeschwindigkeiten zumindest bis mittlere Höhen (ca. 500-hPa-Niveau) eher schwach bleiben, was wiederum die Absinkeffekte begünstigt hat.

Ursprünglich war vorgesehen, parallel zum Morgenflug auch ein umfangreiches Messfahrtprogramm am Boden durchzuführen, das jedoch infolge des überraschenden advektiven mächtigen Talnebels im Raum Graz in einem eingeschränkten Rahmen erfolgte. Ein Team führte eine Messfahrt im Westen von Graz durch, ein weiteres im zentralen Teil von Graz und eines betreute die Seitentäler im Norden und Osten von Graz. Letzteres lieferte die interessantesten Ergebnisse, da die Route auch ein Vertikalprofil nach Kalkleitenmöstl beinhaltete. Auch die Temperaturergebnisse waren abschnittsweise sensationell: In den ansonsten immer recht kalten Seitentälern war es diesmal infolge des advektiven Hochnebels aus Osten um 1 bis 1,5 K wärmer als im Stadtzentrum. Die niedrigsten Temperaturen wurden im Norden von Graz – Raum Andritz/St. Veit – jeweils in den Abschnitten mit noch fehlendem Nebel gemessen. Jedoch waren auch hier die Temperaturen nur wenig niedriger als im Zentrum, da dieses von der Talnebelkaltluft aus dem Grazer Feld erfasst worden war und damit jegliche Wärmeinseleffekte unterbunden wurden.

3.2.2 BALLONSONDIERUNGEN

Die Ballonsondierungen wurden von Pilz Umwelttechnik bzw. von der ZAMG am Flughafen Graz-Thalerhof (Abbildung 7) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messkampagne sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Am Standort der Fa. Roche nahe der Reininghausgründe wurde mit dem ersten Aufstieg am 24.10. um 4:30 begonnen, wobei zu diesem Zeitpunkt die Nacht noch vollkommen klar und die Sicht als ausreichend zu beurteilen war. Der Murtalauswind war aber in dieser Nacht ausnahmsweise nur ab ca. 300 m Seehöhe voll entwickelt, darunter waren die Windgeschwindigkeiten sehr gering. Wir erkennen aus dem

Diagramm mit den Windverhältnissen, dass in der Folge die Geschwindigkeiten weiter nachlassen, was an der Talbasis das Eindringen von Kaltluft mit Nebel aus dem Grazer Feld (Abbildung 8 und Abbildung 9) stark begünstigt. Bei nun schwachen südlichen Winden – offensichtlich als Folge einer Anströmung advektiv aus dem ungarischen Raum, wo sich überraschenderweise ein Hochnebefeld entwickelt hatte – erfasste nun die Nebelkaltluft bald den gesamten Grazer Raum. Damit wurde auch klar, dass eine Befliegung zum Morgentermin wie geplant nicht durchführbar war, auch aus technischer Sicht nicht, denn das Flugzeug hätte keine Starterlaubnis erhalten.

Abbildung 7:
Lage der Ballon-
sondierung am
24.10.2005

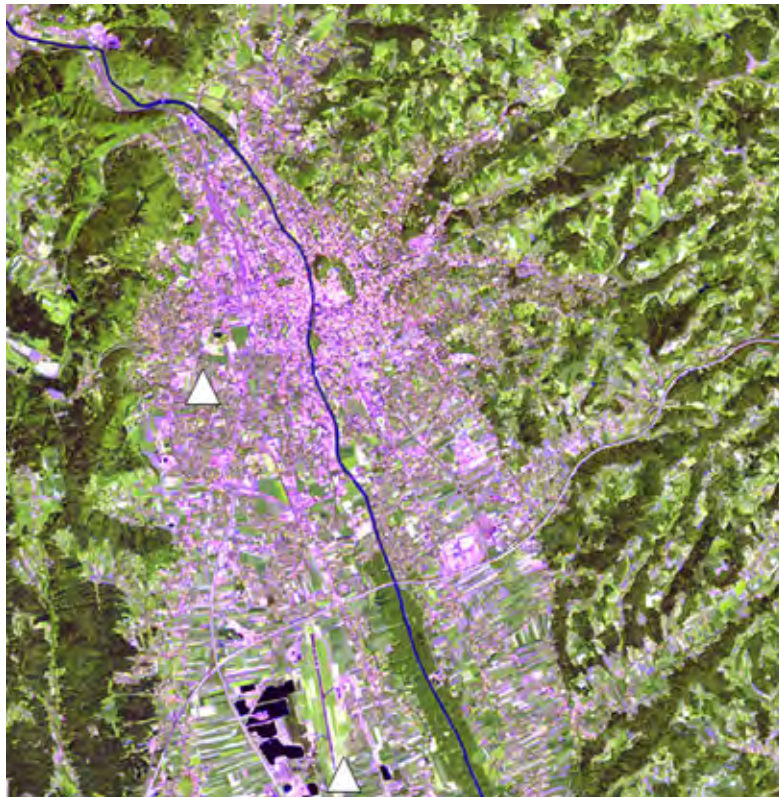


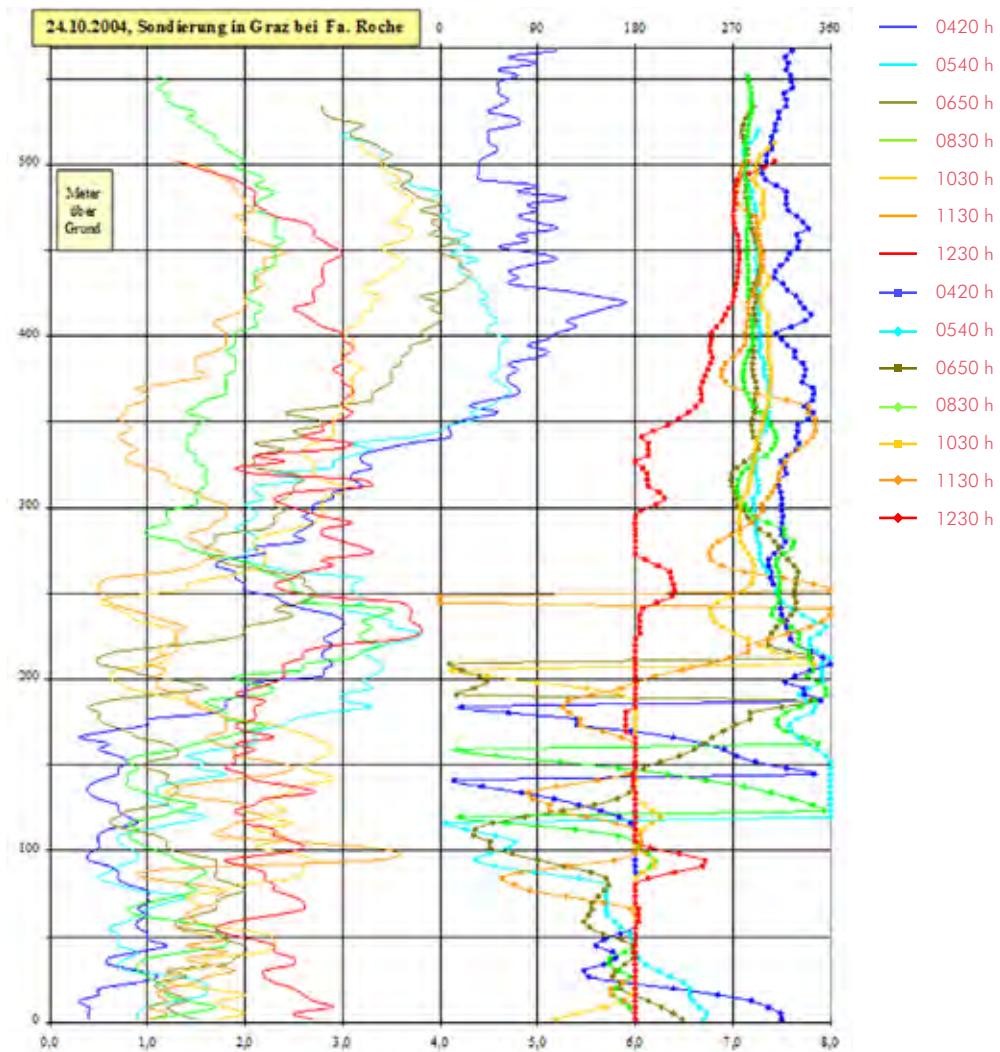
Abbildung 8:
Ballonsondierung
mit Eindringen von
Nebel aus dem Grazer
Feld (Aufnahme K.
Hubeny, 08.39 Uhr)



Abbildung 9:
Talnebelgrenzsituation
in St. Veit (Aufnahme
K. Hubeny, 08.04 Uhr)



Abbildung 10:
Ballonsondierung
am 24.10.2004 –
Windverhältnisse

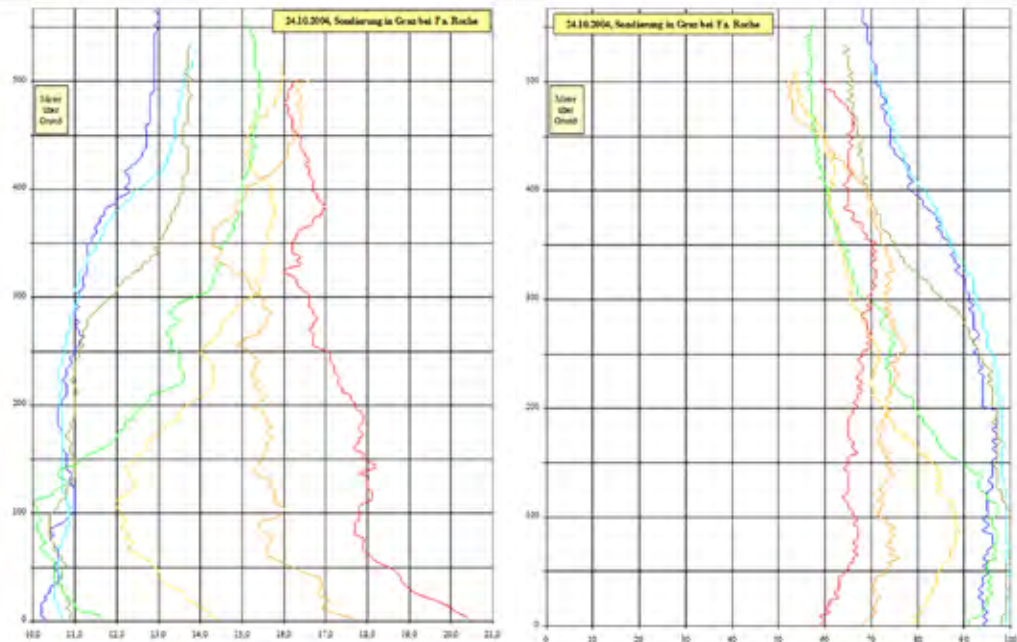


Die vertikalen Temperaturverhältnisse (Abbildung 11) zeigen in Übereinstimmung mit der Radiosondierung (Abbildung 12), dass eine mächtige Isothermie bestand, die dann in eine freie Inversion mit einer Mischungsschicht von ca. 100 m (Aufstieg von 8:30) einen klaren Hinweis auf die Nebelmächtigkeit liefert. Demnach war die Nebelobergrenze bei ca. 450 m, wobei bei der Messfahrt von 5 bis 8 Uhr gut beob-

achtet werden konnte, dass die Nebelobergrenze gegen Norden hin (Andritz) deutlich anstieg und ein Niveau von ca. 530 m erreichte. Ferner war im Osten von Graz ein Hochnebelfeld, das zögernd die gesamten Seitentäler erfasste, wodurch infolge der Gegenstrahlung dort ein höheres Temperaturniveau herrschte als im Stadtgebiet von Graz.

Abbildung 11:
Ballonsondierung
am 24.10.2004 –
Temperaturverhältnis-
se (links), und Feuchte-
verhältnisse (rechts)

— 0420 h
— 0540 h
— 0650 h
— 0830 h
— 1030 h
— 1130 h
— 1230 h



Im weiteren Verlauf setzt mit der Nebelauflösung eine Erwärmung ein und die Inversion wird sukzessive abgebaut, bis schließlich der 12:30-Aufstieg eine nahezu durchgehende Durchmischung zeigt, nur in ca. 320 m ist noch ein Rest einer freien Inversion angedeutet, wobei die Zunahme von 1 K nicht überbewertet werden darf.

Die Inversion selbst war beim 8:30-Aufstieg noch am stärksten und erzielte ein Ausmaß von nahezu 5 K. Die relative Feuchte (Abbildung 11) nahm noch in der Inversion auf Werte um 70 % ab – was im Übrigen sehr gut mit der Radiosondierung übereinstimmt – später dann sogar bis auf 60 %. Bemerkenswert ist ferner bei den Ergebnissen der relativen Feuchte, dass die Grundsicht im Raum Graz auch noch bei der 12:30-Sondierung sehr gut daran erkennbar ist, dass die relative Feuchte noch bis zur Obergrenze auf ca. 70 % zunimmt, und darüber deutlich wieder abnimmt. Die Grundsicht weist demnach eine Mächtigkeit

von 350 m auf, was für die Mittagsbefliegung dann von Bedeutung sein wird.

Bezüglich der Windverhältnisse können aus dem beiliegenden Diagramm (Abbildung 10) eindrucksvoll die Gegensätze zwischen den Bedingungen in der Grundsicht einerseits und den gradientbedingten übergeordneten Strukturen andererseits unterschieden werden. Während in den ersten 200 m durchwegs schwache südliche, teils aber auch richtungsuneinheitliche Winde verzeichnet werden, herrschen darüber Winde aus dem Sektor West bis NW vor, wobei die Windgeschwindigkeiten beim 1. Aufstieg um 4:30 noch 4–5 m/s erzielten; später sanken dann die Werte auf 2–3 m/s ab. Bemerkenswert gut ist auch die Übereinstimmung mit dem Anstieg der Grundsicht zum 12:30-Termin, da die südlichen Winde nun eine Vertikalerstreckung von nunmehr 350 m aufwiesen.

Der weitere Verlauf ab 22 Uhr war durch einzelne Wolkenfelder gekennzeichnet, die dann ab Mitternacht, als die Kampagne schon vorüber war, auch stärker wurden und schließlich gegen Morgen wieder verschwanden. Die Gegenstrahlung aus der Atmosphäre wurde durch die Bewölkung in mittlerer Höhe (As- und Ac-Schichtwolken als Zeichen einer Erwärmung in der Höhe) etwas erhöht und damit die Abkühlung der Luft gebremst. Dies lässt sich an fast allen Stationen nachweisen. Mit der Befliegung wurde demnach ein Status quo von ca. 22 Uhr erhoben, was wiederum ein Vorteil war, denn ansonsten wäre bei weiterer Abkühlung ein Korrekturfaktor mit einem Vergleich der Ausgangs- und Endtemperatur bei der Messkampagne zu erheben gewesen.

Abbildung 13:
Berliner Wetterkarte
mit der Wetterlage
vom 20.12.2011
im 500-hPa-Niveau,
01:00 Uhr (Quelle:
Berliner Wetterkarte)

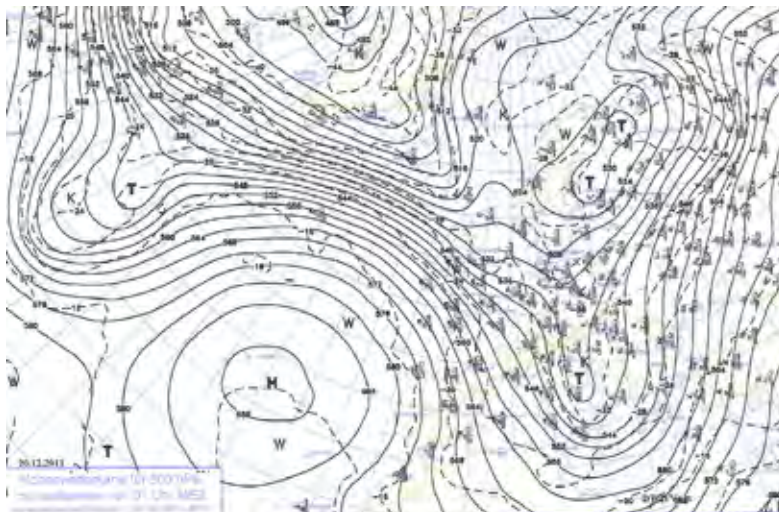


Abbildung 14:
Berliner Wetterkarte
mit der Wetterlage
vom 20.12.2011
im 850-hPa-Niveau,
01:00 Uhr (Quelle:
Berliner Wetterkarte)

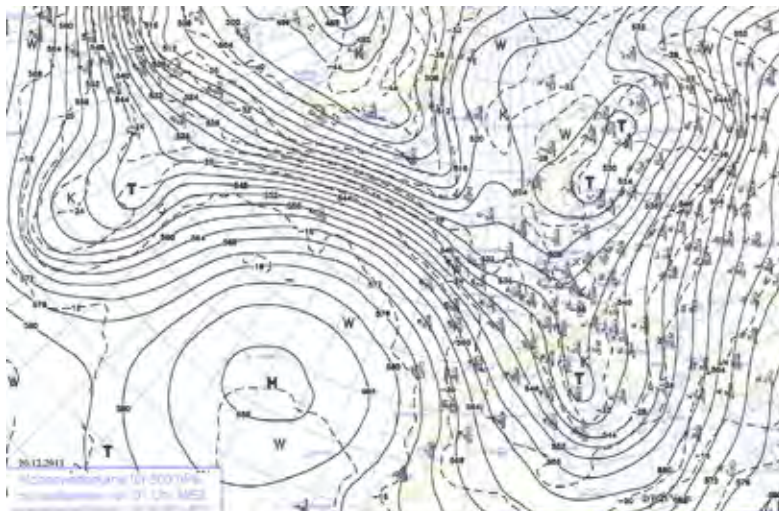
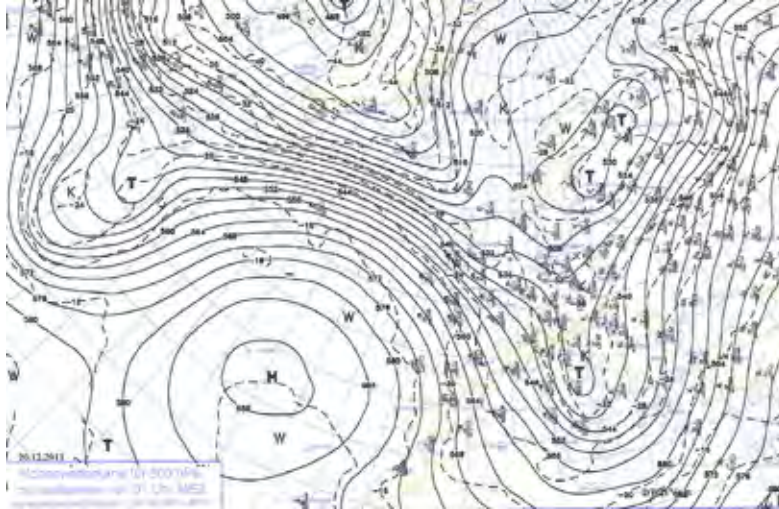


Abbildung 15:
Berliner Wetterkarte
mit der Wetterlage
vom 20.12.2011,
13:00 Uhr (Quelle:
Berliner Wetterkarte)



Der Verlauf an den Stationen in Graz: Nach einem klaren Morgen mit Werten von -5 bis -7°C (in der Innenstadt um $-2/-3^{\circ}\text{C}$) erwärmt sich die Luft infolge des niedrigen Sonnenstandes (Wintersonnenwende am 21.12.) nur mäßig bis auf $2-3^{\circ}\text{C}$. Der Wind bleibt entsprechend der Jahreszeit schwach mit Murtaleinwind mit einer Geschwindigkeit mit $0,5$ bis 2 m/s – nur am Schlossberg auch bis 3 m/s . Gegen 18 Uhr setzt planmäßig mit zunächst geringer Windgeschwindigkeit der Murtalauswind ein. Er erreicht dann in Raach und am Schlossberg Werte von $3-4\text{ m/s}$, steigert sich aber nicht mehr weiter, denn sehr häufig erzielt er in der zweiten Nachthälfte Werte von ca. 5 m/s . Wir konnten dies auch am eher sehr schwachen Düseneffekt im Bereich Weinzötlbrücke beobachten, denn hier werden bei typischer Ausprägung des Murtalauswindes Werte von wenigstens $2-3\text{ m/s}$ gemessen.

Die Temperaturen an den Stationen sanken bis auf ein Niveau von -4 bis 0°C , wobei die höchsten Werte im Zentrum mit der Station Graz Mitte erzielt wurden ($0-0,5^{\circ}\text{C}$) und die niedrigsten in Mariatrost (-6°C) bzw. im Becken von Thal (bis -5°C). Die anderen Stationen wie Don Bosco und Graz Nord schwankten zwischen -2 und -3°C , wobei sich an der Station Graz Nord auch in Bodennähe im weiteren Verlauf wärmere Luft durchgesetzt hat (verspäteter Düseneffekt?).

Am 21.12. setzte sich vor allem in der Höhe – also auch an der Station Plabutsch – wärmere Luft durch. Die Stadtstationen reagierten ohne Veränderung zum Vortag mit Maxima von $2-3^{\circ}\text{C}$ und geringer Bewölkung tagsüber.

Die vertikalen Temperaturunterschiede hielten sich in engen Grenzen, zumal ja die Kaltluftadvektion keine größeren Inversionen zuließ. Im Gegensatz zum 2./3.10.1986, wo Warmluftadvektion mit einem ausgeprägten Hoch eine große Rolle spielte und Inversionen bis zu 13 K auftraten (2°C Mariatrost, 15°C Platte), waren es diesmal nur etwa $4-5\text{ K}$, wobei die höchsten Temperaturen schon in den ersten $100-200\text{ m}$ über Grund auftraten, wie auch die Sondierungen bestätigten. Die Station Plabutsch registrierte jedenfalls schon tiefere Temperaturen als weite Teile des Stadtgebietes. Demnach beschränkte sich die warme Hangzone, die ja 1986 so auffällig in Erscheinung

trat, nur auf den unteren Abschnitt des Plabutsch. Im Riedelland des Ostens waren die oberen Riedelniveaus nicht begünstigt, auch dort waren im Wesentlichen die Unterhänge bevorzugt.

Bezüglich der relativen Feuchte wurden die Werte der Talstation Graz Nord und der Station Schlossberg herangezogen. Sie zeigen, dass wir immerhin Unterschiede zwischen 85–90 % an der Talsohle und 65–70 % rel. Feuchte im Riedelniveau zu verzeichnen hatten. Demnach waren die Verhältnisse für eine Thermalkampagne günstig, denn je trockener die Luft, desto weniger Einfluss auf die Infrarotmesswerte für den Sensor im Flugzeug.

Bezüglich der Windverhältnisse ist noch anzumerken, dass sich Flurwinde im Süden der Stadt bis weit über das Stadtzentrum hinaus gut entwickeln konnten, zumal der Murtalauswind nicht so stark ausgeprägt war. Die Wärmeinselintensität von ca. 4 K (bis zu den Seitentalbecken 6–7 K) reichte auch dafür hinreichend aus. Einige Stationsdaten sind in einem Diagramm zusammengefasst, wobei sowohl an der Station Weinzöttl als auch an der Station Schloßberg der Murtalauswind mit 2–4 m/s vertreten ist. An der Talstation Graz Nord wurden im selben Zeitraum nur noch ca. 0,5 bis 1,5 m/s registriert. Selbst am Plabutsch, der sonst sehr gut auf den Murtalauswind anspricht, erreicht nur Werte von 3–4 m/s, was möglicherweise auch auf die Bewölkungseinflüsse im Einzugsgebiet im Oberen Murtal zurückzuführen war.

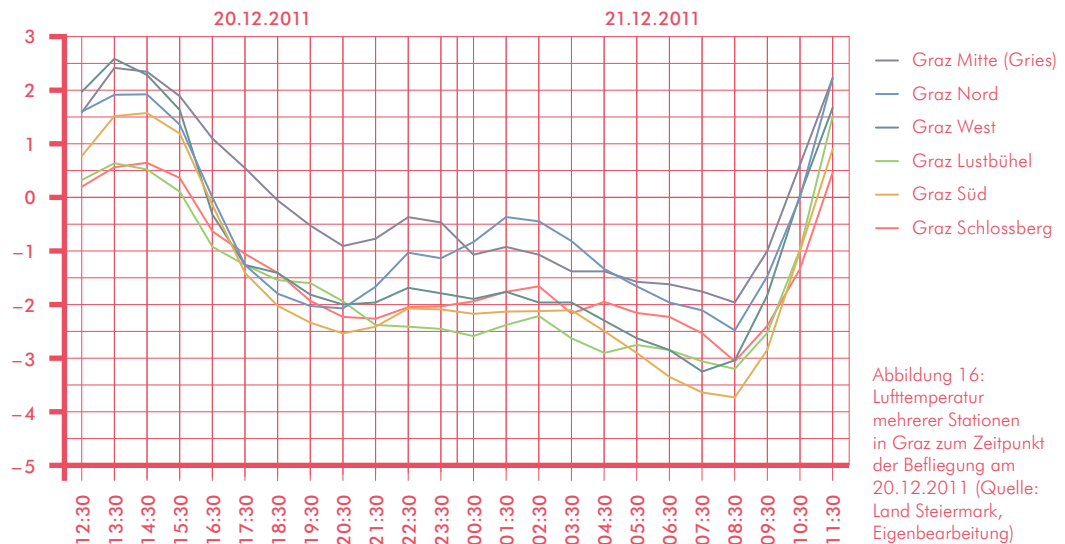
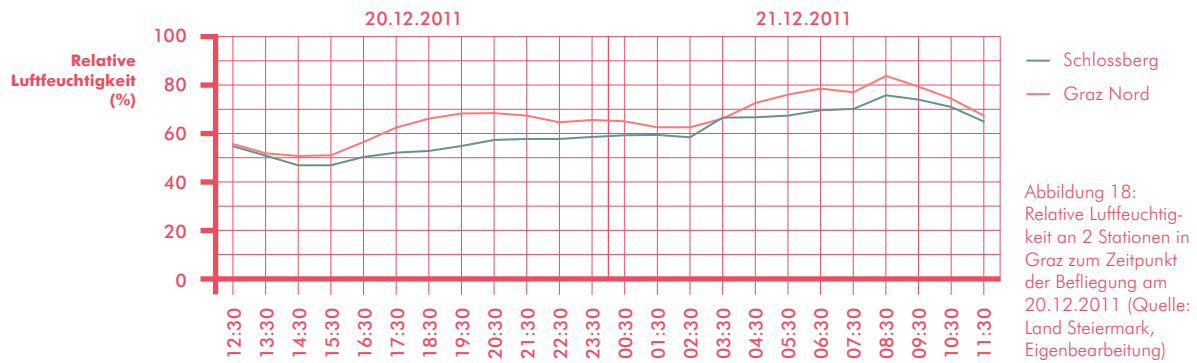
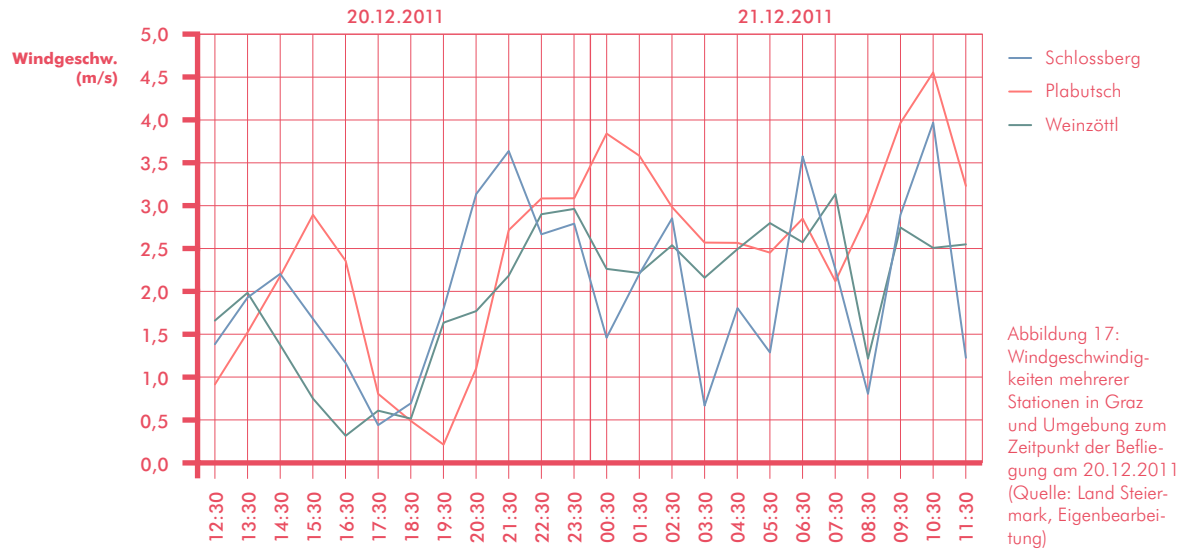


Abbildung 16:
Lufttemperatur
mehrerer Stationen
in Graz zum Zeitpunkt
der Befliegung am
20.12.2011 (Quelle:
Land Steiermark,
Eigenbearbeitung)



3.3.2 ERGEBNISSE DER MESSKAMPAGNEN AM 20.12.2011

Insgesamt waren drei Messtrupps unterwegs, wobei sich im engeren Stadtgebiet leichte Überschneidungen ergaben. Ein weiterer Messtrupp war mit den Sondierungen betraut, wobei bedauerlicherweise seit kurzem eine Beschränkung bezüglich der Steighöhe von 200 m auferlegt wurde. Glücklicherweise war dies nicht von Nachteil, weil ohnehin die Bodeninversion sehr seicht war, wie die Profile im Zusammenhang mit der Station Schlossberg, aber auch mit der Station Plabutsch bestätigten. Ein Messfahrtteam war mit dem Westen von Graz incl. Becken von Thal mit Schluss im Zentrum von Graz betraut. Ein weiteres hatte eine Messtrecke im Osten von Graz samt Vertikalprofil auf die Platte und Einbeziehung beider Seitentalbecken (Fölling und Weinitzen). Das dritte Team war beauftragt mit der Situation vom Zentrum beginnend vor allem den Südosten zu erkunden. Die Ergebnisse der Teams sind in der Karte dargestellt, aus der die Struktur der Wärmeinsel – diesmal der Fall mit der einkernigen Wärmeinsel mit Schwerpunkt im Raum Gries mit maximalen Temperaturen um 0 bis 0,5 °C – sowie die kalten Seitentäler gut zur Geltung kommen.

Im Westen von Graz fiel dem Team neben dem Fehlen der sekundären Wärmeinsel in Gösting auch bei der vertikalen Strecke zur Hubertushöhe (550 m) auf, dass ab ca. 450 bis 500 m Seehöhe keine weitere Temperaturzunahme erfolgte, es sich demnach um eine ausgesprochen seichte Bodeninversion handeln musste. Im Thaler Becken wurden dann erwartungsgemäß mit –4,5 bis –5,5 °C die tiefsten Temperaturen verzeichnet – im Übrigen in guter Übereinstimmung mit Mariatrost/Fölling. In Fällen mit Schneedecke wären die Unterschiede etwa doppelt so groß gewesen, andererseits wäre aber die Thermalbefliegung nicht

mehr in dem geplanten Rahmen angelaufen, denn das Ziel bestand ja gerade darin, die Oberflächen-temperaturverhältnisse im Hochwinter zu erfassen, eine Schneeoberfläche hätte die Verhältnisse stark vereinfacht und auf geländeklimatische Muster und Strukturen abgestimmt. Im übrigen Messbereich herrschten Temperaturen von –1,5 bis –3 °C, die freie Kaltluftfläche bei den Reininghausgründen schnitt um 1,5 bis 2 K kälter ab als die Umgebung.

Das Team im Norden und Osten hatte zunächst eine Streckenführung nach Mariatrost/Fölling, wo die nicht allzu tiefen Temperaturen (Minimum –6,1 °C) auffielen; dazu muss auch angemerkt werden, dass wie erwähnt einige Wolkenfelder durchzogen, und gerade in den sensiblen Seitentalbecken wirkt sich die Erhöhung der Gegenstrahlung stark aus, vermutlich wären ansonsten die Minima bei –7 bis –8 °C gelegen. Weiters fiel auch diesem Team die Benachteiligung der oberen Rücken auf der Platte und damit die geringe Mächtigkeit der Bodeninversion auf. Zwischen dem Becken von Weinitzen und Mariatrost waren die Differenzen sehr klein; hier wären nach den Bautätigkeiten im Föllinger Becken höhere Temperaturen zu erwarten gewesen. In beiden Becken wurden jeweils auch Dämme errichtet (Retentionsbecken).

Das Team im Osten und Südosten wählte eine Messtrecke quer über die Seitentäler und Riedel hinweg bis Raaba. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der anderen Teams blieb es auf den ansonsten deutlich begünstigten Riedelrücken eher moderat milder (bis ca. 0,8 °C) gegenüber den Tallagen mit Werten von –2,5 bis –4 °C. Die Seitentalauswinde waren mäßig entwickelt und auf den Riedelrücken war der Murtauswind aus NW schwach spürbar.

Abbildung 19:
Sondenaufstieg in
Graz am 20.12.2011
von 22:30 bis 23:00
h mit dem Verlauf der
relativen Luftfeuchtig-
keit und Windgeschwin-
digkeit (Windrichtung:
durchgehend NW)
(Eigene Erhebung und
Darstellung)

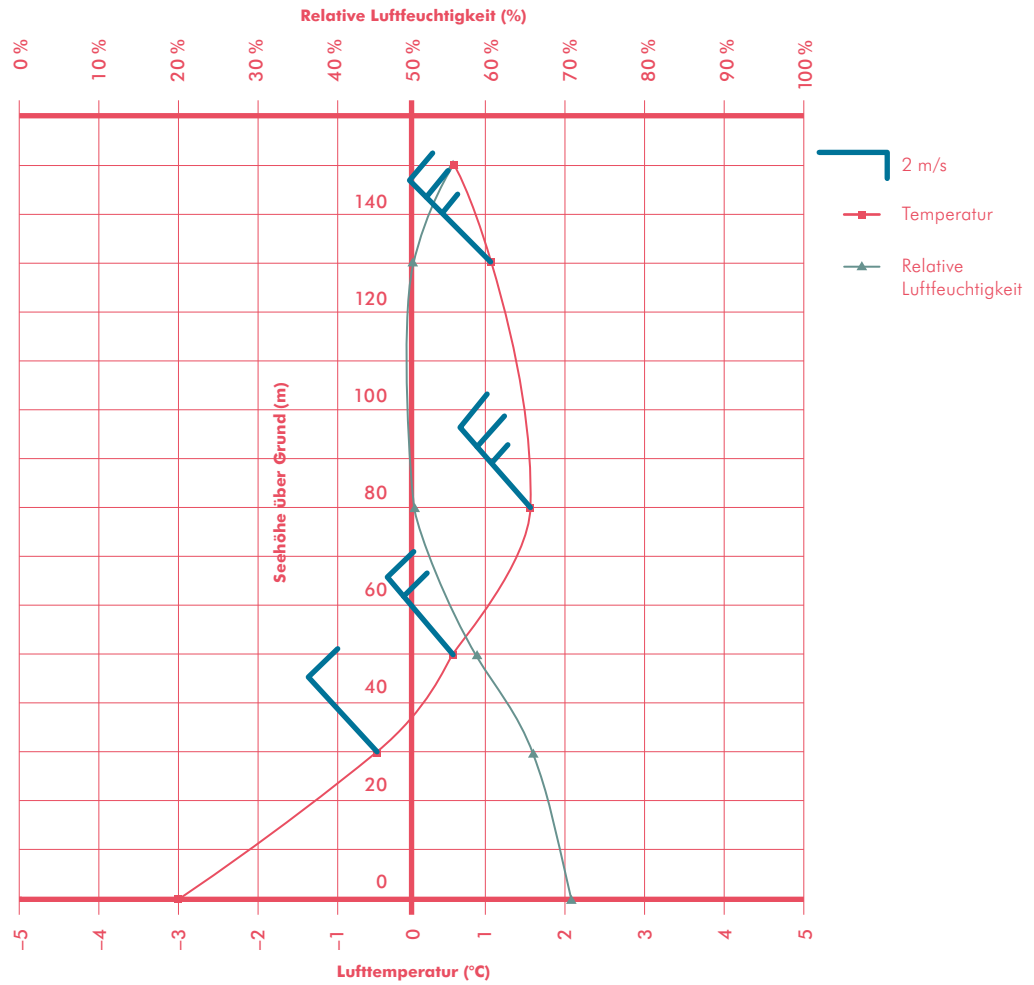


Abbildung 20:
Ballonsondierung
im Wasserwerk Nord
am 20.12.2011
(Photo: Hubeny)

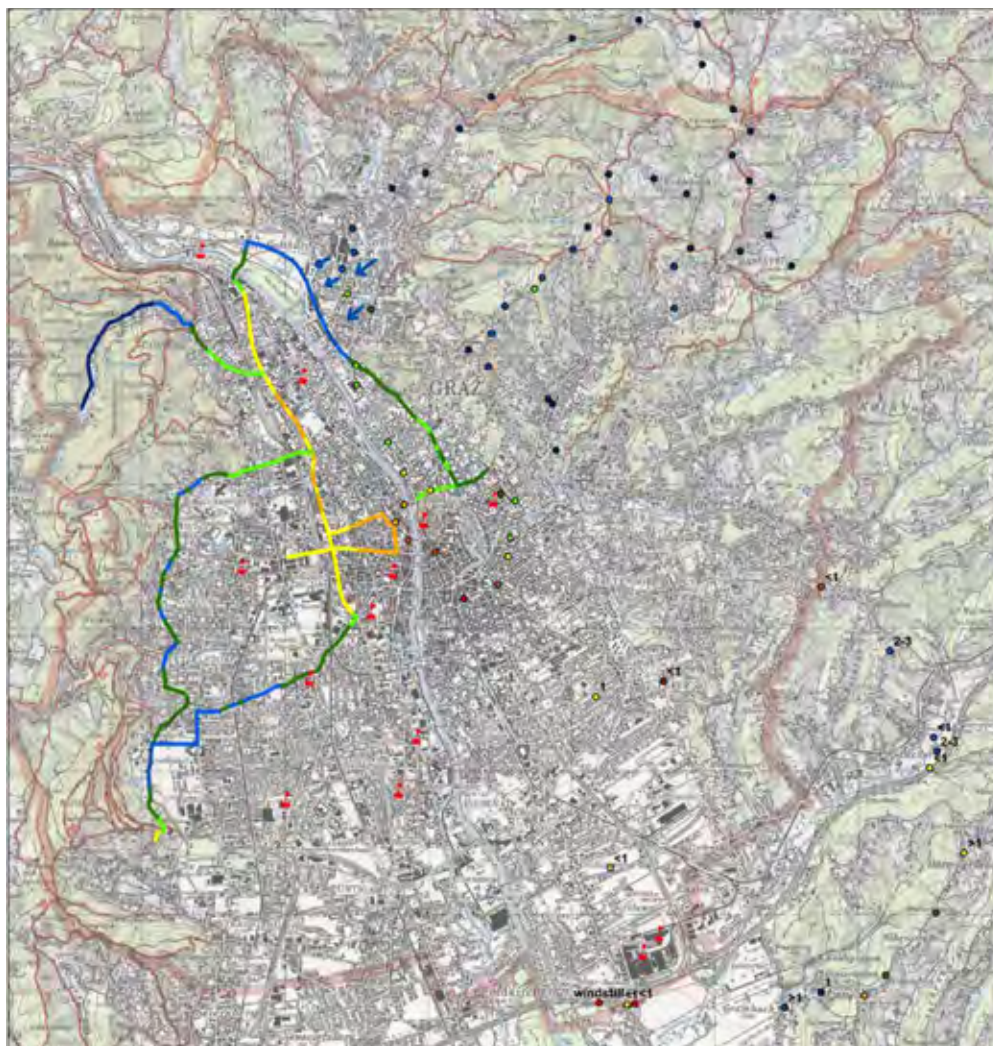


Gesamtbeurteilung der Wetterverhältnisse und der erfassten Daten: Hinsichtlich einer Gesamtbeurteilung der Wetterlage für eine derartige Messkampagne lässt sich folgern, dass die angetroffenen Temperaturunterschiede zwar nicht das Ausmaß jener bei einer Superhochdrucklage wie Anfang Oktober 1986 erreicht haben, aber immerhin die typischen Verhältnisse für die einkernige und demnach stark von der Baukörperstruktur abhängige Wärmeinsel sehr gut wiedergegeben haben. Es darf dabei nicht übersehen werden, dass eine Thermalbefliegung von der Prognostik her betrachtet gerade im Hochwinter eine starke Herausforderung darstellt. Zum einen stellt das Risiko von Talnebelbildungen, wie dies die Befliegung vom Oktober 2004 gezeigt hat, ein großes Problem dar, und zum anderen kommt der nicht erwünschte Einfluss der Schneedecke hinzu. Insgesamt waren die Voraussetzungen bis auf die bedauerlicherweise etwas zu früh aufgetauchte Bewölkung im Rahmen ei-

nes Zwischenhochs sehr gut geeignet für eine derartige Befliegung. Letztlich haben aber auch die Messfahrtergebnisse gezeigt, dass es in Hinblick auf eine üblicherweise aufwendige Anpassungskorrektur der erfassten Temperaturen der Messteams zwischen Beginn und Ende der Kampagne in unserem Fall eine Vereinfachung durch die aufgekommene Bewölkung gab, da es dadurch zu einer Temperaturstagnation gekommen war; deshalb war auch eine Anpassungskorrektur nicht nötig. Schließlich sei noch angemerkt, dass wir nun erstmals über Befliegungsdaten für eine einkernige Wärmeinsel verfügen, die eben mehr in einer stärkeren Abhängigkeit zur Versiegelung steht, als dies bei einer zweikernigen Wärmeinsel mit starkem Einfluss des Murtalauswindes und einer sekundären Wärmeinsel der Fall ist.

Zudem wurden Strahlungsmessungen zur Kalibrierung der Thermalscanneraufnahmen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 ersichtlich.

Abbildung 21:
Messfahrten in
Graz am 20.12.2011
(Eigene Erhebung
und Darstellung)



Messfahrt Temperatur [°C]

| | |
|------------------|------------------|
| — -4,5 bis -3,0 | — -1,49 bis -1,0 |
| — -2,99 bis -2,5 | — -0,99 bis -0,5 |
| — -2,49 bis -2,0 | — -0,49 bis 0,0 |
| — -1,99 bis -1,5 | |

Punktmessung Temperatur [°C]

| | |
|------------------|------------------|
| • -4,5 bis -3,0 | • -0,99 bis -0,5 |
| • -2,99 bis -2,5 | • -0,49 bis 0,0 |
| • -2,49 bis -2,0 | • 0,01 bis 0,5 |
| • -1,99 bis -1,5 | • 0,51 bis 1,0 |
| • -1,49 bis -1,0 | • 1,01 bis 1,8 |

Abbildung 22:
Unterschiedliche
Eisbedeckung an
Teichen (rechts: Eis-
laufplatz in Mariatrost;
links: Hilmteich) am
20.12.2011 (Aufnah-
me: Sulzer)



Insbesondere wurde die Temperatur von Wasseroberflächen bzw. Böden gemessen, da die unterschiedliche Bodenbedeckung wesentlichen Einfluss auf die Emissivität bzw. die Umrechnung der digitalen Werte in Strahlungstemperaturen bzw. Oberflächentemperaturen besitzt. Die durch die Messfahrten und Do-

kumentationen (Temperatur, Wind und Photos) der Bodenbedeckung zum Befliegungszeitraum erzielten Informationen können direkt in die Analyse der Befliegungsdaten eingebunden werden (siehe Abbildung 22, Abbildung 23).

Abbildung 23:
Auswahl der Photo-
dokumentation am
20.12.2011
(links oben: Platte in
Richtung Stadtzentrum;
rechts oben: Cafe
Rosenhain in Richtung
SE; unten links: Platten-
kreuz in Richtung
Wenisbuch, rechts
unten: Lechwald))
(Photos: Sulzer)



4. ERSTELLUNG DER TEMPERATURKARTEN VON GRAZ

4.1 EINLEITUNG

Für (städtische) Klimaanalysen liegt der wesentliche Nutzen von Thermalkarten in ihrem flächenhaften, digital verarbeitbaren Informationsgehalt. Es ist zu unterscheiden zwischen Infrarot-Aufnahmen mit Thermal-Scannern von Flugzeugen aus und den für die vorliegenden Karten benutzten Satellitendaten.

Unter Berücksichtigung der Größe von Graz und des engeren Verflechtungsraumes mit dem Umland ermöglicht nur ein flugzeuggestütztes Verfahren die jeweils fast zeitgleiche Erfassung der langwelligen Eigenstrahlung der Erde (Oberflächentemperatur) in einer aufeinanderfolgenden Nacht-/Tagsituation. Die Interpretation der IR-Thermalbilder erlaubt es, einzelnen Oberflächenelementen und Raumeinheiten über die speziell erfasste Situation hinaus qualitativ allgemeine thermische Eigenschaften zuzuordnen. Diese Umsetzung setzt jedoch großes klimatisches Fachwissen und die Nutzung weiterer Datengrundlagen wie Nutzungs- und Reliefkarten voraus, da die Ausprägung der Oberflächentemperatur verschiedener Nutzungsstrukturen im Rasterbild stets das Ergebnis komplexer physikalischer Prozesse ist, an denen verschiedene horizontale und vertikale Wärme-flüsse und Energieumsätze (Verdunstung, Kondensation) beteiligt sind. Unter Einbeziehung weiterer klimatologischer Parameter wie Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit können Oberflächentemperaturkarten zusätzlich als Unterstützung für die Bestimmung von Klimatopkarten herangezogen werden.

Bei den IR-Thermalaufnahmen wird die Oberflächentemperatur nicht direkt gemessen, sondern über die von den zu erfassenden Strukturen ausgehende langwellige Strahlung berechnet; erfasst wird die sogenannte Strahlungstemperatur. Dabei handelt es sich um einen Energietransport mittels elektromagnetischer Wellen, wobei die Strahlung der Fluss der elektromagnetischen Wellen pro Fläche und Zeit ist. Strahlung und Temperatur eines Körpers unmittelbar an seiner Oberfläche stehen in einem funktionalen Zusammenhang, ausgedrückt durch das Gesetz von Stefan-Boltzmann. Dieser Zusammenhang besteht, wenn die Oberflächen annähernd ihr volles Emissionsvermögen (Emissionswert = 1) erreichen. Dies ist für alle wichtigen Oberflächenelemente innerhalb des erfassten Wellenlängenbereichs von 10,4 bis 12,5 μm gegeben, so dass der Einfluss der Atmosphäre auf das Emissionsverhalten vergleichsweise gering bleibt. Die Differenz zwischen der vom Flugzeugscanner erfassten Strahlungstemperatur und der berechneten Oberflächentemperatur ist somit in der Regel vernachlässigbar. Um genauere Ergebnisse zu bekommen, wurden die Daten radiometrisch korrigiert. Nur Metalloberflächen, wie sie z. B. bei Flachdächern Verwendung finden, weichen mit Emissionswerten von 0,1 beträchtlich ab und müssen daher auch bei der Interpretation eine Sonderstellung einnehmen.

Durch die Infrarot-Aufnahmen ist die Möglichkeit gegeben, während eines Strahlungstages Momentaufnahmen der Temperaturverteilung zu gewinnen und damit siedlungsbedingte Unterschiede von Temperaturstrukturen in einem Stadtgebiet zu erkennen. Das Ziel der Auswertung ist dabei, mit den Gesetzmäßigkeiten der Geländeklimatologie Hinweise auf lokale Luftaustauschprozesse zu erhalten bzw. auf Gebiete der Stadtlandschaft, die für die Ausbildung lokaler Windsysteme eine wichtige Funktion haben.

Solche Schlussfolgerungen erfordern jedoch eine realistische Vorstellung vom Zusammenwirken der meteorologischen Parameter in der bodennahen Luftschicht. Auch lassen sich Infrarot-Messflüge nur bei Kenntnis der örtlichen Geländeverhältnisse und im Zusammenhang mit anderen meteorologischen Informationen, sozusagen als Bestandteil einer „Indizienkette“, sinnvoll auswerten. Dabei bedeuten Windarmut und ausgeprägtes Geländere relief des Untersuchungsgebietes eine wichtige Voraussetzung für die Erfolg versprechende Anwendung der Infrarot-Thermographie; denn nur unter diesen Bedingungen ist mit der Ausbildung planungsrelevanter lokaler Windsysteme zu rechnen.

4.2 DAEDALUS-BEFLIEGUNG 1986

Zur Durchführung einer Erstellung von Strahlungstemperaturdaten für das Jahr 1986 war in der damaligen Zeit eine große Computer- und Bildverarbeitungsanlage mit geeigneter Software notwendig. Große Datenmengen bedingten damals große Magnetplattenspeicher und sehr hohe Rechnerleistungen sowie komplexe Steuer- und Auswertprogramme. Alle diese Voraussetzungen waren am Institut für Digitale Bildverarbeitung und Graphik der Forschungsgesellschaft Joanneum gegeben.

Die Bildelementgröße des Orthobildes beträgt $5 \times 5 \text{ m}^2$. Die Orthobilder haben eine maximale Größe von 3072×3072 Pixel und überdecken somit das gesamte Stadtgebiet von Graz. Um die visuelle Interpretation durch einen Klimatologen optimal vorzubereiten, wurden einzelne aufeinanderfolgende Temperaturintervalle mit verschiedenen Regenbogenfarben eingefärbt. Es wurden von allen drei Befliegungen Strahlungstemperaturkarten im Maßstab 1:25.000 hergestellt. Die Ausgabe der endgültig bearbeiteten Bilddaten erfolgte auf einem Laserfarbfilmschreiber bei der DLR. Von den so entstandenen Farbdiaspositiven im Format von $17,5 \times 18,5 \text{ cm}^2$ wurden dann mittels eines Laserreproscanners die vier Farbauszüge Gelb, Cyan, Magenta und Schwarz im Endmaßstab angefertigt und zur kartographischen Bearbeitung weitergeleitet. Letztere übernahm das Institut für Kartographie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Wien. Den Druck besorgte das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (LAZAR et al., 1994).

Radiometrische Korrektur: Da die vom Sensor aufgezeichneten Temperaturstrahlungswerte, welche im Grauwertbereich zwischen 0 und 255 kodiert sind, eine große Anzahl verschiedenartiger „Fehler“ aufweisen, müssen die gemessenen Videodaten relativ aufwendig korrigiert werden, um eine absolute, nicht nur relative Strahlungstemperaturgenauigkeit von $\pm 0,1$ K zu garantieren.

**BEI DER RADIOMETRISCHEN KORREKTUR DER AUFNAHMEDATEN
MÜSSEN FOLGENDE EINFLÜSSE BEACHTUNG FINDEN
(LAZAR ET AL., 1994):**

Kalibrierung des Thermalbandes

Absorption der Strahlung durch Optik

Filter und Sensor

Absorption der Strahlung durch Atmosphäre

(Druck, Temperatur, Feuchtigkeit usw.)

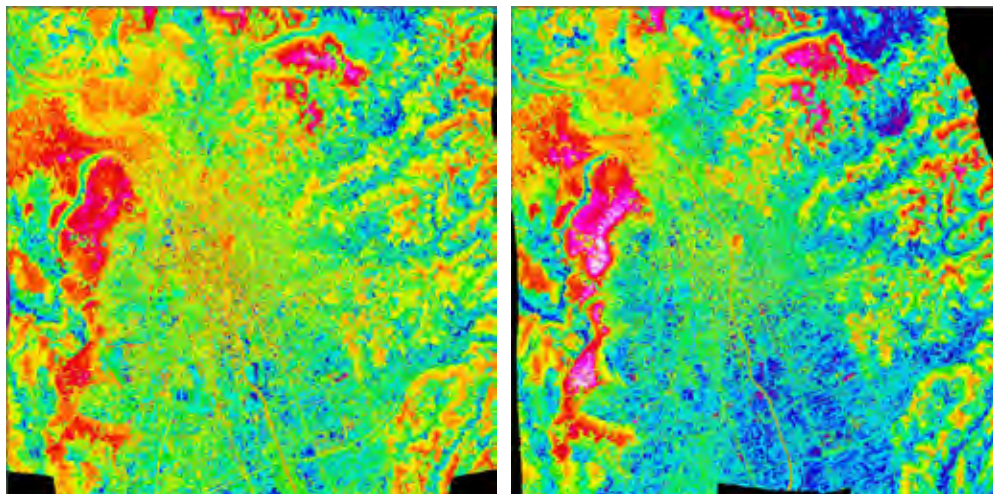
Quantisierungsfehler nach Überschreiten der Sättigungsgrenze

Eine atmosphärische Korrektur der Temperaturstrahlung erfolgte mit einer Software LOWTRAN 5 am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck. Mit dieser Software war es möglich, die vom Sensor in Flughöhe gemessene Temperaturstrahlung auf scheinbare Oberflächentemperaturen umzurechnen. Eingabedaten für dieses Programm sind unter anderem alle Bodenmessdaten, die Messwerte der Radiosondenaufstiege und diverse Filterfunktionen. Die Umrechnung der Grauwerte in absolute Temperatureinheiten erfolgt mittels Referenzmessdaten zu den Schwarzkörpern.

Als Ergebnis der umfangreichen Aufbereitungsarbeiten liegen drei farbige Temperaturstrahlungskarten (Nacht, Morgen, Tag) von Graz vor. Die originalen Datensätze 1986 wurden dankenswerter Weise von Herrn KAUFMANN (Technische Universität Graz, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) zur Verfügung gestellt und das Fremdformat in *ERDAS IMAGINE* importiert.

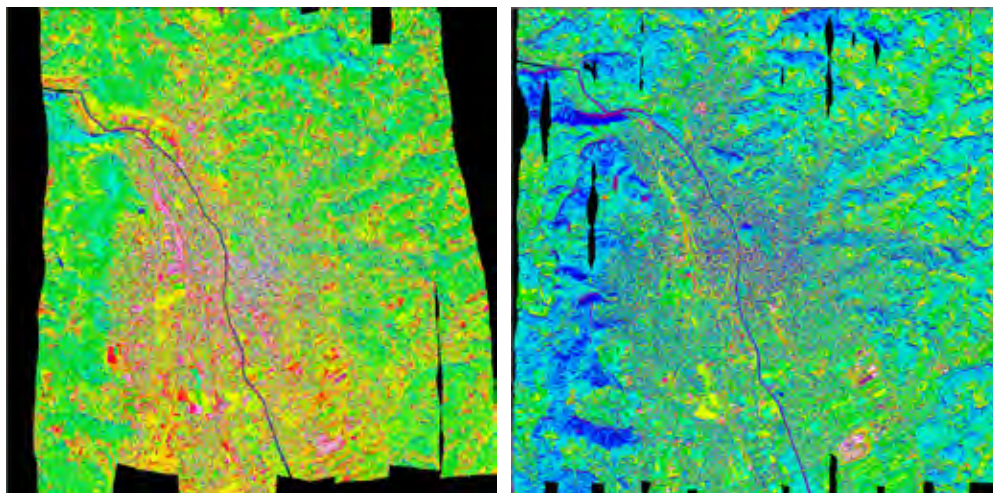
Die Nacht-, Morgen- und Mittagstermine von 1986 wurden farbkodiert dargestellt und anschließend analysiert: Die folgenden Darstellungen wurden als Grundlage für die Überarbeitung der Klimatopkarte und der Karte der planerischen Hinweise verwendet.

Abbildung 1:
Farbkodierte
Nacht- (links),
Morgentherma-
aufnahme (rechts)
von 1986 in °C



| | | | | | |
|---|---------|----|-----------|----|-----------|
| 0 | 0 | 7 | 7.1–7.6 | 14 | 11.6–12.5 |
| 1 | <2.9 | 8 | 7.6–8.2 | 15 | 12.5–13.4 |
| 2 | 2.9–3.8 | 9 | 8.2–8.8 | 16 | 13.4–14.2 |
| 3 | 3.8–4.6 | 10 | 8.8–9.4 | 17 | 14.2–15.1 |
| 4 | 4.6–5.5 | 11 | 9.4–10.1 | 18 | 15.1–15.9 |
| 5 | 5.5–6.4 | 12 | 10.1–10.8 | 19 | > 15.9 |
| 6 | 6.4–7.1 | 13 | 10.8–11.6 | | |

Abbildung 2:
Farbkodierte Mittags-
thermalaufnahme
von 1986 (links) und
2004 (rechts) in °C



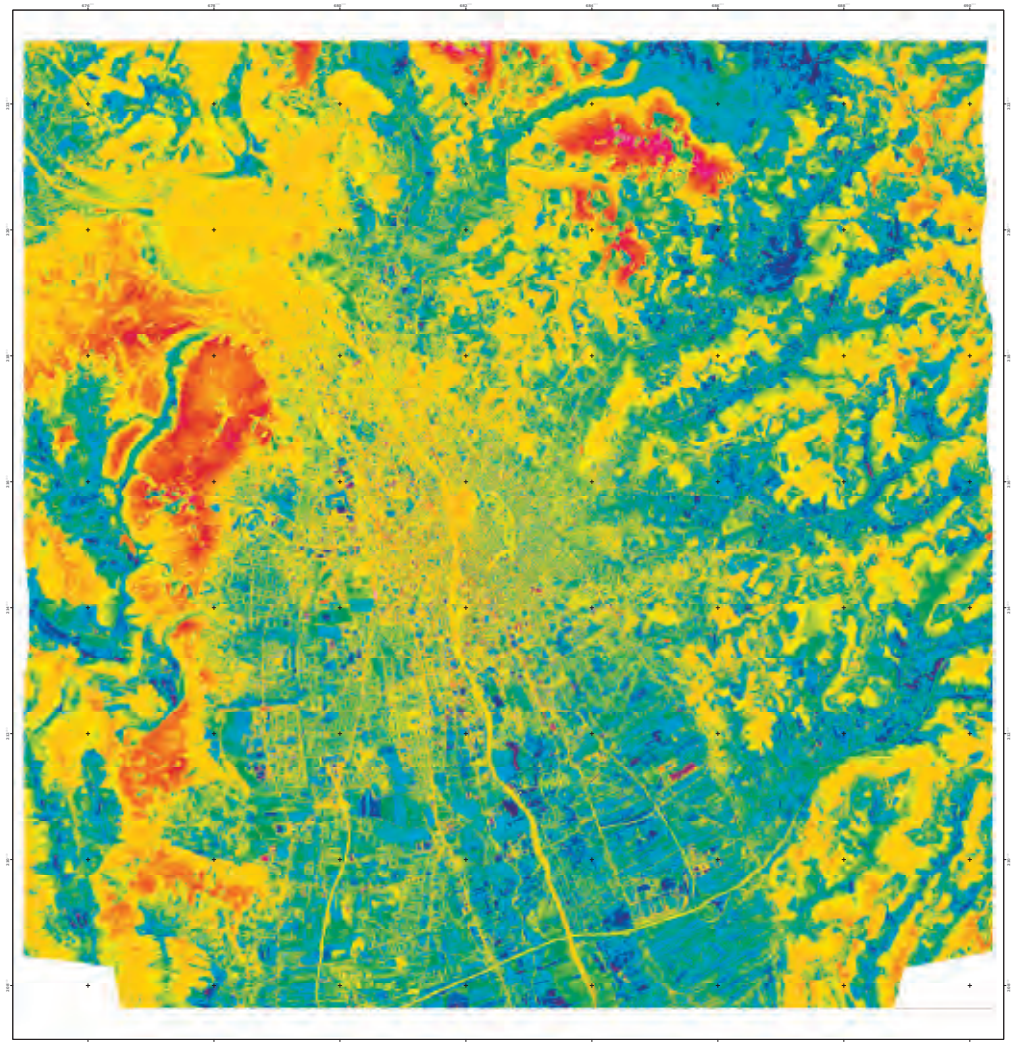
| | | | | | |
|---|-----------|----|-----------|----|-----------|
| 0 | 0 | 7 | 20.4–21.6 | 14 | 29.8–31.4 |
| 1 | < 12.4 | 8 | 21.6–22.8 | 15 | 31.4–32.9 |
| 2 | 12.4–14.1 | 9 | 22.8–23.9 | 16 | 32.9–34.6 |
| 3 | 14.1–15.8 | 10 | 23.9–25.2 | 17 | 34.6–36.5 |
| 4 | 15.8–17.4 | 11 | 25.5–26.2 | 18 | 36.5–38.9 |
| 5 | 17.4–18.9 | 12 | 26.2–28.2 | 19 | 38.9> |
| 6 | 18.9–20.4 | 13 | 28.2–29.8 | | |

Für die einzelnen Flüge 1986 (Nacht-Morgen-Mittag) wurden 2004 neue Thermalkarten erstellt und der Datenlieferung beige-fügt. In den folgenden Abbildungen werden Verkleinerungen (A4) dargestellt.

Abbildung 3:
Strahlungstemperaturkarte der
Thermalscanner-
befliegung von 1986
(Nachtflug)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 2. Oktober 1986
22:00–23:30 MEZ (Nachtflug)



Temperaturangaben in °C

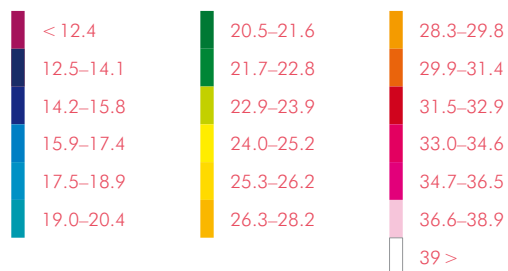
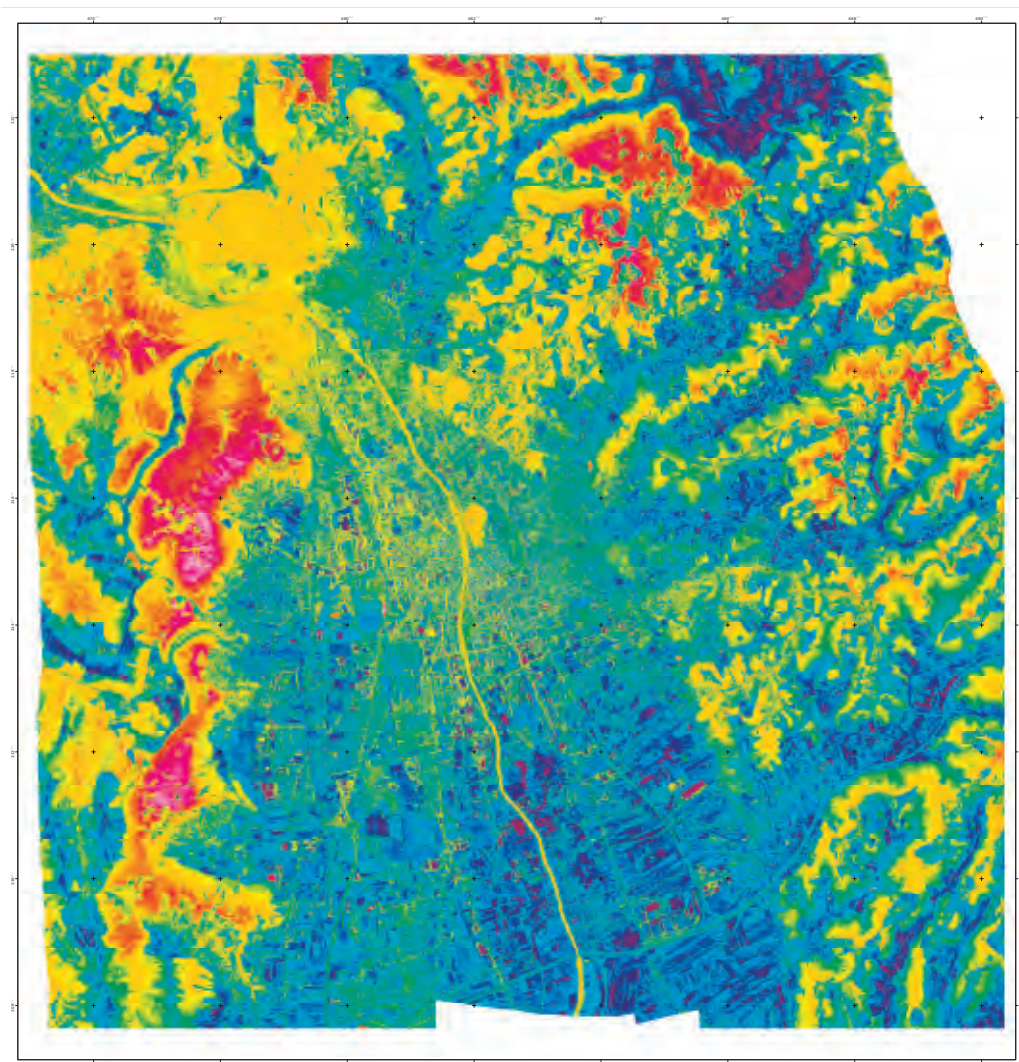


Abbildung 4:
Strahlungstempe-
raturkarte der
Thermalscanner-
befliegung von 1986
(Morgenflug)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 3. Oktober 1986

05:06–06:26 MEZ (Morgenflug)



Temperaturangaben in °C

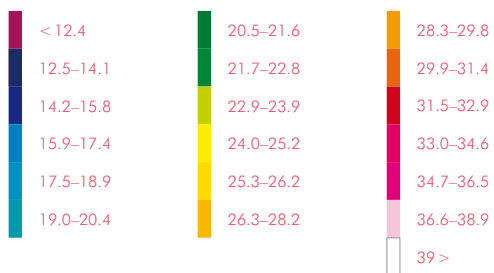
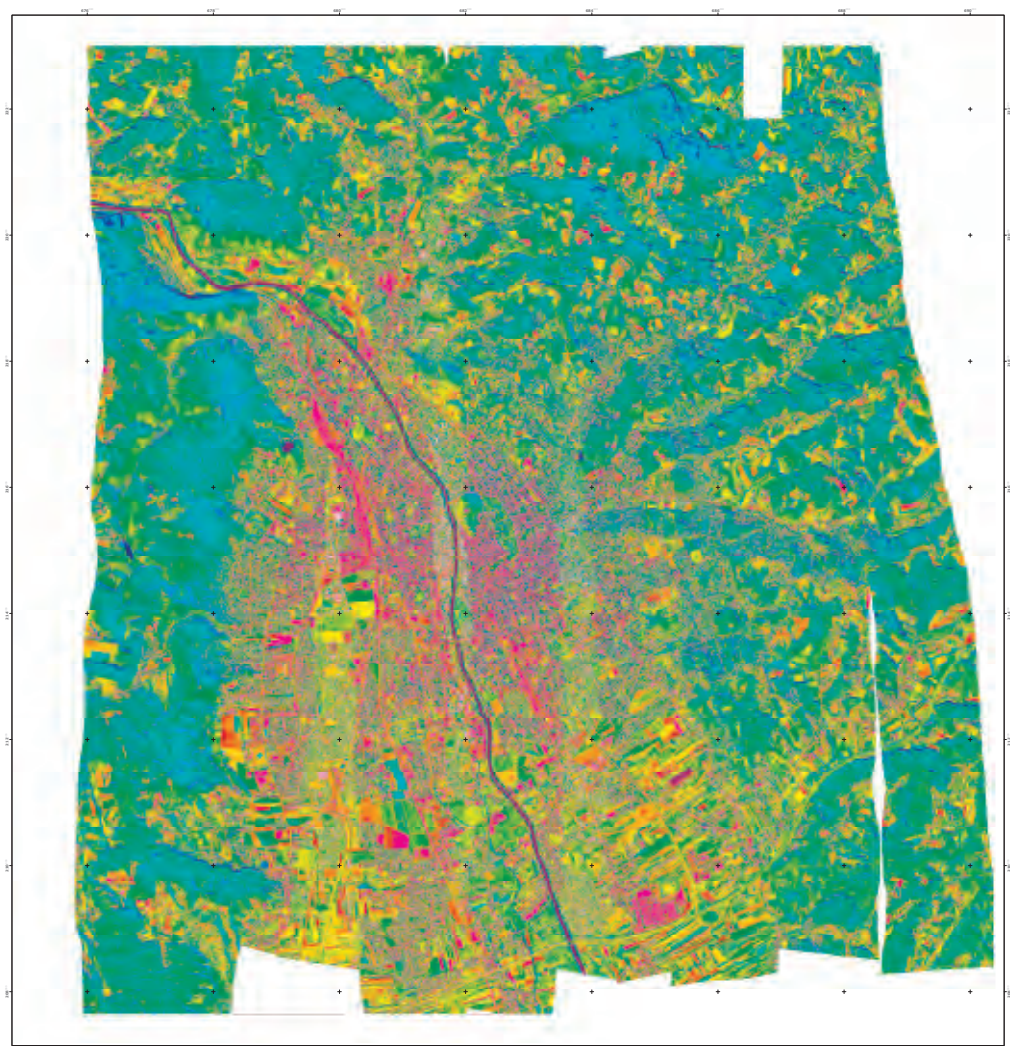


Abbildung 5:
Strahlungstemperaturkarte der
Thermalscanner-
befliegung von 1986
(Mittagsflug)

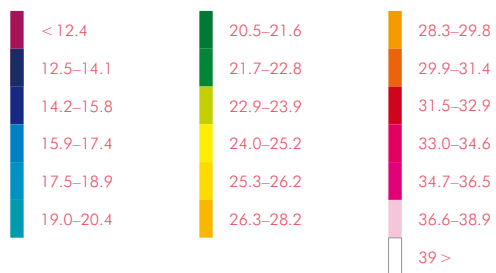
Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 3. Oktober 1986

12:49–14:17 MEZ (Mittagsflug)



Temperaturangaben in °C



4.3 DAEDALUS-BEFLIEGUNG 1996

Auf Grund der Tatsache, dass für die Befliegung von 1996 keine Oberflächentemperaturdaten als Referenzdaten zur Verfügung standen, wurde auf die Verwendung des Datensatzes von 1996 verzichtet. Zudem wurden die Originalwerte des thermalen Kanals verändert und für eine optimale Darstellung gespreizt. Dadurch ist es unmöglich, klimatologische Aussagen zu treffen.

Abbildung 6:
Thermalkanal
(oben: Original
Datengrauwerte,
unten: Kontrast-
verbesserung)

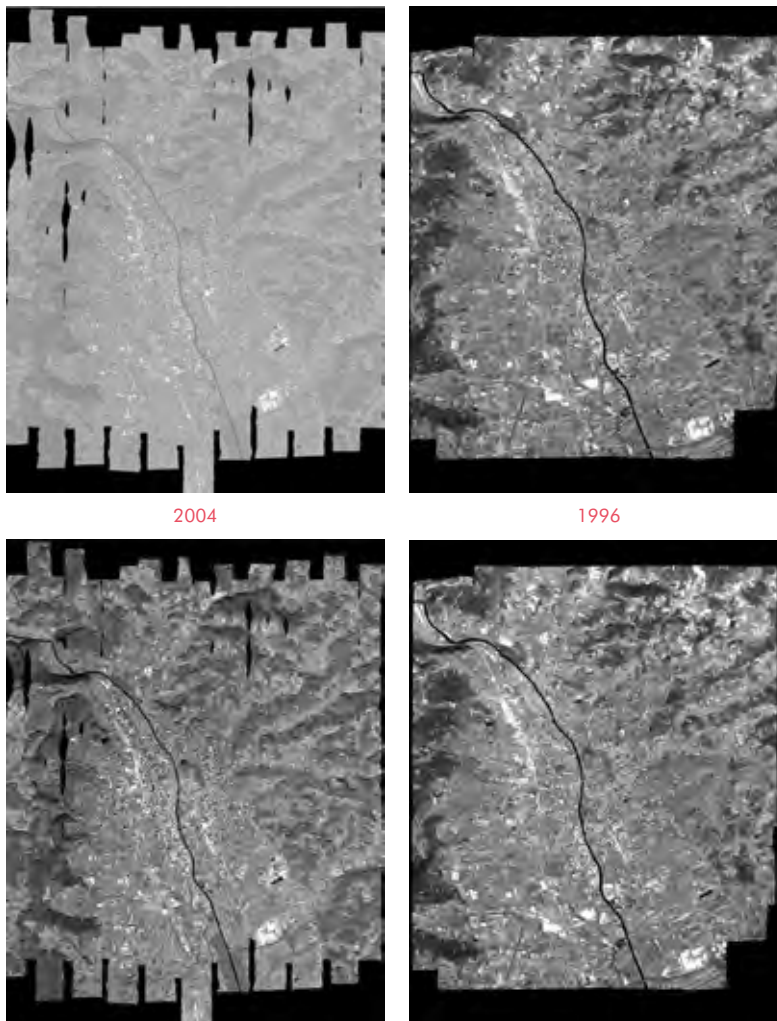


Abbildung 6 dokumentiert, dass die Grauwerte des thermalen Bandes aus dem Jahre 1996 auch in den Originaldaten durch eine Bildverbesserung angepasst wurden. Die Daten von 2004 zeigen eine deutliche Veränderung.

4.4 DAEDALUS-BEFLIEGUNG 2004

Analog zu der Thermalbefliegung von 1986 sollen Temperaturkarten vom Morgen- bzw. vom Mittagsflug erstellt werden. Grundlage hierfür ist eine Multispektralscannerbefliegung zu mittag des 24.10.2004. Ein Morgenflug konnte aufgrund von Nebel nicht durchgeführt werden. Diesen gilt es im Rahmen dieses Projektes mit Hilfe anderer Parameter und Informationen, inklusive der Daten von 1986, zu simulieren und zu modellieren. Ziel ist eine digitale Thermalkarte, die die klimatische Situation kurz vor Sonnenaufgang unter Strahlungswetterbedingungen darstellt.

Die Durchführung der Kartierung für den Mittagsflug kann in ähnlicher Weise wie 1986 durchgeführt werden. Mit Hilfe der Kalibrierungsparameter des Scanners und zusätzlicher Informationen kann eine relativ genaue (thermale) Klassifizierung durchgeführt werden. Der Scanner wird mittels Schwarzkörper so kalibriert, dass die Grauwerte zwischen +2 und +42 °C zu liegen kommen. Gleichzeitig mit der Befliegung wurden separate Messungen am Boden (Messfahrten) und in der Luft (Ballonsondierungen) durchgeführt. Die Daten der Pyranometermessungen und Ballonsondierungen werden einfließen, um eine genauere Klassifizierung zu erreichen.

ALS DATENGRUNDLAGEN FÜR DIE ERSTELLUNG DER TEMPERATURKARTEN DIENEN:

Gebäudeflächen bzw. Katasterinformationen der Stadtgemeinde Graz für die Verortung von Hausdächern und Straßenflächen bzw. Bebauungsstrukturen. Ideal wäre hier auch eine Katasterinformation, die dem Jahre 1986 zugrunde liegt

Reliefparameter: Das digitale Oberflächenmodell (Bodenauflösung 2 m) soll für die Differenzierung der reliefbedingten (Kuppe-Hang-Tal-Becken) Parameter herangezogen werden. Ideal wäre hier als zusätzliche Information das Stadtmodell, um z. B. Kaltluftabflüsse, Staueffekte bzw. um den Einfluss auf das Windsystem zu analysieren und in das System einzubinden

Langjährige klimatologische Messdaten bzw. klimatische Differenzierung der Stadt Graz

Thermalkartierungen von 1986 (Morgen- und Mittagsflug) als Ausgangsbasis für die Modellierung

Klimatopkarte von 1994 (digitale Version)

Klimatopkarte von 2004 (digitale Version)

Für die Darstellung der Thermalkarte muss noch eine kartographische Grundlage (z. B. Höhenschichten und Namensgut aus der ÖK 50) gefunden werden

4.4.1 ERSTELLUNG DER STRAHLUNGSTEMPERATURKARTE:
MITTAGSFLUG 2004

Nach der eingehenden Analyse und Beschreibung der Daten-
grundlage in den beiden vorangegangenen Kapiteln, gilt der
nächste Schritt der Erstellung der Strahlungstemperaturkarte für
die Mittagssituation.

HIERFÜR WURDEN FOLGENDE SCHRITTE DURCHGEFÜHRT:

Umrechnung der Grauwerte in absolute Temperatureinheiten

Kalibrierung der Daten

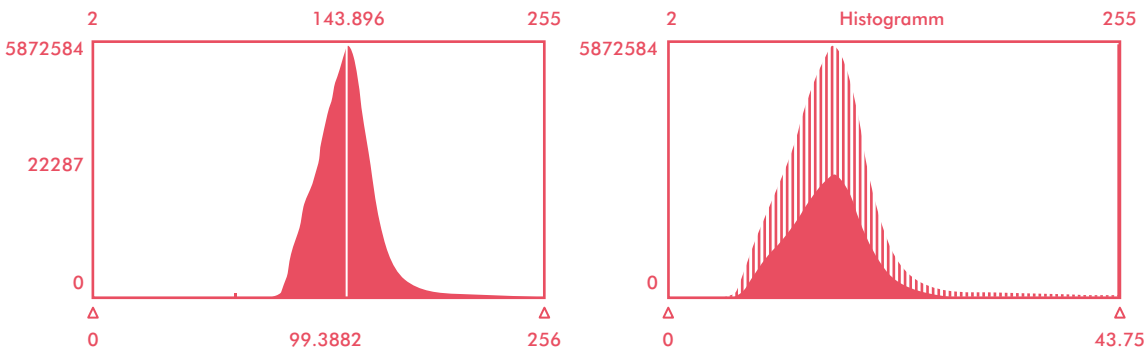
Erstellen von Temperaturklassen

Kartengestaltung

Umrechnung in absolute Temperatureinheiten: Wie bereits
beschrieben, wurden die in Grauwerten auf 8-Bit-Basis kodier-
ten Temperaturwerte in einer thermalen Auflösung von 0,25 °C
pro Grauwert vom DLR ausgeliefert. Mit einer einfachen Formel
wurden die Grauwerte in absolute Temperatureinheiten umge-
rechnet. Die Histogramme vor und nach der Umrechnung sind
in Abbildung 7 dargestellt.

$$T(^{\circ}) = (DN - 80) \cdot 0,25$$

Abbildung 7:
Grauwertverteilung
vor und nach der
Umrechnung in
absolute Temperatur-
einheiten



Das rechte Histogramm in Abbildung 7 zeigt die Schwankungsbreite der Temperaturen im beflogenen Untersuchungsgebiet. Die Schwarzkörper (*Blackbody*, *BB*) wurden vor der Befliegung auf die zu erwartenden Oberflächentemperaturen zwischen ca. 2 °C und ca. 42 °C geeicht. Dieser Wert unterliegt aber aufgrund von Temperatur- und Druckunterschieden ebenfalls einer gewissen Schwankung.

Tabelle 1:
Schwankungen
der Schwarzkörper-
temperaturen während
der Befliegung
(jeweilige Minima
und Maxima sind
fettgedruckt)

| Streifen | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| BB (°C) Low | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| BB (°C) High | 40,9 | 41,2 | 41,2 | 41,3 | 41,3 | 41,1 | 41,4 | 41,9 | 42,3 | 42,2 | 42,9 |

| Streifen | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| BB (°C) Low | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,1 |
| BB (°C) High | 43,2 | 43,3 | 43,2 | 43,3 | 43,2 | 42,2 | 43,2 | 43,3 | 43,2 | 43,3 |

Weniger aus dem Histogramm als bei näherer Betrachtung des in Temperaturwerte umgerechneten thermalen Kanals ist ersichtlich, dass trotz der unteren Begrenzung der Temperaturen auf wenigstens 1,8 °C Temperaturen unterhalb dieses Wertes auftreten können. Von „kalten Flecken“ spricht man bei Metalldächern von Industrieanlagen, welche durch strahlungsphysikalische Anomalien, ausgelöst durch das stark verringerte Emissionsvermögen, im thermalen Infrarot entstehen. Die Emissionsgrade solcher Metalle liegen zwischen 0,01 und 0,07 bei blanken Metallen und zwischen 0,6 und 0,8 bei oxidierten Metalloberflächen (KAUFMANN, 1989, S. 91).

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt von Kanal 12 im Süden von Graz (St.-Peter-Hauptstraße – Köglerweg – Messendorfgrund). Während die Dächer im mittleren Teil des Bildausschnittes im Durchschnitt (unkorrigierte!) Temperaturen von etwa ca. 37 °C aufweisen, treten die großen schwarzen Flächen im oberen und unteren Bildausschnitt durch ihre dunkle Erscheinung markant hervor. Diese Flächen weisen aufgrund ihrer geringen Emissionseigenschaften äußerst geringe Werte um ca. 0 °C auf und sind über das Stadtgebiet verteilt an mehreren Standorten zu verzeichnen. Diesen „kalten Flecken“ bedurften bei der Modellierung der Morgensituation einer gesonderten Vorgehensweise und wurden mit dem höchsten Temperaturwert besetzt.

Abbildung 8:
„Kalte Flecken“ von
Industrieanlagen im
Südosten von Graz



Kalibrierung der Daten: Es wurde bereits erwähnt, dass die vom Thermalscanner aufgenommenen Temperaturen mit „in situ“ gemessenen Oberflächentemperaturen verglichen und dementsprechend korrigiert werden. Solche, auch thermale Passpunkte genannte Referenztemperaturen wurden ebenfalls während des Befliegungszeitraumes bei der Thermalbefliegung Graz 2004 von repräsentativen Oberflächen mit einer möglichst großen Verteilung über das Stadtgebiet hinweg gemessen. Die Messungen wurden mit einem sogenannten Bandstrahlungspyrometer der Marke „Heimann“ durchgeführt, welches mit einem Objektiv von 90 mm Brennweite ausgestattet und für den Spektralbereich von 8 bis 20 μm empfindlich ist. Das Pyrometer zeigt punktuell die Oberflächentemperatur des gemessenen Objektes an und hat seit langer Zeit seinen Einsatzbereich in der Industrie.

Das bei diesen Messungen verwendete Strahlungspyrometer KT 19.83 erreicht eine maximale Temperaturauflösung 0,1 K bei einer Messgenauigkeit von 0,5 K nach einer Einlaufzeit von etwa 15 Minuten, wobei hier die richtige Wahl des korrekten Emissionskoeffizienten der zu messenden Oberfläche unabdingbar ist. Die Bedienung des Pyrometers bedarf darüber hinaus noch einiger Zusatzinformationen, da es hier sehr leicht zu Fehlmessungen und daher unbrauchbaren Werten kommen kann. Es ist zum Beispiel teilweise schwierig, nur das zu messende Objekt durch das Objektiv zu erfassen.

Tabelle 2 zeigt die zum Zeitpunkt der Befliegung gemessenen Strahlungstemperaturen ausgewählter Oberflächen.

Tabelle 2:
Temperaturen der
thermalen Passpunkte
zum Zeitpunkt der
Befliegung

| NR. | UHRZEIT | FLÄCHE | STRAHLUNGSTEMPERATUR | | | | LUFTTEMPERATUR | |
|-----|---------|-----------------|----------------------|------|------|-------------|-------------------------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | \bar{x} | Boden- nähe | Körper- höhe |
| 1 | 12:45 | Acker (ug) | 22,4 | 23,0 | 22,3 | 22,6 | 19,8 | 19,1 |
| 2 | 12:45 | Acker (begrünt) | 19,4 | 18,8 | 19,3 | 19,2 | 21,1 | 20,2 |
| 3 | 12:50 | Maisfeld (ag) | 24,8 | 25,2 | 25,3 | 25,1 | 21,0 | 21,8 |
| 4 | 12:55 | Schotterfläche | 26,2 | 21,7 | 22,2 | 23,4 | 18,7 | 19,3 |
| 5 | 13:00 | Asphalt (P) | 23,6 | 20,6 | 20,8 | 21,6 | 19,2 | 19,6 |
| 6 | 13:10 | Maisfeld (ug) | 25,7 | 26,6 | 25,2 | 25,8 | 21,8 | 20,6 |
| 7 | 13:20 | Acker (WG) | 20,0 | 19,7 | 19,6 | 19,8 | 22,5 | 21,2 |
| 8 | 13:25 | Wiese | 19,2 | 19,1 | 19,3 | 19,2 | 19,0 | 20,8 |
| 9 | 13:31 | Acker (ug) | 20,7 | 21,9 | 20,4 | 21,0 | 21,8 | 23,2 |
| 10 | 13:42 | Erdbeerfeld | 23,8 | 21,8 | 18,3 | 21,3 | --- | --- |
| 11 | 13:50 | Wiese (gemäht) | 18,1 | 18,5 | 18,2 | 18,3 | --- | --- |
| 12 | 14:00 | Kleewiese | 19,4 | 20,0 | 19,6 | 19,7 | 22,8 | 21,2 |
| 13 | 14:12 | Verwildert | 21,3 | 19,5 | 20,8 | 20,5 | 24,8 | 23,3 |
| 14 | 14:26 | Wiese | 12,5 | 12,9 | 11,0 | 12,2 | 22,9 | 24,0 |
| 15 | 14:36 | Wiese | 19,5 | 18,6 | 20,1 | 19,4 | 22,8 | 23,4 |
| 16 | 14:44 | Wasser | 15,1 | 13,8 | 15,9 | 14,9 | 12,8 (H ₂ O-T.) | --- |
| 17 | 14:56 | Maisfeld (ag) | 23,3 | 22,0 | 22,8 | 22,7 | 24,4 | 21,6 |
| 18 | 15:09 | Wiese | 20,4 | 21,1 | 19,7 | 20,4 | 23,4 | 21,5 |
| 19 | 15:15 | Asphalt (P) | 25,3 | 24,8 | 24,9 | 25,0 | 23,4 | 23,1 |

ag: abgeerntete Fläche

P: Parkplatz

ug: umgeackerte Fläche

WG: Wintergetreide

In Abbildung 9 und Tabelle 2 ist aufgrund der Lage und der Oberflächenart der thermalen Passpunkte gut zu erkennen, dass trotz der knapp bemessenen Zeit der Befliegung von rund zwei Stunden eine größtmögliche Verteilung der Messstandorte und auch der Oberflächenart zu erreichen versucht wurde.

Da, wie bereits mehrfach erwähnt, die Temperaturinformationen des Thermalscannerbildes mit den „in situ“ gemessenen Referenztemperaturen geeicht werden müssen, werden in der folgenden Tabelle 3 die jeweiligen Temperaturwerte von Scanner und Pyrometermessung verglichen.

Abbildung 9:
Lage der Pyrometer-
messstandorte im
Stadtgebiet von Graz

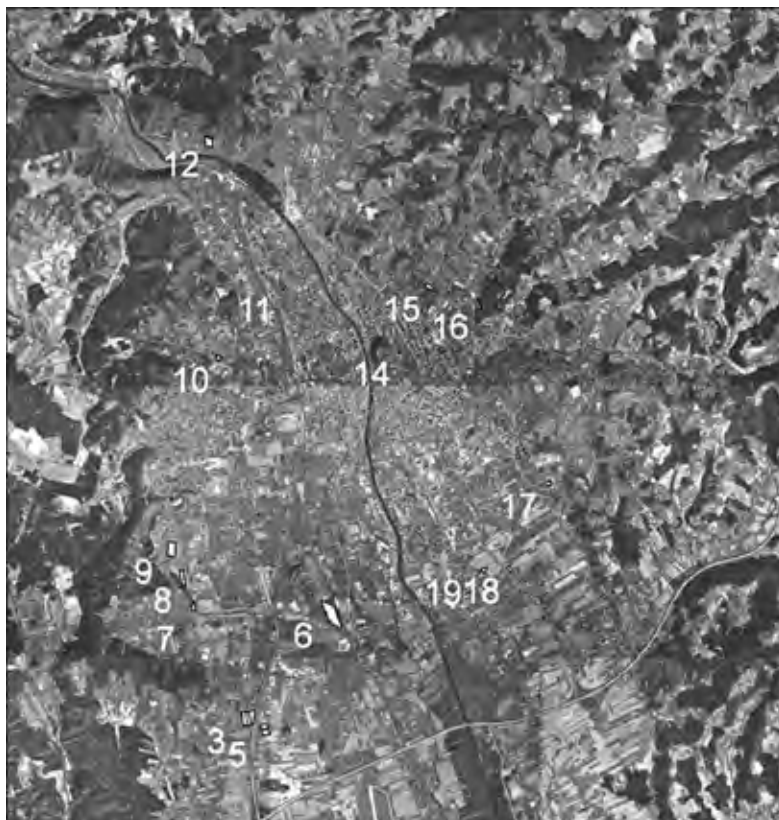
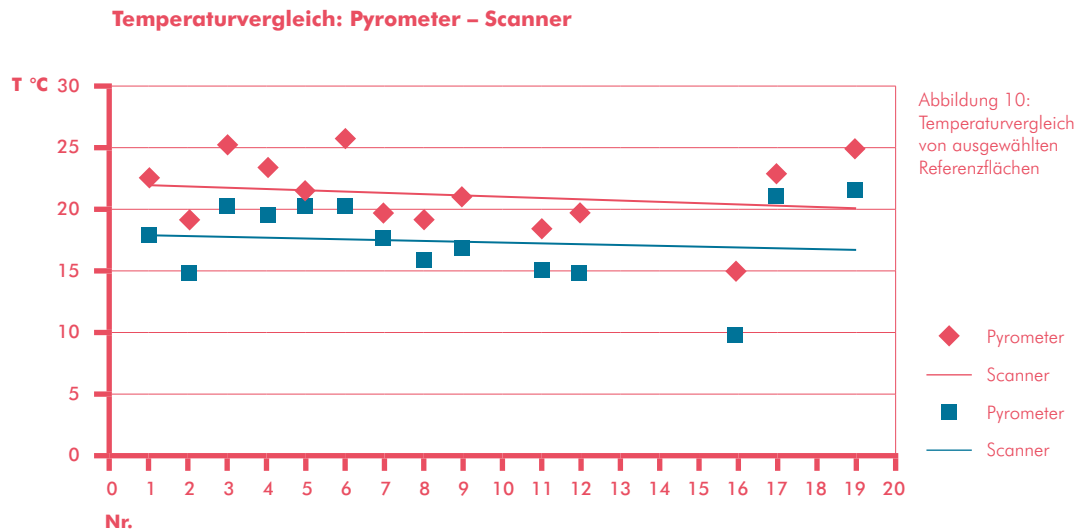


Tabelle 3:
Vergleich der thermalen
Passpunkte mit vom
Scanner gemessenen
Temperaturen
*: nicht eindeutig
lokalisierbar

| NR. | T Pyrometer (C°) | T Scanner (C°) | | | DIFFERENZ (K) |
|-----|------------------|----------------|-------|-----------|---------------|
| | \bar{x} | Min. | Max. | \bar{x} | |
| 1 | 22,6 | 16,50 | 19,25 | 17,8 | 4,8 |
| 2 | 19,2 | 13,75 | 16,25 | 14,8 | 4,4 |
| 3 | 25,1 | 18,25 | 22,00 | 20,2 | 4,9 |
| 4 | 23,4 | 18,00 | 21,25 | 19,3 | 4,1 |
| 5 | 21,6 | 19,50 | 21,00 | 20,2 | 1,4 |
| 6 | 25,8 | 17,25 | 24,00 | 20,3 | 5,5 |
| 7 | 19,8 | 15,75 | 19,00 | 17,7 | 2,1 |
| 8 | 19,2 | 14,00 | 17,50 | 15,7 | 3,5 |
| 9 | 21,0 | 15,75 | 18,25 | 16,8 | 4,2 |
| 10 | 21,3 | . | . | . | . |
| 11 | 18,3 | 13,50 | 16,75 | 15,1 | 3,2 |
| 12 | 19,7 | 13,50 | 16,00 | 14,7 | 5,0 |
| 13 | 20,5 | . | . | . | . |
| 14 | (12,2) | 16,25 | 18,50 | 17,4 | -5,2 |
| 15 | (19,4) | 17,75 | 23,50 | 20,6 | -1,2 |
| 16 | 14,9 | 8,75 | 10,75 | 9,7 | 5,2 |
| 17 | 22,7 | 17,50 | 24,25 | 21,1 | 1,6 |
| 18 | (20,4) | 19,75 | 25,75 | 22,6 | -2,2 |
| 19 | 25,0 | 19,50 | 22,75 | 21,4 | 3,6 |

Tabelle 3 zeigt uns, dass sich die Differenzen zwischen den thermalen Passpunkten und den vom Scanner gemessenen Temperaturen, abgesehen von ein paar „Ausreißern“, in einem Wertebereich zwischen 1,4 K und 5,5 K bewegen. Auffällig hierbei ist, dass sich die drei Ausreißer allesamt auf Messungen von Wiesenflächen beziehen, wobei hier jeweils die vom Scanner gemessenen Temperaturen, im Gegensatz zu den anderen gemessenen Vergleichswerten, über den Referenzmessungen befanden. Die Werte der Flächen 10 und 13 konnten bei der Identifizierung im Scannerbild nicht eindeutig lokalisiert werden und wurden für weitere statistische Analysen außer Acht gelassen.

In Abbildung 10 sind die Temperaturen der thermalen Passpunkte und die zugehörigen Scannertemperaturen dargestellt, welche sich auf Grund der oben genannten Kriterien dafür qualifizierten. Ferner sind die jeweiligen Trendlinien der Messsysteme eingetragen, was auf eine konstante Abweichung der Temperaturen hinweist.



Aus den verbleibenden Werten wurde die mittlere Abweichung der Temperaturdifferenzen berechnet:

$$K_{\text{Pyro}} = \bar{x}\Delta T = +3,8 \text{ K.}$$

Auf einen solchen systematischen Temperaturfehler wird bereits bei Kaufmann (1989, S. 93 ff.) hingewiesen, welcher anhand von wenigen an Wasseroberflächen gemessenen Referenztemperaturen eine systematische Korrektur von 2,5°C anwendete.

Da offene Wasserflächen fast einem schwarzen Strahler nahe kommen ($\epsilon \approx 1$), eignen sie sich prinzipiell sehr gut für die Ermittlung systematischer Temperaturfehler. Da aber bei stehenden Gewässern Temperaturunterschiede zwischen der Oberfläche und den darunter liegenden Wasserschichten von 0,5–1,0 K auftreten können, werden für gewöhnlich Fließgewässer aufgrund ihrer konstanten Durchmischung der Wasserschichten und den daraus resultierenden ähnlichen Temperaturen zur Wasseroberfläche, bevorzugt (Kaufmann, 1989, S. 93).

Da fließende Oberflächengewässer ein sehr träges Temperaturverhalten aufweisen, wurden die Temperaturen zusätzlich mit dem Tagesmittel der Mur verglichen. An dieser Stelle ist Hr. Dipl.-Ing. Dr. SCHATZL von der Fachabteilung 19A – Referat 1, Hydrogra-

phischer Dienst des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung und Hrn. Mag. Johannes DRAXLER vom Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz für die freundliche und rasche Bereitstellung dieser Information zu danken. Für die Ursache der relativ großen Differenzen zwischen den Referenztemperaturen zeichnet KAUFMANN (1989, S. 95) mit Verweis auf mehrere Literaturangaben einen systematischen Messfehler des Thermalscanners verantwortlich.

Tabelle 4:
Scheinbare Oberflächentemperatur der Mur im Vergleich zur Tagesmitteltemperatur

| \bar{T}_X Mur (24.10.2004) | T_{Scanner} | $K_{\text{Hydro}} = \Delta T$ |
|------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 11,4 °C | 8,13 °C | 3,3 K |

Um eine größere Stabilität der Temperaturdifferenzen zwischen Referenzmessungen und Scannertemperaturen zu erhalten, sollen sowohl die Ergebnisse aus den Pyrometermessungen als auch der Wassertemperatur in den Korrekturfaktor miteinfließen. Die endgültige Korrekturformel für die Berechnung von Oberflächentemperaturen aus dem Mittagsflug 2004 gibt die Gleichung 5.3.2. wieder:

$$K = \frac{K_{\text{Pyro}} + K_{\text{Hydro}}}{2} = 3,55 = T^{\text{Korr}} - T^{\text{Scanner}}$$

Darstellung der Ergebnisse: Die Umrechnung der Grauwerte in Temperaturwerte und die Kalibrierung der Temperaturen sind wichtige Vorverarbeitungsschritte bei der Erstellung von Strahlungstemperaturkarten, die aber durch eine mangelnde Darstellung der Ergebnisse in kartographischer Form nicht ihr ganzes Potential entfalten können. Da das menschliche Auge nicht in der Lage ist, wie in diesem Fall 175 verschiedene Grauwerte voneinander zu unterscheiden, hat sich die Klassifizierung der Ergebnisse in farbkodierten Äquidensiten (in konstanten oder variablen Temperaturintervallen) für eine quantitative und qualitative Analyse international schon lange als geeignete Darstellungsmethode bewährt (Kaufmann, 1989, S. 182).

Als schwierigster Teil dieser Aufgabenstellung erwies sich die Einteilung der einzelnen Temperaturklassen, wobei hier zunächst versucht wurde, die Klassenbreiten in Anlehnung an die Strahlungstemperaturkarten von 1986 zu wählen, um eine direkte Vergleichbarkeit der Temperaturen der beiden Karten nebeneinander in einfacher Weise zu gewährleisten. Da die Oberflächentemperaturen dieser beiden Zeitpunkte aber zu stark divergierten, mussten neue Klassenbreiten gewählt werden, welche aber dem Anspruch einer Vergleichbarkeit mit der Karte von 1986 Genüge tun mussten.

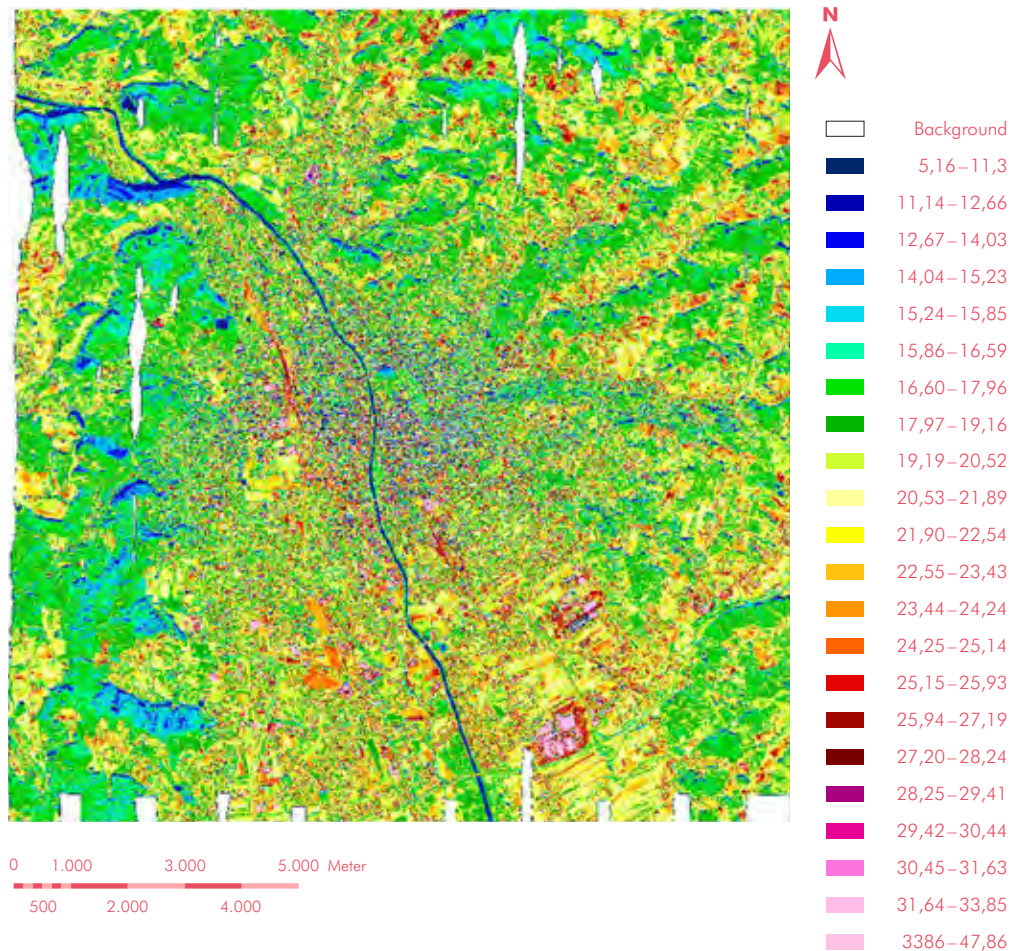
Dies wurde zum einen dadurch erreicht, dass die Klassenbreiten in einem Bezug zur Bodenbedeckung, die aufgrund ihrer Strahlungsverhalten auch ähnliche Oberflächentemperaturen aufweisen, gewählt wurden, und dadurch, dass die Farbgebung jener von 1986 entsprach.

Zusätzliche kartographische Merkmale wie ein Koordinatensystem im Bundesmeldenetz, Legende und Kartenrandgestaltung vervollständigen das Bild der Strahlungstemperaturkarte und dienen dem Betrachter als Hilfe bei der Interpretation, Identifizierung und Verortung der Objekte.

In weiterer Folge mussten die Temperaturwerte klassifiziert werden. Hierzu wurden möglichst assoziative Farbtöne gewählt, um beim Betrachter unmittelbar einen relativen Zusammenhang zwischen Farbcode und Temperatur herstellen zu lassen.

Die Einteilung der Temperaturklassen ist in Abbildung 11 ersichtlich.

Abbildung 11:
Farbkodierte
Strahlungstemperatur-
karte für die Mittags-
situation 2004



4.4.2 MODELLIERUNG DER STRAHLUNGSTEMPERATURKARTE – MORGEN 2004

Die Befliegung des Morgentermins konnte, wie bereits erwähnt, aus witterungstechnischen Gründen nicht durchgeführt werden. Da aber die Erstellung einer Strahlungstemperaturkarte sowohl für die Mittagssituation als auch für die Morgensituation geplant war, wurde durch vergleichende Analysen versucht, ein abstraktes Modell der Strahlungstemperaturkarte für die Morgensituation zu erstellen.

Als Grundlage für die Verarbeitung dienten hierbei sowohl die Ergebnisse der Thermalbefliegung von 1986 und der unter anderem daraus resultierenden Stadtklimaanalyse Graz 1990 als auch die Ergebnisse im Rahmen der Flugkampagne von 2004.

Der Grundgedanke für die gewählte Vorgehensweise ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen Bodenbedeckung und Emissivität und demnach auch aus der Oberflächentemperatur der einzelnen Objekte auf der Erdoberfläche. Diese Zusammenhänge sind in der Wissenschaft zwar schon lange bekannt, doch beschränkte sich dieses Feld in den letzten Jahren hauptsächlich auf quantitative Beschreibungen thermaler Muster und simple Korrelationen mit der

Bodenbedeckung (VOOGT und OKE, 2003, 373 f.). In derselben Quelle werden auch bisherige Studien der thermalen Fernerkundung in Bezug auf Stadtklimate beschrieben, wovon die beiden mit Abstand am häufigsten besprochenen Sensoren dem AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) und den thermalen Kanälen diverser Landsat-Generationen gewidmet waren. Hingegen beschäftigten sich nur wenige Publikationen mit der Auswertung von flugzeuggetragenen Aufnahmesystemen. Als Hauptgründe hierfür können der einfachere Zugang zu Satellitenbilddaten, reduzierte Kosten und eine verminderte Komplexität der Datensätze aufgrund einer geringeren räumlichen Auflösung der Daten genannt werden. Die Bearbeitung des hier präsentierten abstrakten Modells wurde jedoch aus mehreren Gründen (Zeitaufwand, Komplexität der Daten) stark vereinfacht und erhebt nicht den Anspruch einer klimatologisch korrekten Modellierung. Jedoch wurde versucht, relevante bekannte Beziehungen zwischen den einzelnen Parametern herzustellen und in die Modellbildung miteinfließen zu lassen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5:
Faktoren für das
Tag-Nacht-Temperatur-
verhalten von Ober-
flächen (LAZAR et al.,
1994, S. 116)

| OBERFLÄCHENTEMPERATURMUSTER | TAG | NACHT |
|-----------------------------|---|---|
| | Oberflächenbeschaffenheit Differenzierung nach Albedo, Transpiration u. a. von Grünflächen (Wald, Wiese), Dächern, Straßen usw. | Oberflächenbeschaffenheit z. B. Wärmespeichervermögen (z. B. Autobahn) |
| | Baukörperstruktur Anordnung und Höhe der Blöcke mit wechselndem Versiegelungsgrad (Gestaltung der Innenhöfe – z. B. Durchgrünung) | Entfernung vom Stadtkern Einfluss der Wärmeinsel, geringere Abkühlung der Oberflächen im Zentrum |
| | Beschattung z. B. Straßenschluchten, enge Gassen der Altstadt, Teile der Innenhöfe | Geländeklimatische Lage Extrembeispiele: Seitentalbecken bzw. Rücken über 550 m |
| | Seehöhe An bewaldeten Flanken Abnahme der Temperatur um 1K/100 m | Einfluss des Murtalauswindes Wirkt nivellierend, relativ einheitliche Oberflächentemperaturen infolge hoher Windgeschwindigkeiten |
| | Besonnung Einfluss von Hangneigung und Exposition (je steiler die Hänge, desto ausgeprägter die Gegensätze) | |

Prinzipiell liegt der Modellansatz in einer vergleichenden Analyse der Thermalstrukturen unter Einbindung der geänderten Bodenbedeckungsstrukturen von 1986 auf 2004.

DABEI SOLLEN ZUSÄTZLICHE STADTKLIMATOLOGISCHE KOMponentEN (EINFLUSSPARAMETER) EINGEBRACHT WERDEN, UM EINE MÖGLICHST GENAUE SIMULATION ZU ERZIELEN:

Bodenbedeckung und Bodenversiegelung: Jede Bodenbedeckungsart zeigt typische Eigenschaften hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens (z. B: Unterschied von verbauten und nicht verbauten Flächen etc.) im Tagesverlauf. Hier wird ein klimatischer Bodenbedeckungskatalog erarbeitet

Die Bodenbedeckungen bzw. ihr Temperaturverhalten werden durch das Relief (u. a. Geländeform, Exposition, Inversionshöhe) beeinflusst und dementsprechend im Modell berücksichtigt

Der Wind (hier im Wesentlichen der Murtalauswind) besitzt auf das Temperaturverhalten wesentlichen Einfluss. So nehmen die Oberflächen im Einflussbereich des Düseneffektes bei Weinzödl verstärkt die Temperatur des Windsystems an

Die Seitentalauswinde bewirken vor allem in der Nacht eine Beeinflussung der Oberflächentemperaturen

Auch werden Bebauungsstrukturen, die u. a. die Ausgestaltung des Wärmeinseleffektes bedingen, in die Analyse miteinbezogen

Bekannte Kaltluftbecken werden aufgrund ihrer klimatischen Besonderheit ebenfalls in die Modellierung mit einfließen

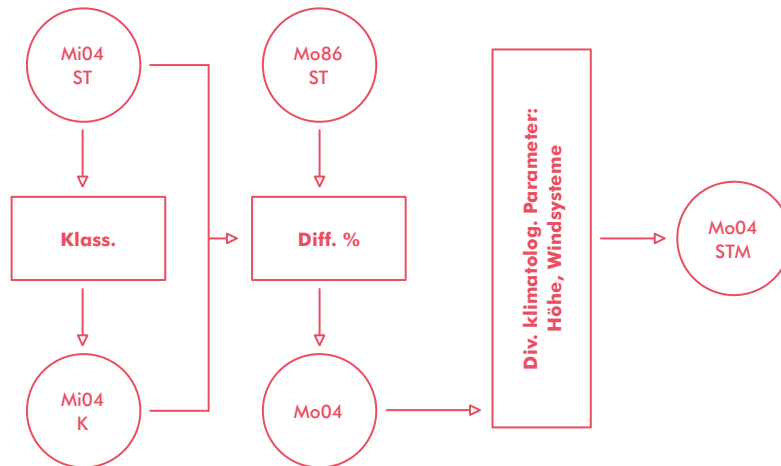
Arbeitsablauf: Die Vorgehensweise kann grundsätzlich in zwei Teilen beschrieben werden. Da die Zusammenhänge der Temperaturen auf der Bodenbedeckung basieren, wurde zunächst eine Bodenbedeckungsklassifizierung der Mittagssituation 2004 (Mi04 ST) durchgeführt, um die Klassen und in weiterer Folge die einzelnen Bildpunkte unabhängig voneinander anzusprechen und ihnen neue Temperaturwerte zuzuweisen (Mi04 K).

Im zweiten großen Teil wurden aufgrund der bekannten Bodenbedeckungsarten vergleichende Temperaturanalysen angestellt, um die Unterschiede zwischen

der Mittagssituation 2004 und der Morgensituation 1986 (Mo86 ST) herauszuarbeiten und zu quantifizieren und diese in Form eines ersten Produktes visualisiert (Mo04), wobei hier lediglich einfache Beziehungen zwischen der einzelnen Oberflächen und deren Temperaturen hergestellt wurden.

Um weitere bekannte klimatologische Einflüsse von Graz in die Verarbeitung zu integrieren, wurden diese in einem letzten Verarbeitungsschritt verarbeitet. Ein schematischer Überblick über den durchgeführten Arbeitsablauf ist in Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 12:
Arbeitsablauf (ST:
Strahlungstemperatur,
K: Klassifizierung,
STM: Strahlungstempe-
raturmodell)



Modellbildung

Bodenbedeckungsklassifizierung: Wie bereits oben erwähnt, bildet eine Bodenbedeckungsklassifizierung die Grundlage für jede weitere Verarbeitung der vorhandenen Datensätze, und hat deshalb auch einen direkten Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse. In diesem Sinne wurde zunächst eine überwachte Klassifizierung der 10 spektralen Kanäle basierend auf Trainingsgebieten durchgeführt, welche in einigen Bereichen gute Ergebnisse erbrachte und einer

ersten Evaluierung der Methodik Genüge tun konnte. Da aber für die Weiterverarbeitung der Klassifizierung zusätzliche Daten benötigt wurden, wurde die Qualität der Klassifizierung in manchen Bereichen stark beeinträchtigt. Dies kann sehr eindrucksvoll in der folgenden Abbildung 13 betrachtet werden, wo versucht wurde, die stark ausgeprägten Schlagschattenbereiche in den verbauten Gebieten unter Zuhilfenahme von Vektorinformationen einer älteren visuellen Klassifizierung zu eliminieren.

Abbildung 13:
Überrepräsentation
von Straßen aufgrund
von Schlagschatten



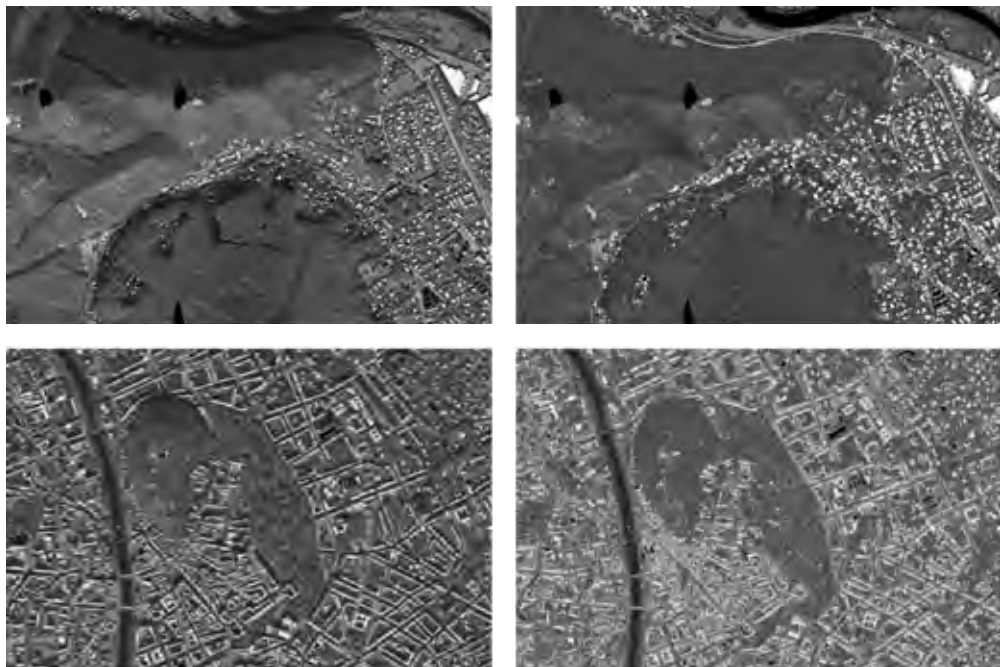
Für die endgültige Verarbeitung wurde aber eine objektorientierte Klassifikation gewählt, welche von KERN (2007) ebenfalls im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurde und bei welcher bereits bei der Klassifizierung die Schlagschattenbereiche aufgrund von Bildverarbeitungsoperationen vor der Segmentierung eliminiert wurden. Eine genaue Beschreibung der durchgeführten Klassifizierung ist ebenfalls in der oben genannten Diplomarbeit zu finden und wird deshalb an dieser Stelle nur insoweit erläutert, als eine Gesamtgenauigkeit bei der Klassifizierung von 92,6 % erreicht wurde.

Da aber in dieser Klassifizierung für die versiegelten Gebiete keine Unterscheidung zwischen Straßen, Häusern, Abstellflächen, Bauflächen und Bahnanlagen getroffen wurde, mussten diese Klassen nachträglich durch Verschneidung mit zusätzlichen Datenquellen erstellt werden. Hierbei konnte aber unter Zuhilfenahme der einzelnen Segmente eine Überrepräsentation von einzelnen Klassen vermieden werden und die natürlichen Grenzen der Segmentierung blieben.

Eliminierung von Schattenflächen: Der für das Jahr relativ späte Befliegungszeitpunkt zeichnet sich

für die Ausprägung eines verhältnismäßig großen Anteils an Schattenflächen in der Mittagssituation verantwortlich. Vor allem an Nordflanken topographisch überhöhter Gebiete und in den engen Gassen der Grazer Innenstadt sind diese sehr deutlich zu erkennen und stellen sich für die Modellbildung insofern als problematisch dar, als sie in so einer markanten Form nicht die thermale Struktur einer fiktiven Morgenbefliegung vor Sonnenaufgang widerspiegeln. Die relative Häufigkeit von 29 % (vgl. Kern, 2007, S. 52) von identifizierten Schattenflächen im gesamten Untersuchungsgebiet (ohne Gewässer) machte einen nicht unbeträchtlichen Anteil aus, und konnte daher für die Weiterverarbeitung nicht unberücksichtigt bleiben. Aus diesem Grund wurde ein relativ einfacher Ansatz gewählt, die Temperaturen in den Schattenbereichen denen in besonnten Gebieten anzugleichen. Hierfür wurde ein klassenweises Histogramm-matching durchgeführt, welches die Histogramme der Schattenbereiche jeder einzelnen Klasse an jene außerhalb beschatteter Bereiche anpasste. Die Ergebnisse konnten als zufriedenstellend erachtet werden und können in Abbildung 14 betrachtet werden (links: Mittagssituation, rechts: nach der Korrektur).

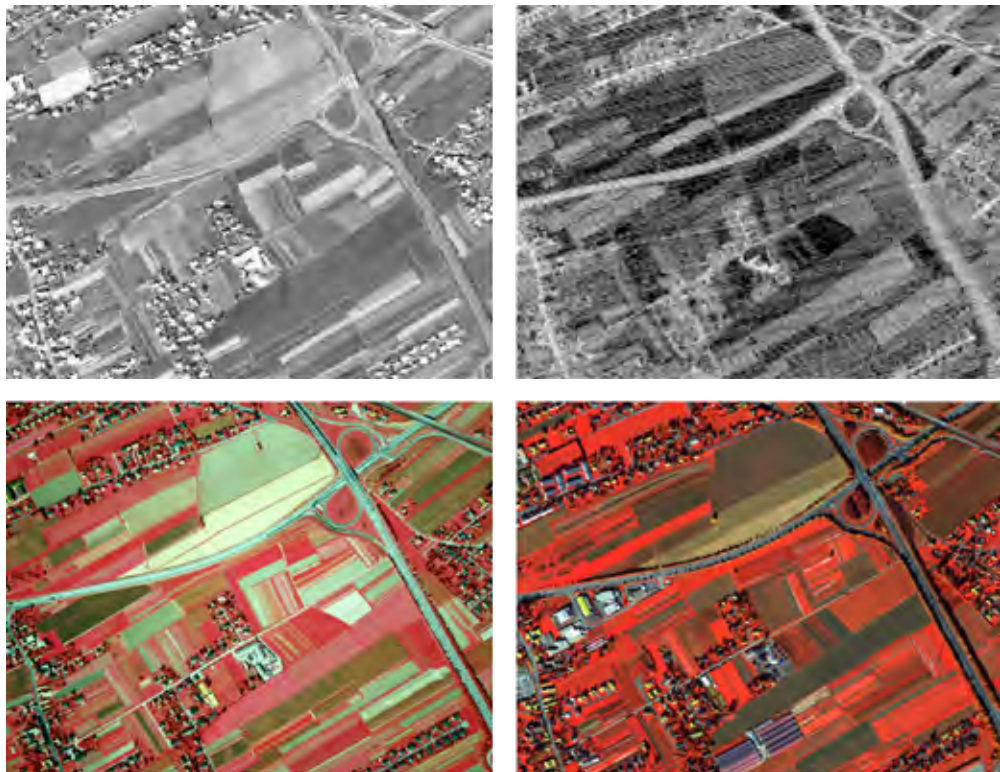
Abbildung 14:
Korrektur von
Schattenflächen



Temperaturanpassung: Nach der erfolgreichen Korrektur der Schatten wurden zwischen den für die Modellbildung relevanten Zeitpunkten Vergleiche über die Temperaturentwicklung der unterschiedlichen Oberflächen im Tagesverlauf angestellt, um die Differenzen zu quantifizieren und in die weitere Verarbeitung einfließen zu lassen. Hierfür mussten zunächst gleiche Objekte auf der Geländeoberfläche zu allen Zeitpunkten identifiziert werden, was sich aufgrund

der verminderten geometrischen Auflösung von 5×5 m der Befliegungen von 1986 gegenüber 1×1 m von 2004 und aufgrund der fehlenden multispektralen Information von 1986 als besonders schwierig erwies. Zusätzlich konnten keine eindeutigen Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit bzw. den Bauungszustand von landwirtschaftlich genutzten Flächen oder auch von versiegelten Flächen getroffen werden.

Abbildung 15:
Identifikation von
Oberflächenstrukturen
1986 und 2004



Aus diesem Grunde wurden während der Befliegung von 1986 zeitgleich mit der Thermalscannerbefliegung auch Falschfarbinfrarotluftbilder aufgenommen, welche bei der Identifikation der Flächen hilfreich waren. Die Schwierigkeit bei der Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit der Objekte vom Jahre 1986 ist sehr augenscheinlich in Abbildung 15 dargestellt. Sie zeigt, dass allein aufgrund der thermalen Information (obere beide Bildausschnitte) keine eindeutige

Aussage über den Bedeckungszustand der landwirtschaftlich genutzten Flächen getroffen werden kann und durch die Zuhilfenahme der Falschfarbinfrarotaufnahmen (links unten) monoskopisch und stereoskopisch die Identifizierung einfacher und klarer ausfällt. Eine Schlussfolgerung kann auch nicht einfach über die Aufnahme aus dem Jahre 2004 getroffen werden. Dies zeigt derselbe Ausschnitt (rechts unten) von 2004, wo klar ersichtlich ist, dass hierdurch auch

nicht auf die Bodenbedeckung der 20 Jahre jüngeren Aufnahme geschlossen werden kann. Dies ist auch einfach über die beiden unterschiedlichen Befliegungszeitpunkte im Jahr zu erklären, da 1986 Anfang Oktober, 2004 jedoch Ende Oktober geflogen wurde. In diesem Sinne wurden von jeder Klasse mehrere repräsentative Testflächen für alle Zeitpunkte gemessen und gemittelt. Als teilweise schwierig erwies es sich, für manche Klassen geeignete Flächen zu fin-

den, die von anderen klimatologischen Parametern unbeeinflusst waren. So konnten zum Beispiel keine Waldflächen in höheren Lagen für die Temperaturmessung herangezogen werden, da die vertikale Temperaturzunahme die Messung massiv beeinflusst hätte. Zusätzlich durften die Gebiete auch nicht durch ihre Exposition in positiver oder negativer Weise beeinflusst werden.

Tabelle 6:
Mitteltemperaturen
der Klassen der
drei Zeitpunkte und
deren Beziehungen
zueinander

| Nr. | Klasse | 1986_Mo (°C) | 1986_Mi (°C) | 2004_Mi (°C) | Mo86- Mi86 (K) | Mi86- Mi04 (K) | Mi04:- Mi86 (%) | Mo84:- Mi04 (%) |
|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Abbaufld. | 7,1 | 29,3 | 22,4 | 22,2 | 6,9 | 75,8 | 31,8 |
| 2 | Gewässer | 11,8 | 13,5 | 12,3 | 1,7 | 1,2 | 91,0 | 96,2 |
| 15 | Acker | 5,4 | 32,0 | 21,1 | 26,6 | 10,9 | 65,9 | 25,5 |
| 16 | Grünland | 5,2 | 22,5 | 19,9 | 17,3 | 2,7 | 88,2 | 26,3 |
| 17 | Wald | 5,2 | 24,0 | 18,5 | 18,8 | 5,5 | 77,2 | 28,1 |
| 19 | Sonder- kultur | 5,6 | 23,3 | 19,0 | 17,7 | 4,3 | 81,5 | 29,6 |
| 20 | Sportplatz | 6,0 | 27,5 | 22,3 | 21,5 | 5,2 | 81,5 | 26,8 |
| 22 | Abstellfl. | 8,3 | 32,3 | 23,8 | 24,0 | 8,5 | 73,5 | 34,8 |
| 23 | Bahn | 7,5 | 35,3 | 24,4 | 27,9 | 10,9 | 69,0 | 30,6 |
| 24 | Baufläche | 9,0 | 31,9 | 22,0 | 22,9 | 9,9 | 68,6 | 41,0 |
| 25 | Häuser | 5,8 | 36,8 | 38,5 | 30,9 | -1,7 | 104,6 | 15,1 |
| 26 | Straße | 7,8 | 25,9 | 21,5 | 18,1 | 4,3 | 83,8 | 36,2 |

Die gemessenen Werte für jede Klasse wurden gemittelt und in eine Beziehung zu den jeweils anderen beiden Zeitpunkten gestellt (vgl. Tabelle 6), was für jede Klasse individuelle Temperaturverhältnisse aus gibt, welche in Form einer Maske mit der Mittagssituation verschnitten wurden. So wurde ein erstes Er-

gebnis dieses Verarbeitungsschrittes visualisiert. Sehr unterschiedlich zeigen sich demnach die einzelnen Temperaturgegensätze zwischen dem Zeitpunkt der größten Erwärmung (Mittagssituation) und dem der größten Abkühlung (Morgensituation) (vgl. Tabelle 7, in Anlehnung an Lazar et al., 1994, S. 126).

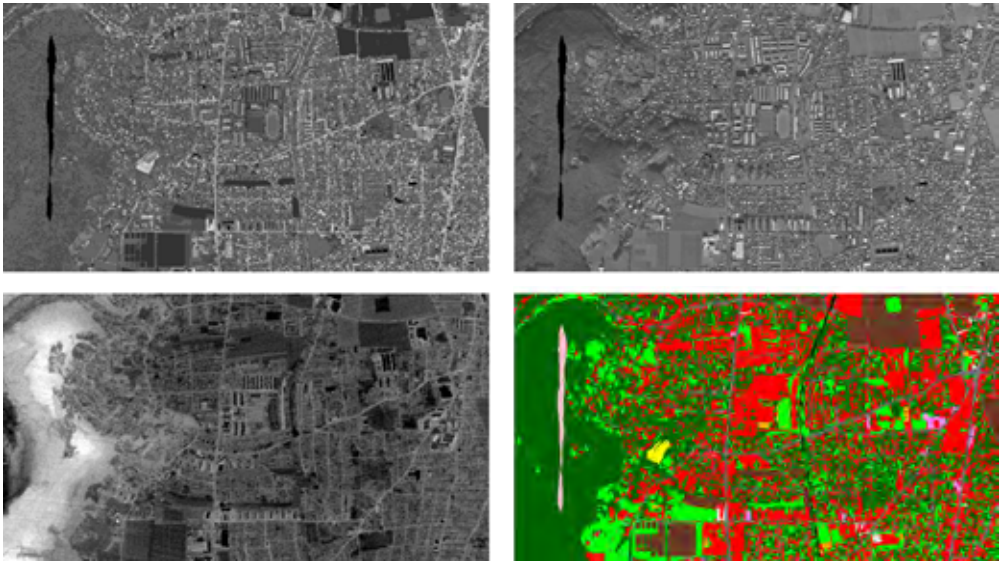
Tabelle 7:
Temperaturgegensätze
der einzelnen Klassen

| GERINGE GEGENSÄTZE | MITTLERE GEGENSÄTZE | GROSSE GEGENSÄTZE |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| Gewässer | Abbaufäche | Acker |
| | Grünland | Abstellfläche |
| | Wald | Bahnanlagen |
| | Sonderkultur | Häuser |
| | Sportplatz | |
| | Bauflächen | |
| | Straße | |

Es sollte an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass zum Zeitpunkt der geplanten Morgenbefliegung genauso wie zu Mittag Oberflächentemperaturmessungen mit einem Pyrometer durchgeführt wurden, die Vergleichbarkeit dieser Werte aber aufgrund der Talnebelbildung nicht gegeben war und diese Informationen nicht in die Modellbildung mit einfließen. Ein Ausschnitt dieses Ergebnisses im Westen von Graz ist in Abbildung 14 dargestellt (links oben: Modell, rechts oben: Mittagssituation 2004, links unten: Morgensituation 1986, rechts unten: Klassifizierung) und lässt erkennen, dass die abgeernteten Ackerflächen

deutlich mit einer dunkleren (= kälteren) Signatur erscheinen, was die Auskühlung von nicht vegetationsbedeckten, landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Nacht repräsentiert. Sehr interessant ist auch, dass die unterschiedlichen Vegetationsbedeckungen der Landwirtschaftlichen und Gärtnerischen Handelsschule Grottenhof im linken unteren Bildausschnitt durch die Temperatur sehr deutlich repräsentiert werden. Weiters treten die Straßen durch ihre hellere (= wärmere) Erscheinung hervor, wofür die bessere Wärmespeicherung von Verkehrsflächen am Morgen gegenüber dem Umland verantwortlich ist.

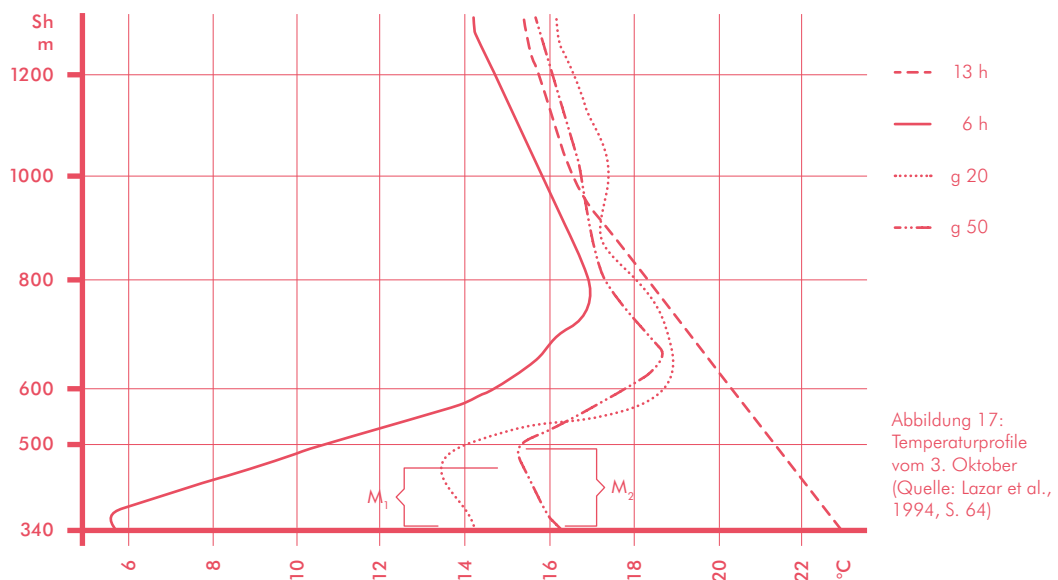
Abbildung 16:
Klassenweise
Temperaturanpassung
(li. o.: Modell,
re. o.: Mittag 2004,
li. u.: Morgen 1986,
re. u.: Klassifizierung)



Im linken unteren Bildausschnitt ist derselbe Bereich von der Morgenbefliegung 1986 zu sehen und lässt ähnliche Temperaturmuster erkennen, was den Modellansatz soweit rechtfertigt. Sehr augenscheinlich ist aber die vertikale Temperaturzunahme der Wälder an den Hängen des Ölbergs im Westen des Ausschnittes, welche zunächst im Modell noch unberücksichtigt blieb, da vorerst lediglich eine zweidimensionale Anpassung der Temperaturen aufgrund der Bodenbedeckung geschah.

Einfluss der Inversion: Die zunehmenden Temperaturen der Waldgebiete an den Hängen und Kämmen

der Riedel im Osten und des Plabutsch-Buchkogel-Zuges im Westen von Graz sind auf die Einflüsse der Bodeninversion, welche sich in der Nacht vom 2. auf den 3. Oktober 1986 entwickelte, zurückzuführen. Die Ballonsondierungen, die am Morgen und im Verlaufe des Vormittages durchgeführt wurden, zeigen eine kräftige Inversion mit 12 K bis ca. 400 m über Grund zum 6-Uhr-Aufstieg, welche während des Vormittages abgebaut wurde, und sich zum Zeitpunkt des 13-Uhr-Aufstieges völlig aufgelöst hat (vgl. Abbildung 17).



Klimatologische Phänomene dieser Art lassen sich aber nicht einfach über eine direkte Reduktion der Temperaturen der Mittagssituation in das gewünschte Modell einbinden und so musste diese Erscheinung in einem separaten Arbeitsschritt der fiktiven Befliegung hinzugefügt werden. Ursprüngliche Überlegungen die vertikale Temperaturzunahme im Modell für die Morgensituation 2004 auf den Ballonsondierungen vom 24.10.2004 basieren zu lassen, wurden

aber aufgrund folgender Erkenntnisse verworfen: wie in Abbildung 17 ersichtlich, konnte sich in der Nacht auf den Befliegungstag keine Bodeninversion entwickeln, was aus den Temperaturprofilen der Radiosondenaufstiege von 04:20, 05:40 und 06:50 Uhr hervorgeht. Lediglich zum Zeitpunkt des 4. Aufstieges um 08:30 Uhr ist eine verhältnismäßig ausgeprägte Inversion ab etwa 100 m über Grund mit 5 K zu erkennen.

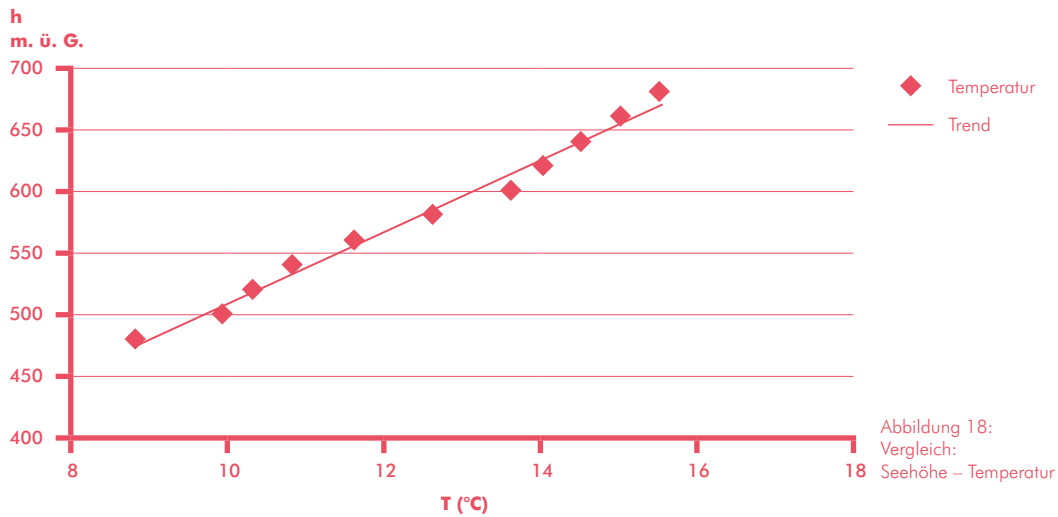
Da aber diese Inversion aufgrund der Talnebelbildung nicht so stark ausgeprägt war wie zum Zeitpunkt des Morgenflugs von 1986, kamen die Parameter der Inversion von 1986 in der Modellbildung zum Tragen, da ansonsten eine geringere Vergleichbarkeit der beiden Situationen gegeben gewesen wäre. Bereits durch den Ansatz eines Modells wird dem Anwender ein gewisser Handlungsspielraum für die Auswahl der Parameter gelassen.

Um die Einflüsse der Inversion auf die Oberflächentemperaturen der Wälder genau zu quantifizieren, wurden in verschiedenen Höhen Temperaturen dieser Oberflächen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Abbildung 19 dargestellt und zeigen sich in einer höchst korrelativen Beziehung zueinander.

Tabelle 8:
Beziehung zwischen
Höhe und Temperatur

| h (m) | 480 | 500 | 520 | 540 | 560 | 580 | 600 | 620 | 640 | 660 | 680 | C = 0,994 |
|--------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----------|
| T (°C) | 8,8 | 9,9 | 10,3 | 10,8 | 11,6 | 12,6 | 13,6 | 14 | 14,5 | 15 | 15,5 | |

Vergleich: Seehöhe – Temperatur



Ferner wurden Temperaturprofile über einen Riedelrücken gemessen, welche ebenfalls den deutlichen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der

Seehöhe visualisieren. Diese sind in Abbildung 19 dargestellt (links: Seehöhe, rechts: Temperatur).

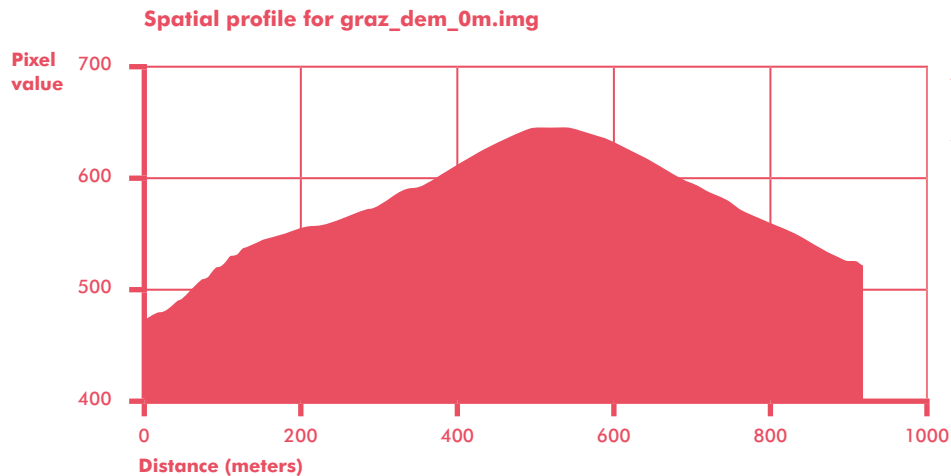
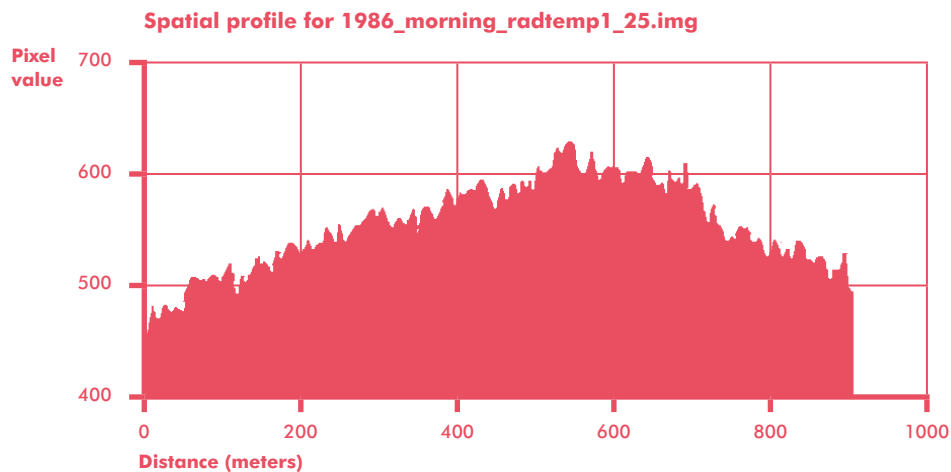


Abbildung 19:
Beziehung zwischen
Seehöhe und Tempera-
tur (links: Höhenprofil,
rechts: Thermisches
Profil)



Auf diesen Erkenntnissen beruhend, wurden die Einflüsse der Inversion in die Modellbildung nach folgender Gleichung integriert:

$$T_{\text{Inv}} = 0,034 \cdot (h - 328) + T_{\text{Wald}}$$

Rolle und Bedeutung der Windsysteme und Kaltluftbecken: Da dieses Modell, wie bereits oben erwähnt, lediglich auf Erkenntnissen aus bisherigen Stadtklimaanalysen beruht und niemals den komple-

xen klimatologischen Vorgängen in der Natur entsprechen wird, konnten die Einflüsse der nächtlichen Seitentalauswinde auf die Oberflächentemperaturen bisher nicht berücksichtigt werden. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, sind in der Nacht Seitentalwinde mit einer Mächtigkeit bis zu 50 m für eine Abkühlung in den östlichen Seitentälern verantwortlich. Verhinderter Kaltluftabfluss in der Nacht führt zur Ausprägung von Kaltluftbecken, in denen sich die Kaltluft aus den Seitentälern staut und somit für hohe Temperaturunterschiede gegenüber dem Stadtkern sorgt.

Diese Erkenntnisse sind in der „Strahlungstemperaturkarte Graz-Morgenflug“ (vgl. DIBAG, 1989) sehr deutlich ersichtlich, ein Ausschnitt daraus ist in der folgenden Abbildung 20 dargestellt. Sie zeigt den Bereich zwischen Mariatrost und Stiftingbachtal in NE von Graz. Klar zu erkennen ist das Föllinger Becken

im rechten oberen Bildausschnitt, welches sich von seiner Umgebung durch die bläuliche (= kühlere) Färbung deutlich abgrenzt. Weiters sind die kühleren Seitentäler und die stark erwärmten (rötliche Färbung) Riedelrücken zu erkennen.

Abbildung 20:
Abkühlung in den
Seitentälern und Bildung
von Kaltluftbecken

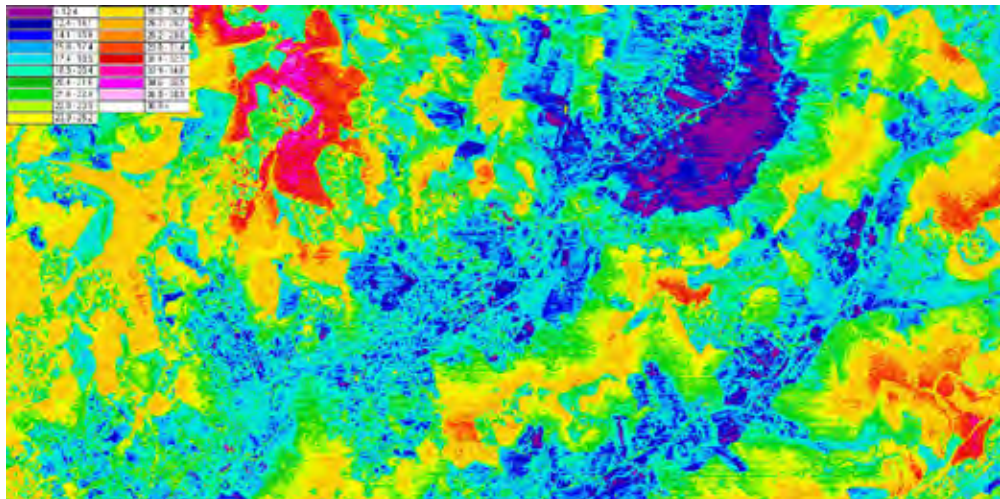
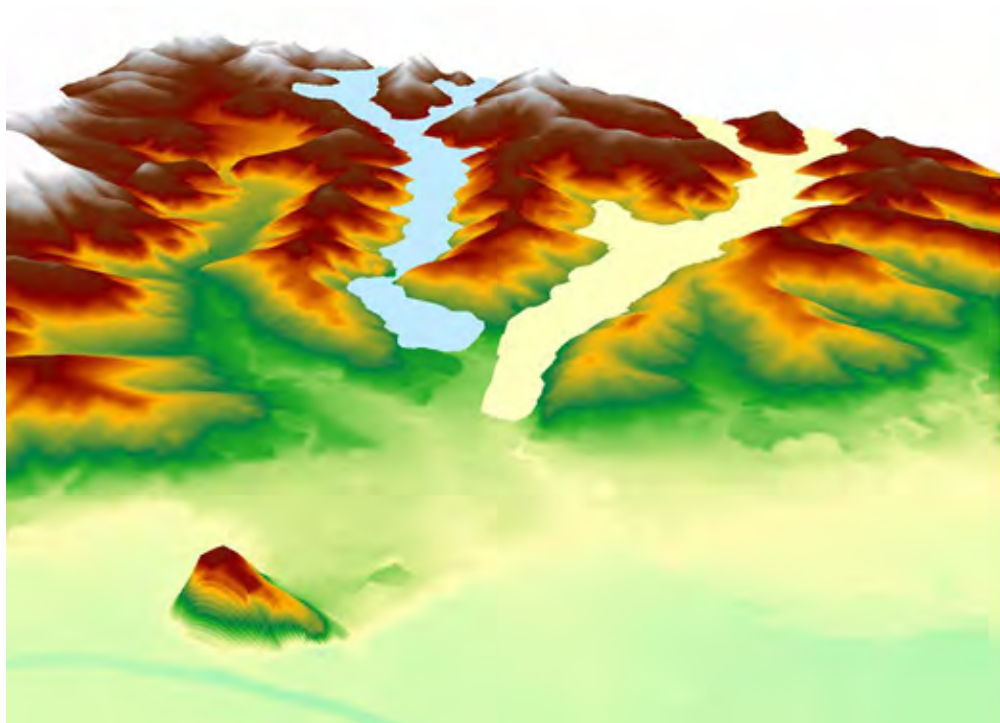


Abbildung 21:
Modellierung des
Seitentalauswindes.
(hier: Ragnitz- und
Stiftingtal) Blickrichtung:
NNE

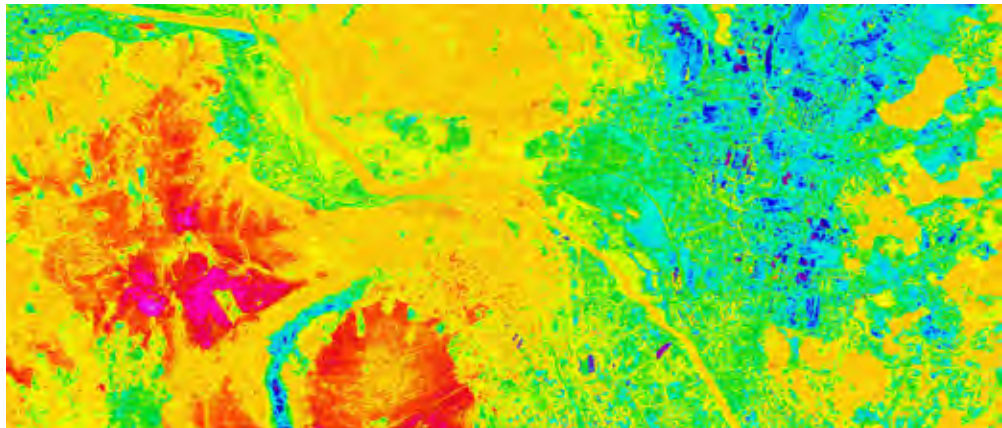


Die Wirkungsweise der Seitentalauswinde kann in abstrahierter und vereinfachter Form in Abbildung 21 betrachtet werden. Zu sehen ist das Riedelland im Osten von Graz mit dem Mariatrostertal, dem Ragnitztal und dem Stiftingtal. Für die beiden Letzteren sind die Seitentalauswinde in ihrer Mächtigkeit dargestellt, wobei in dieser vereinfachten Darstellung die Ausläufer der Winde in das Stadtgebiet nicht visualisiert sind. Um diesen klimatologischen Phänomenen Rechnung zu tragen, wurden diese Erkenntnisse auch hier als Parameter in die Modellbildung eingebettet.

Ein weiteres sehr augenscheinliches Phänomen der Windsysteme ist die Beeinflussung der Oberflächentemperaturen im Norden von Graz bei Gösting durch

den Murtalauswind, welche beinahe eine Homogenisierung der Temperaturen in diesem Bereich aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten (Düseneffekt) bewirkt. In Abbildung 22 ist klar zu erkennen, dass selbst die sonst kühleren Dächer und sogar landwirtschaftlich genutzten Flächen kaum von den Temperaturen der Straßen zu unterscheiden sind. Windsysteme in der Natur und deren Wechselwirkung mit der Erdoberfläche sind grundsätzlich eine komplexe Thematik und deren korrekte klimatologische Einbettung in dieses Modell würde den Rahmen dieser Aufgabenstellung sprengen, weshalb hier lediglich eine zweidimensionale Abstraktion dieser Auswirkungen erfolgt.

Abbildung 22:
Düseneffekt bei
Gösting

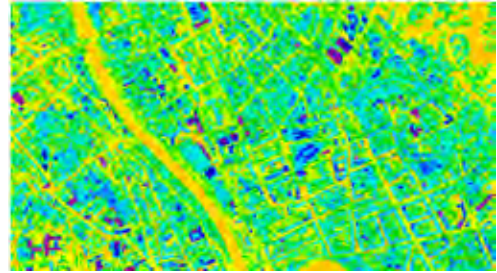
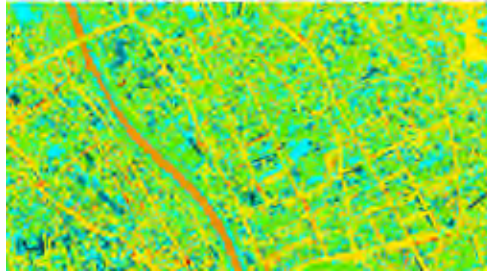


Darstellung und Besprechung der Ergebnisse:

Analog zur Mittagssituation musste die auf diesem Wege erstellte Temperaturinformation für den menschlichen Betrachter aufbereitet werden, um eine einfache und rasche Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten. Hierfür wurden ebenfalls Temperaturklassen gebildet, was in Anlehnung zur Farbgebung von 1986 geschah. Dabei wurden Modifikationen zur besseren Abgrenzung der Farben für den Betrachter eingebracht. In den folgenden Zeilen werden die erzielten Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin besprochen und mit der Referenzkarte von 1986 verglichen.

Versiegelte Flächen: Bei Betrachtung der „Strahlungstemperaturkarte Graz-Morgenflug“ von 1986 ist eine deutliche Differenzierung von Straßen gegenüber Häusern ersichtlich. Dieses Erscheinungsbild zeichnet sich ebenso in der generierten Karte für die fiktive Morgenbefliegung 2004 ab (vgl. Abbildung 23). Deutlich zu erkennen ist auch der Verlauf der Mur, welche durch ihre höhere Temperatur am Morgen gegenüber ihrem Umland hervortritt.

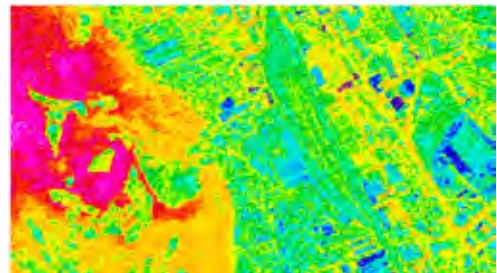
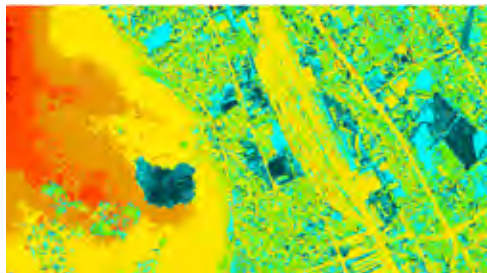
Abbildung 23:
Differenzierung von
Straßen (links: Morgen
2004, rechts: Morgen
1986)



Als offensichtlich problematischer gestaltete sich die Anpassung der Temperaturen des Bahnhofgeländes. Wie in Abbildung 24 ersichtlich, wurden die Temperaturen nicht stark genug reduziert, was der Ausküh-

lung der Gleisanlagen während der Nachtstunden entsprechen würde. Die Temperaturen erscheinen als zu hoch gegenüber jenen von 1986.

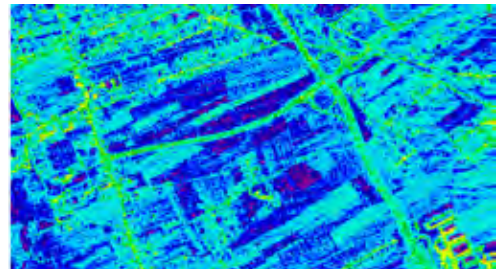
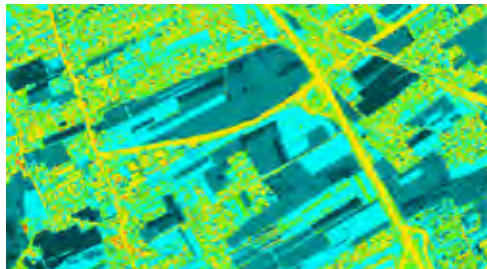
Abbildung 24:
Undeutliche Differen-
zierung des Bahnhof-
geländes (links: Morgen
2004, rechts: Morgen
1986)



Landwirtschaftliche Nutzflächen: Erfolgreich konnte die Differenzierung der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten von landwirtschaftlichen Nutzflächen und Grünanlagen durchgeführt werden. Wie

in Abbildung 25 zu erkennen ist, lassen sich unterschiedliche Texturen und Temperaturklassen selbst bei Acker- und Grünlandflächen voneinander unterscheiden.

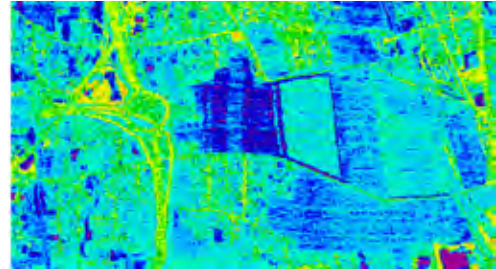
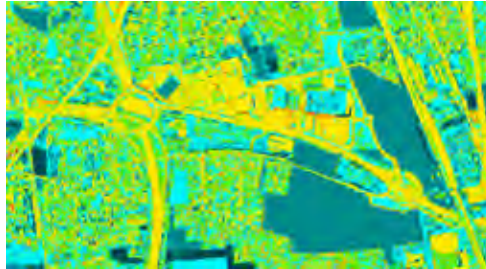
Abbildung 25:
Nutzungsstatus von
landwirtschaftlichen
Nutzflächen
(links: Morgen 2004,
rechts: Morgen 1986)



Bebauungsveränderungen: Ein interessanter Aspekt ist die Darstellung der veränderten Baustruktur durch den Vergleich der beiden Aufnahmen. In Abbildung 26 ist die Fertigstellung des Autobahnanschlusses in Graz West und die Verbauung der vormals landwirtschaftlich genutzten Flächen durch das

1989 eröffnete „Shopping Center West“ durch die „wärmere“ Farbgebung deutlich zu erkennen. Die versiegelten Flächen heben sich gut von den zuvor an dieser Stelle vorhandenen Acker- und Grünlandflächen ab.

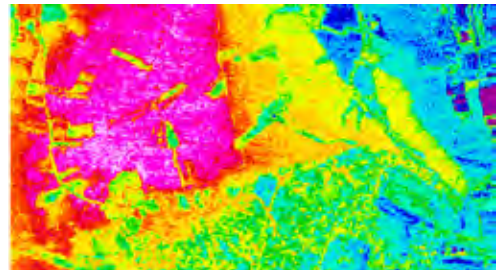
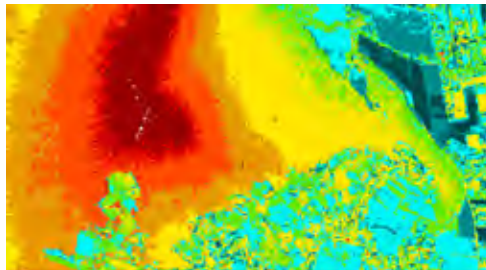
Abbildung 26:
Veränderung der
Baustruktur
(links: Morgen 2004,
rechts: Morgen 1986)



Klimatologische Parameter: An dieser Stelle sollen noch kurz die klimatologischen Parameter bei der Modellbildung visualisiert werden. In Abbildung 27 ist ein Beispiel für die für die Erwärmung der Waldflächen in höheren Lagen verantwortliche Inversion zu sehen. Die lineare Anpassung der Erwärmung im Modell ist durch die ringförmige Abgrenzung der ein-

zelnen Temperaturklassen zueinander deutlich zu erkennen. Diese und alle weiteren unten genannten Einflüsse sind wie schon erwähnt sehr komplexer Natur und können in einem Modell nicht den genauen Verlauf der natürlichen vertikalen Erwärmung aufzeigen, jedoch wurde dieser „Effekt“ durchaus erfolgreich simuliert.

Abbildung 27:
Vertikale Temperatur-
entwicklung
(links: Morgen 2004,
rechts: Morgen 1986)



Ebenfalls als sehr kompliziert erwies sich die Aufgabe, die Beeinflussung der Seitentalauswinde und die Entstehung von Kaltluftbecken aufgrund des verhinderten Abfließens der Kaltluft. In Abbildung 28 ist die deutliche Erniedrigung der Temperaturen im Föllinger Becken zwar zu erkennen, jedoch scheint die

Beeinflussung durch die Seitentalauswinde nicht im erwünschten Maße erfolgt zu sein. Dies ist ebenfalls auf die Komplexität der natürlichen Vorgänge und die Vereinfachung bei der Einbindung dieser Parameter zurückzuführen.

Abbildung 28:
Seitentalauswinde
und Kaltluftbecken
(links: Morgen 2004,
rechts: Morgen 1986)

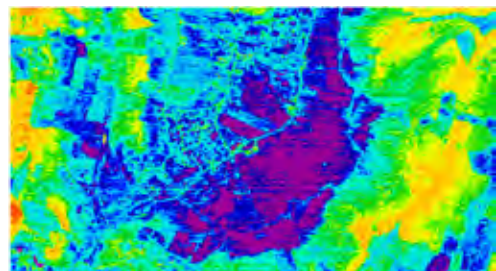
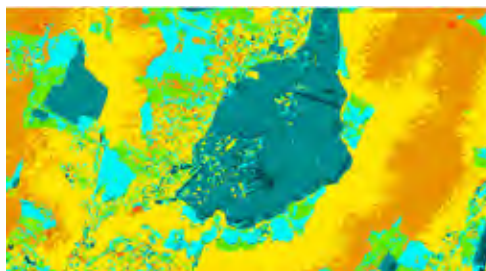
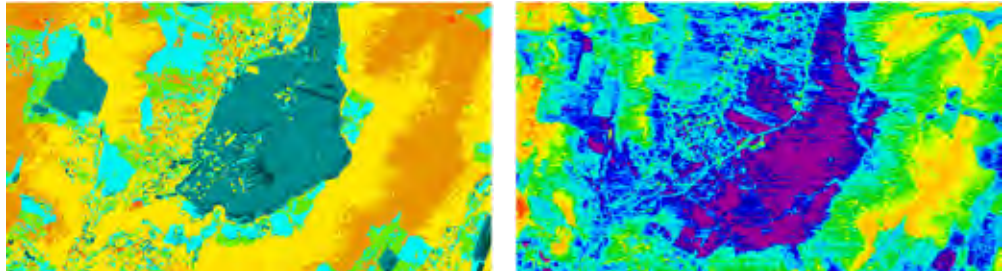


Abbildung 29:
Düseneffekt bei Gösting
(links: Morgen 2004,
rechts: Morgen 1986)



Wie erwartet, konnte die gewünschte Homogenisierung der Oberflächentemperaturen im Bereich der Auswirkungen des Düseneffektes in Gösting nicht in einem solchen Maße erfolgen, wie sie zum Zeitpunkt der Befliegung von 1986 wirkte (Abbildung 29). Durch die (vereinfachte) zweidimensionale Einbindung dieses Parameters konnten nicht alle natürlichen Vorgänge wie gewünscht dargestellt werden.

Probleme bei der Modellerstellung und Resümee: Nach Evaluierung der Ergebnisse kann schlussfolgernd erwähnt werden, dass der grundsätzliche Ansatz der Erstellung einer fiktiven Strahlungstemperaturkarte über vergleichende Analysen und Einbindung von zusätzlichen klimatologischen Erkenntnis-

sen zumindest in eine Richtung zeigt, welchen durch aus großen Spielraum und Potenzial für Modifikationen lassen.

Die lineare Reduzierung der Temperaturen, welche kaum zusätzlichen klimatologischen Einflüssen unterliegen, zeigte in einigen Gebieten und für manche Klassen (Straßen, Acker- und Grünlandflächen, Wald) verhältnismäßig gute Ergebnisse. Hier lässt eine Optimierung der Parameter auf eine weitere Verbesserung der Ergebnisse hoffen.

Als höchst problematisch erwies sich erwartungsgemäß die Einbindung der „heiklen“ klimatologischen Parameter der Seitentalwindssysteme, der Erwärmung durch den Murtalauswind und der Kaltluftbecken.

Abbildung 30:
Modellierte Strahlungstemperaturkarte für die Morgensituation

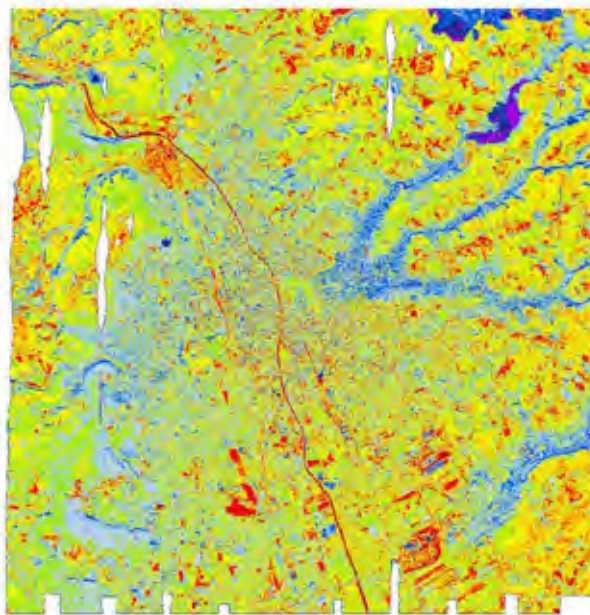
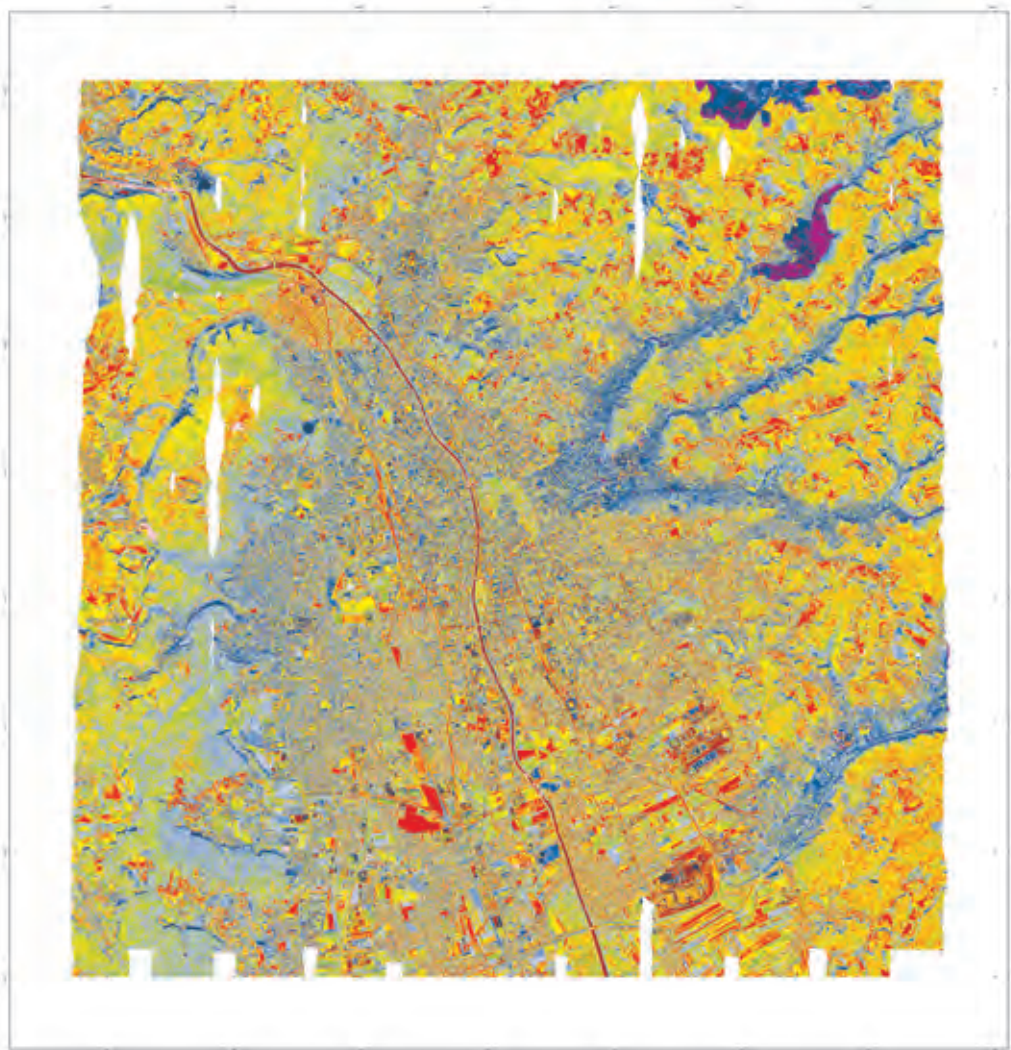


Abbildung 31:
Strahlungstemperatur-
karte von 2004
(simulierter Morgen-
flug)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 24. Oktober 2004
Simulation (Morgenflug)



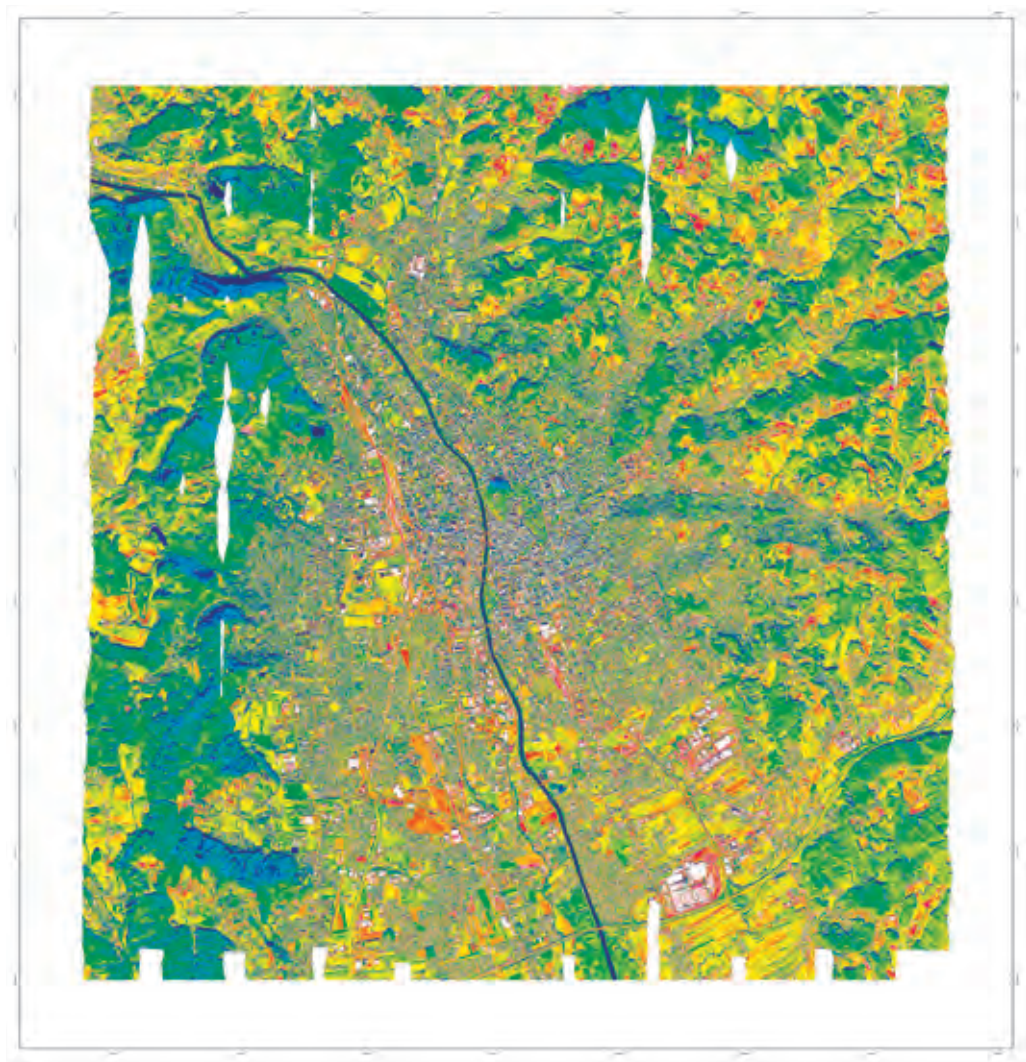
| | | |
|--|---|--|
| Sehr kalt: Kaltluftbecken, Seitentäler, abgeerntete Ackerflächen | Mäßig warm: Wälder, Wiesen | Sehr warm: Gewässer, Wälder, Ackerflächen |
| Kalt: Wiesen, Seitentäler, Hausdächer | Warm: Wälder in höherer Lage, Ackerflächen | |

0 1.000 3.000 5.000 Meter
500 2.000 4.000

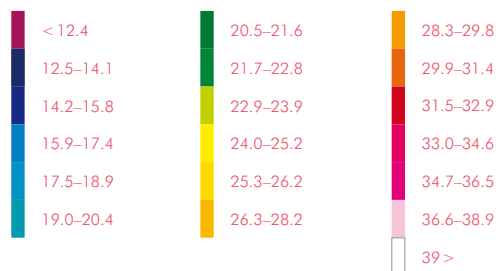
Abbildung 32:
Strahlungstemperatur-
karte der Thermal-
scannerbefliegung
von 2004 (Mittagsflug)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 24. Oktober 2004
12:02–14:15 MEZ (Mittagsflug)



Temperaturangaben in °C



4.5 TABI-1800-BEFLIEGUNG VON 2011

Zielsetzung: Das Ziel der Analyse der TABI-Daten ist eine kartographische Darstellung der Strahlungs- bzw. Oberflächentemperaturen des Stadtgebiets von Graz aus den am 20. Dezember 2011 aufgenommenen Thermalscannerdaten. Die erzeugten Karten dienen in weiterer Folge einer Stadtklimaanalyse und einer vergleichenden Gegenüberstellung mit Strahlungs- und Oberflächentemperaturkarten aus vorangegangenen Befliegungen. Die erstmalig im Winter (20. Dezember 2011, ca. 21 Uhr Ortszeit) durchgeführte Thermalbefliegung der Stadt Graz ermöglicht auch Aussagen über die besonderen klimatischen Verhältnisse in der Heizperiode. Dabei kam der von ITRES neu entwickelten Thermalsensor TABI-1800 (Thermal Airborne Broadband Imager; TABI-1800, 2012) mit einer Bodenauflösung von 60 cm und einem thermalen Auflösungsvermögen von 0.05° C zum Einsatz. Bei der stadt- und geländeklimatologischen Analyse zeigte sich, dass sich durch die hohe Auflösung detaillierte Analysen der thermalen Strukturen der Stadt Graz und somit auch Aussagen über den Wärmehaushalt von Hausdächern durchführen lassen. Die spezielle klimatische Situation (kein Schnee, Windarmut, niedrige Lufttemperaturen) während der Befliegung im Dezember eignet sich sehr gut für die Erfassung der Wärmeabgabe der städtischen Strukturen an die Atmosphäre. Somit kann die Wärmeabgabe künstlicher Oberflächen analysiert und visualisiert werden.

Methodik: Die Kalibrierung der Rohdaten wurde bereits von der Firma ITRES nach der oben genannten Methode durchgeführt. Die gelieferten Daten beinhalten somit schon die Strahlungstemperaturwerte. Diese Werte sind allerdings fiktive Temperaturwerte, da die Emissionsgrade verschiedener Oberflächen noch nicht berücksichtigt wurden. Der Emissionsgrad bezeichnet das Verhältnis der Strahldichte einer Strahlungsquelle zur Strahldichte eines schwarzen Körpers und ist ein Wert zwischen 0 und 1. Von einem schwarzen Strahler spricht man, wenn ein Objekt sowohl den maximalen Absorptions- als auch den wellenlängenabhängigen Emissionskoeffizienten $\epsilon = 1$ besitzt. Die Strahlungstemperatur ist generell immer geringer als die Oberflächentemperatur. Diese Tatsache wird durch die folgende Formel belegt:

$$T_{\text{rad}} = \epsilon^{1/4} T_{\text{kin}}$$

Wobei

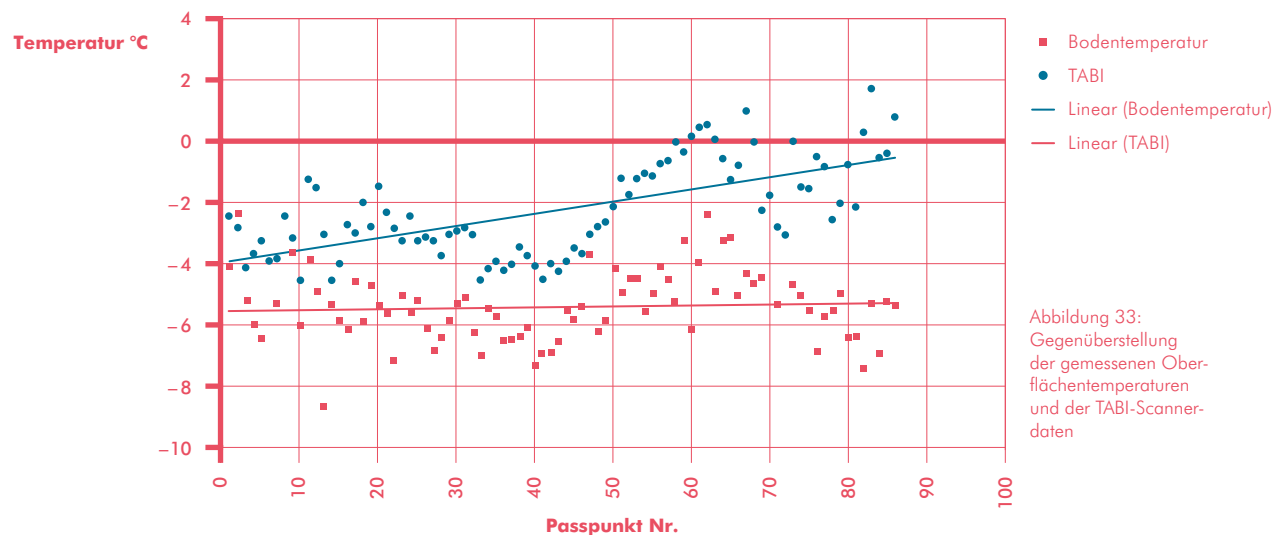
$$= \epsilon^{1/4} T_{\text{kin}}$$

T_{rad} die Strahlungstemperatur,

ϵ der Emissionskoeffizient und

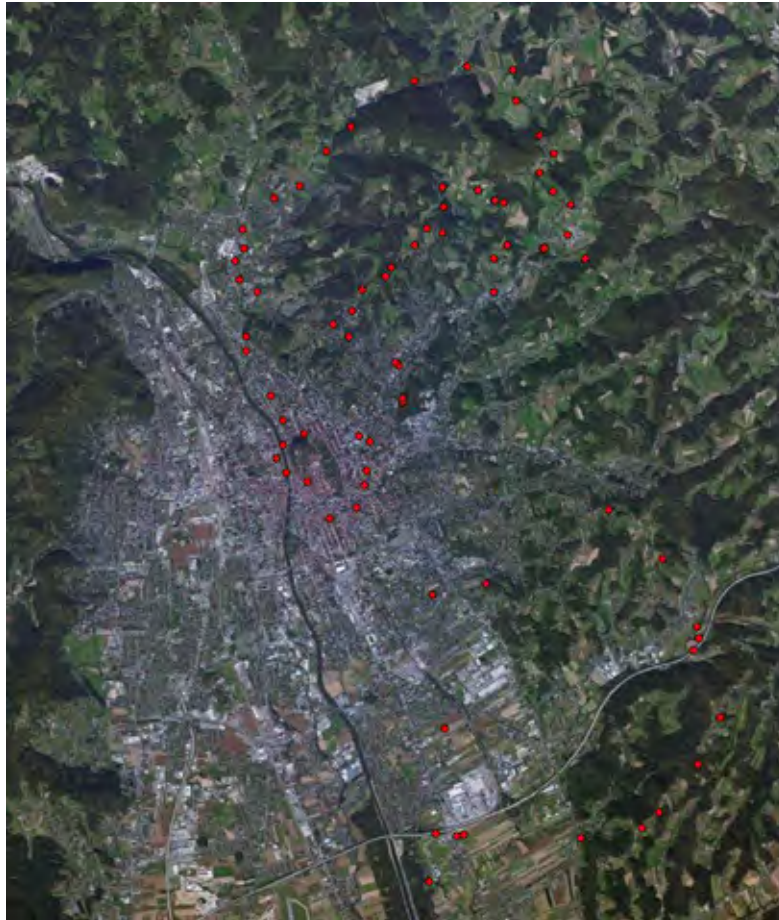
T_{kin} die wahre Oberflächentemperatur ist (Jensen, 2005)

Der TABI-Sensor nimmt, im Gegensatz zu den meisten anderen Thermalscannern, nicht im „traditionellen“ Infrarotbereich zwischen 8 und 14 μm auf. Für diesen Wellenbereich gibt es ausführliche Dokumentationen der Emissionsgrade von einer Vielzahl von Oberflächen. Für den Wellenlängenbereich zwischen 3,7 und 4,8 μm sind diese Informationen allerdings viel spärlicher. Aufgrund dieser Tatsache und weil an der Universität Graz kein Labor zur Bestimmung dieser Emissionsgrade zur Verfügung steht, wurden keine Emissionswerte berücksichtigt. Laut Kaufmann (1989) ist dies ohnehin nicht zwingend notwendig, da die Streuung der einzelnen Emissionsgrade der im Gelände vorkommenden Objekte relativ gering ist. Des Weiteren ist für eine Stadtklimaanalyse weniger die Genauigkeit der Werte auf mehrere Kommastellen gefragt, sondern vielmehr die Erkennung und Visualisierung von Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Objekten.



Für die Erstellung der Oberflächentemperaturkarte wurde daher auf eine andere Methode zurückgegriffen. Diese stützt sich im Wesentlichen auf die von Wurm (2007) verwendete Methodik. Gleichzeitig mit der Befliegung wurden die bodennahen Lufttemperaturen erhoben. Dabei wurde auf eine möglichst große Abdeckung des Grazer Stadtgebietes und auf die Auswahl von möglichst repräsentativen Oberflächen geachtet. Abbildung 33 zeigt die räumliche Lage der sogenannten thermalen Passpunkte.

Abbildung 34:
Lage der thermalen
Passpunkte im Stadt-
gebiet von Graz



Die Messungen der oberflächennahen Lufttemperatur wurden mit den Werten der Scannerdaten an den Referenzpunkten verglichen und in weiterer Folge wurde daraus die mittlere Abweichung der der Temperaturdifferenzen berechnet. Die Werte der Messungen werden in Abbildung 34 dargestellt.

Die Berechnungen ergaben eine mittlere Differenz:

$$\text{Diff.Messung} = \bar{\Delta T} = 3,2 \text{ K.}$$

Offene Wasserflächen kommen einem schwarzen Strahler nahe ($\epsilon \approx 1$) und daher eignen sie sich prinzipiell sehr gut für die Ermittlung systematischer Temperaturfehler. Aus diesem Grund wurden die scheinbaren Oberflächentemperaturen der Mur zum Befliegungszeitpunkt zusätzlich zu den thermalen Passpunkten für die Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz zwischen den Scannerdaten und den tatsächlichen Temperaturen herangezogen.

Diese Daten wurden von der Stadt Graz übermittelt.
Die Temperaturdifferenzen berechneten sich wie folgt:

$$\text{Diff. Hydro} = \bar{x}\Delta T = 4,2 \text{ K.}$$

Für die Berechnung des endgültigen Temperaturdifferenzwerts wurden die zuvor ermittelten Werte wiederum gemittelt:

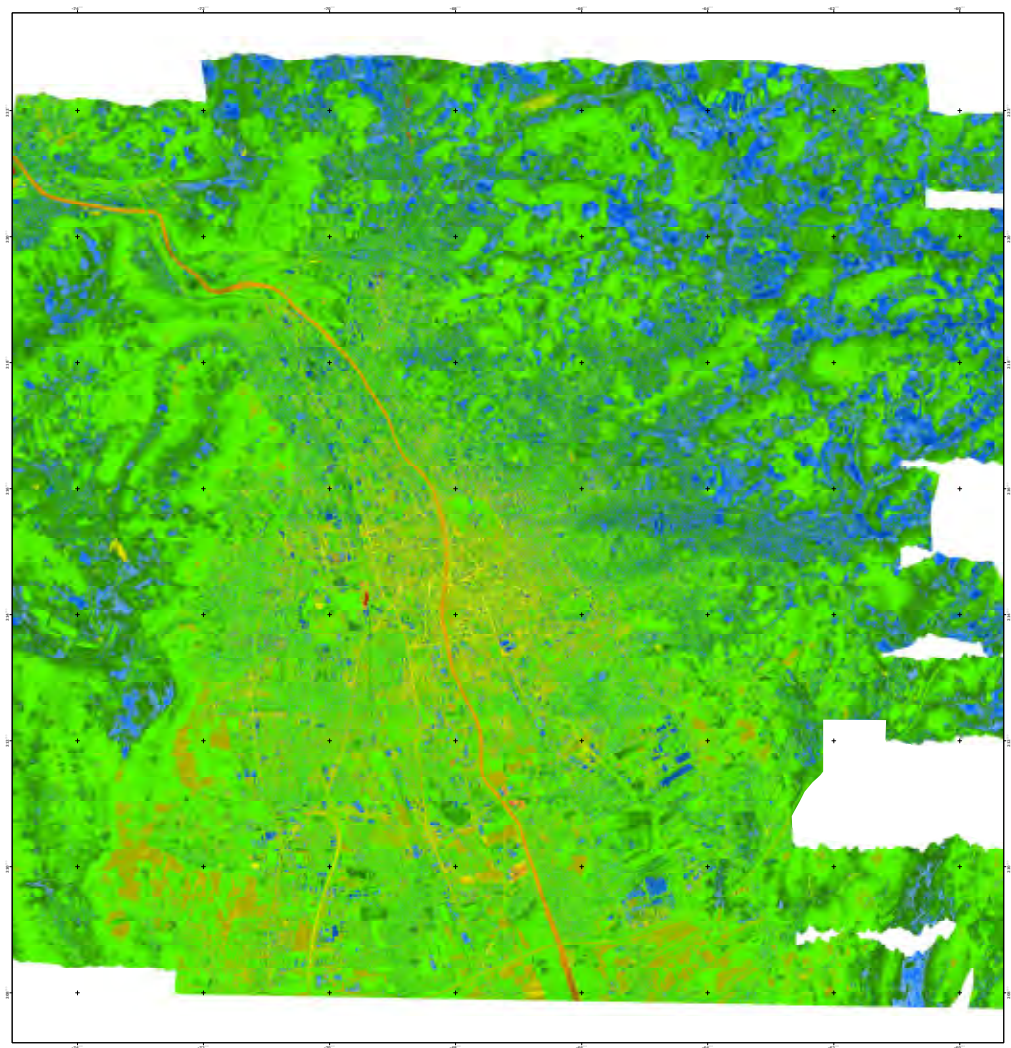
$$\text{Diff. Gesamt} = \frac{\text{Dif.Messung} + \text{Diff.Hydro}}{2} = 3,7 \text{ K.}$$

Um eine Karte der scheinbaren Oberflächentemperaturen zu erstellen, wurde somit der Wert 3,7 zu jedem einzelnen Wert der Strahlungstemperaturen addiert.

Abbildung 35:
Strahlungstemperaturkarte der
Thermalscanner-
befliegung vom
20. Dezember 2011
(5-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

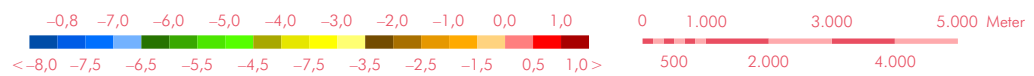
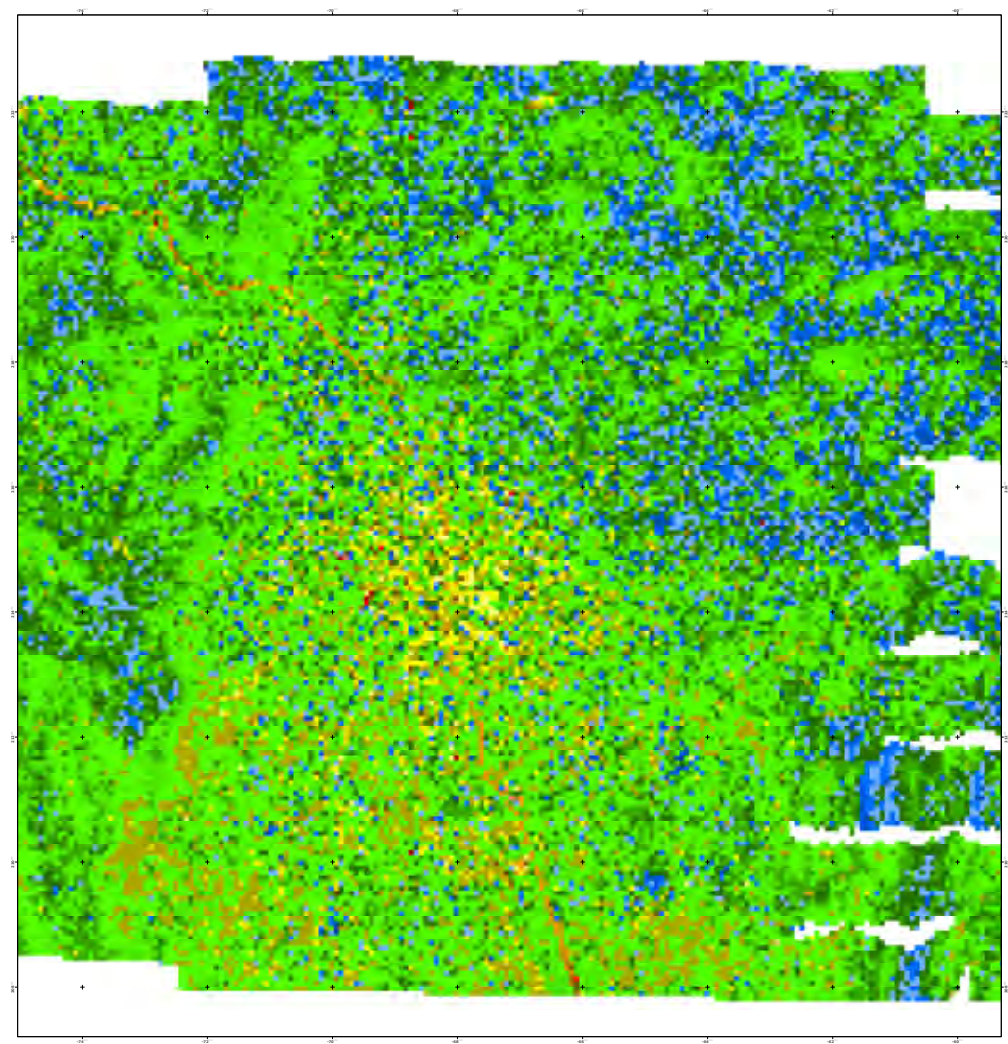


Abbildung 36:
Strahlungstempe-
raturkarte der
Thermalscanner-
befliegung vom
20. Dezember 2011
(80-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011

18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

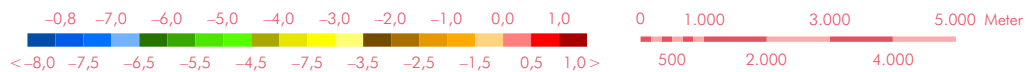
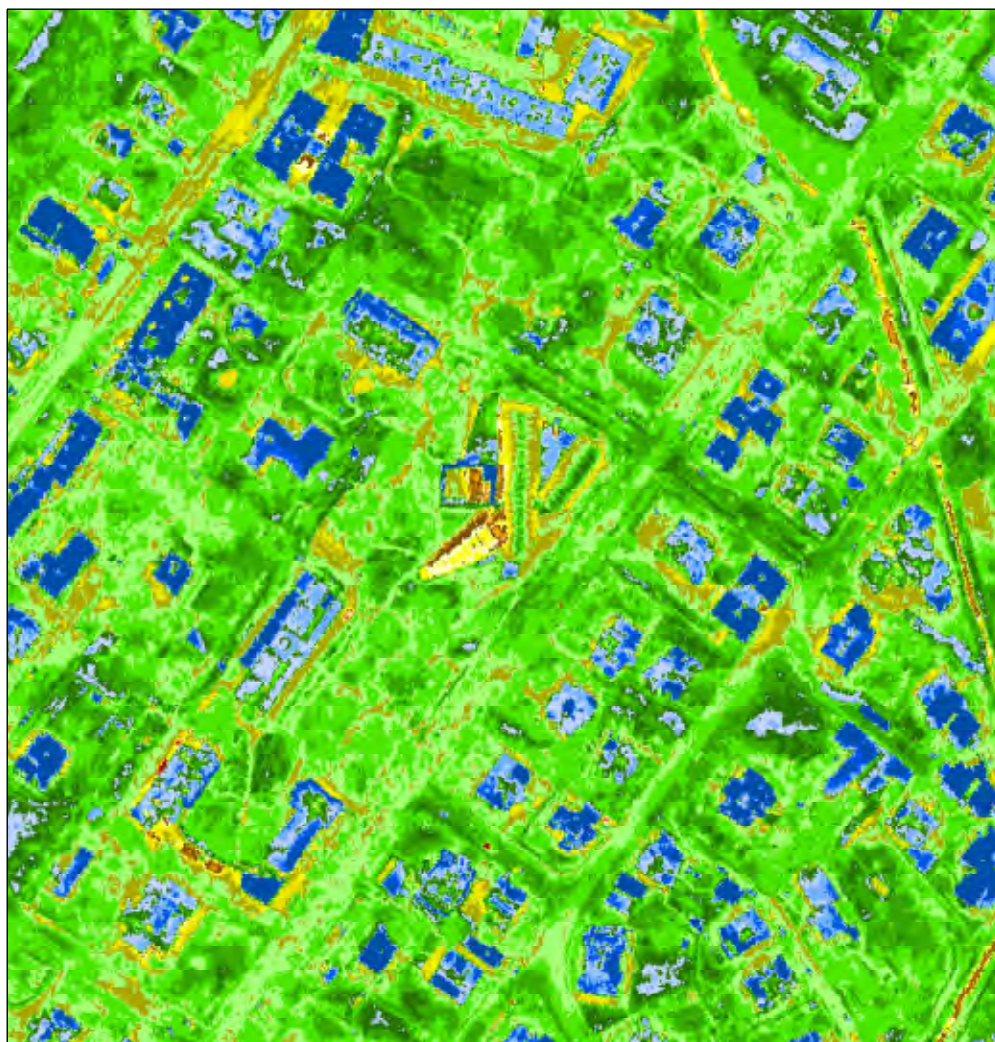


Abbildung 37:
Strahlungstemp-
eraturkarte im Bereich
Botanischer Garten
am 20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

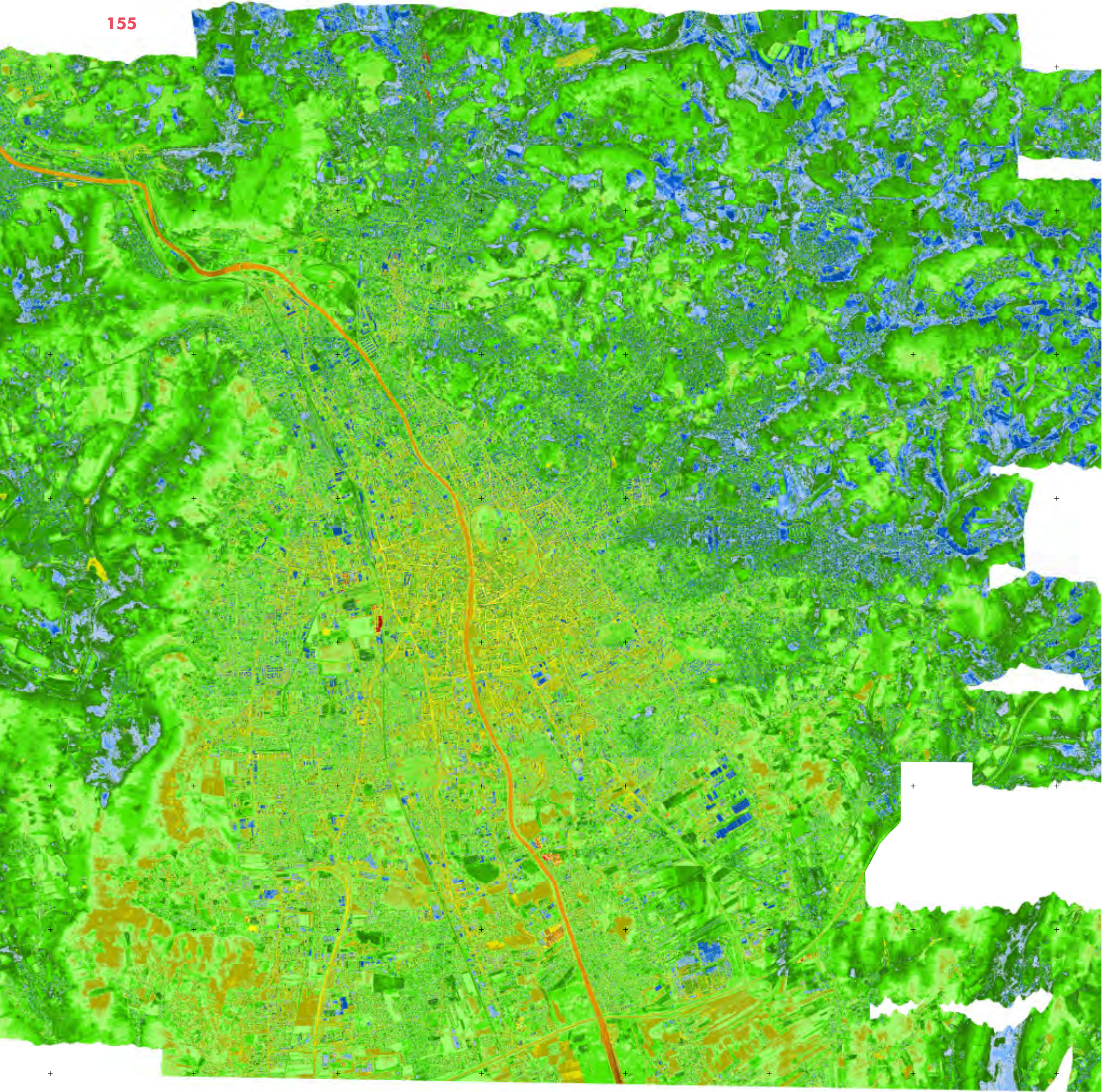
Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Botanischer Garten
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C





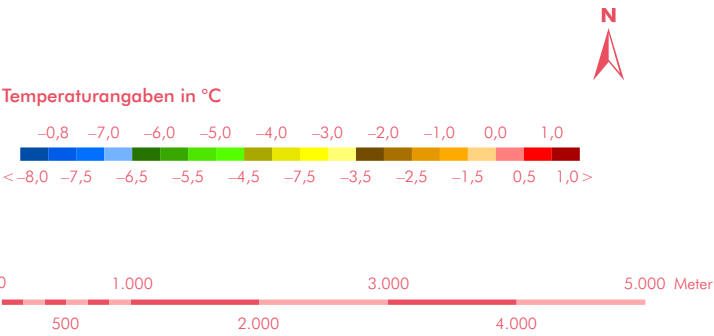
4. Erstellung der Temperaturkarten von Graz

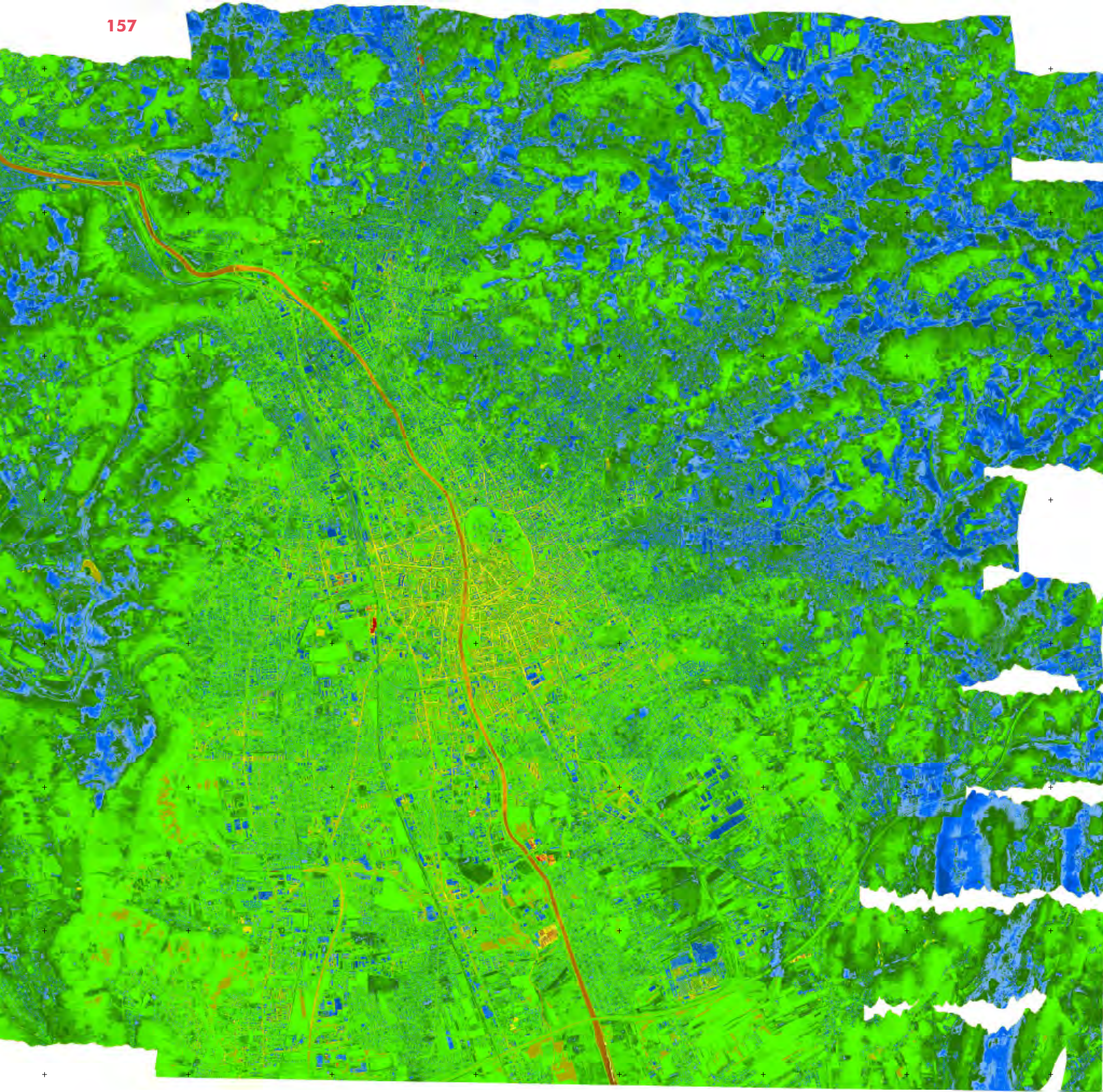
Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011
18:52–20:11 MEZ
Datengrundlage: TABI 1800 Thermalscannerbefliegung
vom 20.12.2012, 18:52–20:11 MEZ
Bodenauflösung 0,6 m × 0,6 m
Geometrische Entzerrung: Vermessung AVT-ZT-GmbH,Imst
Strahlungstemperaturkarte: Institut für Geographie
und Raumforschung, Universität Graz
Bearbeitung: W. Sulzer, A. Salentinig



Abbildung 38:
Strahlungstemperatur-
karte (0,6-m-Auflösung)





4. Erstellung der Temperaturkarten von Graz

Oberflächentemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011
18:52–20:11 MEZ
Datengrundlage: TABI 1800 Thermalscannerbefliegung
vom 20.12.2012, 18:52–20:11 MEZ
Bodenauflösung 0,6 m × 0,6 m
Geometrische Entzerrung: Vermessung AVT-ZT-GmbH,Imst
Strahlungstemperaturkarte: Institut für Geographie
und Raumforschung, Universität Graz
Bearbeitung: W. Sulzer, A. Salentinig



Abbildung 39:
Oberflächentemperatur-
karte (0,6-m-Auflösung)

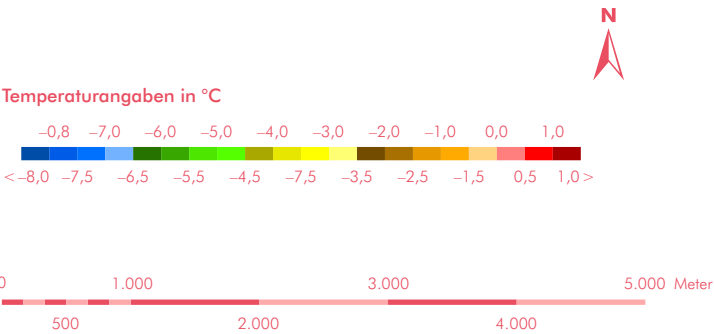


Abbildung 40:
Strahlungstemp-
eraturkarte im Bereich
Hauptplatz am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Grazer Hauptplatz
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C



Abbildung 41:
Strahlungstemp-
eraturkarte im Bereich
Messe am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht „Magna Steyr Fahrzeugtechnik“
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

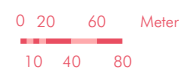
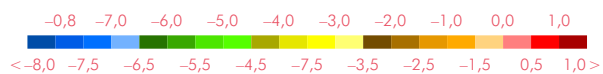


Abbildung 42:
Strahlungstemper-
turkarte im Bereich
Reininghausgründe
am 20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Reininghausgründe
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C



Abbildung 43:
Strahlungstemp-
eraturkarte im Bereich
Bad zur Sonne am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Hallenbad „Bad zur Sonne“
18:52–20:11 MEZ



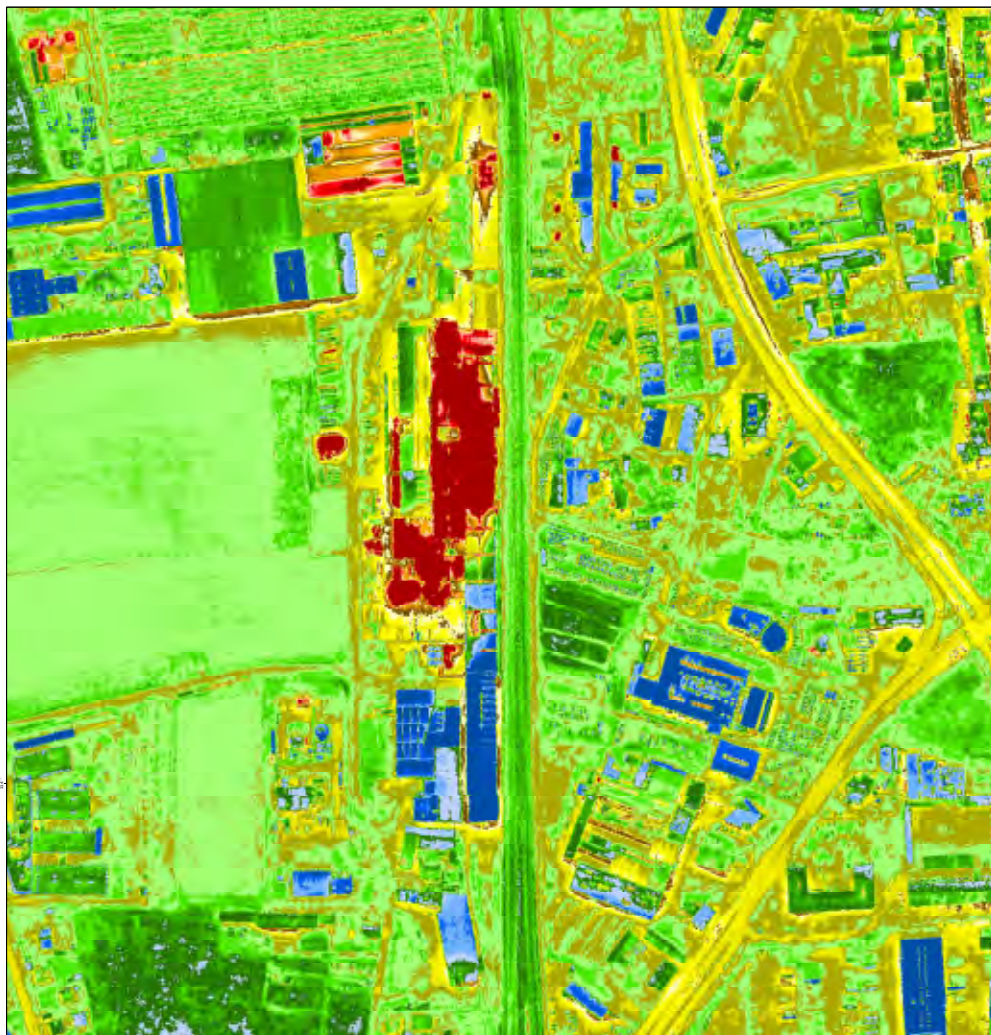
Temperaturangaben in °C



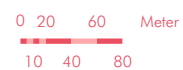
Abbildung 44:
Strahlungstemp-
eraturkarte im Bereich
Stahlwerk Marien-
hütte am 20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Stahlwerk „Marienhütte“
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C



Analyse der Ergebnisse:

Oberflächentemperaturkarten eignen sich hervorragend, um Temperaturverteilungsmuster in bestimmten Siedlungsgebieten zu identifizieren und zu beschreiben. Besonders in Städten ist deutlich zu erkennen, dass unterschiedliche Bebauungsstrukturen ein unterschiedliches Temperaturverhalten aufweisen. Dadurch lassen sich beispielsweise versiegelte Flächen aufgrund ihrer starken Überwärmung sehr gut von anderen Oberflächen unterscheiden. Dieser und weitere Sachverhalte sollen in den folgenden Absätzen dokumentiert werden.

Baukörperstrukturen

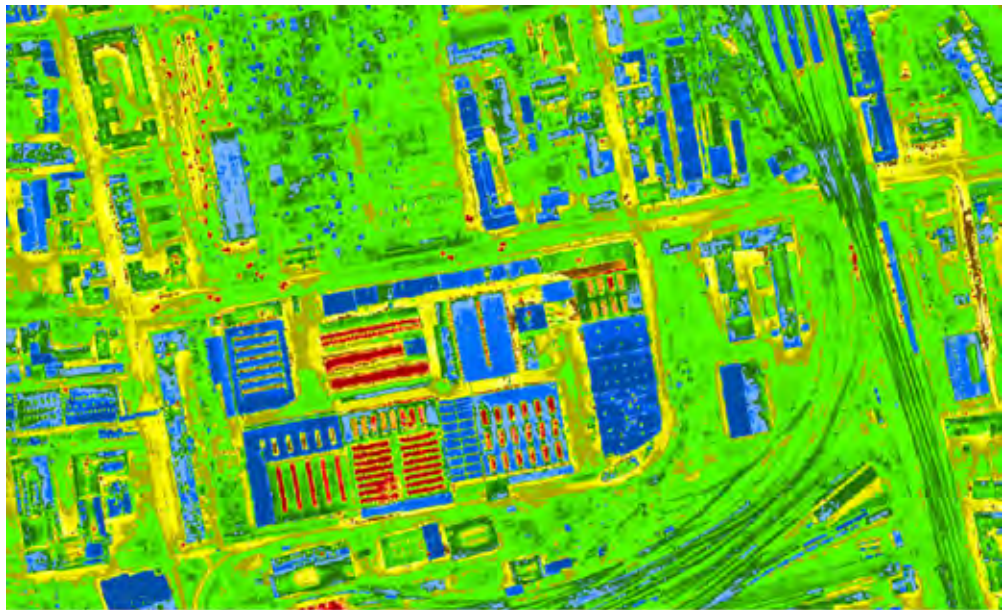
Altstadt: Die Überwärmung des historischen Teils der Stadt Graz durch den hohen Anteil an versiegelten Flächen wird anhand der Oberflächentemperaturkarte eindeutig sichtbar. Gebäude lassen sich gut von Straßenanlagen unterscheiden, da diese Wärme in geringerem Ausmaß zu speichern vermögen. Da die Befliegung in der Vorweihnachtszeit stattfand, sind auch die Christkindlmärkte in der Altstadt gut zu erkennen.

Abbildung 45:
Strahlungstemperatur-
karte im Bereich Altstadt
(Hoher Versiegelungs-
grad)

**Temperaturangaben in °C**

Gründerzeitliche Bebauung: Im Bereich östlich des Stadtparks lässt sich die charakteristische Struktur der gründerzeitlichen Bebauung sehr gut erkennen. Da es sich bei den Daten um eine Nachtaufnahme handelt, weisen die Dachflächen geringfügig niedrigere Temperaturwerte als die mit Vegetation bedeckten Innenhöfe auf. Als Erklärung hierfür könnte eine raschere nächtliche Abkühlung der Dachflächen im Vergleich zu den Innenhöfen dienen. Dieses Muster der leicht wärmeren Innenhöfe erstreckt sich über das gesamte Stadtgebiet.

Abbildung 46:
Strahlungstemperatur-
karte im Bereich von
einem Industrie- und
Gewerbegebiet



Temperaturangaben in °C



Industrie- und Gewerbeflächen: Industrie- und Gewerbeflächen weisen einen hohen Versiegelungsgrad auf. Prinzipiell sollte das zu einer Überwärmung führen. In der Industriezone westlich des Grazer Hauptbahnhofs wird das anhand der Straßenanlagen deutlich sichtbar. Die Dachflächen erscheinen allerdings deutlich kälter. Das liegt wiederum an den Dachmaterialien (Metалldächer) und der damit verbundenen raschen nächtlichen Auskühlung. Besonders ins Auge stechend ist auch der Wärmeverlust durch Dachfenster. Des Weiteren sind überwärmte Dachflächen ein Indiz für rege Arbeitstätigkeit innerhalb des Industriegebäudes zum Zeitpunkt der Befliegung.

Gartenstadt: Die sogenannte „Gartenstadt“ wird gekennzeichnet durch eine lockere Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern und durch einen hohen Grünflächenanteil. In der Oberflächentemperaturkarte weist die Gartenstadt ein relativ heterogenes Erscheinungsbild auf. Straßen und Gebäude können eindeutig von den umliegenden Grünflächen unterschieden werden. Ähnlich wie bei den Innenhöfen in der gründerzeitlichen Bebauungsstruktur sind die Oberflächentemperaturen an Grünflächen aufgrund der geringeren nächtlichen Auskühlung in einer Winternacht geringfügig höher als an Gebäuden.

Abbildung 47:
Strahlungstemperatur-
karte – Typus Garten-
stadt



Temperaturangaben in °C



Grünflächen und landwirtschaftlich genutzte Flächen

Grünflächen und Parks: In den Sommermonaten haben die innerstädtischen Grünflächen und Parks eine kühlende Wirkung, was besonders durch den Stadtpark verdeutlicht wird. Im Winter ist dieser Effekt allerdings nur bedingt gültig. Bei der vorliegenden Oberflächentemperaturkarte ist zwar erkennbar, dass die Temperaturen in der Innenstadt höher sind als im Stadtpark, allerdings trifft das nicht auf die anderen umliegenden Bebauungsstrukturen zu.

Wiesen- und Ackerflächen: Aufgrund der unterschiedlichen Bewuchsarten bei landwirtschaftlich genutzten Flächen weisen diese eine große Streuung der Oberflächentemperaturen auf. Im vorliegenden Beispiel sind die Ackerflächen wärmer als die Wiesenflächen in der Mitte des Bildausschnitts.

Wälder: Wälder weisen hauptsächlich expositionsbedingte Unterschiede im Temperaturverhalten auf. Nordexponierte Wälder sind in der Regel kälter als tagsüber besonnte Wälder.

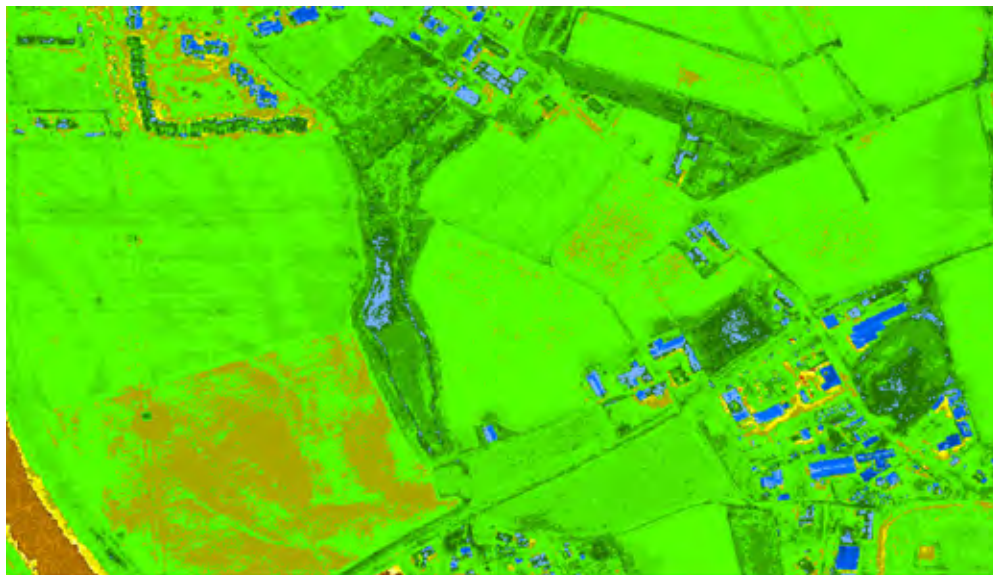
Abbildung 48:
Strahlungstemperaturkarte – der Stadtpark und der Schlossberg im Vergleich zu den umliegenden Gebieten



Temperaturangaben in °C



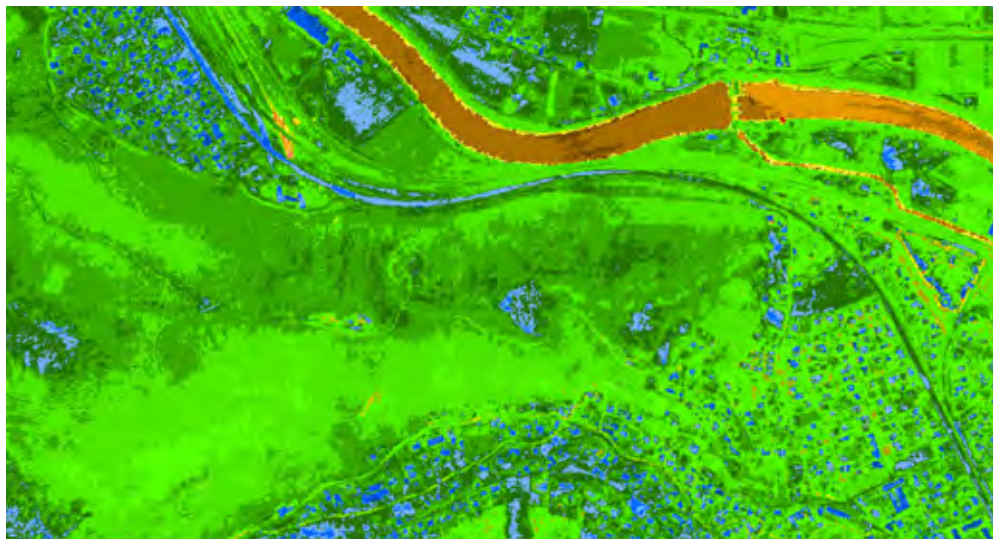
Abbildung 49:
Strahlungstemperatur-
karte – Wiesen- und
Ackerflächen



Temperaturangaben in °C



Abbildung 50:
Strahlungstemperatur-
karte – Einfluss der Ex-
position auf Oberflä-
chentemperaturen von
Wäldern



Temperaturangaben in °C



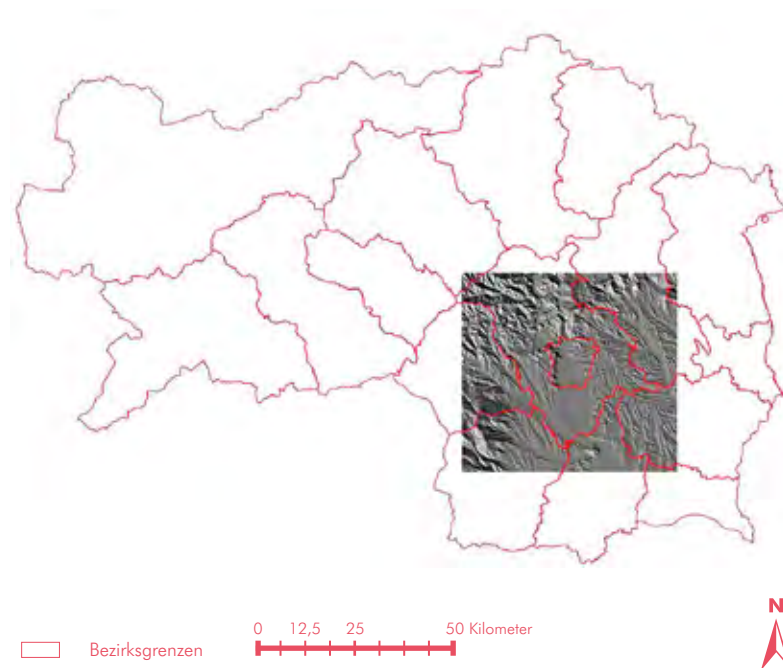
4.6 EINBINDUNG VON LANDSAT-NACHTAUFGNAHMEN

Das Beispiel der städtischen Wärmeinsel von Graz sowie die Temperatur-, Wind- und Wetterverhältnisse im Großraum Graz sollen das Potenzial und die vielfältigen Möglichkeiten einer Thermal-Nachtaufnahme darbieten. Anhand der LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme vom 20. August 2000 wurde zuerst eine Strahlungstemperaturkarte erstellt und diese anschließend ausgewertet. Da LANDSAT-Aufnahmen systembedingt nur Tagesaufnahmen macht, muss hier auf historische Daten zurückgegriffen werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen einer Seminararbeit von Christian Stiegler durchgeführt.

Der geographische Untersuchungsraum wurde so gewählt, dass der Zentralraum Graz annähernd den geographischen Mittelpunkt darstellt. Das Gebiet erfasst ebenfalls die urbanen Räume Weiz, Gleisdorf, Voitsberg, Köflach, Gratkorn sowie Gratwein. Als nordwestliche Begrenzung wurde die Gleinalm gewählt, als südliche der Wildoner Buchkogel. Abbildung 51 zeigt die genaue Lage des Untersuchungsgebietes.

Für die Analyse der städtischen Wärmeinsel sowie die Darstellung der Temperaturverhältnisse im Großraum Graz steht als zentrales Datenmaterial eine LANDSAT-Nachtaufnahme der Steiermark mit dem Aufnahmezeitpunkt von 22:30 Uhr MEZ zur Verfügung. Der verwendete Thermalbereich im Kanal 6 liegt zwischen $10,4$ und $12,5 \mu\text{m}$, die räumliche Auflösung beträgt $60 \text{ mal } 60 \text{ Meter}$ und die radiometrische Auflösung wird mit 8 Bit angegeben. Des Weiteren findet ein digitales Höhenmodell der Steiermark Verwendung.

Abbildung 51:
Lage der LANDSAT-
Nachtaufnahme



Meteorologische Messdaten/Wetterlage: Für den Aufnahmezeitpunkt vom 20. August 2000 stehen zusätzlich Messdaten der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit, des Niederschlags, der relativen Luftfeuchte und des Luftdrucks der Stationen Graz Universität, Laßnitzhöhe, St. Radegund und Schöckl zur Verfügung. Außerdem liegen Daten von Sondenaufstiegen am Flughafen Graz Thalerhof vor. Laut Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2009) herrscht im Alpenraum vom 18. bis zum 21. August 2000 schwacher Hochdruckeinfluss mit flacher Druckverteilung. Diese gradientschwache Lage G sorgt außerdem für Zufuhr heißer Luft aus Südwest und damit verbunden sehr hohen Temperaturen, welche am 20. August 2000 um 15 Uhr MESZ in Graz den Höchstwert von 34,8 °C erreichen.

Erstellung Strahlungstemperaturkarte: Als Ausgangsprodukt für eine spätere Darstellung des Potenzials einer nächtlichen Thermalaufnahme dient eine Strahlungstemperaturkarte. Da der Sensor am Satelliten die Oberflächentemperatur anhand der empfangenen Strahlung misst und diese zuerst die Atmosphäre durchdringen muss und dabei Veränderungen bzw. Streuung oder teilweiser Absorption unterzogen ist, wird eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Mit Hilfe der Funktion „Haze Reduction“ in ERDAS IMAGINE werden dabei die atmosphärischen Einflüsse herausgefiltert. Das Histogramm der Aufnahme zeigt nach der Korrektur eine Verteilung der Pixelwerte im Bereich zwischen ca. 108 bis 140.

Die Umrechnung der Temperatur erfolgt in mehreren Schritten und orientiert sich im Wesentlichen an die Ausführungen von STRATHOPOULOU und CARTALIS (2007). Zuerst wird der jeweilige Pixelwert (DN) des Kanals 6 der LANDSAT-Nachtaufnahme in die Spektralstrahlung L umgewandelt. Dies erfolgt mit folgender Formel:

$$L = 0,0370588 \cdot DN + 3,2$$

L = Spektralstrahlung (Wm⁻²sr⁻¹μm⁻¹)

DN = digital number, jeweiliger Pixelwert des Grauerthistogramms

Anschließend erfolgt die Umwandlung der Spektralstrahlung in die vom Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (BT) mit der Formel:

$$BT = \frac{K_2}{\left\{ \ln \left(\frac{K_1}{L} + 1 \right) \right\}}$$

Wobei:

BT = am Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (in Kelvin)

K₂ = Kalibrationskonstante von LANDSAT 7 (1282,71 Kelvin)

K₁ = Kalibrationskonstante von LANDSAT 7 (666,09 Wm⁻²sr⁻¹μm⁻¹)

L = Spektralstrahlung am Satellitensensor (Wm⁻²sr⁻¹μm⁻¹)

Die Umrechnung der Strahlungstemperatur von Kelvin in Grad Celsius erfolgt durch:

$$T(^{\circ}\text{C}) = - 273,15 + T \text{ K}$$

Die somit erhaltene Strahlungstemperatur dient als Basis für weitere Analysemöglichkeiten und liegt im Untersuchungsgebiet im Bereich von 9,5 bis 19,2 °C.

Anschließend wurde mit Hilfe des „Knowledge Engineer“ die Strahlungstemperatur in 16 Klassen unterteilt. Daraus erfolgte eine Generierung der Strahlungstemperaturkarte, welche in Abbildung 52 dargestellt ist. Die Farbdarstellung mit Hilfe von assoziativen Farben stellt sich jedoch als wenig zufriedenstellend dar und im Vergleich zur Grauwertdarstellung können Temperaturunterschiede visuell nicht mehr so gut wahrgenommen werden. Deshalb erfolgte eine Einschränkung des Untersuchungsraums auf die Stadt Graz. Außerdem wurde die Klassenanzahl von ursprünglich 16 auf sieben Klassen reduziert. Das Ergebnis ist in Abbildung 54 dargestellt und zeigt deutlich einen Informationsgewinn gegenüber Abbildung 52; Abbildung 53 und Abbildung 55 zeigen gegenübergestellt eine Grauwertdarstellung des Untersuchungsgebiets.

Abbildung 52:
Strahlungstemperatur-
karte Untersuchungs-
gebiet

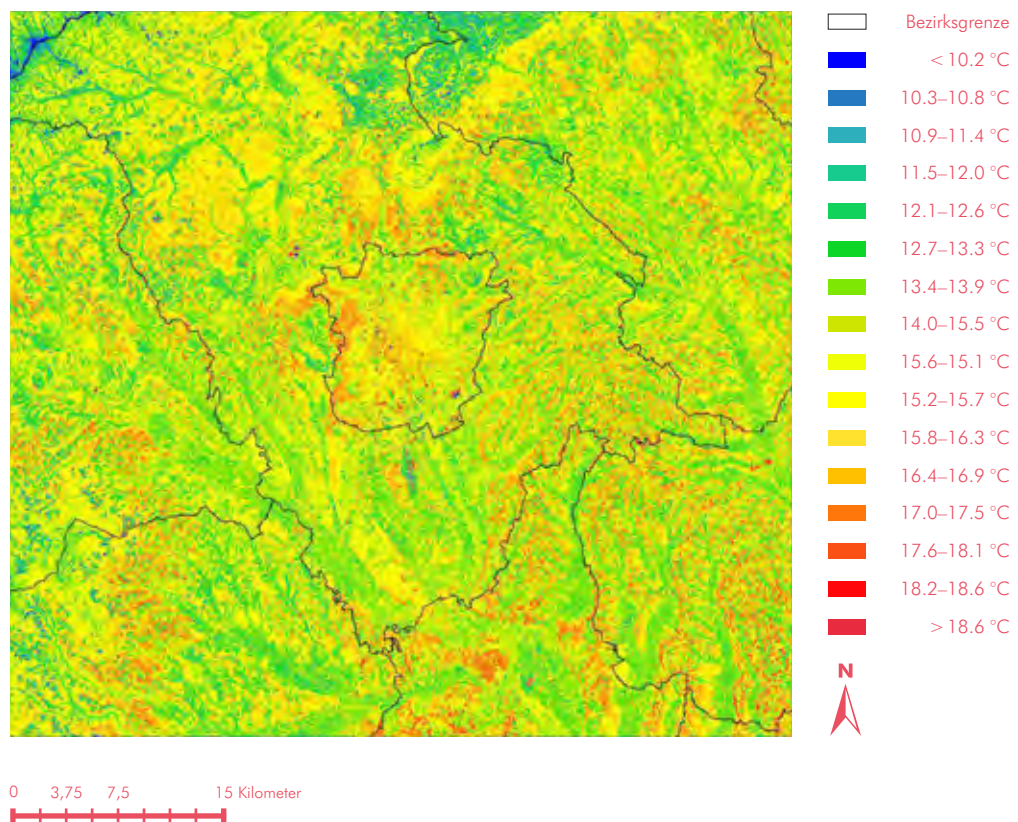
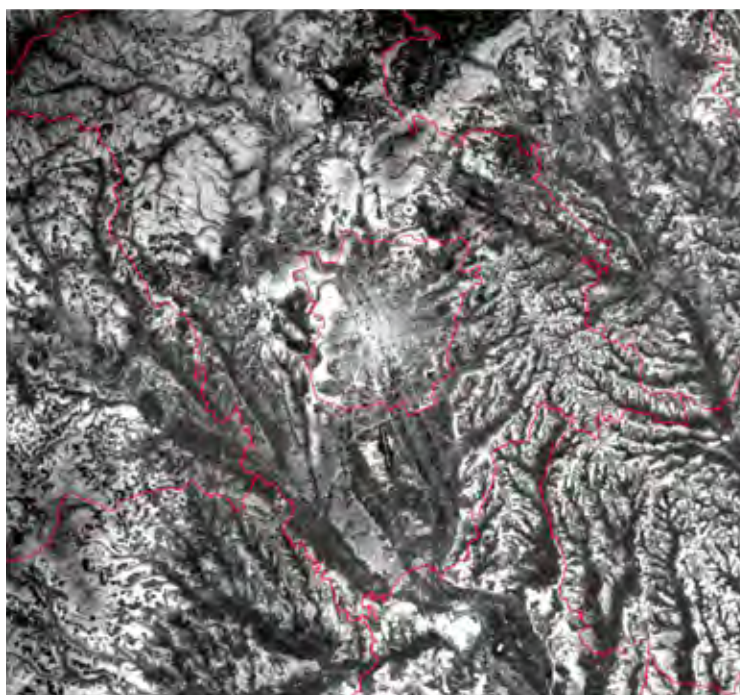


Abbildung 53:
Grauwertdarstellung
Untersuchungsgebiet

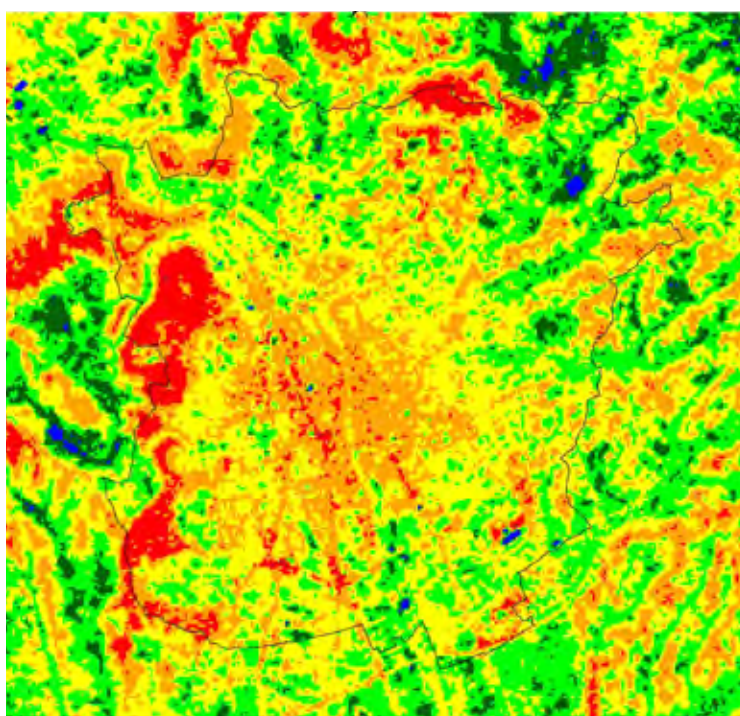


0 5 10 20 Kilometer

Bezirksgrenze



Abbildung 54:
Strahlungstempera-
turkarte Graz



0 1,5 3 6 Kilometer

Stadtgrenze

< 10.6 °C

12.7–13.6 °C

13.7–14.5 °C

14.6–15.4 °C

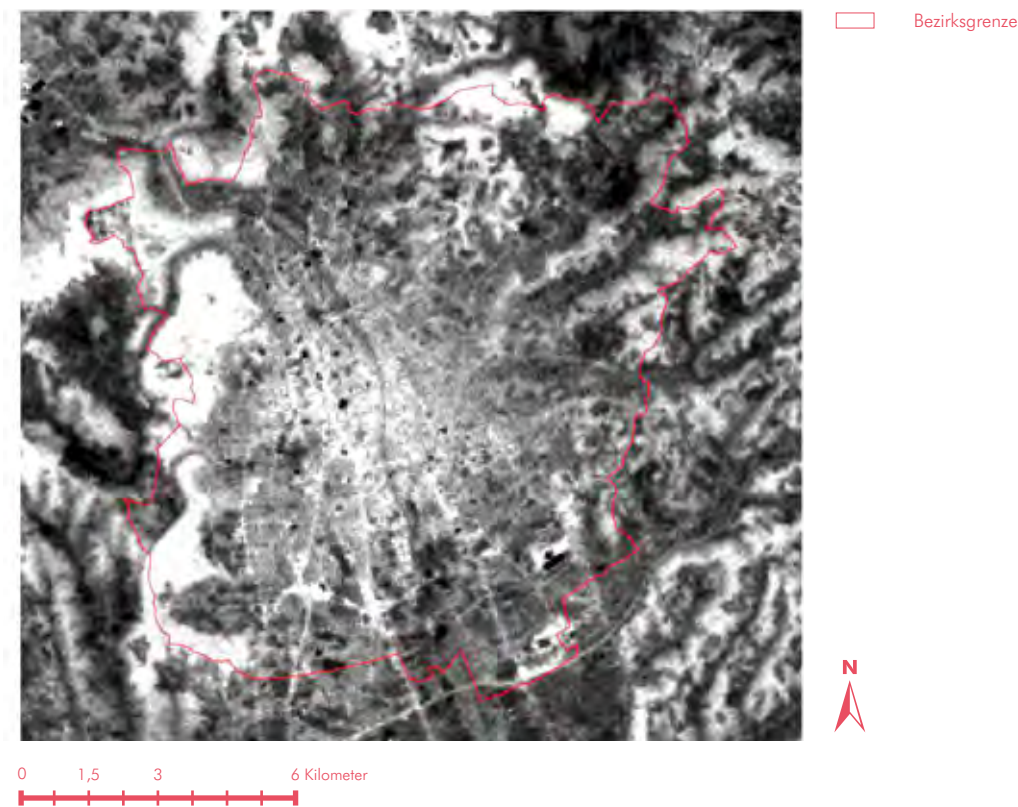
15.5–16.3 °C

16.4–17.2 °C

> 17.2 °C



Abbildung 55:
Grauwertdarstellung
Graz



Die Strahlungstemperatur ist jene Temperatur, die ein schwarzer Körper in der Wellenlänge von 11,5 μm ausstrahlt. Die jedoch nicht einheitliche Emissivität der Landoberfläche erfordert eine zusätzliche Korrektur, aus der anschließend eine Oberflächentemperatur generiert wird. Dabei ist die Einbeziehung der unterschiedlichen Ausstrahlung der verschiedenen Landbedeckungsarten entscheidend. Die Werte der Oberflächenemissivität sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9:
Mittlerer Emissionsgrad
verschiedener Ober-
flächen
(Quelle: Strathopoulou
& Cartalis, 2007,
Triebnig-Löffler, 1992)

| OBERFLÄCHE | MITTLERER EMISSIONSGRAD ϵ |
|---|------------------------------------|
| Wasser | 0,993 |
| Vegetation, Wald- und Wiesenflächen, Ackerflächen | 0,980 |
| Dichte städtische Verbauung | 0,946 |
| Lockere städtische Verbauung | 0,964 |
| Verkehrs- und Industrieflächen | 0,950 |

Die Oberflächentemperatur T_s berechnet sich wie folgt:

$$T_s = \frac{BT}{\left\{ 1 + \left[\frac{\lambda \cdot BT}{\rho} \cdot \ln \epsilon \right] \right\}}$$

Wobei:

T_s = Oberflächentemperatur (in Kelvin)

BT = am Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (in Kelvin)

λ = die Wellenlänge der emittierten Strahlung ($11,5 \mu\text{m}$)

$\rho = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$

ϵ = mittlerer Emissionsgrad

Die Umrechnung der Oberflächentemperatur von Kelvin in Grad Celsius erfolgt durch:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T_s - 273,5$$

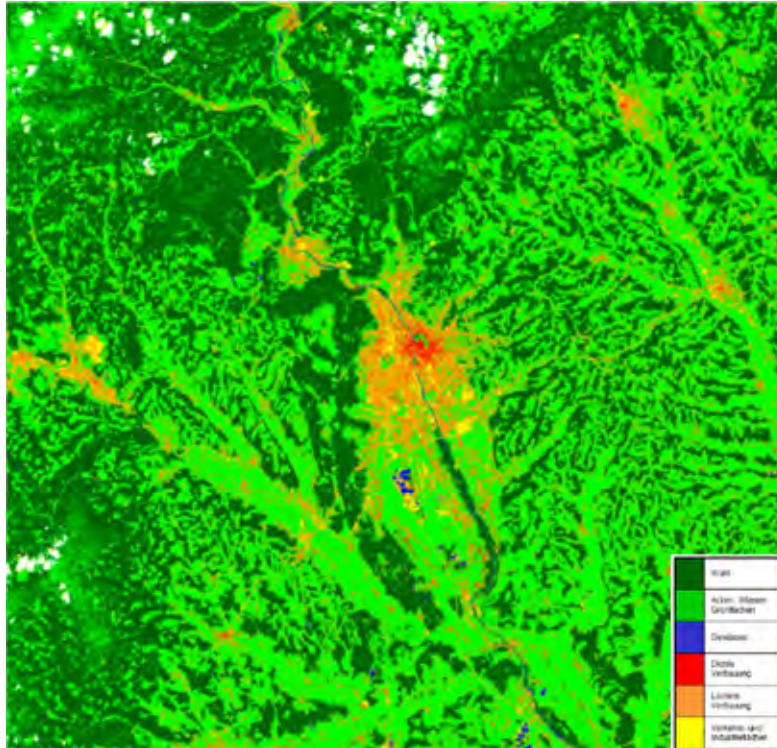
Die nun berechnete Temperatur spiegelt jene der unterschiedlichen Oberflächen wider und liegt im Bereich von $10,0$ bis $23,1^{\circ}\text{C}$. Für klimageographische Fragestellungen ist die Umrechnung von Strahlungs- in Oberflächentemperaturen nicht zwingend notwendig, da eine Darstellung relativer Werte durch ein Grauwertbild für die Analyse der Verteilung von Temperaturmustern ausreichend ist.

Bodenbedeckungskarte: Um eine Interpretation der Strahlungstemperatur zu ermöglichen, wurde zusätzlich eine Bodenbedeckungskarte generiert. Dabei findet eine Unterteilung des Untersuchungsgebiets in folgende sechs Klassen statt:

- Wasserflächen
- Wald
- Grün-, Acker- und Wiesenflächen
- dichte städtische Verbauung
- lockere (städtische) Verbauung
- Verkehrs- und Industrieflächen

Abbildung 56 zeigt die Bodenbedeckung im Untersuchungsgebiet. Das Ergebnis deckt sich in guter Näherung mit einer visuellen Interpretation.

Abbildung 56: Bodenbedeckungskarte des Untersuchungsgebiets



Einbeziehung zusätzlicher Daten: Die thermale Bildaufnahme ist ein mögliches Instrument der Untersuchung von klimageographischen Fragestellungen. Jedoch ist ihre Aussagefähigkeit bzw. die Interpretation der gewonnenen Daten nur im Zusammenhang mit weiteren Parametern, Analysen und Datenmaterialien sinnvoll. Die Meteorologie liefert in dieser Beziehung wichtige Zahlen, da sie die Temperatur direkt am Boden messen kann bzw. auf ein breites Netz an Messstationen zurückgreift. In-situ-Messungen der Lufttemperatur, Windverhältnisse, des Luftdrucks sowie der Luftfeuchtigkeit sind ebenfalls ein wichtiges Instrument.

Eine zusätzliche Informationsquelle stellen Messungen mit einem sogenannten Bandstrahlungs-pyrometer dar. Dieses Gerät misst die von einem Objekt ausgesendete Strahlung in einem Spektralbereich von ca. 8 bis 20 μm . Der Pyrometer ermöglicht eine Kontrolle der vom Satellitensensor berechneten Strahlungstemperatur mit Hilfe von thermalen Passpunkten. Diese In-situ-Messungen werden häufig an Gewässern durchgeführt. Gewässer, besonders Flüsse, reagieren thermal sehr träge, d. h., dass die Oberflächentemperatur sich im Laufe eines Tages nur geringfügig ändert. Der Pyrometer zeigt punktuell die Oberflächentemperatur des gemessenen Objektes bzw. der gemessenen Oberfläche an und gibt somit Aufschluss über die Abweichung zwischen gemessener Strahlungstemperatur am Boden und aufgezeichneter Temperatur vom Satellitensensor. Laut WENG (2009, S. 339) gestaltet sich die Generierung re-

präsentativer thermaler Passpunkte für stadtklimatologische Analysen schwierig. Begründet wird dies durch die Komplexität der städtischen Strukturen. Außerdem stellen In-situ-Messungen meist nur eine tägliche Variabilität der Temperaturen dar und nicht eine saisonale oder langjährige.

Information über womöglich herrschende Inversionswetterlagen geben Sondaufstiege, welche ein vertikales Profil der Atmosphäre erstellen. Ihre Miteinbeziehung in die Analyse der Thermalaufnahme ermöglicht bestimmte Temperaturanomalien besser sichtbar zu machen sowie deren Magnitude und geographische Ausbreitung festzustellen. **Abbildung 57** zeigt einen Sondaufstieg vom 20. August 2000.

Ohne die Einbeziehung meteorologischer Messdaten sowie In-situ-Messungen besteht bei satellitengenerierten Strahlungstemperaturkarten mit großer Wahrscheinlichkeit eine hohe Fehleranfälligkeit und gefährdet somit eine verlässliche Aussage bzw. Interpretation von verschiedenen Parametern. Des Weiteren spielt die Bodenbedeckung eine entscheidende Rolle. Die unterschiedliche Emissivität einzelner Oberflächen wirkt sich auch auf die Darstellung der Strahlungstemperatur aus. Oberflächen mit hohem Reflexionsgrad erzeugen dementsprechend höhere Strahlungstemperaturwerte, jene mit geringem Reflexionsgrad hingegen bewirken u. a., dass im Bild sogenannte „kalte oder schwarze Flecken“ auftauchen. Speziell Oberflächen aus Metall wie z. B. Aluminium, Blech oder Kupfer können aufgrund ihres niedrigen Emissionsgrades solche Flecken in der Darstellung erzeugen. Am Beispiel des Untersuchungsgebiets lässt sich dies exemplarisch im Südosten des Grazer Stadtgebietes darstellen. Ohne die Generierung einer Bodenbedeckungskarte bzw. ohne vorhandene Kenntnis über die landschaftliche Nutzung der Oberfläche sind Interpretationen der Strahlungstemperatur nicht aussagekräftig und führen zu Fehldarstellungen. Als wichtige Informationsquelle dient auch die Landnutzungsklassifizierung des CORINE-Programms (Coordination of Information on the Environment). Die EU-weit einheitliche Klassifizierung ermöglicht einen besseren Vergleich von Daten untereinander und gewährt einen detaillierten Einblick in die Nutzung der Erdoberfläche. Somit findet sie auch für klimageographische Fragestellungen Verwendung.

Einbindung von MODIS-Aufnahmen

Die Daten des MODIS-Radiometers können von der Homepage des „Land Processes Distributed Active Archive Center“ (LP DAAC) <https://lpdaac.usgs.gov/> bezogen werden. Der verwendete Datensatz wird unter dem Begriff „MOD11A1“ bzw. „MODIS LST Night 1 km“ zusammengefasst. Er deckt ein Gebiet von 1100 mal 1100 Kilometern mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer im Nadir ab. Die verwendete Szene stammt vom 1. August 2003.

Vergleich zwischen LANDSAT- und MODIS-Daten: Um das Potenzial einer LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme darstellen zu können, wurde ebenfalls eine MODIS-Thermal-Nachtaufnahme untersucht. Sie verfügt über eine räumliche Auflösung von einem Kilometer im Nadir und stammt vom 1. August 2003. Laut ZAMG (2010) herrschte zu diesem Zeitpunkt eine gradientenschwache Wetterlage mit geringen Druckunterschieden über Mitteleuropa. Feuchtlabile Luft lagerte über Österreich und der Tag verlief eher bewölkt mit lokalen Schauern oder Strichregen bei maximal 19 bis 31 °C.

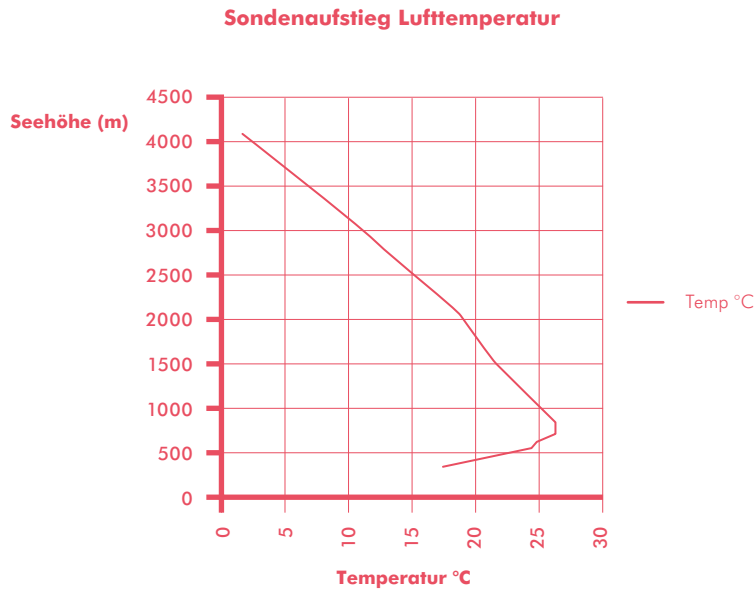
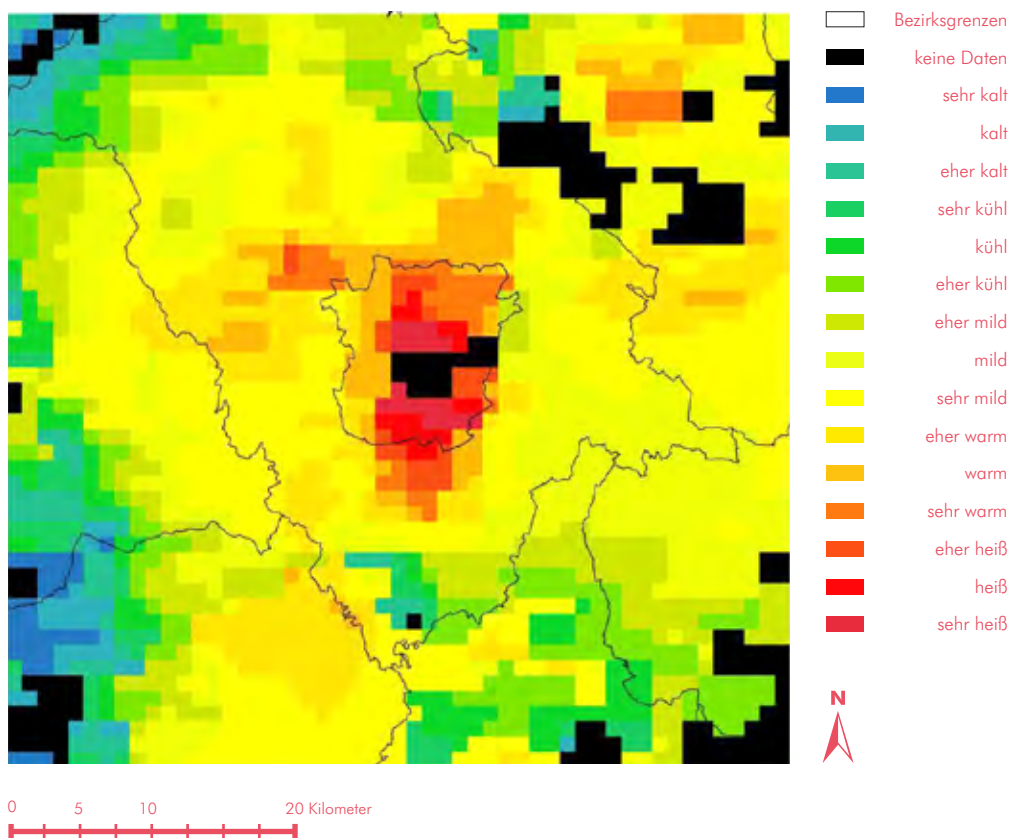


Abbildung 57:
Sondenaufstieg
vom 20. August

Die MODIS-Daten wurden zu Beginn einer atmosphärischen Korrektur unterzogen und anschließend das Untersuchungsgebiet in 16 Klassen eingeteilt. Das Stadtgebiet von Graz wurde in 8 Klassen unterteilt. Auf die Umrechnung der Grauwerte in Strahlungstemperaturwerte wurde verzichtet, da erstens keine meteorologischen Messdaten über diesen Zeitpunkt zur Verfügung stehen und zweitens eine Temperaturdarstellung bei einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer bei der geringen Größe des Untersuchungsgebietes als wenig sinnvoll erachtet wird. Außerdem gestaltet sich die Umrechnung der Grauwerte in Temperaturwerte als schwierig. Primär soll aus der visuellen Interpretation die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und dem Umland ersichtlich werden und das Potenzial einer LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme gegenüber den MODIS-Daten darstellen. Abbildung 58 zeigt die Darstellung des Untersuchungsgebietes mit assoziativen Farben. Die visuelle Interpretation der Daten zeigt, dass das Stadtgebiet von Graz eine Erwärmung gegenüber seinem Umland aufweist. Die Temperaturen innerhalb des Stadtgebietes sind die höchsten im gesamten Untersuchungsgebiet. Kühlere Regionen sind die Gleinalm sowie an der Grenze zu Kärnten. Schwarze Flecken im Bild sind eventuell zurückzuführen auf mögliche Bewölkung. Sie stören das Bild, da auch mitten im Grazer Stadtgebiet ein solcher schwarzer Fleck vorhanden ist.

Die räumliche Auflösung von einem Kilometer lässt keine Rückschlüsse auf kleinräumige Temperaturunterschiede zu. Lokale Kaltluftseen oder Windsysteme sind nicht mehr erkennbar und zeigen somit deutlich das Potenzial der LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme gegenüber dieser MODIS-Thermal-Nachtaufnahme.

Abbildung 58:
Untersuchungsgebiet
MODIS-Thermaldaten



5. VERGLEICHENDE ANALYSE DER THERMALBEFLIEGUNGEN 1986 – 1996 – 2004 – 2011

5.1 DATENGRUNDLAGEN

Die Befliegung des Grazer Stadtgebietes mit Thermalscannersystemen ist ein Unterfangen, welches mittlerweile einen beeindruckenden Zeitraum abdeckt. Der Datenbestand, welcher in Abbildung 1 näher beschrieben ist, bildet die Basis dieser Arbeit.

Abbildung 1:
Datenbestand

| Aufnahmezeit | 1986 | 1996 | 2004 | 2011 |
|--------------|----------|----------|----------|-----------|
| Sensor | DAEDALUS | DAEDALUS | DAEDALUS | TABI 1800 |
| Vormittag | X | | | |
| Mittag | X | X | X | |
| Nacht | X | | | X |

Die Aufgabenstellung liegt nun in der Erstellung einer vergleichenden Analyse der einzelnen Datensätze. Bevor diese Herausforderung in Angriff genommen werden kann, muss zu Beginn eine kritische Durchsicht des Datenbestandes erfolgen.

| FOLGENDE PUNKTE WURDEN BEI DIESER UNTERSUCHUNG ÜBERPRÜFT: |
|---|
| Genauigkeit der geometrischen Entzerrung |
| Projektion der einzelnen Befliegungen |
| Abdeckung des Stadtgebietes (Datenlücken) |
| Radiometrische Qualität |
| Verzerrungen |
| Geometrische Auflösung |
| Aufnahmedatum |

Thermalscannerbefliegung 1986: Die Befliegung von 1986 bildet auf Grund der Chronologie den Ausgangsdatensatz der vergleichenden Analyse. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, ist der Datensatz aus diesem Jahr der einzige, welcher über eine „komplette“ tageszeitliche Abdeckung verfügt. Die Untersuchung der Daten auf Basis der 6 Punkte der oben beschriebenen Aufzählung ergab einige Problembereiche. Die größte Schwierigkeit stellt die bereits in diesem Datensatz auftretende Inhomogenität der geometrischen Entzerrung dar. Besonders offensichtlich treten diese Effekte an Hängen auf. Auch innerhalb der mittelalterlichen und gründerzeitlichen Verbauung sind diese Lagefehler deutlich sichtbar, weiters bietet auch die Mur eine gute Möglichkeit diese Effekte zu erkennen. Auch der Vergleich zur DAEDALUS-Befliegung 2004 und dem UltraCam-Orthophotomosaik von 2007 zeigt diese Problematik. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor. Die vollständige Abdeckung des Stadtgebietes ist für die Mittagsaufnahme nicht gegeben (Abbildung 2). Die radiometrische Qualität ist als durchgehend sehr gut zu bewerten.

Abbildung 2:
Datenlücken Mittags-
situation 1986



Als weiterer negativer Faktor fallen die Verzerrungen in den Daten auf, welche im Rahmen der Entzerrung offensichtlich nicht behoben werden konnten. Weiters weisen die Morgen- und Nachtsituation ein teilweise deutliches West-Ost-Striping auf.

Abbildung 3:
Verzerrungen im
südlichen Bereich
des Hauptbahnhofes
(Morgensituation)



Abbildung 4:
Striping (Morgensituation)



Diese Tatsachen sind aber nicht auf mangelnde Sorgfalt bei der Entzerrung zurückzuführen, sondern auf die Datenausgangssituation (bei der Befliegung kein GPS+INS). Die geometrische Auflösung der drei Datensätze liegt bei 5 Metern. Aufgenommen wurde am

02.10.1986, 21:57–23:32 Nachtsituation

03.10.1986, 05:05–06:28 Morgensituation

03.10.1986, 12:47–14:20 Mittagsituation

Thermalscannerbefliegung 1996: Auf Grund der Tatsache, dass für die Befliegung von 1996 keine Oberflächentemperaturdaten als Referenzdaten zur Verfügung standen, wurde auf die Verwendung des Datensatzes von 1996 verzichtet. Zudem wurden die Originalwerte des thermalen Kanals verändert und für eine optimale Darstellung gespreizt. Dadurch ist es unmöglich, klimatologische Aussagen zu treffen.

Thermalscannerbefliegung 2004: Die Befliegung von 2004 stellt die aktuellste Variante einer Thermalscannerbefliegung für die Mittagssituation dar. Somit ergibt sich eine Zeitspanne für die Vergleichbarkeit von 18 Jahren. Die Genauigkeit der geometrischen Entzerrung ist als sehr gut zu bezeichnen. Als Referenz kam ein Orthofotomosaik der UltraCam-Befliegung von 2007 zum Einsatz. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem Geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor.

Abbildung 5:
Datenlücken 2004,
Mittagssituation

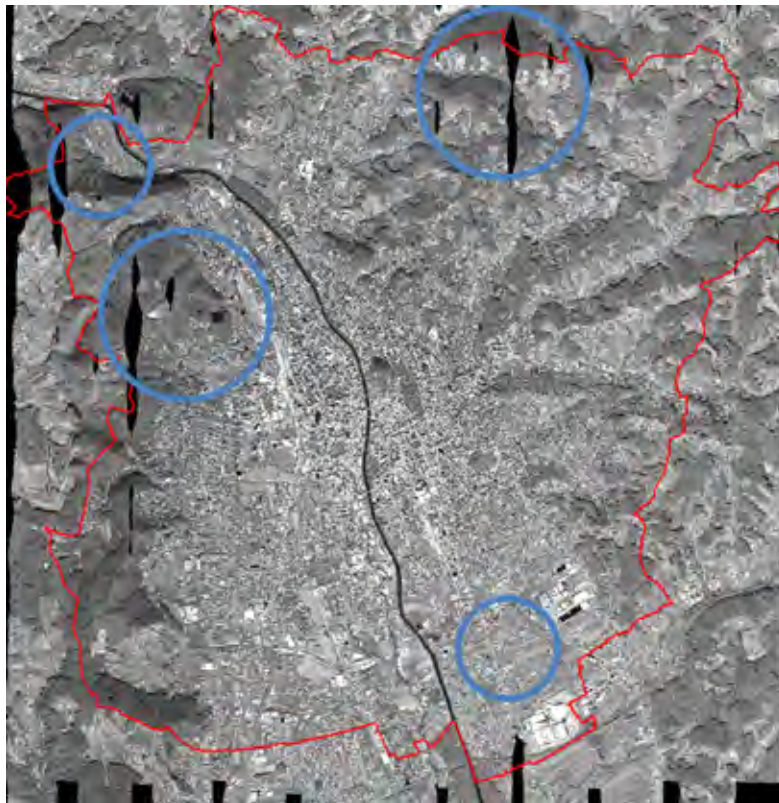
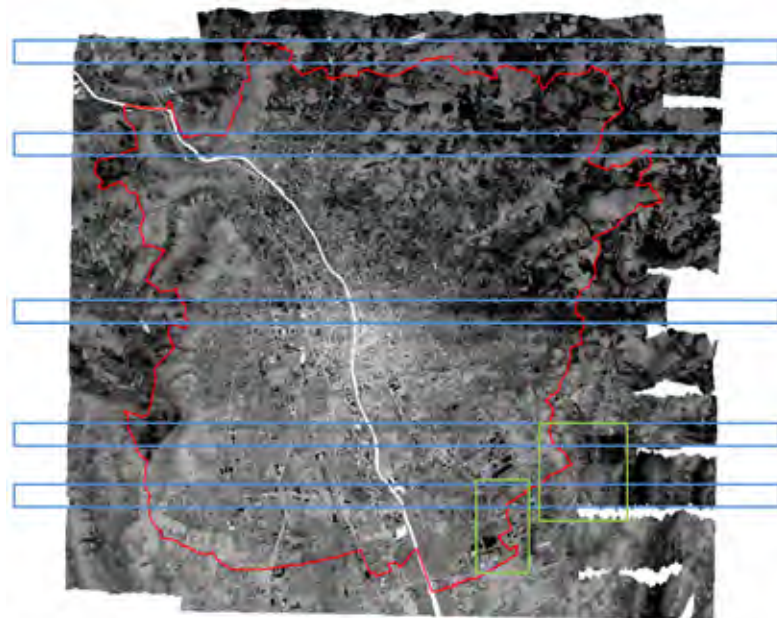


Abbildung 5 veranschaulicht die markanten Datenlücken mit Nord-Süd-Ausrichtung. Radiometrisch betrachtet sind die Daten von 2004 auf einem sehr guten Niveau. Auch Verzerrungen oder Striping-Effekte sind nicht vorhanden. Die geometrische Auflösung liegt bei 1 Meter. Aufgenommen wurde am 24.10.2004, 12:02–14:15.

Thermalscannerbefliegung 2011: Im Unterschied zu den restlichen Befliegungen kam 2011 ein neuer Sensor (TAB1 1800 Thermal Airborne Broadband Imager) zum Einsatz. Die Genauigkeit der geometrischen Entzerrung ist als sehr gut zu bezeichnen. Als Referenz dient auch für diesen Vergleich das UltraCam-Orthofotomosaik von 2007. Die Abdeckung des Stadtgebietes konnte flächendeckend erfüllt werden. Die Untersuchung der radiometrischen Qualität brachte einige Problemstellen ans Licht, welche in der Folge genauer beschrieben werden.

-
1. Sichtbare Cutlines (verlaufen jeweils in der Mitte der blauen Box)
-
2. Striping Effekte in homogenen Flächen (grüne Box)
-

Abbildung 6:
Radiometrie Problem-
bereiche



Auf Grund dieser Fehler wurden die von der Firma AVT gelieferten Flugstreifen einzeln untersucht. So konnte ausgeschlossen werden, dass die Fehler bei der Erstellung des Mosaiks entstanden sind. Des Weiteren wurde auch der Überlappungsbereich der Flugstreifen untersucht. Die Basisüberlegung für diese Überprüfung war, dass in einem optimalen Szenario mit perfekt radiometrisch kalibrierten Flugstreifen (X und Y) die Subtraktion des Überlappungsbereiches den Wert Null erreichen müsste.

Ausgehend von diesem optimalen Szenario ist natürlich zu erwähnen, dass der zu erwartende Wert sich gegen null einstellen sollte, aber wahrscheinlich nicht null selbst erreicht. Bezogen auf das gesamte Stadtgebiet wären hier Werte von $\pm 0,45$ K (Kelvin) schon die obere Grenze des Toleranzbereiches.

FÜR DIESE UNTERSUCHUNG WURDE FOLGENDER WORKFLOW ANGEWANDT:

Import der gelieferten Flugstreifen (.hdr zu .img)

Subtraktion der Bildstreifen

Teilausschnitt des Überlappungsbereiches

Klassifikation

Abbildung 7:
Temperaturdifferenzen der Überlappungsbereiche in Kelvin

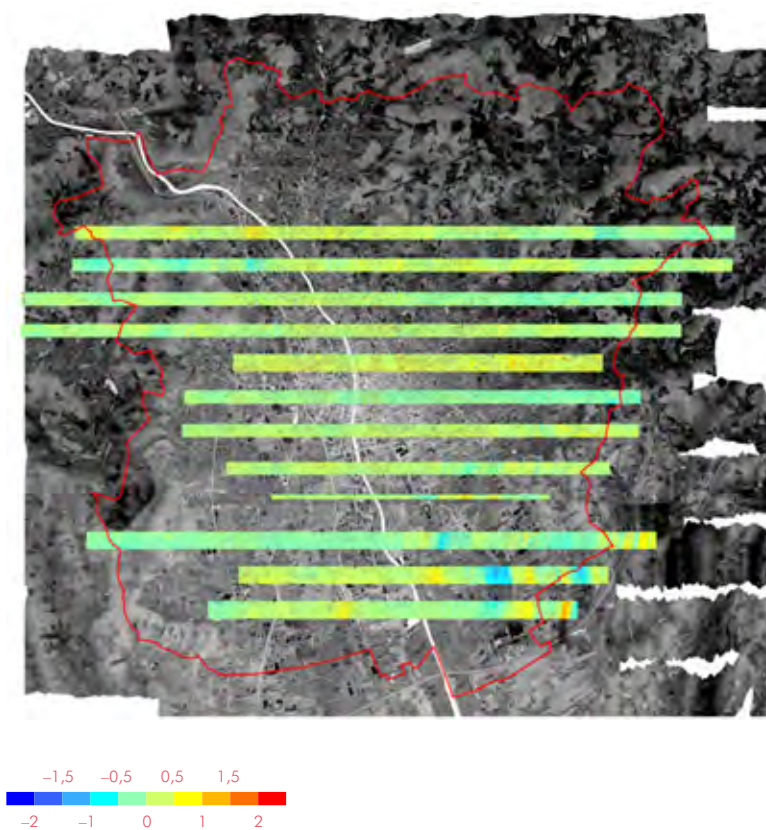
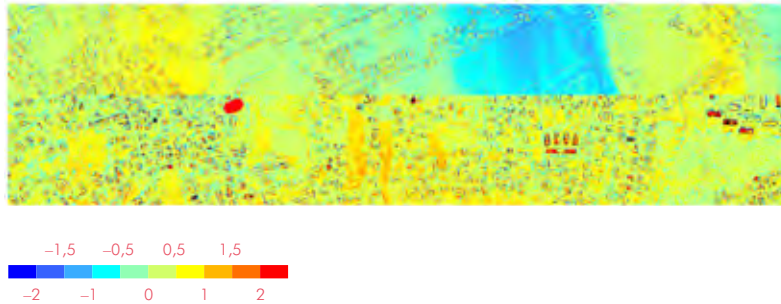


Abbildung 7 zeigt eindeutig, dass diese Werte in vielen Bereichen nicht erreicht werden. Abbildung 8 zeigt zwei Überlappungsbereiche im Detail.

Abbildung 8:
Temperaturdifferenzen der Überlappungsbereiche im Detail in Kelvin



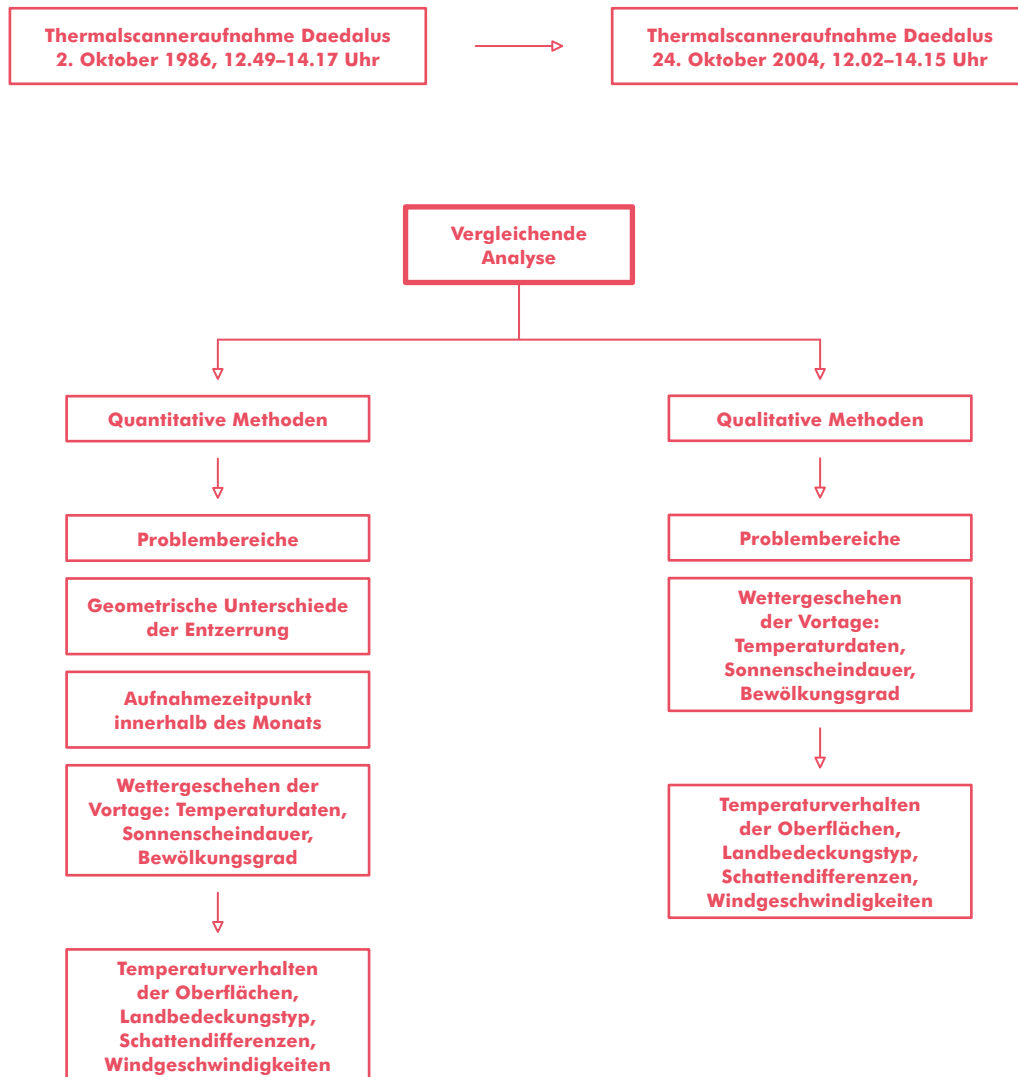
Diese radiometrischen Fehler haben somit sehr große Auswirkung auf die Verwendbarkeit der Daten. So sind zum Beispiel Ableitungen aus den Daten, welche zu Aussagen über das gesamte Stadtgebiet liefern sollen, nicht zulässig. Die Darstellung der Temperaturwerte in einer Karte für das Stadtgebiet ist zwar möglich, verlangt aber vom Kartennutzer, die eben beschriebenen Fakten beim Betrachten bzw. bei der Interpretation dringlichst zu beachten. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor. Die geometrische Auflösung liegt bei 0,6 Meter. Aufgenommen wurde am 20.12.2012, 18:52–20:51.

5.2 MÖGLICHKEITEN DER VERGLEICHBARKEIT

Nachdem das komplette Datenmaterial hinsichtlich der 7 Punkte untersucht wurde, muss nun überlegt werden, welche Vergleiche möglich und zulässig sind

und auch welche Methoden zum Einsatz kommen sollen. Einen Teil dieser Überlegungen zeigt Abbildung 9.

Abbildung 9:
Vergleichbarkeit



In dieser schematischen Darstellung sind Überlegungen zur Methodik und die Problembereiche für einen Vergleich der Mittagssituation von 1986 und 2004 visualisiert. Speziell zu erwähnen ist hier die Tatsache, dass sich diese beiden Datensätze auf Grund des Aufnahmedatums noch am besten für einen Vergleich eignen. Die Auflistung der Problembereiche zeigt deutlich, wie komplex die Zusammenhänge sind, welche in Anschluss beschrieben werden.

Die erste Aussage, die getroffen werden kann, ist jene, dass ein quantitativer Vergleich der Datensätze nicht zulässig ist. Der primäre Grund ist die Tatsache, dass die geometrische Entzerrung des Bildmaterials von 1986 nicht gut genug mit den Daten von 2004 übereinstimmt. Diese Problematik verhindert sowohl einen Vergleich auf pixelbasierten Methoden wie auch die Verwendung von objektbasierten Ansätzen. Weiters müssten für eine quantitative Analyse auch meteorologische Gesichtspunkte Berücksichtigung finden. Dies zu modellieren wäre sehr zeitintensiv, aber prinzipiell möglich. Dennoch stünde einer quantitativen Analyse dann noch immer die mangelhafte Georeferenzierung der Daten von 1986 im Weg. Nachdem für diese Überlegung der vom Aufnahmezeitpunkt am besten zueinander passende Datensatz gewählt wurde (2. Oktober 1986 zu 24. Oktober 2004), ist noch zu ergänzen, dass die Vergleichbarkeit mit quantitativen Methoden der Nachtszenen von 1986 und 2011 als noch geringer eingestuft werden muss. Von diesen Tatsachen ausgehend war ein Vergleich auf qualitativer Ebene die einzige Alternative. Wobei auch hier die Interpretation der Daten unter strenger Berücksichtigung der für den quantitativen Fall bereits beschriebenen Faktoren erfolgen muss.

Methodik: Grundsätzlich wurde ein objektbasierter Ansatz realisiert. Dies bedeutet eine Zusammenfassung von Pixelwerten zu Polygonshapes. Die Auswahl dieser Methodik erleichtert die weitere Verarbeitung der Daten im Rahmen von etwaigen Analysen. Weiters ist es auch möglich, sinnvollere Generalisierungen

durchzuführen, womit sich zum Beispiel Effekte wie die Ausdehnung von Wärmeinseln einfach darstellen lassen. Softwareseitig wurden die Programme Arc Gis 10, Erdas Imagine und Ecognition Developer 8.0 verwendet.

Workflow: Nachdem der Datensatz von 1986 als Basis für die Vergleiche zu den Daten von 2004 (Mittag) und 2011 (Nacht) dient, wurde dessen Auflösung von 5 Metern auch für die Datensätze 2004 und 2011 übernommen. Somit konnte eine einheitliche Basis geschaffen werden. Für die Darstellung innerhalb eines Kartenwerkes, welches die gesamte Stadtfläche darstellt, ist diese Auflösung leicht ausreichend. Vor allem unter dem Aspekt der weiteren Generalisierung. Diese Basisdaten wurden im Anschluss mit dem Programm Ecognition Developer segmentiert (Erstellung der Polygone). Dies geschah in zweistufiger Art und Weise. Die erste Stufe stellt eine sehr feine Segmentierung dar, während die zweite Stufe eine wesentlich gröbere Segmentierung aufweist. Diese Polygone, welche bei diesen Segmentierungen entstanden sind, wurden im Anschluss als Esri Shape File exportiert. Sie beinhalten nun als Hauptinformation einen Temperaturmittelwert aller Pixel, die sich innerhalb des Polygons befanden, in ihrer Attributtabelle. Für die anstehenden Vergleiche wurde die Klassifikation in 10 Klassen durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk beim Erstellen der Schwellwerte auf eine möglichst gute Darstellung des Datensatzes gelegt wurde. Dabei wurde auch deutlich, dass 10 Klassen als ausreichend zu betrachten sind. Es sei an dieser Stelle noch einmal auf das Ausdrücklichste darauf hingewiesen, dass ein Vergleich der Datensätze untereinander aufgrund der unterschiedlichen Datensätze, Befliegungszeitpunkte, meteorologischen Verhältnisse und radiometrischen Fehler nicht ohne Weiteres zulässig ist. Am ehesten sinnvoll erscheint ein Vergleich der Temperaturverhältnisse mit einer groben ganzheitlichen Betrachtungsweise.

5.3 VERGLEICHENDE ANALYSE DER ERGEBNISSE 1986 BIS 2011

5.3.1 VERGLEICH NACHTAUFNAHMEN 1986 – 2011

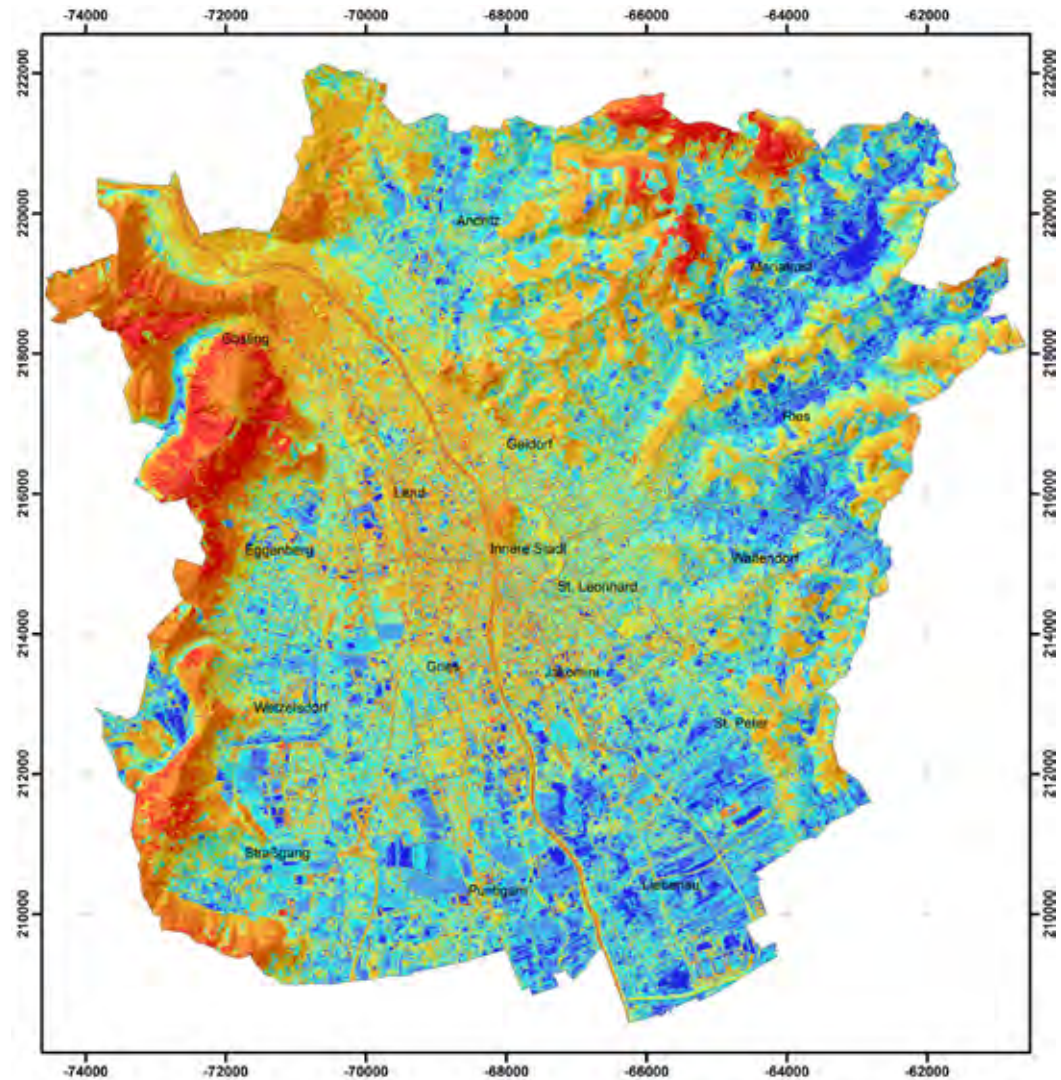
Bereits auf den ersten Blick fallen die unterschiedlichen Wetterlagen zwischen 1986 und 2011 auf. Während die Aufnahme von 1986 von einer deutlichen Inversionslage dominiert wird, ist dieses Phänomen 2011 wesentlich schwächer ausgeprägt. Verwendet man nun die oben erwähnte ganzheitliche Betrachtung, dann fällt weiters auf, dass die Seitentäler im Osten von Graz auch 2011 kühler sind als der Stadtkern. Eine Art Übergangszone stellt zu beiden Zeitpunkten die gründerzeitliche Verbauung der Bezirke Geidorf und St. Leonhard dar. Vergleicht man nun das Temperaturverhältnis der Seitentäler mit den Ackerflächen im Süden von Graz, dann lässt sich festhalten, dass dieses Verhältnis sich 1986 als sehr ähnlich darstellt. Die Situation stellt sich 2011 erheblich anders dar. Hier sind die Ackerflächen im Süden wärmer als die Seitentäler. Im Besonderen betrifft dies die Bezirke Straßgang, Puntigam, Liebenau und Teile von St. Peter sowie Wetzelsdorf. Für die Abschätzung der Ausbreitung der Wärmeinsel ist eine Generalisierung der Datenstruktur von Vorteil. Diese wurde durch die zuvor bereits beschriebene gröbere Segmentierung erreicht. Im Vergleich der beiden Befliegungen fallen die unterschiedlichen Positionen des Wärmeinseleffektes auf. Während sich der wärmste Teil 1986 noch recht gleichmäßig westlich und östlich der Mur in den Bezirken Innere Stadt, Jakomini, Lend, Gries und Geidorf erstreckt, liegen 2011 die Flächen zu größeren Teilen östlich der Mur in den Bezirken Innere Stadt, Jakomini, Gries und in sehr geringem Maße auch St. Leonhard. Die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen der Wärmeinsel und den kühlest Teilen (Seitentäler im Osten) des Stadtgebietes liegen sowohl 2011 wie auch 1986 bei etwa 10 °C.

Bei der Interpretation der Nachtaufnahmen von 1986 und 2011 ist auf die unterschiedliche Legende zu achten, welche zwar die gleiche Farbpalette verwendet, aber sich in den Temperaturschwellwerten deutlichst unterscheidet.

Abbildung 10:
Oberflächentem-
peratur 1986 (Nacht),
Segmentgröße 3

Oberflächentemperatur Graz

Nachtflug, Segmentgröße 3



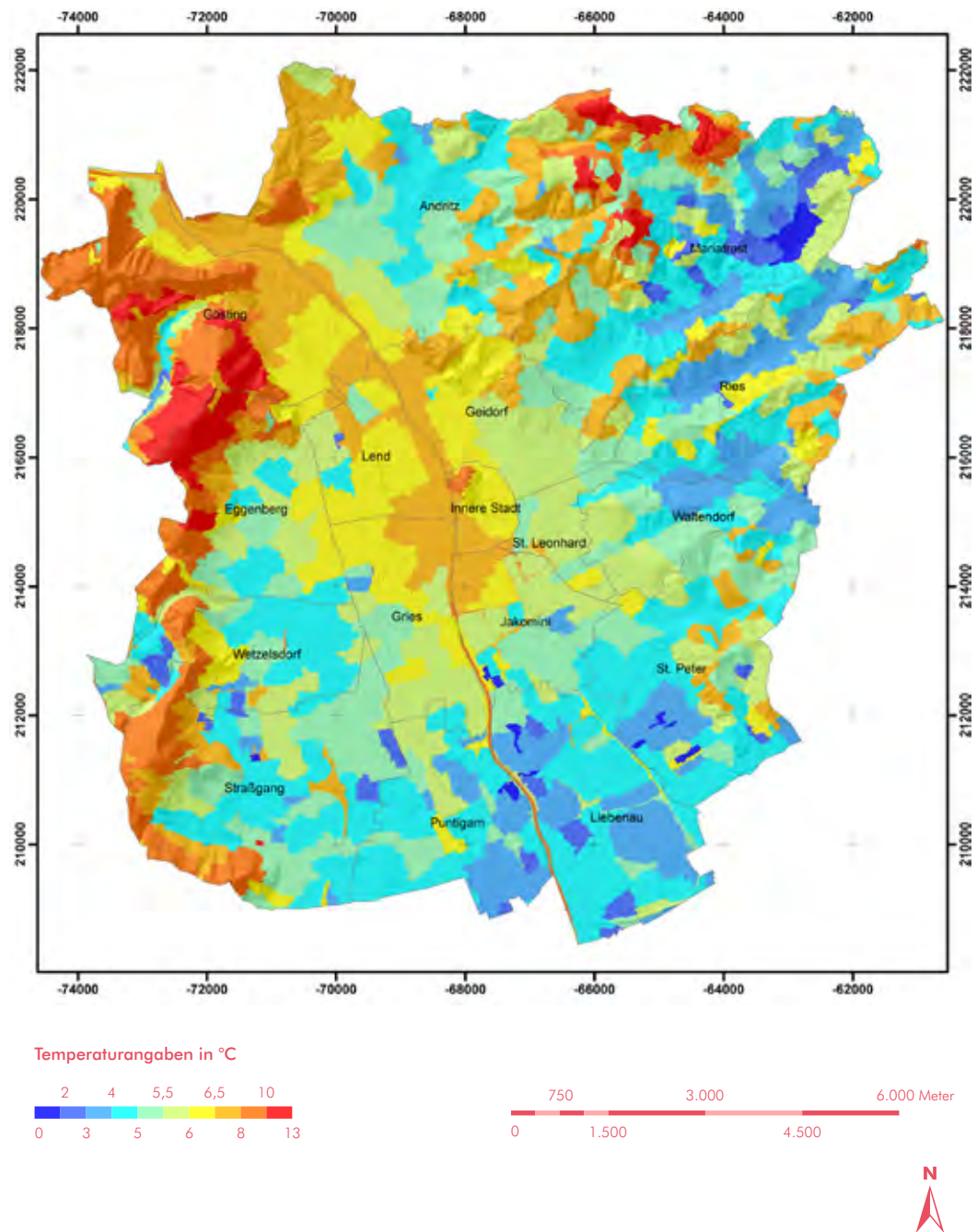
Temperaturangaben in °C



Abbildung 11:
Oberflächentem-
peratur 1986 (Nacht),
Segmentgröße 25

Oberflächentemperatur Graz 1986

Nachtflug, Segmentgröße 25



5.3.2 VERGLEICH DER MITTAGSAUFNAHMEN 1986 UND 2004

Für den Vergleich der Mittagsaufnahmen von 1986 und 2004 war es möglich, auf Grund des ähnlichen Befliegungszeitpunktes innerhalb des Monats und innerhalb des Tages die gleichen Temperaturschwellwerte und die gleiche Farbpalette zu verwenden. Abgesehen von den generell etwas höheren Oberflächentemperaturen 1986 sind die Verhältnisse aber ähnlicher, als dies bei den nächtlichen Befliegungen der Fall war. Ein Unterschied, welcher besonders bei den Karten mit der Segmentgröße 3 zu Tage tritt, ist die deutlich stärkere Erwärmung der Dachflächen 1986.

DIESER UNTERSCHIED LÄSST SICH VERMUTLICH AUF 2 GRÜNDE ZURÜCKFÜHREN

Geringerer Strahlungsinput 2004 (22 Tage späterer Aufnahmezeitpunkt)

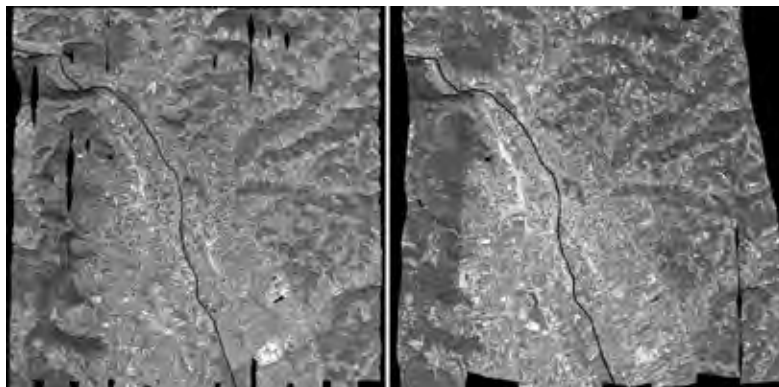
Wetterlage der Vortage 1986 wahrscheinlich günstiger
(längere Sonnenscheindauer)

Besonders deutlich werden diese Unterschiede in den Bezirken Innere Stadt, Lend, St. Leonhard und Geidorf.

Der Effekt der Wärmeinsel ist 1986 deutlich stärker ausgeprägt, als dies 2004 der Fall war. 1986 sind besonders die Bezirke Gries, Lend, Innere Stadt und Jakomini von diesem Phänomen betroffen.

Nachdem die Daten der Befliegung des Mittagstermins in die jeweiligen Dateiformate importiert und der Arbeitsablauf mit Hilfe der oben genannten Informationen durchgeführt wurden, konnte erstmals eine Darstellung der scheinbaren Oberflächentemperaturen für den gesamten Befliegungszeitraum visualisiert und quantifiziert werden.

Abbildung 12:
Visueller Vergleich
der scheinbaren Ober-
flächentemperaturen
von 1986 (rechts)
und 2004 (links)



Bereits bei der ersten Betrachtung mit freiem Auge lässt sich aufgrund der Grauwertkodierung eine Differenzierung der Befliegungen zu Mittag 1986 und 2004 erkennen (Abbildung 12 u. 13). Prinzipiell erscheinen Bereiche der Abbildung von 1986 wärmer, was durch das gehäufte Auftreten von helleren Bildelementen repräsentiert wird. Man kann davon ausgehen, dass dies aufgrund des Tagesganges der Witterung und die unterschiedlichen Befliegungszeitpunkte (Anfang Oktober, Ende Oktober) zurückzuführen ist.

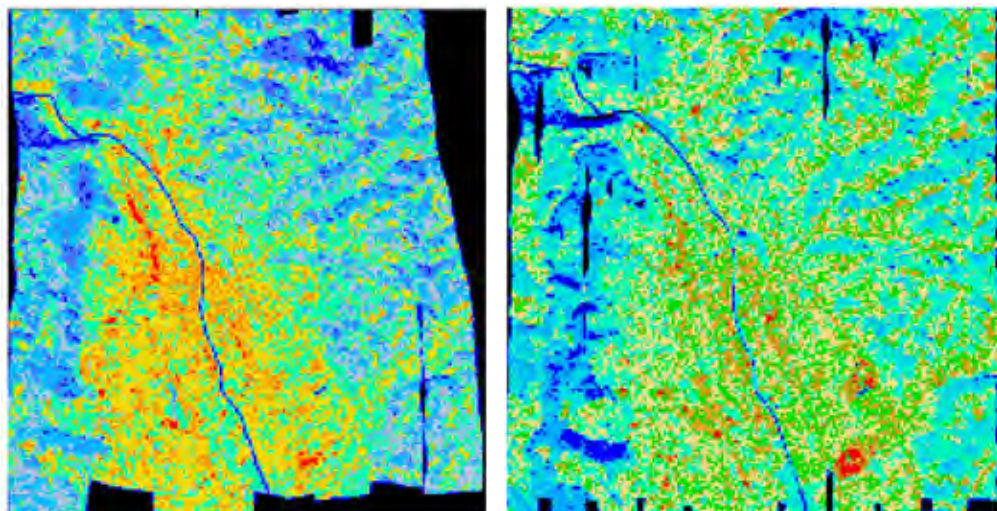
Die auf diesem Wege erstellten scheinbaren Oberflächentemperaturen wurden mit den Daten der Pyranometermessungen, welche zum gleichen Zeitpunkt der Befliegungen stattgefunden haben, verglichen. Vorzüglich handelte es sich bei den Messungen um verschiedene Arten der Bodenbedeckung im Bereich Vegetation, Versiegelte Flächen und Gewässer.

Der Vergleich der errechneten scheinbaren Oberflächentemperaturen mit den am Boden gemessenen zeigte eine mittlere Abweichung des Scanners von 4,5 °C auf. Diese Unterschiede weisen auf einen systematischen Temperaturunterschied hin, welcher bereits in mehreren Literaturquellen diskutiert wurde (siehe: Kaufmann 1989).

Im Speziellen wurden für diese Kalibrierung die gewonnenen Messdaten von Wassertemperaturen und Wasseroberflächentemperaturen verwendet.

Während man bei fließenden Oberflächengewässern davon ausgehen kann, dass aufgrund der hohen Durchmischung die Wassertemperatur auch der Oberflächentemperatur entspricht, muss für stehende Gewässer die Oberflächentemperatur gemessen werden, was im Zuge der Pyranometermessungen auch geschehen ist.

Abbildung 13:
Farbkodierte Darstellung
der Mittagsflüge
(Resampling 80m)



Mittagsflug, 1986

Mittagsflug, 2004

Abbildung 14:
Temperaturunterschied
zw. Mittagsflug 1986
und Mittagsflug 2004
(rot = wärmer,
blau = kälter)

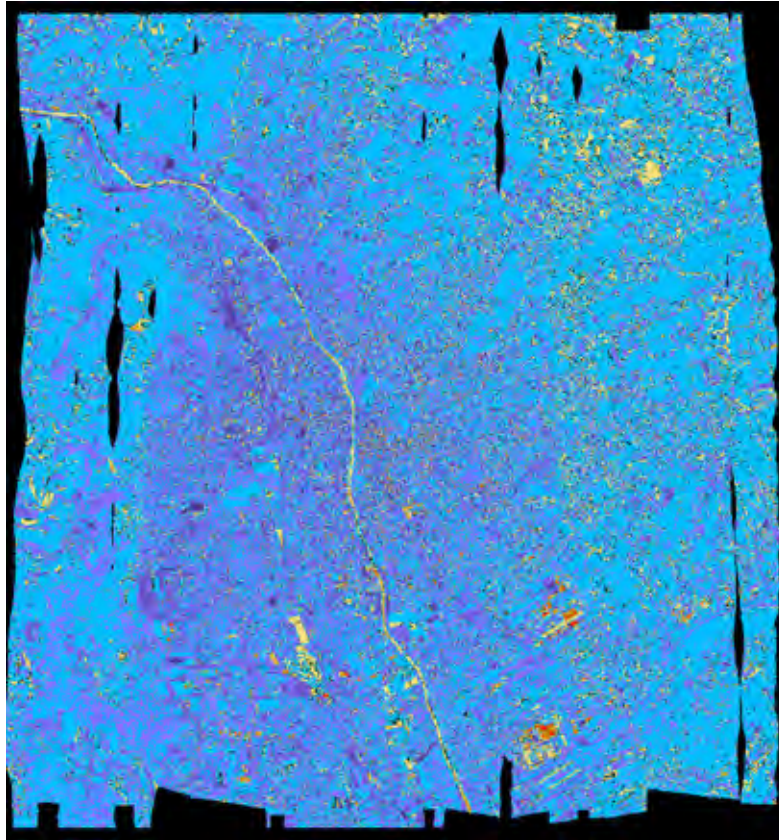


Abbildung 14 dokumentiert die Temperaturunterschiede zwischen den Mittagsflügen. Auffallend ist hier der generell kältere Tag 2004, die Differenzen betragen von einer Temperaturabnahme von 10 °K bis hin zu einer Temperaturzunahme von 15 °K. Eine deutliche Zunahme erfolgt in neu versiegelten Flächen, eine Abnahme hauptsächlich in ehemals versiegelten bzw. an mit offenem Boden versehenen Flächen. Abbildung 15 dokumentiert die Situation im Südosten von Graz. Hierbei ist auffällig, dass neu versiegelte Flächen besonders durch wärmere Temperaturstrukturen hervortreten, obwohl 2004 generell kältere Temperaturen als 1986 auftreten.

Abbildung 15:
Temperaturdifferenz-
karte des Mittagsfluges
(1986–2004) im
SE von Graz

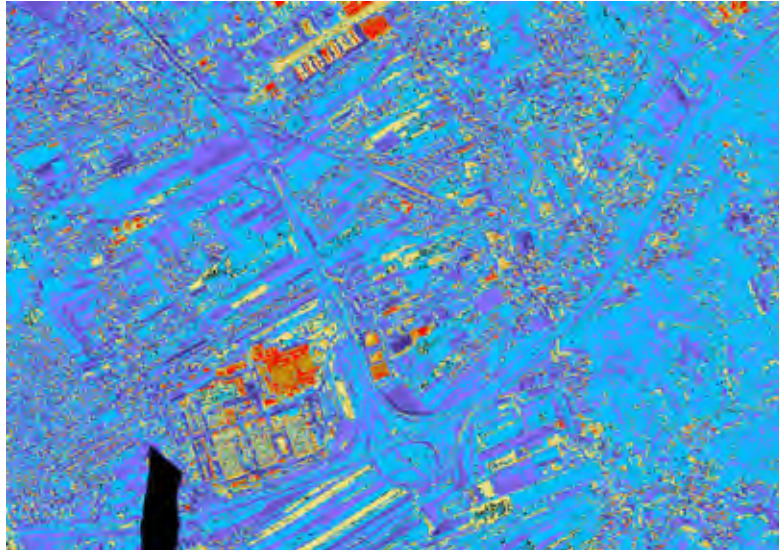
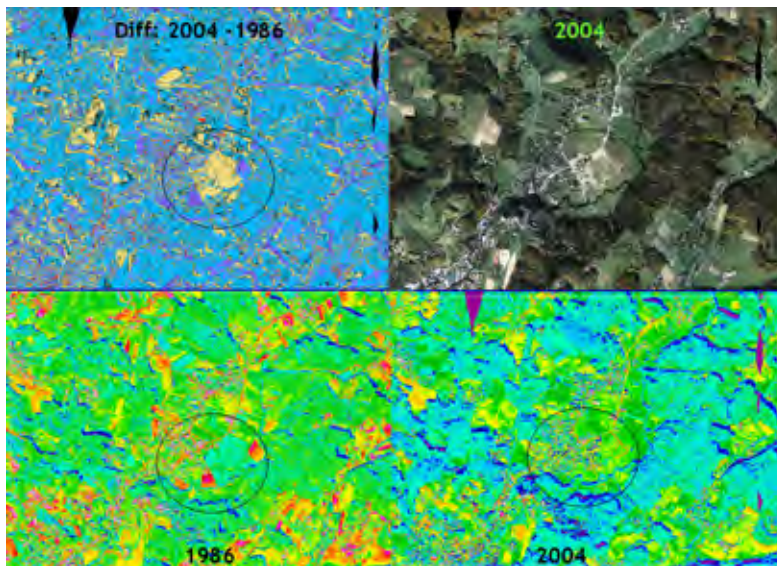
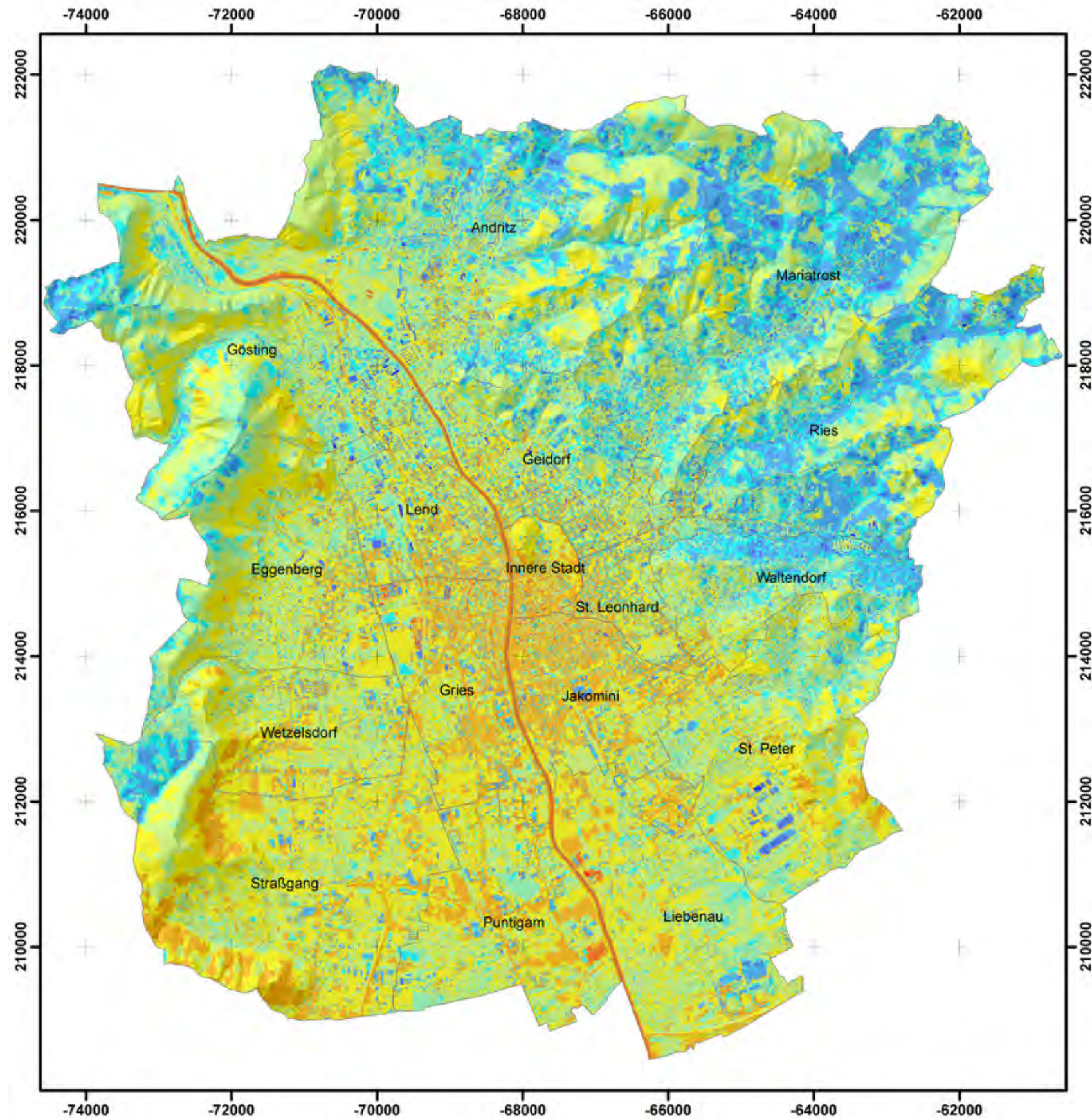


Abbildung 16 zeigt ein Beispiel aus dem Föllinger Becken, wo Verbauungstätigkeit zu generell zu wärmeren Temperaturstrukturen führt.

Abbildung 16:
Vergleich der mittäg-
lichen Temperatur-
verteilung im Föllinger
Becken





5. Vergleichende Analyse

Oberflächentemperatur Graz 2011

Datengrundlage: TABI 1800 Thermalscannerbefliegung vom 20.12.2012, (18:52–20:11)

Bodenauflösung 0,6 m

Digitales Geländemodell

Grazer Bezirke im SHP Format

Bearbeitung: M. Muick und W. Sulzer



Abbildung 17:
Oberflächentemperatur
2011

Temperaturangaben in °C

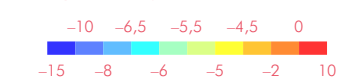


Abbildung 18:
Oberflächentemperatur
2011 (Segment 25)

Oberflächentemperatur Graz 2011

Nachtflug, Segmentgröße 25

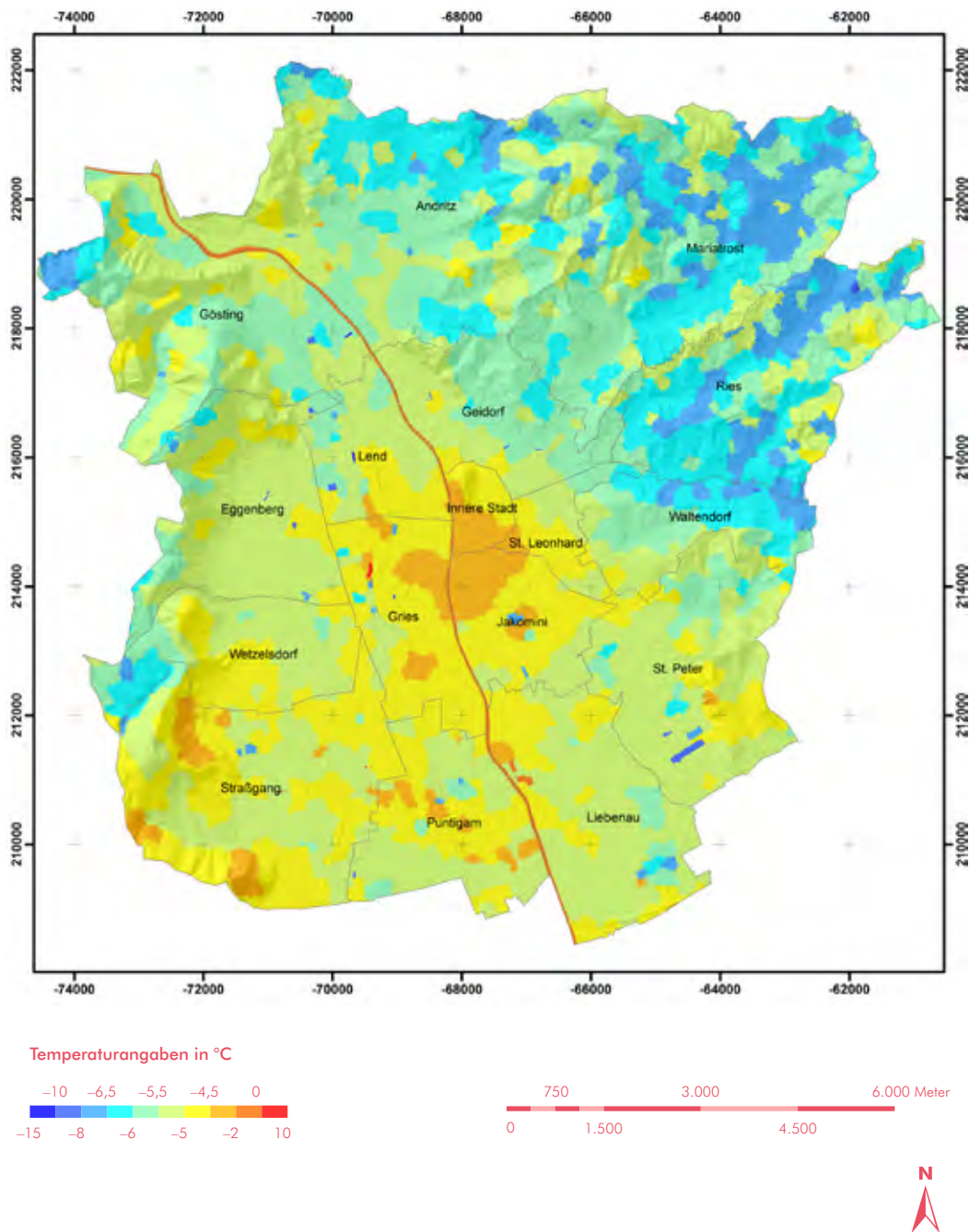


Abbildung 19:
Oberflächentemperatur
1986 (Segment 3)

Oberflächentemperatur Graz 1986

Mittagsflug, Segmentgröße 3

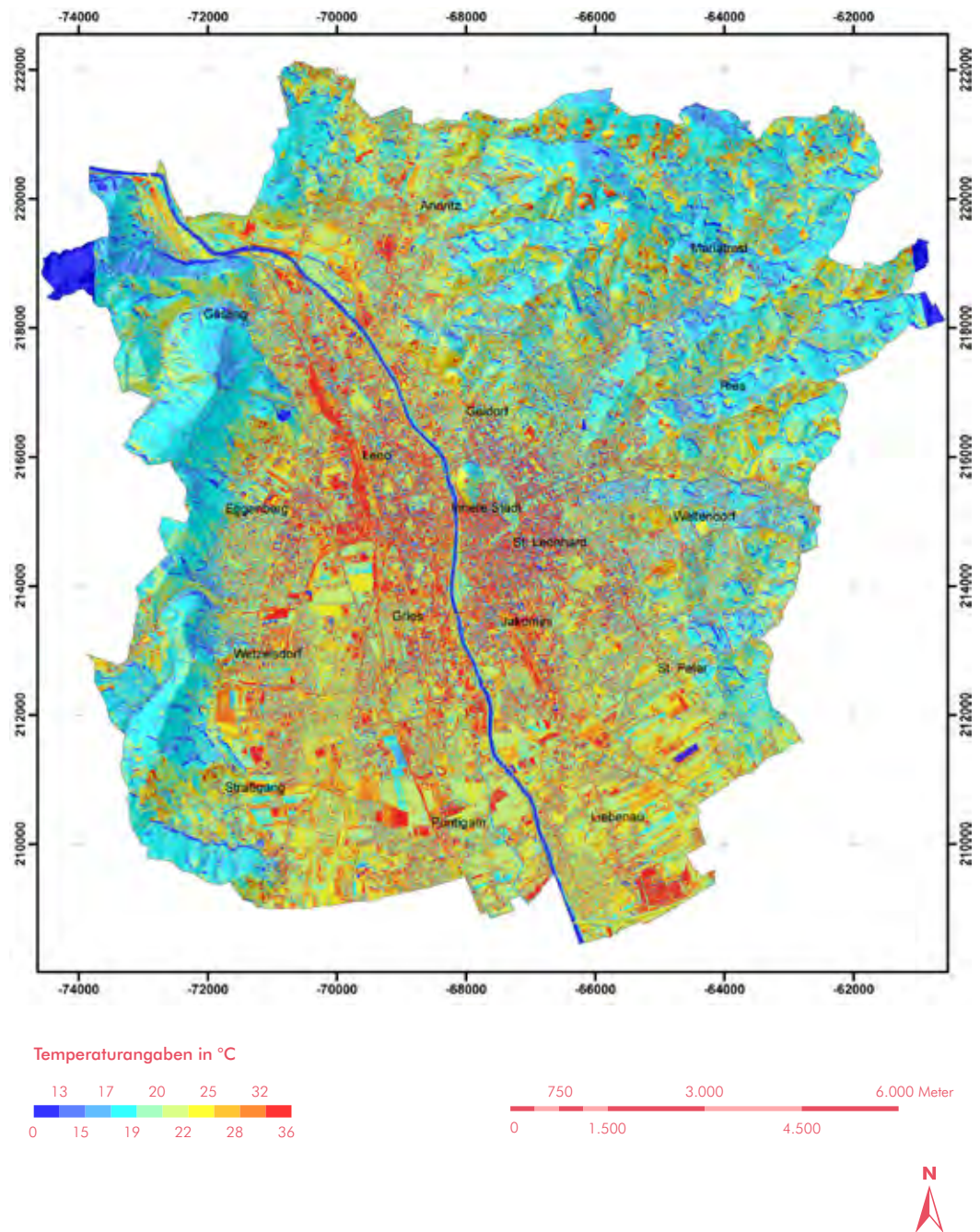
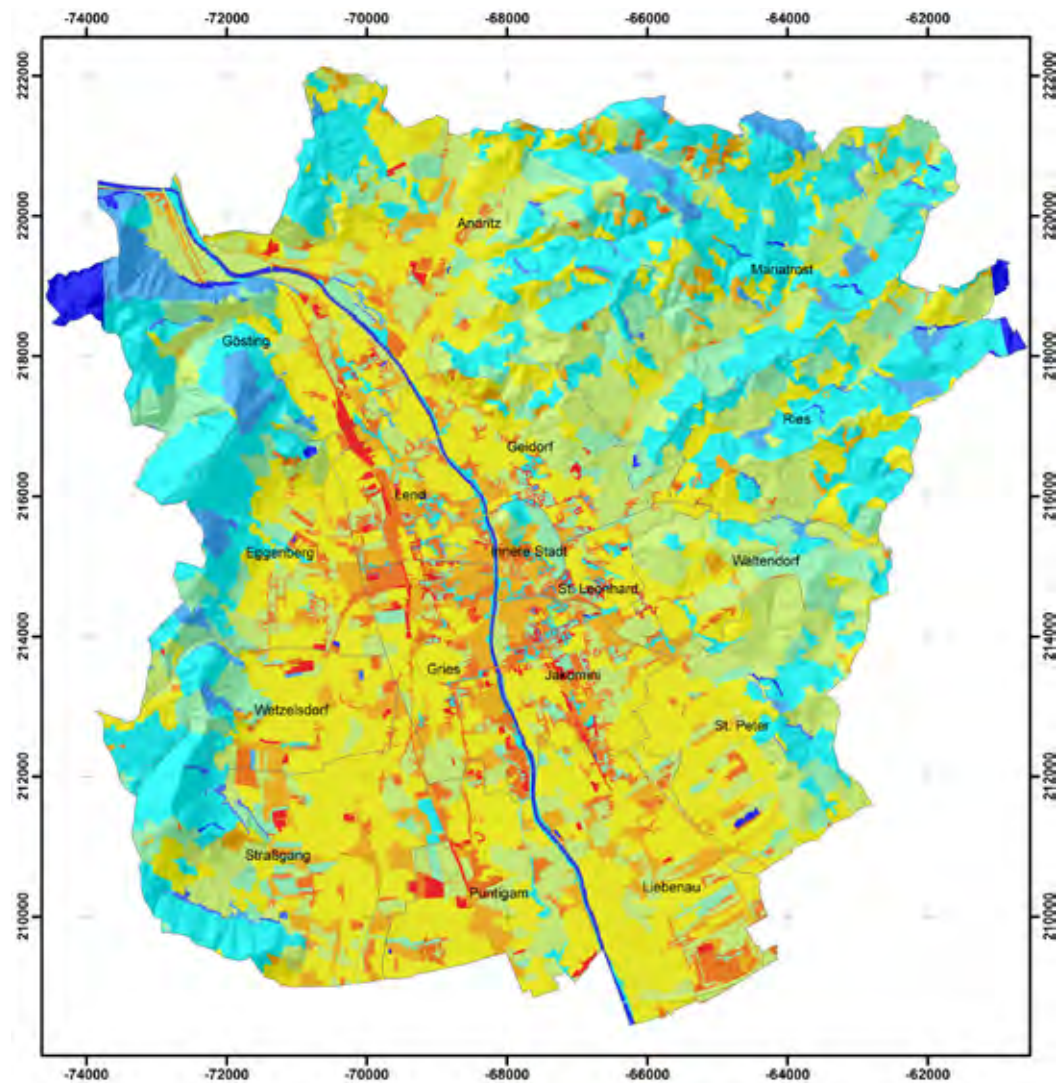


Abbildung 20:
Oberflächentemperatur
1986 (Segment 25)

Oberflächentemperatur Graz 1986

Mittagsflug, Segmentgröße 25



Temperaturangaben in °C



Abbildung 21:
Oberflächentemperatur
2004 (Segment 3)

Oberflächentemperatur Graz 2004

Mittagsflug, Segmentgröße 3

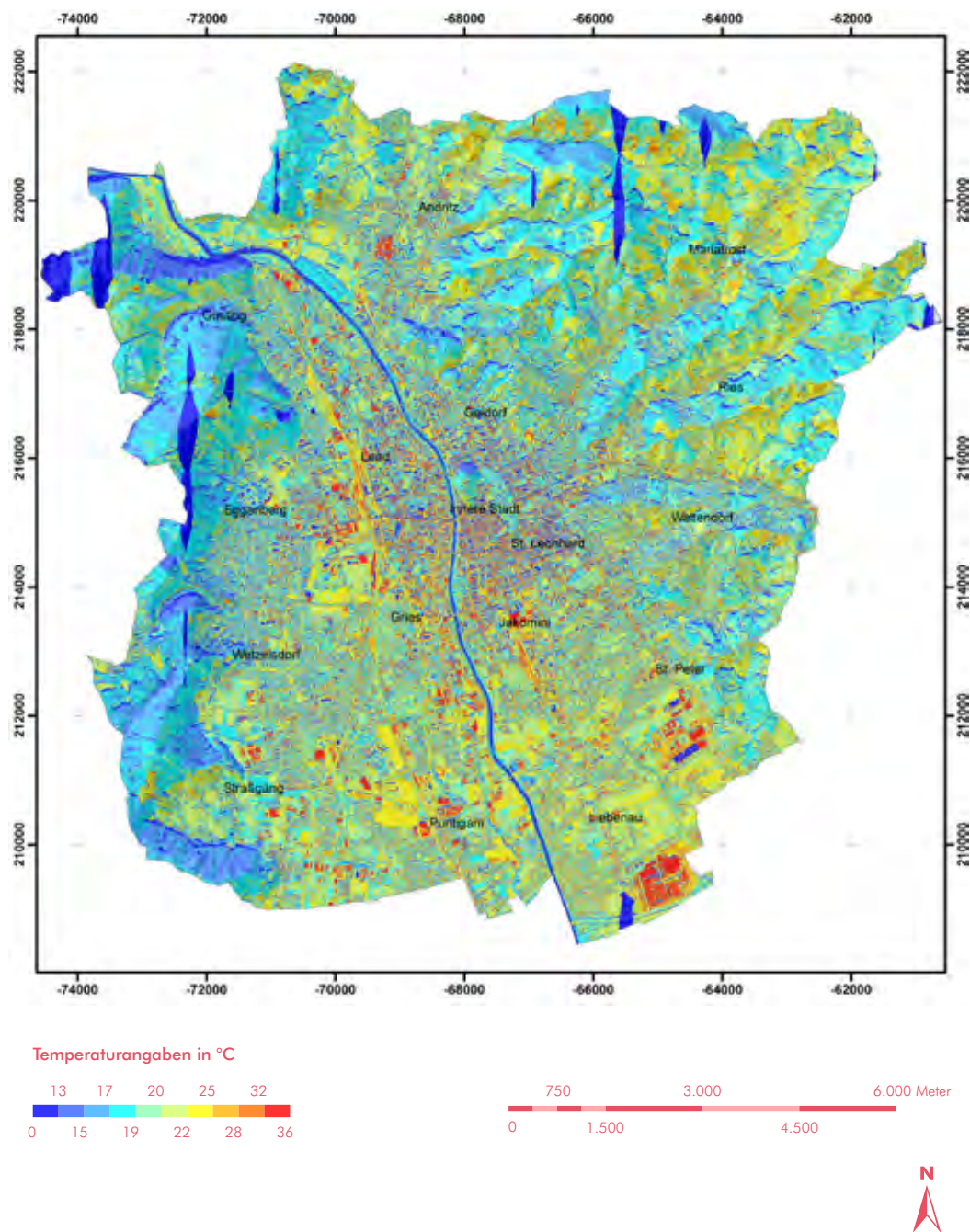
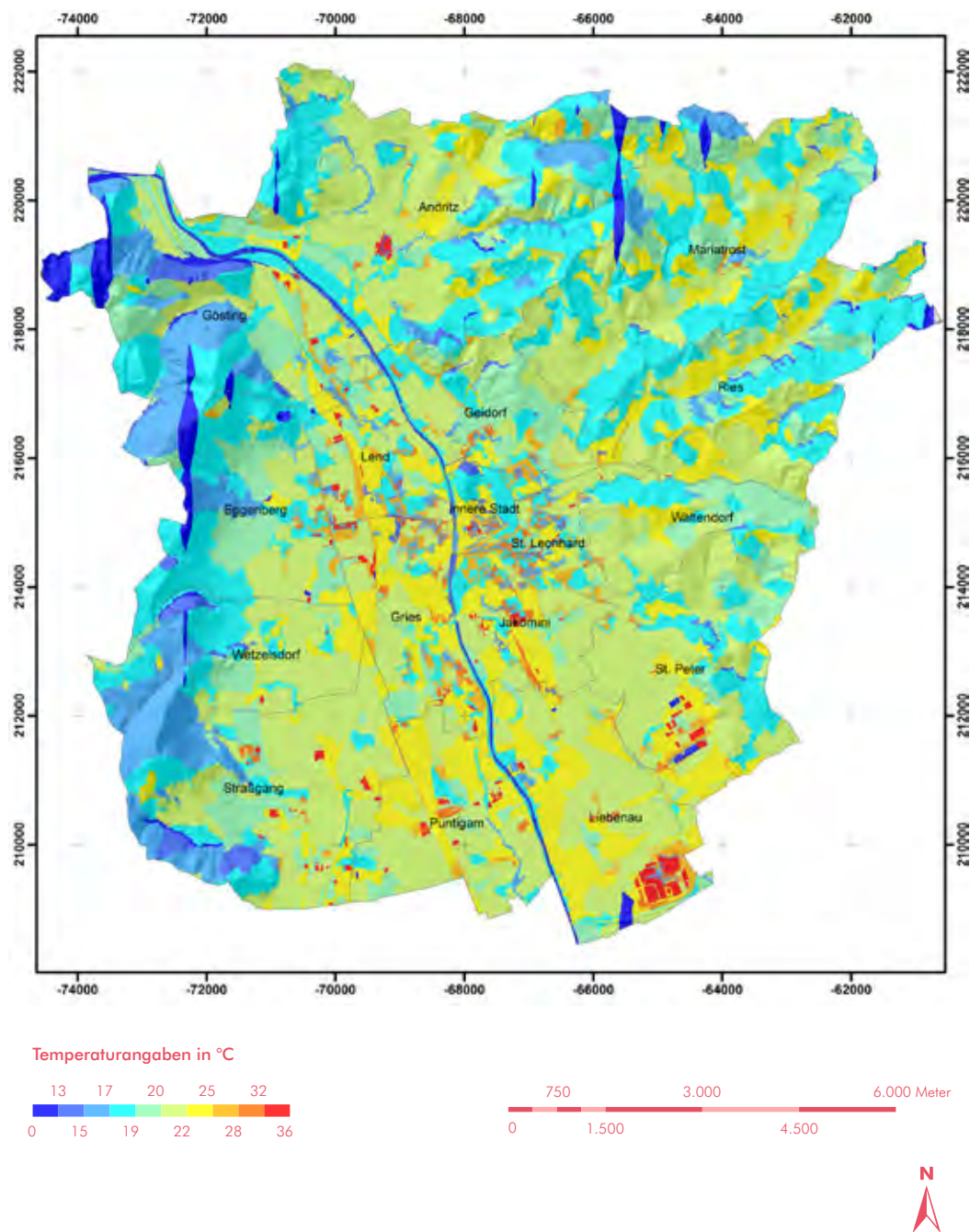


Abbildung 22:
Oberflächentemperatur
2004 (Segment 25)

Oberflächentemperatur Graz 1986

Mittagsflug, Segmentgröße 25



5.4 ANALYSE DER ERGEBNISSE – BESONDERHEITEN DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN 1986 – 2004

Oberflächentemperaturkarten eignen sich sehr gut, um spezielle Temperaturverteilungsmuster in einem Siedlungsgebiet zu identifizieren und zu beschreiben. Speziell in städtischen Gebieten ist sehr deutlich zu erkennen, dass unterschiedliche Bebauungsformen und Stadtteile aufgrund ihrer individuellen Siedlungsstrukturen besondere Temperaturcharakteristika aufweisen. So lassen sich zum Beispiel stark versiegelte Flächen, wie dicht verbaute Wohngebiet oder Indus-

triebgebiete aufgrund ihrer massiven Überwärmung gegenüber ihrem Umland deutlich unterscheiden. Durch multitemporale Interpretation von Oberflächentemperaturkarten, wie zum Beispiel unter Verwendung der Strahlungstemperaturkarte Graz 1986, ist es möglich, auch Bebauungsveränderungen aufgrund des veränderten Temperaturverhaltens zu identifizieren.

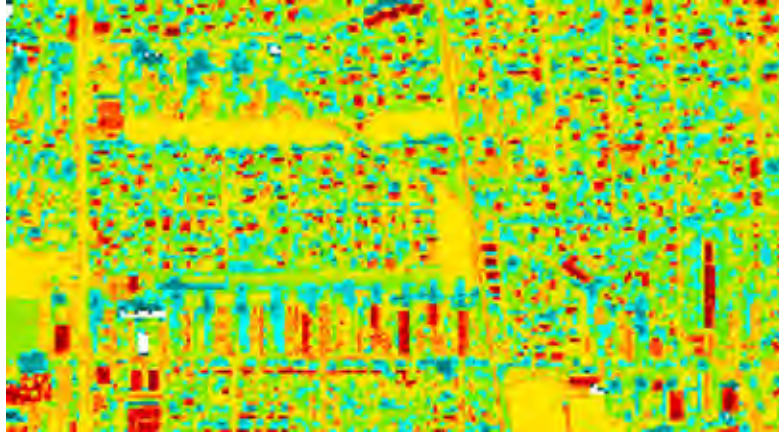
5.4.1 BESONDERE OBERFLÄCHENTEMPERATUR-STRUKTUREN 1986

Graz erfuhr als gewachsene Stadt mit mittelalterlichem Kern viele verschiedene Epochen mit unterschiedlichen Baustilen. Diese weisen aufgrund ihrer jeweiligen Bebauungsdichte auch eigene Temperaturverhalten auf, welche im Folgenden, zusammen mit den Temperaturverhalten einiger signifikanter Oberflächen, beschrieben und auch mit der Befliegung von 1986 verglichen werden (vgl. LAZAR et al., 1994).

Baukörperstrukturen:

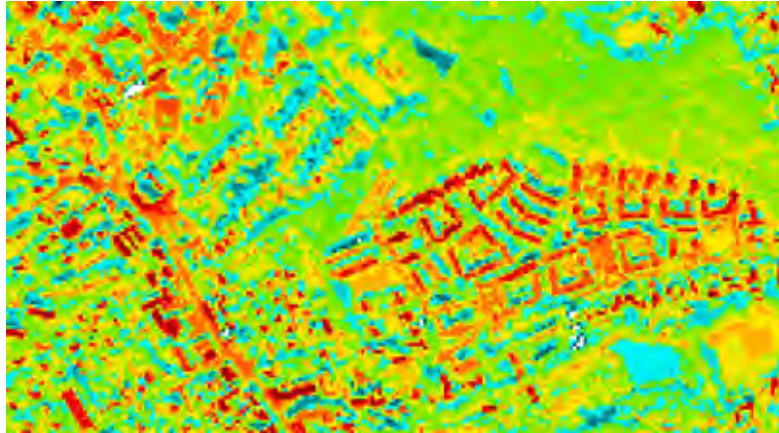
Gartenstadt: Die Baukörperstrukturen der „Gartenstadt“ (lockere Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern, teilweise auch verdichteter Flachbau) nehmen einen Großteil der Fläche der Stadt ein. Die „Gartenstadt“ zeigt sich in der Strahlungstemperaturkarte als punktförmiges Mosaik (vgl. Abbildung 23), bestehend aus aufgeheizten Dachflächen (rot) mit Temperaturen je nach Exposition (29–47 °C) und Beschattung (12–18 °C), Straßen (gelb, orange) zwischen 21–24 °C, im Gegensatz zu den kühleren Gärten und Wiesen (grün) mit 16–19 °C. Im Mittel verzeichnet der Typ Gartenstadt im Jahr 2004 eine Temperatur von ~20 °C gegenüber ~26 °C im Jahr 1986.

Abbildung 23:
Bebauungstyp
Gartenstadt



Blockbebauung: Dieser Typ zeichnet sich durch mehrgeschossige Verbauung aus, welche häufig in die Typen „Gartenstadt“ und den Typ „Gründerzeitliche Bebauung“ eingebunden sind. Durch mehrgeschossige Wohnblöcke und gegenüber der Gartenstadt reduzierte Grünanteile befindet sich das Mittel der Temperaturen mit $\sim 21^\circ\text{C}$ (1986: 28°C) auch über dem oben genannten Typus. Ausnahmen bilden größere Siedlungskomplexe, welche durchaus mit erheblichen Grünanteilen durchwachsen sind, wie zum Beispiel die Terrassenhaussiedlung in St. Peter, die im Mittel eine Temperatur von $\sim 18^\circ\text{C}$ aufweist. Das Mittel wird aber durch erheblichen Schattenwurf aufgrund der großen Gebäudehöhen beeinflusst. Abbildung 24 zeigt die durch Pflanzenbewuchs und Schattenwurf kühlere Umgebung der Terrassenhaussiedlung (linke obere Bildhälfte) und im Vergleich dazu die durch höhere Temperaturen repräsentierte Wienerbergersiedlung (mittlerer rechter Bildteil) aufgrund geringerer Vegetationsanteile. Ebenfalls im Bild zu erkennen ist das Naherholungsgebiet „Eustacchiogründe“ mit seinen Waldflächen (grün) und dem ehemaligen Ziegelteich (blau).

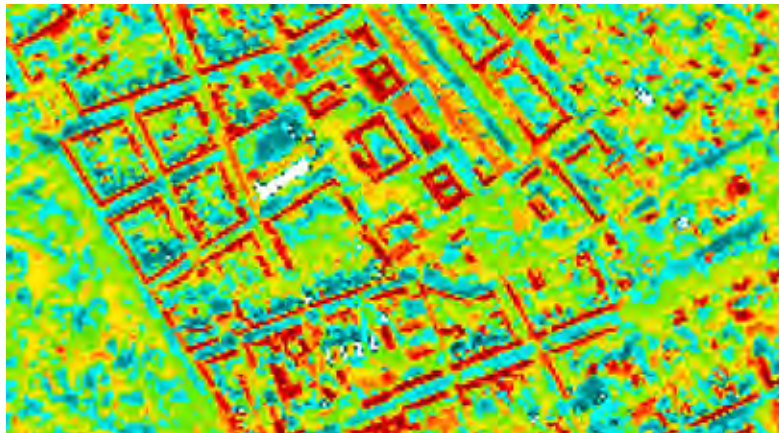
Abbildung 24:
Blockbebauung in
St. Peter



Gründerzeitbebauung: Relativ klar zu erkennen sind die regelmäßigen Muster der gründerzeitlichen Bebauung im Osten des Schlossbergs mit ihren markanten Temperaturdifferenzen zwischen überheizten Dächern mit $\sim 36^{\circ}\text{C}$ und begrünten Innenhöfen mit $\sim 17^{\circ}\text{C}$. Im Mittel errechnet sich eine Temperatur für mehrere Blöcke mit $\sim 22^{\circ}\text{C}$ und $26\text{--}27^{\circ}\text{C}$ für 1986.

In Abbildung 25 sind die kühleren Vegetationsflächen in den Innenhöfen gegenüber den wärmeren Dächern sehr gut zu erkennen. Im rechten Bildteil ist die Karl-Franzens-Universität mit dem warmen Vorplatz zu erkennen.

Abbildung 25:
Gründerzeitliche
Bebauung



Altstadt: Der historische Teil der Stadt erzielt aufgrund seines hohen Versiegelungsgrades (vgl. Abbildung 26) Höchstwerte bei den Temperaturen, welche aber im Mittel ($\sim 22\text{--}23^{\circ}\text{C}$) unter jenen von 1986 liegen. Ein Grund dafür liegt in den hohen Schattenantei-

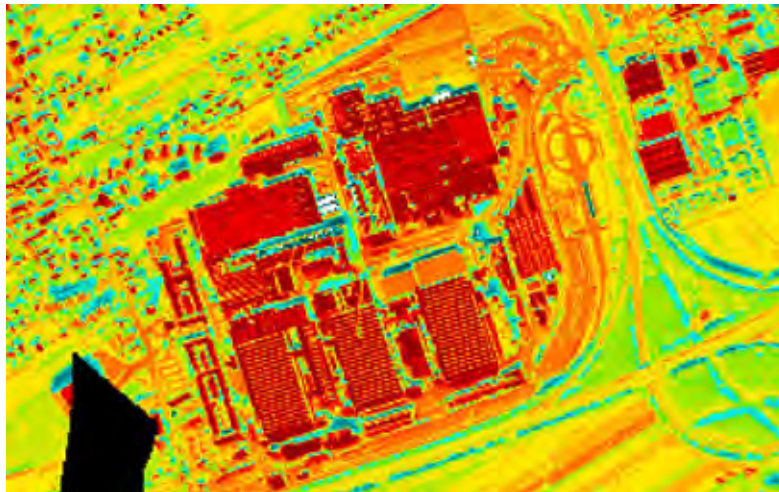
len in den engen Gassen im Jahr 2004. Durch den verminderten Schattenwurf im Ausschnitt von 1986, aufgrund eines früheren Befliegungszeitpunktes, befinden sich die Temperaturen zwischen ~ 29 und $\sim 30^{\circ}\text{C}$.

Abbildung 26:
Hohe Versiegelungs-
dichte in der Altstadt



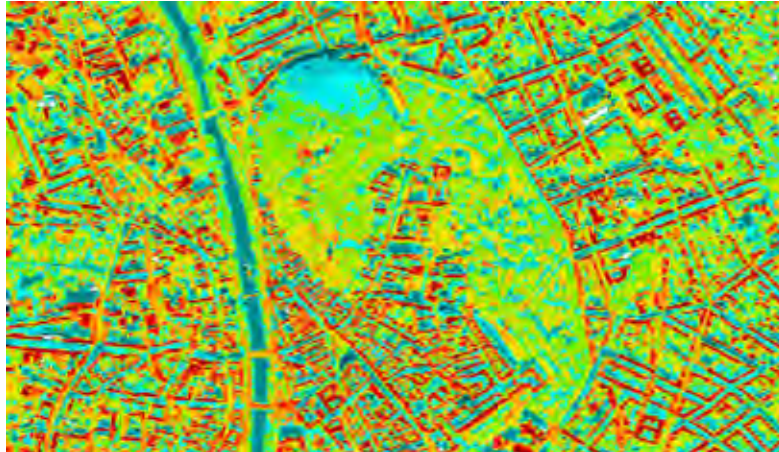
Industrie- und Gewerbeflächen: Dieser Typ weist die höchsten Versiegelungsraten auf, was sich auch sehr deutlich in den erzielten Mitteltemperaturen niederschlägt. 2004 errechnet sich hier eine Mitteltemperatur von $\sim 30^{\circ}\text{C}$ gegenüber $\sim 32^{\circ}\text{C}$ im Jahre 1986. In der folgenden Abbildung 27 sind die Hallendächer der Magna Steyr Fahrzeugtechnik im Süden der Stadt abgebildet. Die rote Farbgebung zeigt die extreme Erwärmung gegenüber dem Umland.

Abbildung 27:
Ehem. „Puchwerke“,
Magna Steyr
Fahrzeugtechnik



B Grünflächen, landwirtschaftlich genutzte Flächen und sonstige Flächen

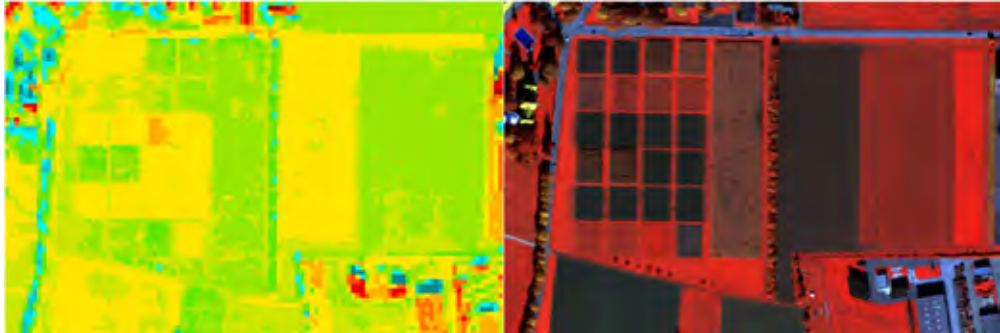
Abbildung 28:
Der kühle Grazer
Stadtpark und der
Schlossberg gegenüber
den überwärmten
bebauten Gebieten



Grünflächen und Parks: Gegenüber den wärmeren bebauten Bereichen haben die innerstädtischen Grünflächen und Parks eine kühlende Wirkung, was insbesondere durch den Grazer Stadtpark, der als kühle „Insel“ hervortritt, verdeutlicht wird (Abbildung 28). In seinem Mittel verzeichnet der Stadtpark eine Temperatur von ~ 17 bis $\sim 18^{\circ}\text{C}$, gegenüber $\sim 23^{\circ}\text{C}$ im Jahr 1986.

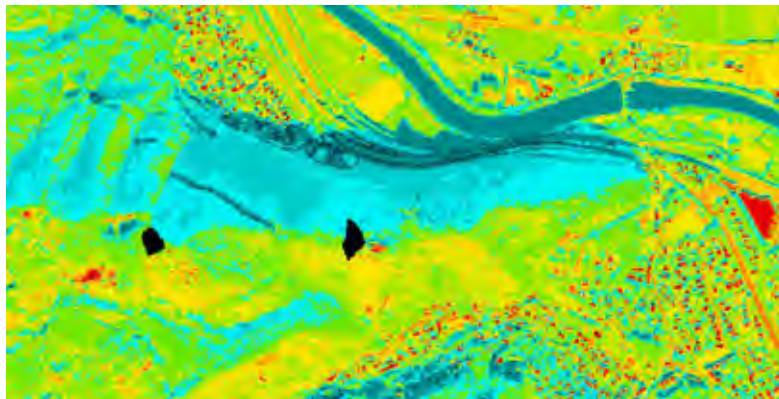
Wiesen- und Ackerflächen: Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen herrscht aufgrund der unterschiedlichen Bewuchsarten und -stände eine große Streuung der Oberflächentemperaturen. Die niedrigsten Mitteltemperaturen weisen Obstbauflächen und Maisfelder mit ~ 17 – 18°C auf, umgepflügte Äcker liegen gemeinsam mit Grünlandflächen leicht darüber (~ 18 – 19°C). Die höchsten Temperaturen treten bei kurzen Rasen, wie zum Beispiel auf Sportplätzen, mit $\sim 22^{\circ}\text{C}$ auf. Besonders augenscheinlich treten diese Differenzen in Abbildung 29 hervor, wo die Anbauflächen in verschiedenen Stadien der Landwirtschaftlichen und Gärtnerischen Handelsschule Grottenhof abgebildet sind. Kanalkombination für den rechten Teil der Abbildung: 7/5/3.

Abbildung 29:
Landwirtschaftliche
und Gärtnerische
Handelsschule
Grottenhof



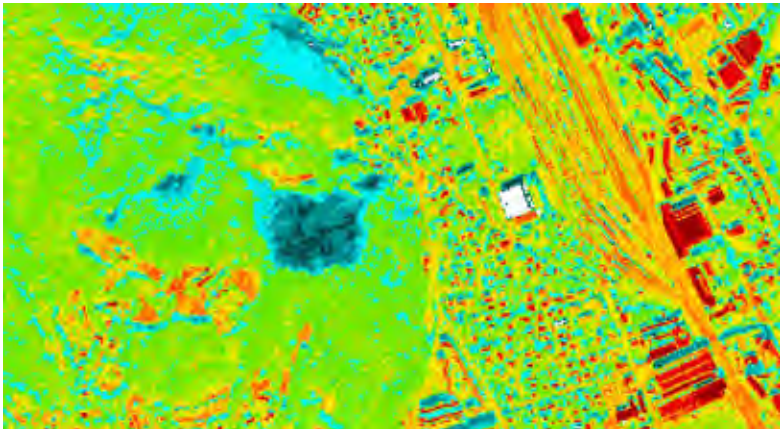
Wälder: Bewaldete Flächen weisen hauptsächlich expositionsbedingt Unterschiede in ihrem Temperaturverhalten auf. Während sich unbeeinflusste Waldflächen im Mittel zwischen $\sim 17\text{--}18^\circ\text{C}$ bewegen, können nordexponierte Wälder im Schatten um 3–4 K kühler sein (z. B.: Jungfernsprung). Besonnte Hänge liegen mit Werten zwischen $\sim 19\text{--}20^\circ\text{C}$ klar darüber (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30:
Einfluss der Exposition
auf Obeflächen-tempe-
raturen von Wäldern



Abbauf Flächen: Je nach Exposition variieren auch die Mitteltemperaturen von Abbauf Flächen. Der nordexponierte Steinbruch an der Nordflanke der Hubertushöhe am Plabutsch gehört mit Werten zwischen $\sim 10\text{--}11^\circ\text{C}$ zu den niedrigsten gemessenen Temperaturen im Untersuchungsgebiet (vgl. Abbildung 31). Die südexponierte Abbauf Fläche im Annengraben hingegen erhitzt sich tagsüber sehr stark, was durch Temperaturen zwischen $\sim 27\text{--}28^\circ\text{C}$ verdeutlicht wird.

Abbildung 31:
Der Steinbruch am
Plabutsch als
„Kältepol“



In Tabelle 1 sind die Temperaturen in einer Zusammenschau übersichtlich dargestellt. Tabelle 1: Mitteltemperaturen ausgewählter Oberflächen.

| BAUKÖRPER- STRUKTUREN | T(°C) 1986 | Diff. (K) | T(°C) 2004 | Diff. (K) |
|------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Gartenstadt | 26 | 0 | 20 | 0 |
| Blockbebauung | 28 | +2 | 21 | +1 |
| Gründerzeit- bebauung | 26,5 | +0,5 | 22 | +2 |
| Altstadt | 29,5 | +3,5 | 22,5 | +2,5 |
| Industrie und Gewerbe | 32 | +6 | 30 | +10 |
| GRÜNFLÄCHEN, LWF + SONSTIGE FL. | | | | |
| Stadtpark | 23 | | 17,5 | |
| Obstb.fl. + Maisfelder | 17,5 | | . | |
| Grünflächen, Wiesen | 18,5 | | . | |
| Rasen | 22 | | 28 | |
| Wald Nord | 14 | | 19,5 | |
| Wald | 17,5 | | 23 | |
| Wald Süd | 19,5 | | 24,5 | |
| Abbauf. Plabutsch | 10,5 | | 12 | |

5.4.2 EINFLÜSSE VON BEBAUUNGSVERÄNDERUNGEN

Lebendige Städte sind dynamisch und unterliegen für gewöhnlich einem stetigen Wandel, was durch Stadterweiterungen und Bebauungsänderungen sichtbar wird. Diese Änderungen können durch ein verändertes Temperaturverhalten des Stadtgebietes, aber auch des Umlandes beobachtet werden. Bereits durch einen visuellen Vergleich der beiden Strahlungstemperaturkarten lassen sich Aussagen über Einflüsse von Bebauungsänderungen auf das Temperaturverhalten treffen.

An dieser Stelle sei Hrn. Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Viktor Kaufmann vom Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz für die Bereitstellung der digitalen Datensätze der Befliegung vom Jahre 1986 gedankt.

Anhand der folgenden Abbildungen kann nochmals ergänzend zum vorigen Kapitel eindrucksvoll beobachtet werden, inwiefern sich die Bebauungsveränderungen durch vergleichende Betrachtung der beiden Strahlungstemperaturkarten 1986 und 2004 identifizieren lassen. Der obere Teil der Abbildungen zeigt jeweils die Situation von 1986 und der untere jene von 2004.

Abbildung 32:
Zubau bei den
„Puchwerken“

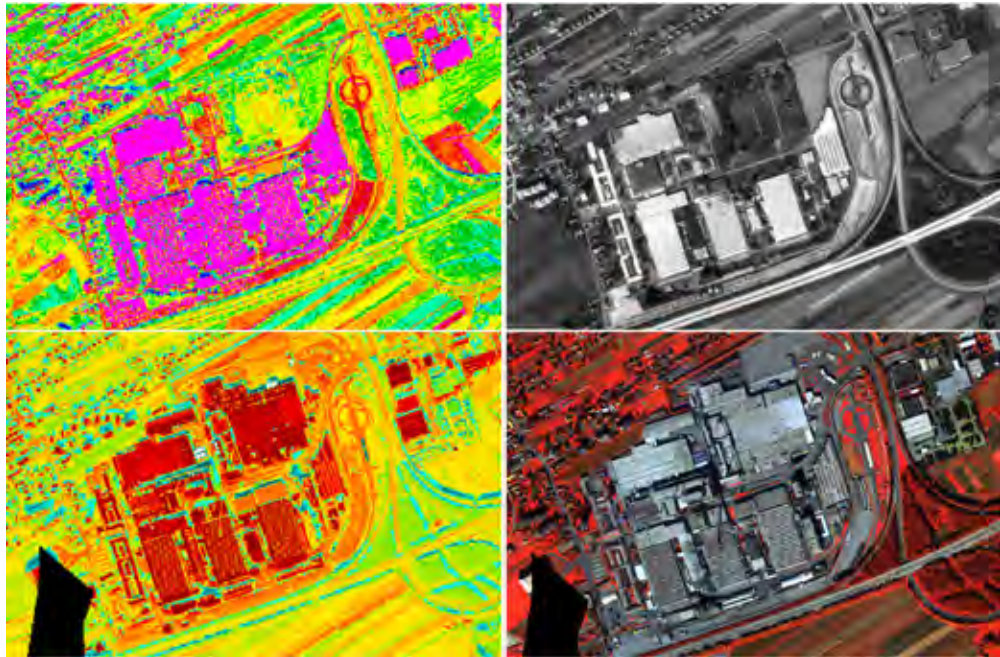


Abbildung 33:
Errichtung „Shopping
Center West“ und
Autobahnzubringer

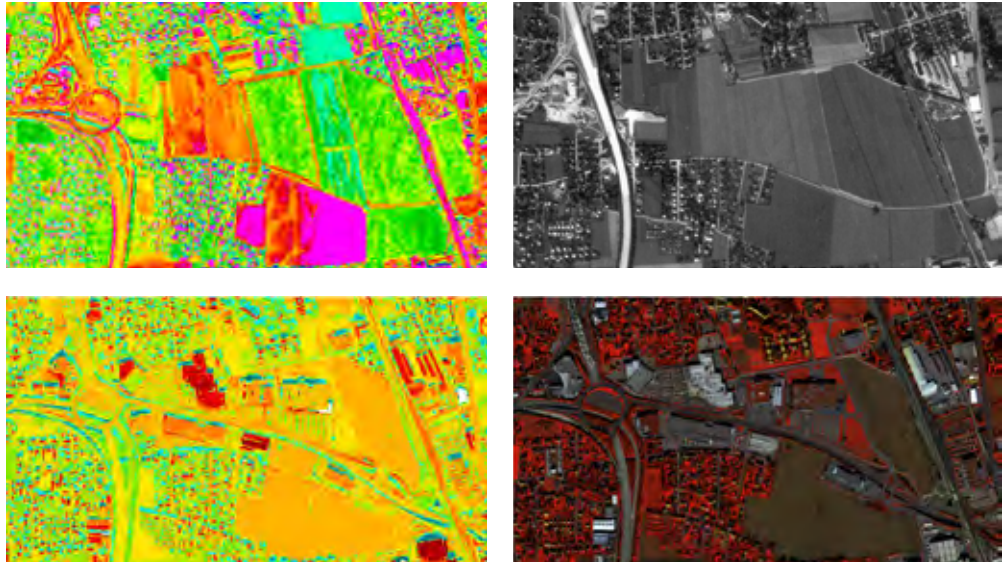
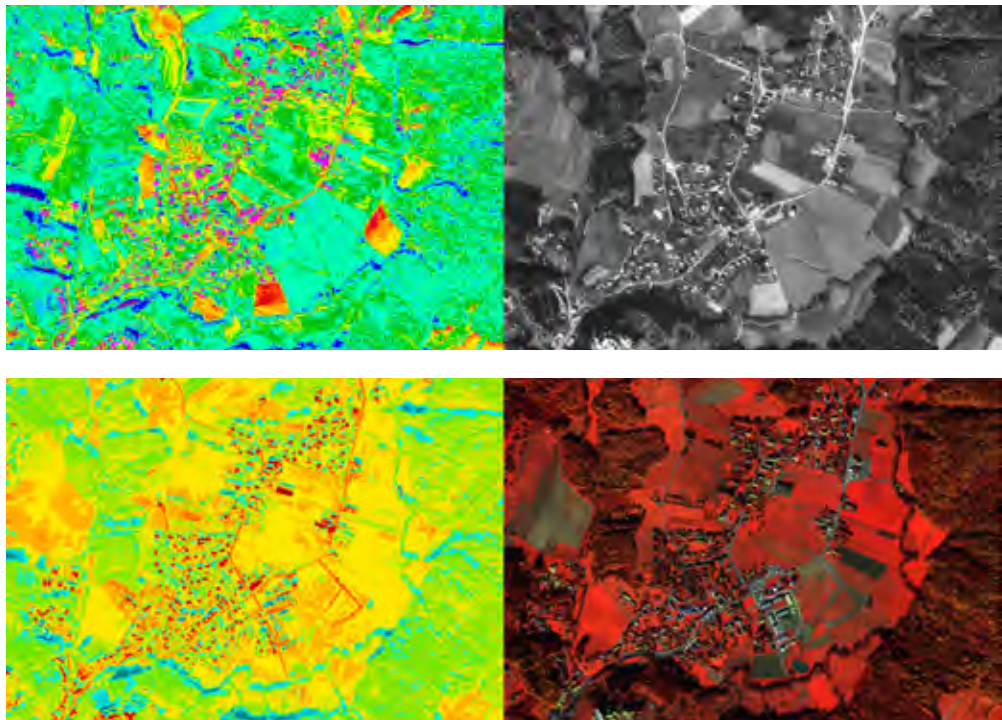


Abbildung 34:
Versiegelungstendenzen
im Föllinger Becken

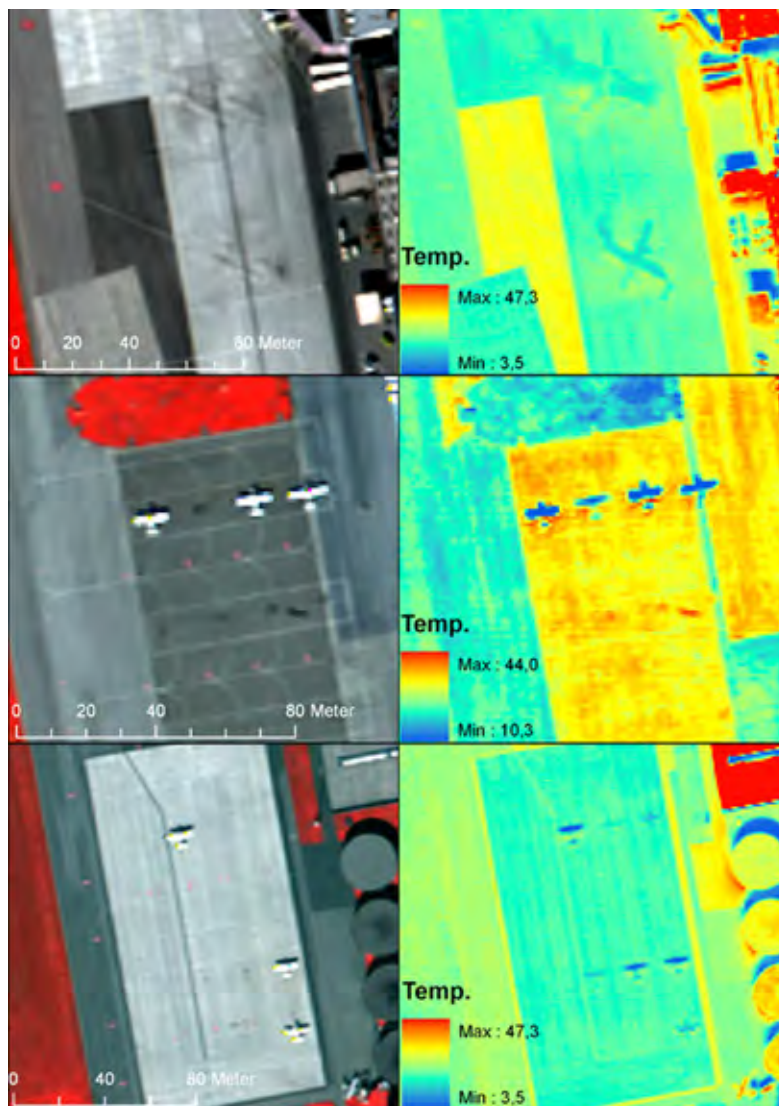


5.4.3 FLUGHAFEN GRAZ

Ein weiteres interessantes Beispiel für die Anwendbarkeit von Thermalscannerbefliegungen fällt bei genauerer Betrachtung des Flughafens Graz Thalerhof auf. Abbildung 35 zeigt sehr eindrucksvoll, dass mit der thermalen Information sogenannte thermale Schatten von Flugzeugen identifizierbar sind. Diese werden

von Flugzeugen, oder bei entsprechender Auflösung auch von Fahrzeugen, welche ihren Standort verlassen haben, hinterlassen, da sich der Boden unter den Objekten nicht so stark aufheizen kann, wie in der Umgebung (vgl. Prinz et.al., 1998).

Abbildung 35:
Thermale Schatten
von Flugzeugen
(Links: Kanalkombi-
nation: 7/5/3,
rechts: Thermalkanal)



5.4.4 THERMALE STADTSTRUKTURANALYSE 2011 UND 1986

Für den Vergleich der Stadtstruktur 2011 wurden nun in die Nutzungsflächen Polygone des Katasters der mittlere Temperaturwert gespeichert. Die jeweiligen Abbildungen zeigen weiters ein Histogramm der Oberflächentemperaturen sowie den Mittelwert der Temperatur für den kompletten Ausschnitt. Die Testgebiete verfügen natürlich 2011 und 1986 über die gleiche Position und Ausdehnung.

ES WURDEN 5 STADTSTRUKTURTYPEN AUSGEWÄHLT:

Mittelalterlicher Stadttyp

Gründerzeitlicher Stadttyp

Gründerzeitlicher Stadttyp (Seitentalauswindeinfluss)

Gartenstadt

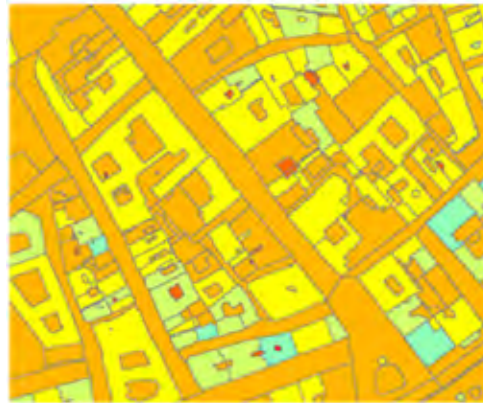
Gartenstadt (Seitentalauswindeinfluss)

SEHR DEUTLICH TRITT BEI DER BETRACHTUNG DER ABBILDUNGEN DER EINFLUSS DER SEITENTALAUSWINDE ZU TAGE, WELCHER SICH WIE FOLGT QUANTIFIZIEREN LÄSST:

| | |
|--|--------|
| Differenz der gründerzeitlicher Stadttypen | 1 °C |
| Differenz der Gartenstadt-Testgebiete | 1,3 °C |

Die maximale mittlere Temperaturdifferenzen der Testgebiete zueinander treten zwischen dem im Zentrum der Wärmeinsel gelegenen mittelalterlichen Stadttyp und der vom Seitentalauswind geprägten Gartenstadt in Mariatrost auf. Hier ist ein Temperaturunterschied von 2,5 °C zu beobachten.

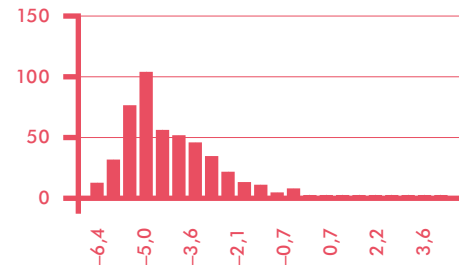
Abbildung 36:
Thermale Struktur-
analyse 2011



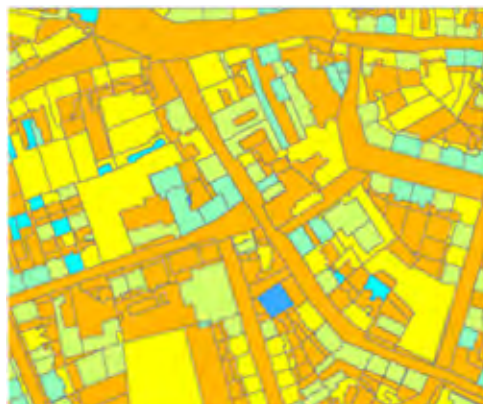
Temperaturangaben in °C

-15 -10 -8 -6,5 -6 -5,5 -5 -4,5

Mittelalterliche Stadtstruktur Zentrum



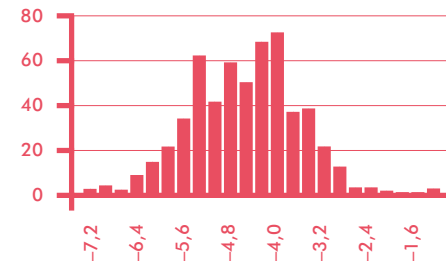
Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: -4,1 °C



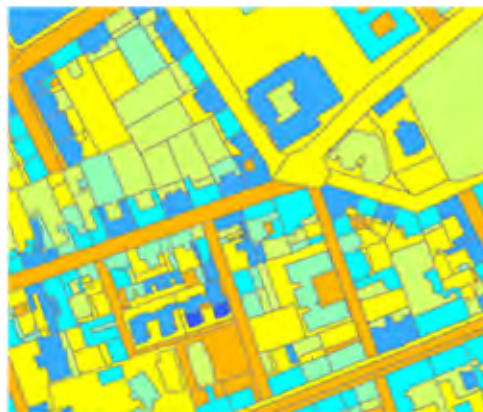
Temperaturangaben in °C

-15 -10 -8 -6,5 -6 -5,5 -5 -4,5

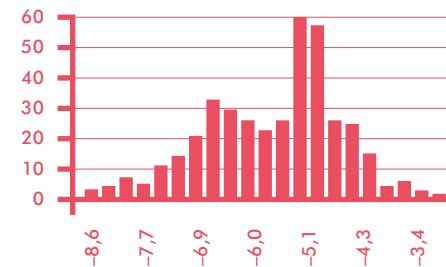
Gründerzeitliche Stadtstruktur Jakomini



Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: -4,4 °C

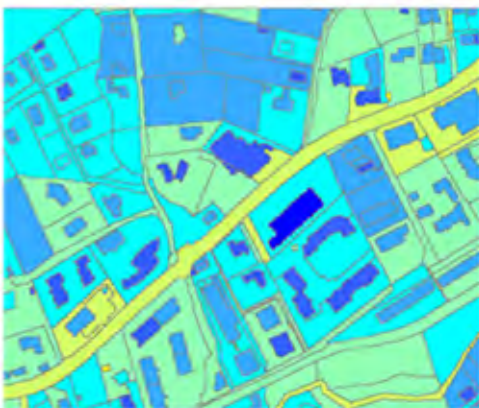
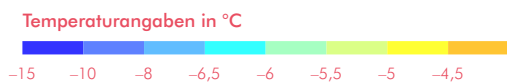


Gründerzeitliche Stadtstruktur Geidorf
Seitentalauswind Einfluss

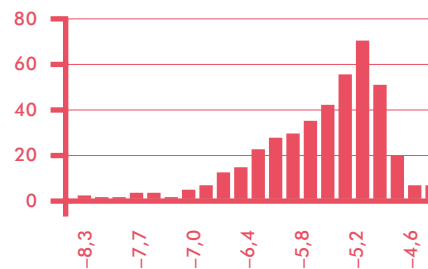


Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: -5,4 °C

Abbildung 37:
Thermale Struktur-
analyse 2011

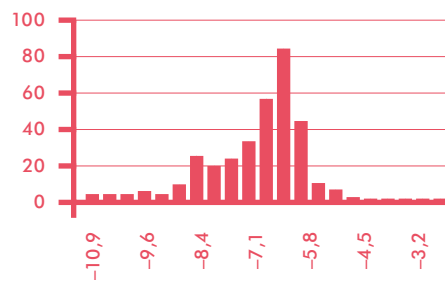


Gartenstadt Straßgang



Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: **-5,3°C**

Gartenstadt Mariatrost
Seitentalwindeinfluss



Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: **-6,6°C**

Auf Grund der schlechteren Qualität der geometrischen Entzerrung der Daten, der schlechteren Kontrastverhältnisse der Daten von 1986 sowie der Zeitspanne zwischen 1986 und dem aktuellen Kataster ist die Qualität der Darstellung deutlich eingeschränkt. Für eine bessere visuelle Vergleichbarkeit wurde jedoch der gleiche Ansatz wie 2011 verwendet. Dies lässt sich auch dadurch rechtfertigen, dass hier der Temperaturmittelwert der Testgebiete die Hauptaussage bildet und nicht deren Verteilung.

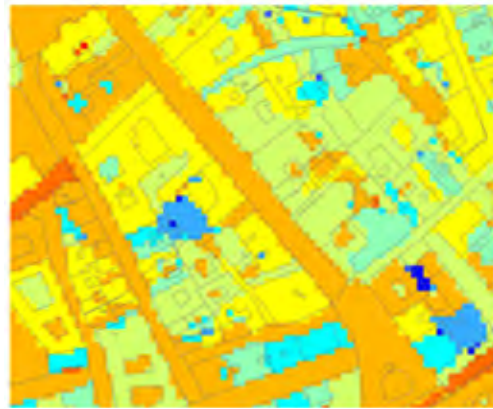
Auch für die Stadtstrukturanalyse von 1986 wurden die gleichen 5 Stadttypen verwendet, wie dies für die Analyse von 2011 der Fall war. Die Ausprägung der Differenzen der gründerzeitlichen Stadttypentestgebiete war 1986 schwächer ausgeprägt als 2011.

Differenz der gründerzeitlicher Stadttypen 0,4 °C

Im Gegensatz dazu war die Differenz der Gartenstadttestgebiete stärker ausgeprägt als 2011

Differenz der Gartenstadt-Testgebiete 1,7 °C

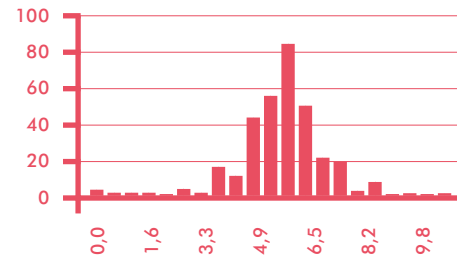
Abbildung 38:
Thermale Struktur-
analyse 1986



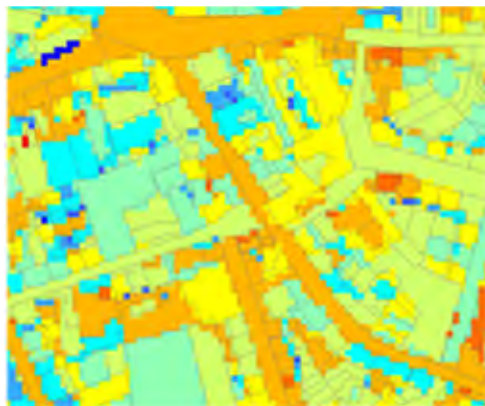
Temperaturangaben in °C

0 2 3 4 5 5,5 6 6,5 8 10 13

Mittelalterliche Stadtstruktur Zentrum



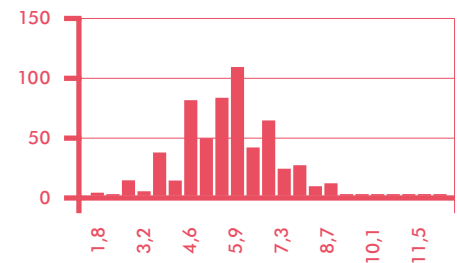
Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: 6,0°C



Temperaturangaben in °C

0 2 3 4 5 5,5 6 6,5 8 10 13

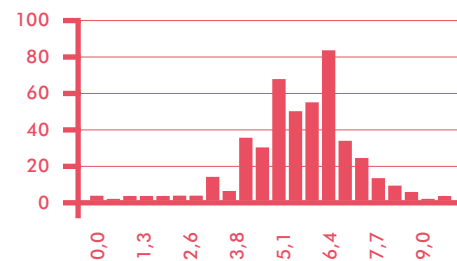
Gründerzeitliche Stadtstruktur Jakomini



Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: 5,9°C

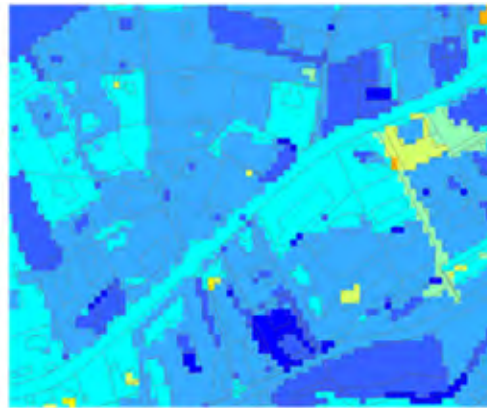
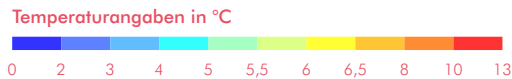


Gründerzeitliche Stadtstruktur Geidorf
Seitentalauswineinfluss

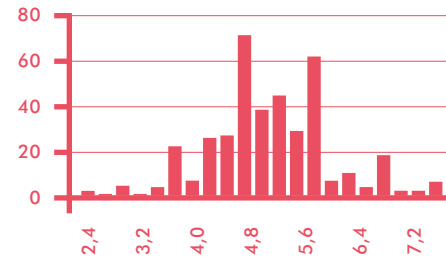


Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: 5,5°C

Abbildung 39:
Thermale Struktur-
analyse Gartenstadt
1986

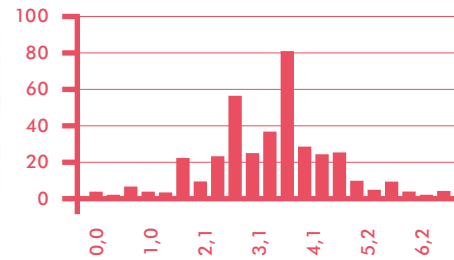


Gartenstadt Straßgang



**Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: 5,4°C**

**Gartenstadt Mariatrost
Seitentalauswindeinfluss**



**Histogramm der Oberflächentemperaturwerte
Mittelwert: 3,7°C**

Die maximale mittlere Temperaturdifferenz der Testgebiete zueinander trat auch 1986 zwischen dem im Zentrum der Wärmeinsel gelegenen mittelalterlichen Stadttyp und der vom Seitentalauswind geprägten Gartenstadt in Mariatrost auf. Hier ist ein Temperaturunterschied von 2,3 °C zu beobachten.

Der Vergleich anhand der Testgebiete innerhalb der jeweiligen Befliegungen zeigt, dass sich die Beziehungen der Stadttypen zueinander über einen Zeitraum von 25 Jahren nicht signifikant verändert haben. Dieses Verhältnis scheint sich also auch innerhalb des Jahres (1986 am 2. Oktober und 2011 am 20. Dezember befliegen) kaum zu verändern.

6. DIE DIGITALE KLIMATOPKARTE

6.1 ERLÄUTERUNGEN ZUR KLIMATOPKARTE

Als Hauptmerkmale zur Differenzierung wurden die Baukörperstruktur und die thermischen Verhältnisse (insbesondere für die nächtliche Ausprägung der Wärmeinsel), im Nordwesten von Graz auch die Durchlüftung, herangezogen. Aus kartographischer Sicht sind die Hauptmerkmale zur Differenzierung dabei, dem Bearbeiter für die Erstellung einer synthetischen Karte Grenzen hinsichtlich der Lesbarkeit zu setzen, wobei der Maßstab 1:25.000 durchaus den Anforderungen einer derart komplexen Karte gerecht wird. Das wesentliche Problem besteht in einer möglichst klar definierbaren Abgrenzung der Klimatope untereinander, wobei sich Baukörperstrukturgrenzen, Geländelinien (z. B. Talsohlenbegrenzung), und schließlich durch Messungen erfasste Differenzierungen bei den Temperaturen als Leitlinien eignen.

Im Westen und Nordwesten bewährte sich die unterschiedliche Durchlüftung zur Abgrenzung recht gut mit der Durchlüftung („Düseneffekt“ in Gösting). Für den Planer ist jedoch wichtig, dass es sich bei der getroffenen Auswahl an Stadtklimatopen (30) um das kartographisch mögliche Maximum handelt, ohne die Karte zu stark zu überladen, und es zweifellos in einigen Bereichen (etwa in der Inneren Stadt) wün-

schenswert wäre, eine weitere Differenzierung vorzunehmen. Bei der Beschreibung der einzelnen Stadtklimatope wird jedoch weitgehend auf Besonderheiten (z. B. Klima der Innenhöfe) verwiesen.

Im Übrigen wurden die Grenzen in der Karte bewusst schwach dargestellt (keine Parzellenschärfe), da es sich mit einigen Ausnahmen um keine scharf ausgeprägten Übergänge zwischen den einzelnen Klimatopen handelt.

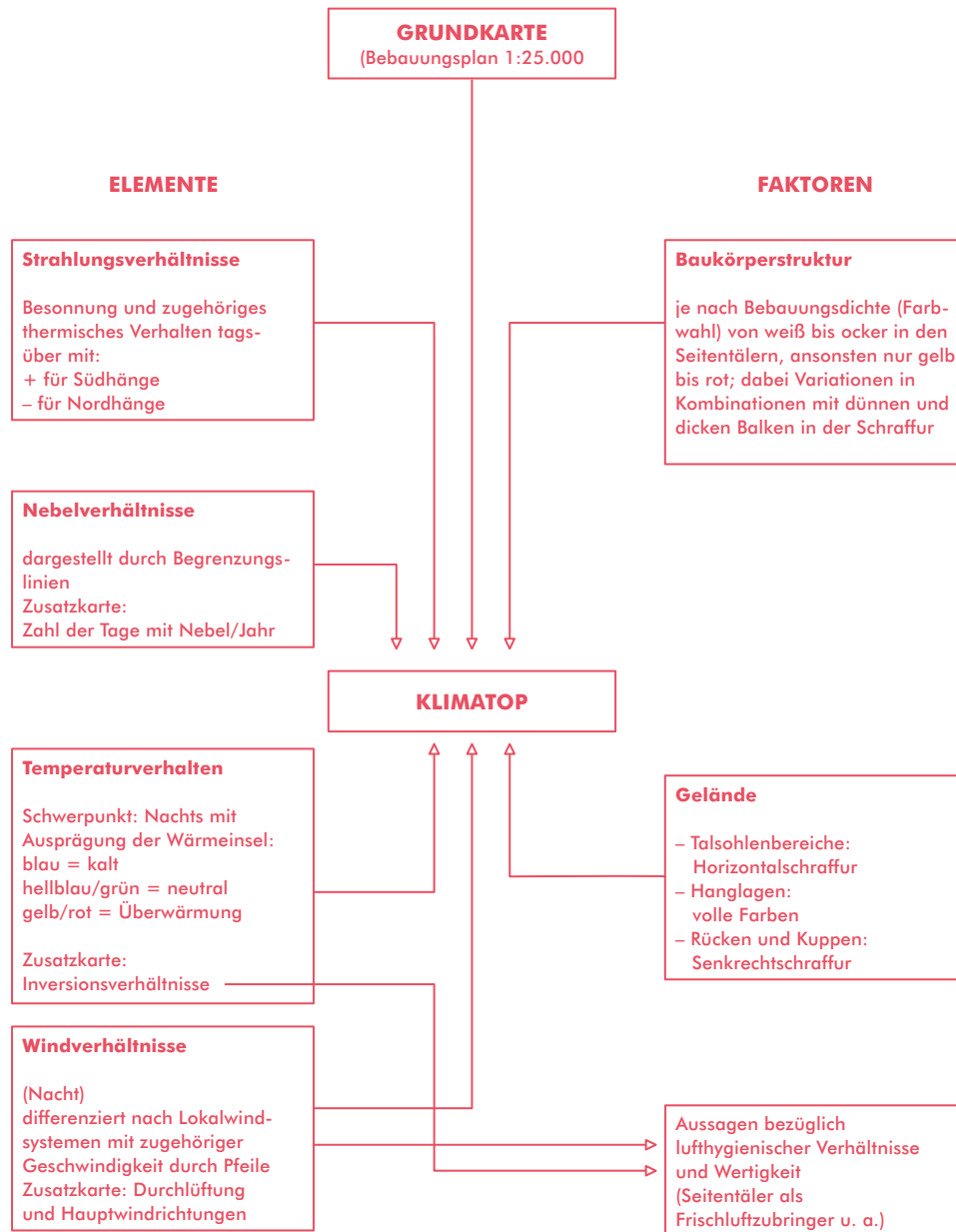
Die Tabelle 3 enthält das Schema des Konzepts zur Definierung der Klimatope für die Definierung der Klimatope mit den Faktoren Baukörperstruktur und Geländeeinfluss bzw. den ausgewählten Elementen Temperatur- und Inversionsverhältnisse, Durchlüftung mit Schwerpunktsetzung für die Nacht- und Morgenphase, Nebelverhältnisse, Strahlungsbedingungen und lufthygienische Eigenschaften (resultierend aus den Ausbreitungsbedingungen). Als Zusatzinformation schien es ferner sinnvoll, in einem Beiblatt kleinmaßstäbige Karten für wichtige Klimaelemente, wie Durchlüftung, Hauptwindrichtungen, Inversionsverhältnisse und Nebelverteilung, beizufügen – allesamt Parameter, die bei der lufthygienischen Beurteilung der Klimatope eine unerlässliche Rolle spielen.

6.2 DIE AUSGEWÄHLTEN BAUKÖRPERTYPEN UND IHRE ROLLE ZUR DEFINITION DER STADTKLIMATOPKARTE

Im engeren Stadtbereich kann man gut zwischen der Altstadt mit ihrer unregelmäßigen Straßenführung, überwiegend kleinen Plätzen und nur teilweise begrünten Innenhöfen, ihrer charakteristischen Ziegeldachlandschaft und generell hohen Bebauungsdichte (drei bis fünf Geschosse) einerseits und einer gründerzeitlichen Bebauung andererseits unterscheiden, die sich durch regelmäßige Straßenführung und relativ große, begrünte Innenhöfe (gilt nur für den Osten!) bei ziemlich einheitlicher Geschossanzahl (drei bis vier, selten fünf) auszeichnet. Im Westen (Bezirke Lend und Gries) sind die Innenhöfe größtenteils bebaut (Gewerbebetriebe), und der Anteil an begrünten Innenhöfen ist wesentlich geringer; woraus sich analog zur Altstadt ein hoher Versiegelungsgrad ergibt. Ferner wirkt die Aufrissgestaltung viel unruhiger, da Baulücken aus dem Zweiten Weltkrieg durch höhere Bauten ersetzt wurden. Relativ eng damit verzahnt und in den Thermalaufnahmen nur schwer davon zu unterscheiden, schließt ein Gürtel mit dominanter Blockverbauung daran an. Es ist dies von der Struktur her der heterogenste Typ (Blockgürtel), da reine Blockbebauung nur auf bestimmte Flächen beschränkt bleibt und dazwischen immer wieder Einzelbebauung auftritt, westlich der Mur aber auch Gewerbebetriebe vertreten sind; mitunter finden sich auch isolierte Grünflächen.

Den größten Flächenanteil nimmt der Typ „Gartenstadt“ ein, der vor allem im Westen und Südwesten bzw. in St. Peter im Osten weit verbreitet und durch Reihenhaussiedlungen (generell klein parzelliert) gekennzeichnet ist und nur lokal durch kleine Wohnblockbereiche unterbrochen wird. In St. Leonhard aber – auch an den Hängen und am Beginn der Seitentäler – dominiert ein ähnliches Bebauungsmuster, jedoch großparzelliert und teilweise mit Gärten, die parkähnlichen Charakter haben (Park- und Villenklima). Im Süden schließlich nimmt der Anteil an landwirtschaftlich genutzten Flächen deutlich zu, wobei der Übergang zum sogenannten „Umland“ nur undeutlich ausfällt und daher die Bezeichnung Vorstadt- bzw. Stadtrandgürtel durchaus treffend erscheint. Eine Sonderstellung nehmen die Industrie- und Gewerbeflächen wegen ihres hohen Versiegelungsgrades ein, die schwerpunktmäßig im Nordwesten (Hauptbahnhofbereich mit zugehörigen Gleisanlagen des Verschubbahnhofes) und entlang der Mur im Westen anzutreffen sind; die eh. Puchwerke mit ihren ausgedehnten Dachflächen gehören ebenfalls diesem Typ an.

Abbildung 1:
Grundkonzept für
die kartographische
Gestaltung der
Klimatope

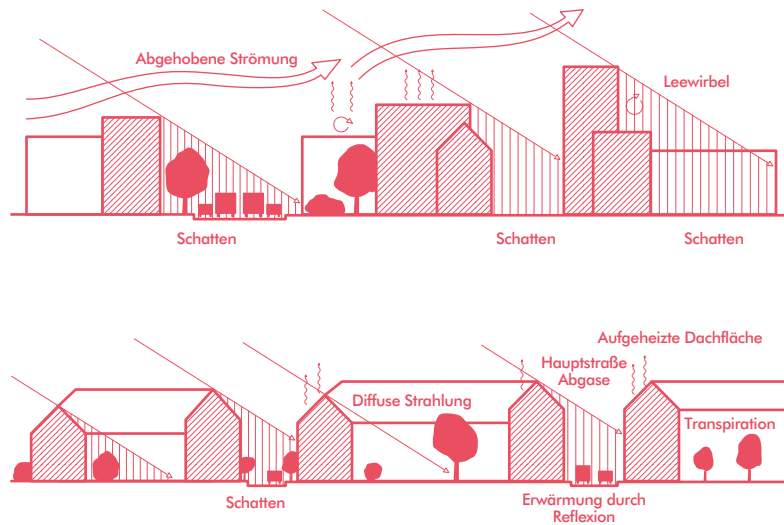


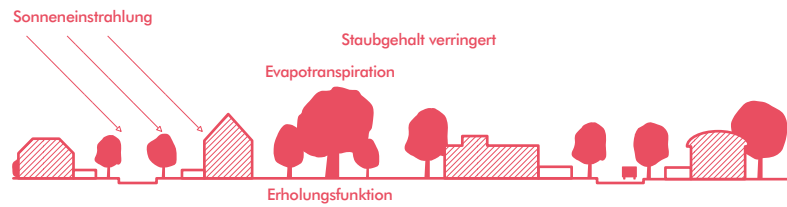
6.3 GELÄNDEKLIMATISCHE ASPEKTE BEI DER KLIMATOPABGRENZUNG

Während im Grazer Feld die stadtklimatische Differenzierung in einer starken Abhängigkeit zur Baukörperstruktur und der damit verbundenen Ausprägung der Wärmeinsel steht, lässt sich in den Seitentälern mit den zugehörigen Hang- und Riedellagen eine klare Gliederung nach geländeklimatischen Eigenschaften eine Differenzierung der Seitentäler mit ihren Talflanken vornehmen. Die Seitentäler werden dabei mit wenigen Ausnahmen (Gabriachtal bei St. Veit) mit zunehmender Entfernung und immer geringer werdenden Bebauungsdichte stadtauswärts immer kälter – besonders in Beckenlagen.

Die Hanglagen in den Seitentälern verhalten sich in gleicher Seehöhe anders als jene im Haupttal (andere Durchlüftungsbedingungen) und werden deshalb getrennt ausgewiesen (Klimatope 17 bzw. 20). Zur besseren Lesbarkeit wurden volle Farben verwendet, die sich gut von der Senkrechtschraffur der Riedel- und Kammlagen abheben.

Abbildung 2:
Schematische Darstellung der Klimabeeinflussung durch die Baukörperstruktur am Beispiel der Innenstadt (City Klima) (verändert nach P. STOCK, 1986)





6.4 BESONDERE OBERFLÄCHEN UND IHRE ZUORDNUNG ZU KLIMATOPEN (ALS SONDERKLIMATOPEN IN DER KARTE BEZEICHNET)

Allgemein handelt es sich um isolierte Flächen, die nach ihrem thermischen Verhalten erheblich von ihrer Umgebung abweichen und deshalb bis zu einer gewissen Mindestgröße (etwa entsprechend eines Einkaufszentrums) ausgeschieden werden. An erster Stelle stehen landwirtschaftlich genutzte Flächen (Klimatop isolierte Grünflächen); es folgen die Klimatope isolierter Grünflächen, Industrie- und Gewerbeflächen, Parks und Friedhöfe sowie der Bereich des LKH und der ehemaligen Deponie Köglerweg, die jeweils, abgesehen von den thermischen Eigenschaften, den jeweiligen Stadtklimatopen in der Umgebung zugeordnet sind.

6.5 ERLÄUTERUNGEN ZUM GRUNDKONZEPT DER KARTOGRAPHISCHEN GESTALTUNG

In Abbildung 1 wurde versucht, die Abgrenzung und Definition der Stadtklimatope in einer übersichtlichen Form zusammenzufassen. Dadurch werden die Verzahnung von Gelände und Baukörperstruktur als Faktoren einerseits und die wesentlichen Elemente, wie Temperaturverhalten etc., andererseits zur Abgrenzung der Klimatope ersichtlich.

Abschließend sei bemerkt, dass sich die in der Legende angeführte nächtliche Temperaturdifferenzierung auf die Bedingungen in wolkenarmen Nächten bezieht (Mittel aus ca. einem Drittel aller Nächte), was immerhin Horizontalunterschieden zwischen dem wärmsten und dem kältesten Punkt von 9 bis 10 K, im Winter auch mehr, entspricht. Der Stadtrandgürtel (Nr. 8) im Süden von Graz scheint aus Platzgründen im Diagramm nicht auf und umfasst den Bereich zwischen 0,5 bis 1,5 K Temperaturdifferenz (zum Bezugspunkt Thalerhof).

Irreführend scheint bei dem Vergleich mit der Hauptkarte die Bezeichnung „Stadtklima“ zu sein, die eigentlich als Überbegriff fungieren sollte. Wie die Abgrenzung der Stadtklimatope zeigt, bildet die Baukörperstruktur nur ein Merkmal zur Differenzierung, beispielsweise umfasst der Wärmeinselnkern (Stadtklimatop 1) große Teile der gründerzeitlichen Bebauung (mit nur geringem Anteil an begrünten Innenhöfen).

Hier schien die Hervorhebung dieser wichtigen Stadtklimaeigenschaften besonders wichtig. In den Hanglagen der Seitentäler wurde überhaupt auf eine Differenzierung hinsichtlich der Baukörperstruktur verzichtet, da ohnedies eine lockere Einzelbebauung vorherrscht. Diese Hanglagen erfahren jedoch eine Differenzierung bezüglich der Strahlungsverhältnisse, die durch entsprechende Signaturen (+ = Überschuss in Südhängen, – = Defizit) gekennzeichnet wurden.

6.6 ZUSAMMENFASSENDE BESCHREIBUNG DER STADTKLIMATOPE

Die folgende Beschreibung dient als Ergänzung. Der Wärmeinselnkern (Klimatope 1 und 2) umfasst die gesamte Altstadt und westlich der Mur auch Teile der gründerzeitlichen Bebauung, mit deutlich höherem Versiegelungsgrad als im „Gründerzeitgürtel“. Der Westabschnitt (Nr. 1 in der Karte) unterscheidet sich vom östlichen Teil durch die Durchlüftungsverhältnisse.

So lässt sich östlich der Mur speziell in der ersten Nachthälfte die von Nordosten her einströmende Kaltluft aus den Seitentälern nachweisen (besonders gut infolge Kanalisierungseffekt im Bereich des Ringes zwischen Oper und Neutorgasse), während der Westteil ausschließlich vom Murtalauswind beherrscht wird, der jedoch wegen der unregelmäßigen Straßenführung selten oder nur abgeschwächt bis ins Straßenniveau durchgreift. Leitlinien für den Murtalauswind bilden hingegen neben der Mur (1 bis 3 m/s) auch die Sackstraße und der Lendplatz. Die Überwärmung gilt nach den Messfahrten nur für die Nacht; tagsüber gibt es im Gegensatz zu Großstädten in Deutschland keinen Wärmeineffekt und daher auch kein zum Zentrum gerichtetes Flurwindssystem, wie etwa in Dortmund.

Tagsüber sind Vergleiche zwischen Innenhöfen unterschiedlicher Ausgestaltung und besonnten Plätzen von Interesse. Kleine, begrünte, stark beschattete und abgeschlossene Innenhöfe verzeichnen dabei die stärksten negativen Abweichungen (3 bis 5 K) von der Referenzstation Thalerhof, während die Plätze wegen der Windoffenheit nur kurzfristig geringfügig (bis ca. 1 K) wärmer sind als das Umland – Ergebnisse, die sich im Übrigen recht gut mit Untersuchungen aus Freiburg decken (W. Nübler, 1979). Wichtig für die Schadstoffausbreitung ist, dass sich während der Nacht durchwegs Bodeninversionen unter dem wärmeren Murtalauswind bilden, was z. B. in den größeren Städten Deutschlands nicht beobachtet werden kann, wo sich überwiegend „abgehobene“ (= freie) Inversionen über den jeweiligen Wärmeinselnkernen einstellen.

Allerdings ist die Inversionshäufigkeit im Grazer Stadtkern gegenüber dem Umland etwas geringer.

Um den Wärmeinselnkern schließen Gründerzeitviertel an, im Westen die Industrie- und Gewerbezone „Hauptbahnhof“ (Nr. 4), die in der Nacht eine fast annähernd so starke Überwärmung aufweist wie die Wärmeinsel und hauptsächlich wegen der starken Aufheizung der versiegelten Flächen eigens ausgeschieden wurde. Im Gegensatz dazu wird die Wärmeinselintensität im Gründerzeitgürtel Ost (Nr. 3c) deutlich durch die einfließende Kaltluft aus den Seitentälern gedämpft, wodurch sich neben einer auffälligen Asymmetrie zum Westen auch lufthygienische Vorteile ergeben (raschere und bessere Lüfterneuerung trotz der schon erheblich verbauten und somit vorbelasteten Seitentäler).

Bei einem Vergleich der Situation tagsüber schneiden die Gründerzeitgürtel besser ab als weite Teile des Wärmeinselnkerns, da die Innenhöfe großflächiger gestaltet und überwiegend begrünt sind, wodurch sich, wie die Messergebnisse der Station Hof/Harrachgasse zeigten, ein bioklimatisch ausgesprochen behagliches Wohnklima ergibt. Bei Durchschnittstemperaturen, die durchaus noch Wein- oder Marillenanbau gestatten würden, bleiben die Extreme gedämpft. Bezüglich der Strömungsverhältnisse ist auf die nächtliche Windscherung zwischen stadteinwärts strömender kälterer und wärmerer Luft des Murtalauswindes zu achten, der generell für die Durchlüftung des Klimatops Nr. 3b (Geidorf) verantwortlich zeichnet, während sich im Süden (Nr. 3a) besonders im Winter in der zweiten Nachthälfte auch Flurwinde bemerkbar machen und die Nebelhäufigkeit gegenüber Nr. 3a deutlich zunimmt. Letztere Aussagen betreffen auch die Industrie- und Gewerbezone 6a in ihrem südlichen Teil, während der nördliche durch kräftigeren Murtalauswindeneinfluss begünstigt wird.

Infolgedessen führt eine markante Nebelverbreitungsgrenze mitten durch die Zone, wobei der Talnebel häufig gerade noch den Hauptbahnhofsbereich erfasst. Konzentrisch um die gründerzeitlichen Klimatope reihen sich die von der Baukörperstruktur her sehr heterogenen „Blockgürtel“ 5a-e, die, von einer noch relativ einheitlichen nächtlichen Überwärmung (3 bis 4,5 K in heiteren Strahlungsnächten) abgesehen, sehr große Unterschiede in der Durchlüftung aufweisen. So wird für bodennahe Emissionsquellen in den Blockgürteln 5b und 5c der Flurwindeinfluss besonders im Winterhalbjahr maßgeblich, während die Abgase großer Emittenten (z. B. das Fernheizkraftwerk Puchstraße in der Industrie- und Gewerbezone 26) mit dem Murtalabwind nach Süden verfrachtet werden. Mit dem erhöhten Flurwindeinfluss verzeichnen die südlichen Blockgürtel 5a, b auch eine wesentlich größere Nebelhäufigkeit (60 bis 90 Tage) gegenüber dem Blockgürtel 5a im Nordwesten (40 bis 50 Tage) bei einheitlicher Durchlüftung. Lufthygienisch benachteiligt wird der Blockgürtel West (Nr. 5e) infolge geringen Einflusses des Murtalauswindes bzw. Fehlens von Kaltluftzufuhr aus Seitentälern.

Im Blockgürtel Ost (5c) war die aus dem kleinen Seitentalkessel Ruckerlberg/Waltendorf ausströmende Kaltluft früher zweifellos wirksamer; heute ist die Bebauung so weit fortgeschritten, dass die einströmende Kaltluft wärmer und der Effekt für die Lüfterneuerung bei weitem geringer geworden ist. Damit zählen die Bezirke St. Peter und St. Leonhard zu jenen mit der stärksten Temperaturzunahme seit der Jahrhundertwende, wobei das Ausmaß der Temperaturerhöhung während der Nacht (Verstärkung des Wärmeinselleffektes) mit 1 bis 2 K für klare Strahlungsnächte abgeschätzt werden kann, woraus sich noch immer eine mittlere Erwärmung in den letzten vier Jahrzehnten um 0,4 bis 0,8 K ergibt. Die thermische Asymmetrie zwischen den wärmeren westlichen und kühleren östlichen Bezirken hat sich somit merklich abgeschwächt, so dass die Differenz in klaren Nächten nur noch etwa 1 bis 3 K, bei höheren Werten im Hauptbahnhofsbereich, beträgt.

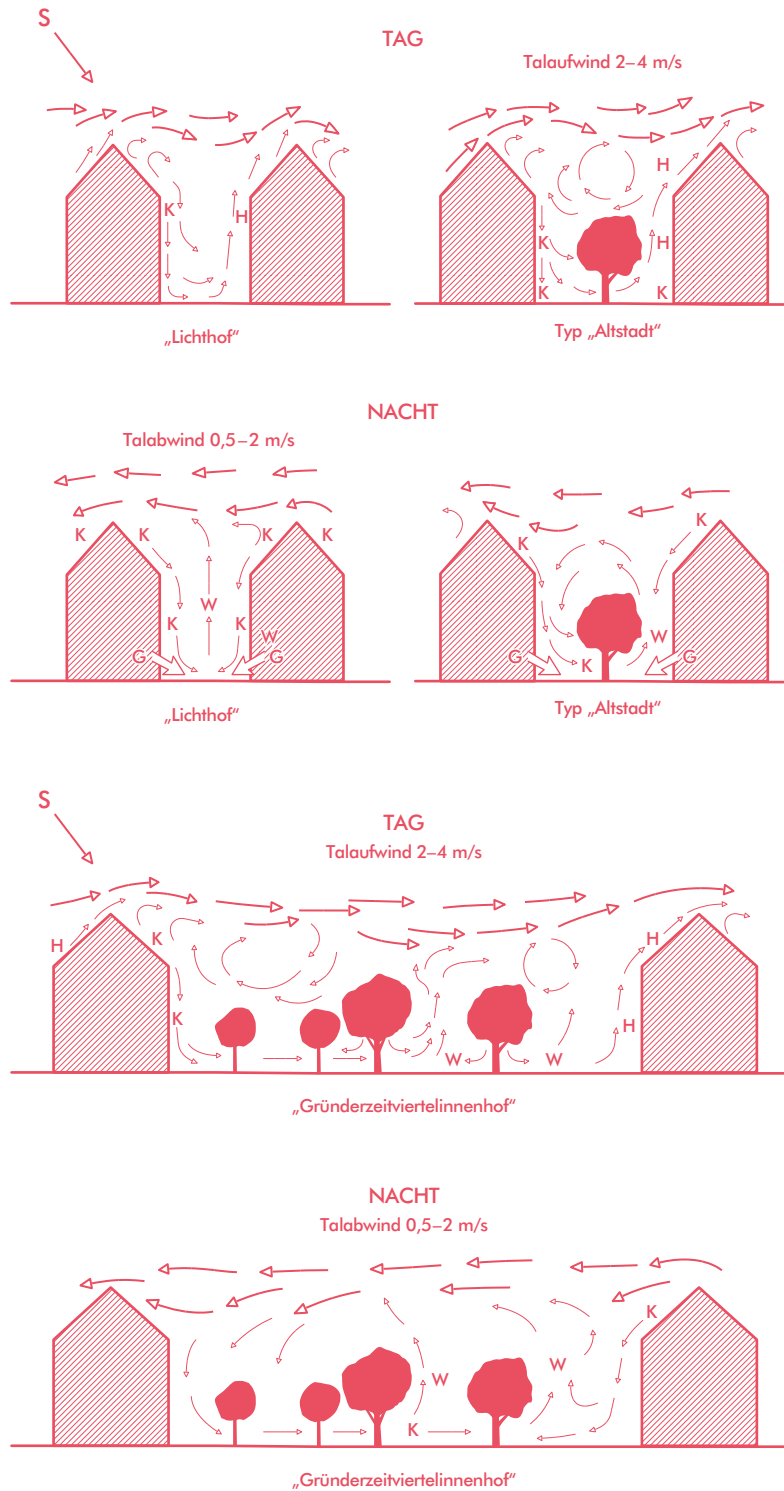
Grundlage: Beobachtungen bzw. Messungen in Innenhöfen, ferner Untersuchungen von W. Reichelt (1979). Zu beachten ist die Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse vom Gebäudeabstand.

Von den besprochenen „Blockgürteln“ nach außen nimmt nun der Anteil der Einzelbebauung stark zu, wofür in Anlehnung an einen Teil in St. Peter („Gartenstadt“) die Bezeichnung „Gartenstadtgürtel“ gewählt wurde. Diese lockere Bebauung mit ihrem erhöhten Anteil an Grünflächen dämpft die nächtliche Überwärmung (Wärmeinselintensität 1,5 bis 3 K), schon wegen der tagsüber geringeren Aufheizung der teils beschatteten Obstgärten bei entsprechender höherer Transpiration. Dadurch bleiben auch tagsüber die Unterschiede zum Umland sehr gering. Betrachtliche Gegensätze sind jedoch hinsichtlich der Durchlüftung und der Nebel- und Inversionsgefährdung zu beachten.

Eine Sonderstellung nimmt der Blockgürtel 7a ein, der gemeinsam mit der heterogenen Zone 7 (teilweise durchaus auch dem Typ Gartenstadt entsprechend) eine wichtige Gemeinsamkeit aufweist: Die Strömungsverhältnisse werden hier durch eine Rezirkulation mit dem Murtalauswind geprägt, was erstmals Modellberechnungen ergaben. Im östlichen Teil herrschen demnach nördliche Winde, im westlichen südliche Winde vor. Dieses Phänomen wird geländeklimatisch durch den Vorsprung mit der Hubertushöhe bedingt, wo sich im Lee ein Wirbel ausbildet.

Die Gartenstadtgürtel West (6a) und Ost (6) unterliegen einem starken Flurwindeinfluss, dadurch sind speziell im Südwesten Windscherungen zwischen 30 und 80 m über Grund typisch. Da die Flurwinde durch Reibungsverluste nur sehr geringe Geschwindigkeiten erreichen (0,3 bis 1 m/s), dominieren in den ersten 10 m über Grund Windstillen, so dass der Gartenstadtgürtel West (Zone 6a) zu den Bereichen mit der geringsten Durchlüftung gehört (Kaltenanteil im Winter über 50 %).

Abbildung 3:
Temperatur- und
Strömungsverhältnisse
in Innenhöfen (Tag-
Nacht-Vergleiche)



Am besten schneidet der Gartenstadtgürtel Nordwest (6d) ab, der noch im Randbereich des Murtalauswindes liegt. Mit der geringen nächtlichen Überwärmung verschärfen sich die Bodeninversionen gegenüber den inneren Bezirken, auch die Häufigkeit ist um einige Prozent höher zu veranschlagen. Die Nebelhäufigkeit nimmt nach Süden zu (bis zu 80 Tage mit Nebel), im Gegensatz zur Zone 14, die unter dem Murtalauswind einfluss zu den nebelarmen Zonen in Graz zählt.

Sehr unscharf von der Baukörperstruktur her verläuft die Abgrenzung zum Stadtrandgürtel (Zone 8). Sie beruht im Wesentlichen auf einer deutlichen Zunahme der landwirtschaftlich genutzten Flächen, so dass bei einer Kombination einer lockeren Einzelbebauung (z. B. Murfeldsiedlung) mit älteren Siedlungskernen entlang der Ausfallsstraßen kaum mehr Unterschiede zum Umland (Grazer Feld) bestehen. Charakteristika des Stadtrandgürtels (Typ „Vorstadt“) sind hohe Nebelgefährdung (zwischen 90 und 110 Tage mit Nebel), verstärkte Inversionsbereitschaft und Windarmut mit überwiegendem Flurwind einfluss während der Nacht- und Morgenstunden. Die nächtliche Überwärmung sinkt auf 0,5 bis 2 K ab und betrifft nur mehr die Bereiche mit größerer Bebauungsdichte bzw. die Siedlungskerne. Die Abschnitte der Murauen (Zone 8) weisen bereits negative Abweichungen zur Basisstation Thalerhof auf.

Als Kältepole innerhalb dieses Stadtrandgürtels heben sich die Grünflächen als isolierte Bereiche mit stagnierender Kaltluft markant ab, deren klimaökologische Bedeutung nur auf den Nahbereich (50 bis 100 m) beschränkt bleibt, da die in situ gebildete Kaltluft nur eine geringe Mächtigkeit besitzt. Die große, landwirtschaftlich genutzte Fläche im Südwesten entlang des Buchkogels ist als Sonderklimatop eigens im Tabellenanhang angeführt, da sie bezüglich der Ausbreitungsbedingungen zu den ungünstigsten von ganz Graz zählt (neben den Seitentalkesseln windschwächstes Gebiet).

Ganz im Gegensatz dazu zeichnet sich der Düseneffektgürtel (Zone 9) im Nordwesten von Graz durch sehr starke nächtliche Durchlüftung aus, weshalb diese Bezeichnung auch unabhängig von der Baukörperstruktur (alter Siedlungskern Gösting, Einzelbebauung, kaum Blockbebauung) gewählt wurde. Der

starke Murtalauswind einfluss bewirkt im Winterhalbjahr oft die Ausbildung einer sekundären Wärmeinsel (mitunter höhere Temperatur als im Zentrum von Graz), woraus sich eine deutliche thermische Abweichung vom Stadtrand im Süden ergibt. Parallel dazu handelt es sich um den nebelärmsten Abschnitt im Grazer Feld (weniger als 40 Tage mit Nebel, günstiger schneiden nur noch die höheren Riedellagen ab). Die der Zone 9 zugeordnete Grünfläche des Wasserwerkes (9a) wird vom Murtalauswind aber nicht erfasst, so dass sich dort eine seichte bodennahe Kaltluft ausbilden kann. In nur 30 bis 50 m über Grund werden jedoch schon wieder Windgeschwindigkeiten über 3 m/s gemessen, an der Weinzödlbrücke 4 bis 6 m/s (2 m über Grund, im Kern der Strömung ca. 8 bis 10 m/s).

Teils ältere Siedlungskerne, teils lockere Einzelbebauung (in Andritz auch „verdichteter Flachbau“ und Blockbebauung mit begrenzter Geschosshöhe) kennzeichnen die Baukörperstruktur in den Seitentalmündungsbereichen (Andritz 11, St. Leonhard 10).

St. Leonhard verkörpert dabei noch am ehesten den Typ eines „Villenklimas“. Bei nur geringer nächtlicher Wärmeinselintensität (1 bis 1,5 K) infolge des Kaltluftabflusses aus den Seitentälern und guten lufthygienischen Bedingungen sind auch tagsüber wegen des hohen Baumanteils recht ausgeglichene Temperaturverhältnisse gegeben. Der Seitentaleinmündungsbereich Andritz ist dagegen viel heterogener gestaltet und beinhaltet auch Betriebe (z. B. eine Maschinenfabrik), wodurch die thermischen Verhältnisse und die Durchlüftungsbedingungen durchaus ähnlich der Zone 21 werden. Allerdings ist in Andritz die Nebelhäufigkeit sogar noch etwas geringer als in St. Leonhard.

In den Seitentälern konnte entsprechend der Bebauungsdichte und der Temperaturabweichung von der Basisstation Thalerhof zwischen drei Abschnitten unterschieden werden, wobei die Seitentalbecken (Niederschöckl und Mariatrost/Fölling) gesondert hervorgehoben wurden. Gelten sie doch als „Kältepole“ schlechthin mit Temperaturminima, die jenen in den inneralpinen Tallagen kaum nachstehen.

Auf den beachtlichen Temperaturdifferenzen von 10 K und mehr zwischen diesen Kaltluftreservoirs und dem Wärmeinseln beruht letztlich der Kaltluftabfluss aus den Seitentälern, der durch die Verbauung vor allem der unteren Abschnitte (Zonen 12 und 13) an Stärke eingebüßt hat und zudem durch Emissionen aus dem Hausbrand bzw. dem Kfz-Verkehr (Pendler) vorbelastet wird. Trotzdem leistet er bei kritischen Inversionswetterlagen, wie dies z. B. im Winter 1987/88 der Fall war, einen wesentlichen Beitrag zur rascheren Lüfterneuerung im Osten von Graz.

In Hinblick auf die Schadstoffausbreitungsbedingungen wirkt sich in den Seitentalbecken vor allem die extrem invers geschichtete windschwache Kaltluft ungünstig aus (bei Schneedecke 10 bis 15 K Inversion in den ersten 50 Höhenmetern). Die Nebelhäufigkeit ist in den Becken (Zone 15) wegen der kräftigen nächtlichen Abkühlung gegenüber den anderen Seitentalabschnitten deutlich erhöht, selbst wenn es sich nur um seichte Bodennebelfelder handelt, die sich am Vormittag rasch auflösen.

Tagsüber herrschen in den Seitentälern Taleinwinde, die im Winterhalbjahr belastete Luft aus dem Stadtgebiet mitführen und einen Anstieg der Schadstoffbelastung verursachen. Im Sommerhalbjahr greifen mitunter übergeordnete Winde (Antirandgebirgswinde) mit östlichen Komponenten in das Geschehen ein, so dass in den Seitentälern insgesamt als Hauptwindrichtung die Talauswindkomponenten (Nord bis Ost) dominieren.

Hinsichtlich der nächtlichen Temperaturverhältnisse muss noch auf Besonderheiten einiger Seitentäler hingewiesen werden. So sind Gabriachtal und Statteggertal – bedingt durch bauliche Hindernisse und damit verbundenen Kaltluftstau in den unteren Abschnitten – am kältesten. Im Thalerbachtal wird die Kaltluft oft durch den starken Murtalauswind bei Gösting am Ausfließen gehindert bzw. wird von der wärmeren Luft des Murtalabwindes regelrecht „aufgezehrt“, wie dies in den Thermalaufnahmen sehr eindrucksvoll zu erkennen ist.

Nur bei schwacher Entwicklung des Murtalauswindes konnte Kaltluftabfluss aus dem Thalerbachtal beobachtet werden, der aber keinesfalls die Bedeutung

jenes aus den Seitentälern im Osten erlangt. In der Einöd, dem einzigen Taleinschnitt im Plabutsch-Buchkogel-Zug, lässt sich wohl ein schwacher Kaltluftabfluss beobachten, der aber nur lokale Bedeutung hat. Eine weitere Sonderform der Seitentäler im Osten von Graz stellen solche mit einer Talverengung am Talaustritt dar, so dass von einem „Talkessel“ gesprochen werden muss (Zone 16). Dabei wird einerseits der Kaltluftabfluss weiter behindert, andererseits die Ventilation tagsüber speziell im Winterhalbjahr auf ein Minimum abgesenkt. Hinsichtlich der Ausbreitungsbedingungen kommt zu der großen Inversionsbereitschaft und Kalmenhäufigkeit erschwerend hinzu, dass durch die Bebauung der Hanglagen gegenseitige Immissionsbelastungen (Hausbrand speziell bei Festbrennstoffkesseln) auftreten können.

Der Typ „Seitentalkessel“ umfasst ferner nicht nur die Tal-, sondern auch die zugehörigen Hangbereiche, wobei die klimatisch wesentlich günstigeren Oberhanglagen der Zone 18 (Riedelrücken im Osten von Graz) zugeordnet wurden. Der Übergang kommt in der Karte wesentlich schärfer zum Ausdruck, als es der Realität entspricht.

In den Hanglagen sind nun neben der thermischen Differenzierung (Temperaturzunahme nach oben) auch Besonnungsgegensätze zu beobachten, die in den Thermalanalysen des Mittagsfluges gut wiedergegeben werden.

Bezüglich der Lufttemperaturverhältnisse sind je nach Windexponiertheit der Hänge Überwärmungen in den Südhängen von 0,7 bis 1,5 K gegenüber neutralen Lagen zu berücksichtigen. Die rasche Erwärmung der besonnten Hanglagen führt ferner zu Hangaufwinden, während an nordexponierten, beschatteten Hanglagen vor allem im Winterhalbjahr auch tagsüber Hangabwinde auftreten können. Wegen der großen Unterschiede bezüglich der Durchlüftung und thermischen Struktur wurden in der Karte die Hanglagen in den Seitentälern (Zone 17), die besonders in der zweiten Nachthälfte und am Morgen stark von den Seitentalauswinden und deren Inversionsaufbau beeinflusst werden, gesondert von jenen Hanglagen ausgeschieden, die im Grazer Feld dem Regime des Murtalauswindes unterliegen, was

ausnahmslos für die Zone 19 (untere Hangzone Ost) und eingeschränkt für die Hänge des Plabutsch-Buchkogel-Zuges (20) zutrifft.

Die Abgrenzung dieser Hänge nach oben ist im Osten durch die begünstigten und gut ventilierten (Murtalauswindeinfluss) Riedelrücken (Zone 18a) gegeben, während im Westen die obere Hangzone (Nr. 21) anschließt, die sich durch wesentlich höhere nächtliche Temperaturen („warme Hangzone“) und eine deutlich verringerte Inversionsgefährdung auszeichnet.

Während die niedrigeren Riedelrücken im Osten (Nr. 18b) Seehöhen zwischen 430 und 550 m) die seichten Bodeninversionen überragen, liegt die warme Hangzone oberhalb von ca. 200–300 m über Grund im Sommerhalbjahr schon oberhalb der meisten Bodeninversionen. Im Winterhalbjahr bleibt sie über den für kritische Inversionslagen ungünstigen Mischungsschichthöhen von ca. 200 m, was einer Untergrenze der abgehobenen Inversionen von 550 m entspricht. Somit wird die bewusst starke farbliche Kontrastierung in der Karte zwischen den Zonen 20 und 21 verständlich, zumal noch zu beachten ist, dass in etwa 550 m Seehöhe häufig die Obergrenze des Murtalauswindes verläuft und die Windverhältnisse dieser Zone in zunehmendem Maße von modifizierten Gradientwinden bzw. übergeordneten Windsystemen im Alpenvorland (Randgebirgswind) geprägt werden.

Als Besonderheit zu den Hanglagen ist noch zu erwähnen, dass sich in ausgeprägten Hangmulden Kaltluftabfluss ausbilden kann, der nur eng begrenzte lokale Bedeutung hat (Zone Nr. 11 z. B. am Reinerkogel). Zu dieser Zone gehört auch ein kleines Tälchen am Südfuß des Buchkogels, wo sich die Hangkaltluft sammelt und weiter abkühlt, so dass die Ausbreitungsbedingungen wegen der geringen Geschwindigkeiten und hohen Inversionsgefährdung als sehr ungünstig anzusehen sind.

Die höchsten Kamm- und Gipfellagen der Umgebung von Graz (Gipfelzone Nr. 22, ab ca. 620 m Seehöhe) unterscheiden sich von der oberen Hangzone (21) hauptsächlich durch ihre windoffene Lage und die damit verbundene gute Ventilation, wobei die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten am Admonter Kogel und am Straßengelberg mit ca. 3 m/s

(Jahresmittel) zu erwarten sind, was auf deren Überströmung durch den Murtalauswind mit seinem entscheidenden Einfluss auf die Durchlüftung zurückgeht. Nach Messungen am Nordschacht der Plabutschtunnelentlüftung am Gaisberg in 660 m schwanken die Monatsmittel zwischen 2 und 3 m/s, Kalmen sind sehr selten. Die Lage der beiden Schächte wurde so gewählt, dass die emittierte Abluft guten Verdünnungsmöglichkeiten unterliegt, wobei die Voraussetzungen dafür mit der Durchlüftung und der Lage oberhalb der häufigsten Bodeninversionen im Sommerhalbjahr erfüllt sind. Im Winter befindet sich die Gipfelzone über den kritischen Mischungsschichthöhen und hat daher erhöhte Bedeutung für die Naherholung.

6.7 HINWEISE ZU DEN SONDERKLIMATOPEN

Im Gegensatz zu den Seitentälern mit Kaltluftabfluss bilden sich über den Grünflächen (bzw. landwirtschaftlich genutzten Flächen) nur sehr seichte stagnierende Kaltluftkörper aus, deren Einfluss auf den Nahbereich beschränkt bleibt; eine klimaökologische Ausgleichsfunktion geht jedenfalls von den isolierten Flächen kaum aus. Hingegen sind die Parks ab einer gewissen Mindestgröße (etwa der des Augartens) durchaus im Sinne einer Ausgleichsfläche, speziell tagsüber, zu sehen. Neben der Rolle als Feuchte- und Schattenspende (Abkühlungseffekt) kommt diesen Flächen eine wesentliche Rolle als Staubfilter zu.

Als Sonderklimatop scheint ferner der Schlossberg auf, der durch Expositionsgegensätze erhebliche Unterschiede zwischen der Süd- und Westflanke bzw. der kühlen Nordflanke aufweist. Der Kuppenbereich erweist sich nach den Messergebnissen als sehr gut durchlüftet mit starkem Einfluss des Murtalauswindes (Monatsmittel der Windgeschwindigkeit 2 bis 4 m/s, selten Kalmen). Thermisch zeigt sich der Gipfelbereich des Schlossberges wärmer als der Wärmeinseln, so dass insgesamt an der Südflanke des Schlossberges Jahresmittel von fast 10 °C erreicht werden („Wärmepol“ im Stadtgebiet, zum Vergleich Mariatrost/Fölling).

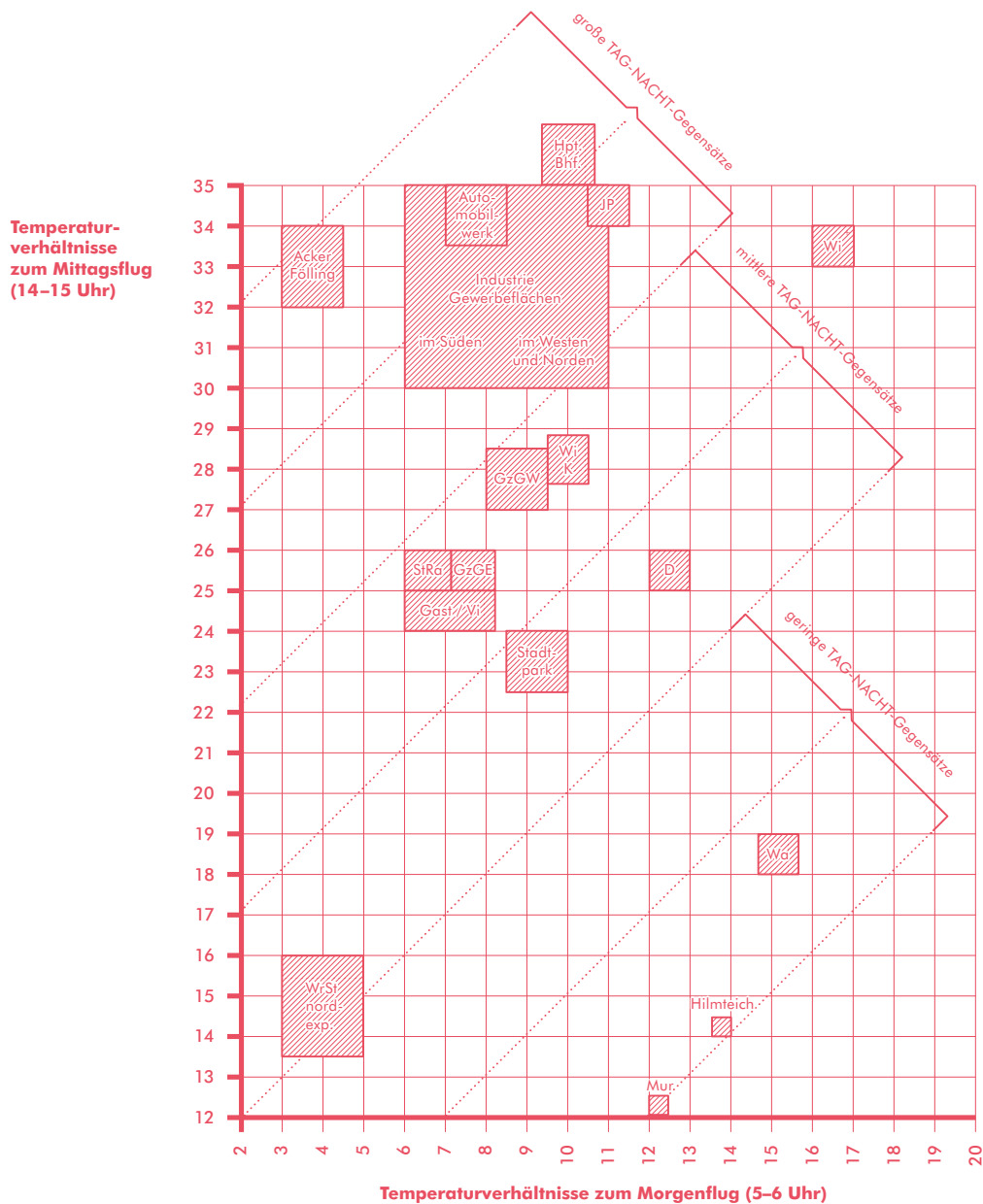


Abbildung 4:
Oberflächen- und
Lufttemperaturverhal-
ten ausgewählter Bau-
körperstrukturen bzw.
sonstiger Klimatope
(Grundlage: Thermal-
daten der Flüge vom
2. und 3. Oktober
1986 und Temperatu-
rdaten der zugehörigen
Messfahrten)

Wrst: Waldrandstreifen
Wa-: Wald (nordexponiert)
Wi+: Wiesen (südexponiert)
JP: Jakominiplatz

D: Düseneffektbereich
(Raum Gösting)
WIK: Wärmeinseln
Gza: Gründerzeitgürtel im Osten
Gzb: Gründerzeitgürtel im Westen

Gast: Gartenstadtgürtel
StRa: Stadtrandgürtel
Vi: Villenviertel
StPk: Stadtpark

7. DIE KARTE DER PLANERISCHEN HINWEISE

7.1 VORBEMERKUNGEN

Gegenüber dem letzten Stand (R. Lazar et al., 1994) haben sich einerseits Veränderungen im Sinne einer Zunahme der Bebauung etwa im Föllinger Becken ergeben, andererseits sind seitens der Zonengestaltung mit der Farbwahl und anderer Aspekte konkrete Anpassungen nötig.

Beginnen wir mit Anpassungen infolge Bautätigkeit, die teilweise aufgrund bestehender Widmungen auch in den Seitentälern nötig geworden sind. Im Wesentlichen betrifft es das Föllinger Becken, wo infolge der Bebauung mit überwiegend zweigeschossigen Häusern – in den sogenannten Marlandgründen – eine geringe Kaltluftproduktion bzw. auch nicht mehr so niedrige Temperaturen verzeichnet werden wie vorher. Letztlich dürfte es damit zu keinem merklichen Funktionsverlust des Mariatroster Tales gekommen sein, es betrifft im Wesentlichen nur eine Verringerung der räumlichen Ausdehnung der Zone 19 „Kältepole“, was entsprechend in der aktualisierten Version angepasst wurde.

Eine weitere Anpassung betrifft die sehr kleinen Kerbtälchen in den Seitentälern im Osten von Graz (Zone 9), wobei hier vor allem ein Tälchen im Mariatroster Tal und eines im Stiftingtal auffallen. Sie sind von ihrer geringen Dimension und damit ihrer vernachlässigbaren Relevanz aus der Karte herauszunehmen. Die nächste Änderung bezieht sich auf die Zone mit

heterogener Bebauung in Kombination von Blockbebauung mit Gartenstadt (Zone 8). Die Unterschiede im Südwesten reichen nach jüngsten Winddaten und Messfahrten nicht aus, um diesen Bereich in eigene Zonen (Zone 14) zu untergliedern. Es erscheint viel sinnvoller, die bestehende Zone 8 um den Bereich der Zone 14 zu erweitern. Dabei sollte die südöstliche Ecke herausgenommen und dem Verlauf mit der Zone des Gartenstadtgürtels (25) angepasst werden. Einer Überarbeitung im Sinne einer Anpassung bedarf auch die Zone 24 in den Abschnitten, in denen Erweiterungen stattgefunden haben. Ein Teil dieser Zone erstreckt sich östlich des Schlosses St. Martin, wo auf einem ehemaligen Gewerbelände eine größere Siedlung geplant ist („Green-City“), weiters im Süden mit dem Magnawerk etc.

Von der farblichen Gestaltung her betrachtet, werden die Park- und Grünflächen in der Karte in zwei Grüntönen dargestellt und gegen die bisherigen wenig assoziativen Grautöne ausgetauscht. In diesem Zusammenhang erscheint es auch sinnvoller, die Wärmeinseln 1 und 2 zu vertauschen, weil der östliche Teil von den Seitentälern beeinflusst wird und vom thermischen Niveau unter jenem der nordwestlichen Wärmeinsel liegt – diese sollte die kräftigere Rotfarbe erhalten.

7.2 EINLEITUNG

In Anlehnung an Stadtklimaanalysen in der BRD werden in eigenen Karten, basierend auf den Ergebnissen in der Stadtklimatopkarte, Planungshinweise angeführt. Die Vorschläge verfolgen das Ziel, eine Verbesserung aus lufthygienischer Sicht zu erzielen, das Bioklima durch geeignete Maßnahmen günstig zu beeinflussen und somit einen Beitrag zur Hebung der Lebensqualität in der Stadt zu leisten. Anhand von Beispielen, ergänzt durch Luftaufnahmen, werden dabei jeweils für die in der Karte ausgewiesenen Zonen die entsprechenden Maßnahmen erläutert, die in der Legende nur relativ allgemein gehalten sind. Es würde aber den Rahmen einer Stadtklimaanalyse sprengen, wollte man auf alle interessanten Details eingehen. Es wird aber in der Praxis zumeist schon so gehandhabt, dass in der Phase der Bebauungsplanung die zur Diskussion stehenden Varianten einer eigenen Prüfung aus klimaökologischer Sicht unterzogen werden. Für den Planer stellen jedoch schon die Kartenunterlagen mit den Erläuterungen (insbesondere Fragen der Schadstoffausbreitung betreffend) eine wichtige Entscheidungshilfe dar, dies gilt vor allem für die Begründung von Vorranggebieten (Wohnen, Gewerbe).

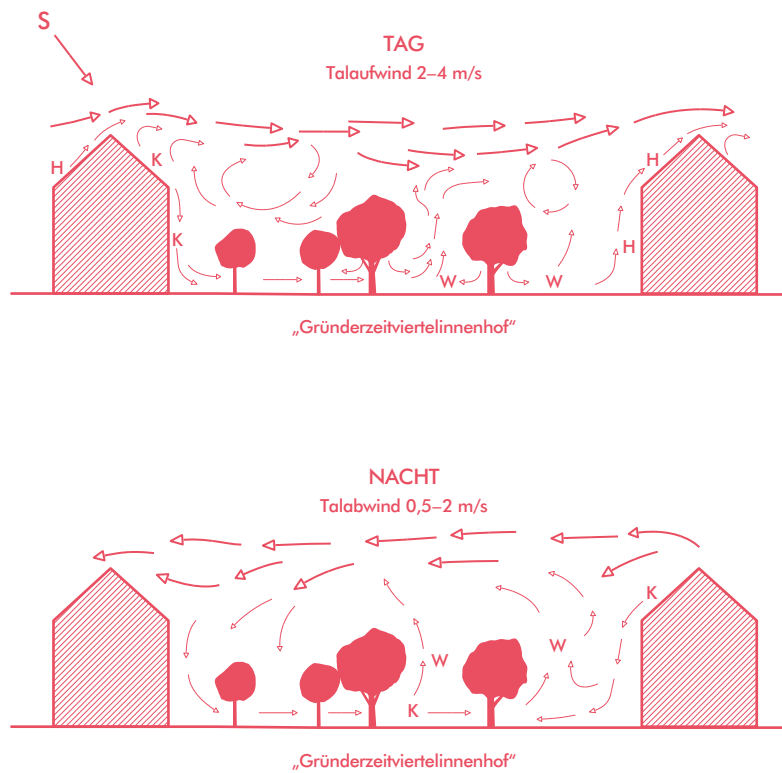
7.3 PLANERISCHE EMPFEHLUNGEN

7.3.1 ZONEN 1 UND 2 (DICHTER VERBAUUNG MIT AUSGEPRÄGTEM WÄRMEINSELEFFEKT NACHTS)

Dieser Bereich umfasst die Altstadt, die gründerzeitlichen Viertel und Abschnitte mit Blockbebauung in Verbindung mit einigen Gewerbebetrieben. Es wird verständlich, dass den klimatischen Bedingungen in den verschiedenen in der Altstadt gestalteten Innenhöfen eine wesentliche Rolle zur Beurteilung von planerischen Maßnahmen zukommt. Die Abbildung 1 veranschaulicht schematisch die Strahlungs-, Temperatur- und Strömungsbedingungen, wobei zwischen drei Grundtypen von Innenhöfen unterschieden wurde. Die ungünstigsten Bedingungen sind im Typ „Lichthof“ gegeben, der tagsüber infolge Beschattung und mangelnder Ventilation zu den kühlest Bereichen zählt. Die relativ geringe Durchlüftung in diesen sehr kleinen Innenhöfen, durch das Verhältnis Gebäudehöhe zu Hofabstand < 1 , führte etwa in Heidelberg im Zuge eines Altstadtrevitalisierungsprojektes zur Öffnung derartiger Höfe durch künstliche Baulücken bzw. künstliche Tore (FEEZER, 1977) oder überhaupt zu stärkeren Eingriffen im Sinne einer Auflockerung von Blöcken, wie dies in Berlin Kreuzberg erfolgt ist, wo durch die Bebauung (hier treffender „Verbauung“) der Innenhöfe eine zu hohe Bebauungsdichte entstanden war und Probleme aus lufthygienischer Sicht eine Sanierung dieser Viertel erzwangen.

Nach den Messergebnissen und Windbeobachtungen genügt in Graz das Offenhalten von Toren, um ein ausreichendes Maß an Durchlüftung zu erreichen, unter der Voraussetzung, dass keine festen Brennstoffe für Heizungszwecke verwendet werden (Zonierung in Deckplan 2 des Flächenwidmungsplanes).

Abbildung 1:
Die gründerzeitlichen
Innenhöfe



Relativ günstige Verhältnisse herrschen in weiten begrünten Innenhöfen des Gründerzeitgürtels, in Teilen der gründerzeitlichen Innenhöfe, da einerseits das Verhältnis Hofabstand zu Gebäudehöhe (3 bis 5:1) sehr vorteilhaft ausfällt, andererseits ausreichende Lichtbedingungen und Strahlungsgegensätze mit Ausbildung kleinräumiger Zirkulation gegeben sind (wie in Abbildung 1) und schließlich die Höfe nicht allseits umschlossen sind, sondern durch Baulücken oder Abschnitte mit geringer Geschossanzahl den Strömungen ein leichtes Durchgreifen gestatten.

Abbildung 2:
Luftaufnahme mit
Ausschnitt aus dem
Wärmeinseln west-
lich der Mur mit Blick-
richtung Norden
(1: Lendplatz,
2: Posthochhaus,
3: Griesplatz,
4: Industrie-
Gewerbezone,
5: Einzelbebauung,
6: Oeverseepark,
7: Volksgartenpark,
8: Hauptbahnhof)

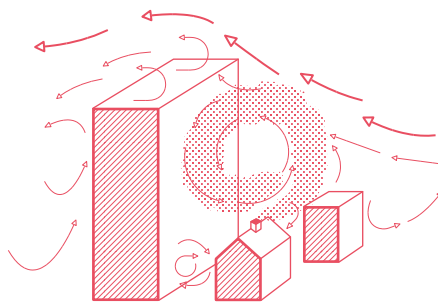
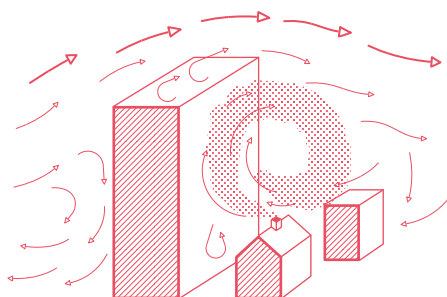
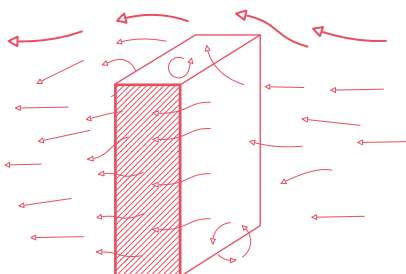
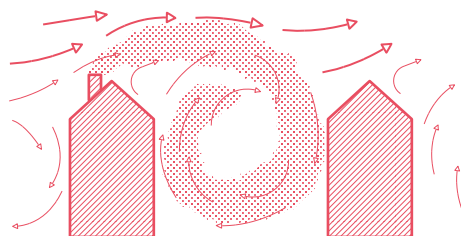


Negativ hingegen wirkt sich die Bebauung der Innenhöfe aus, wie dies auch in dem Abschnitt mit der Umgebung des Griesplatzes (Abb. 2) gut zur Geltung kommt. Die Ventilation wird dadurch arg behindert, und im Winter verbleiben Emissionen bei nur langsamer Verdünnung in diesen Innenhöfen. Im Sommer macht sich der hohe Versiegelungsgrad erschwerend bemerkbar, eine Auflockerung durch laubabwerfende Bäume würde die bioklimatischen Bedingungen merklich verbessern (Zusatzfunktion Staubfilter); von einer weiteren Bebauung über das bestehende Maß hinaus wird aus immissionsklimatologischer Sicht abgeraten.

Rechts in Bildmitte erkennt man den versiegelten Griesplatz (3) und Lendplatz (1). Der Grünanteil in den Innenhöfen ist durch die starke Bebauung stark zurückgedrängt worden. Als störend für die Durchlüftung erweist sich das Posthochhaus (2), wo sich ausgeprägte Rotoreffekte ausbilden (Abbildung 3). Am Beispiel des „Posthochhauses“ (Abbildung 3) am Griesplatz sollen die Folgen aus strömungstechnischer Sicht demonstriert werden. Ausgeprägte Rotoreffekte in beiden Anströmungsrichtungen mit den negativen Begleiterscheinungen (Rezirkulation von Abgasfahnen) sind unausbleiblich.

Als planerische Empfehlungen sind neben der bereits besprochenen Frage der Innenhofgestaltung (Durchgrünung speziell im Westen, Überlegung zur Verbesserung der Durchlüftung) noch die Pflanzung von Bäumen in entsprechend dafür geeigneten Straßenzügen, auf Parkplätzen, aber auch auf dem Griesplatz vorzusehen. Die wenigen noch verbliebenen Baulücken können aber aufgefüllt werden, da die isolierten Grünflächen keinen wesentlichen klimaökologischen Ausgleichsbeitrag leisten. Bei größeren Restflächen sollte jedoch an die Möglichkeit der Schaffung von Parkanlagen gedacht werden, die vor allem bioklimatisch wertvoll sind und an heißen Sommertagen eine größere Ausgleichsfunktion besitzen als Wiesenflächen. Als derartige Parkflächen sind der Bereich zwischen Wiener Straße und Kalvariengürtel bzw. östlich vom Gürtelturmplatz zu werten. Neubauten sollten eine Höhe von vier bis fünf Geschossen nicht überschreiten und in den Abschnitten mit Einfluss des Murtalauswindes nach Möglichkeit Nordwest-Südost (z. T. Nord-Süd) orientiert werden (im Osten bei Seitentaleinfluss auch Nordost-Südwest).

Abbildung 3:
Leewirbelausbildung
beim Posthochhaus
(Griesplatznähe)

**A****B****C****D**

7.3.2 WOHNEN – VORRANGGEBIETE (ZONEN 3 BIS 9)

Die Gebiete mit klimatischer Eignung für Wohnen weisen je nach ihrer Lage im Stadtgebiet unterschiedliche klimatische Besonderheiten auf, die jeweils bei der Bebauungsplanung zu berücksichtigen wären. Günstige Durchlüftungsbedingungen bei geringer Nebelgefährdung charakterisieren die Zonen 3 und 4, wobei in Andritz (identisch mit dem Seitentaleinmündungsbereich) eine Gebäudeausrichtung auf die im Stattegger- und Schöcklbachtal herrschenden Talwinde erforderlich erscheint, um die Funktion der Frischluftzubringer nicht weiter zu vermindern. In der Zone 3 (entsprechend dem Gartenstadtgürtel Nordwest-Zone 14) sollte der Murtalauswind (Hauptwindrichtung Nordwest) beachtet werden. Neben verdichtetem Flachbau ist eine Blockbebauung mit maximal fünf Geschossen durchaus vorstellbar.

Als Beispiel sei die Abbildung 1 (Gründerzeitviertel) angeführt, in der verschiedene Typen des verdichteten Flachbaues zu erkennen sind und die Einflüsse auf die Durchlüftung aufgrund der Anordnung der Häuser veranschaulicht werden (Pfeile).

Sehr günstige klimatische Voraussetzungen findet man auf den Hängen im Osten von Graz (Zone 8/ Klimatop 30) bzw. auf den breiten Riedelrücken außerhalb des „Grüngürtels“ (Zone 7/ Klimatop 28). Allerdings wird das Angebot an noch freien Bauflächen durch die topographischen Verhältnisse (rutschgefährdete Steilhanglagen) bzw. Probleme der Infrastruktur (mangelnder Anschluss an das öffentliche Kanalnetz) stark eingeschränkt.

In Hanglagen ist ferner die gegenseitige Beeinflussung durch Emissionen und eine den Kaltluftabfluss speziell in Hangmulden (in der Karte blau, Klimatop 29a) beachtende Bebauungsplanung im Sinne einer möglichst „strömungsdurchgängigen“ Anordnung anzustreben.

Vom Flächenangebot her besser, jedoch aus klimatischer Sicht mit teils schon erheblichen Abstrichen, bieten sich in Mischgebieten mit Einzel- und Blockbebauung (Zonen 7 und 8, Klimatope 9, 10, 11 und 15) noch potentielle Flächen für die Wohnfunktion an. Der Murtalauswind einfluss beschränkt sich aber nur mehr auf die erste Nachthälfte bzw. auf den Bereich ab 30 bis 50 m über Grund, wobei nach Süden zu Häufigkeit und Mächtigkeit der Flurwinde und parallel dazu die Nebelgefährdung zunehmen. Diese auch im Hinblick auf die lufthygienischen Verhältnisse im Winterhalbjahr ungünstigen Komponenten können jedoch wenigstens teilweise durch entsprechende Maßnahmen auf der Emissionsseite (derzeit viele Einzelfeuerungen mit festen Brennstoffen) kompensiert werden. Bei einer Blockbebauung ist eine Gebäudeorientierung nach der Hauptwindrichtungssache (Nord-Süd bzw. Nordwest-Südost) zweckmäßig.

Im zweiten Beispiel (Abbildung 4) wird die Problematik der Bebauung am Rande des Grazer Feldes mit Einfluss von nächtlichen Hangabwinden aufgezeigt. Die Terrassenhaussiedlung mit ihrer stark variierenden Geschossanzahl lässt trotz der Blockierung quer zur Hauptwindrichtung tagsüber aus Süd bis Südost noch eine ausreichende Durchlüftung zu, zumal diese Strömung von vornherein turbulenter ist als die nächtlichen invers geschichteten quasilaminaren Hangabwinde. So kann die von den Hangbereichen im Osten abfließende Kaltluft noch zur Lüfterneuerung in der Terrassenhaussiedlung einen Beitrag leisten, während – als Negativbeispiel – die Blöcke nördlich davon eine ausgesprochene Barriere für diese seichten Winde darstellen.

Abbildung 4:
Luftaufnahme eines
Teiles des Blockgürtels
Ost (Klimatop Nr. 9,
„Terrassenhaussied-
lung“ in St. Peter)
mit Blickrichtung Norden
(1: Einzelbebauung,
2: Siedlungskern
St. Peter,
3: Terrassenhaussied-
lung, Pfeil: schwacher
Seitentalauswind aus
dem Peterstal;
4: Villenviertel)



Die Orientierung der Wohnblöcke (E-W) gestattet den Kaltluftabfluss von Osten her bis in die Siedlung (3), während im Norden einige Wohnhäuser diesen unterbinden. Einzelstehende „turmartige“ Hochhäuser erweisen sich strömungstechnisch noch als relativ günstig (analog Abbildung 3) durch Umströmungs-

möglichkeiten. Weit verbreitet trifft man allerdings bei größeren Wohnanlagen noch immer auf vollständig versiegelte Parkplätze, die zur Verbesserung lokalklimatischer Bedingungen (Dämpfung der Aufheizung) bepflanzt werden sollten.

7.3.3 WOHNEN MIT EINSCHRÄNKUNGEN (ZONEN 9 BIS 18)

Die Einschränkungen beruhen einerseits auf einer geminderten Klimateignung, andererseits auf Restriktionen von Widmungen zur Erhaltung von Funktionen (z. B. als Frischluftzubringer bzw. als Kaltluftproduktionsfläche). Die klimatische Benachteiligung in den Zonen 12 und 13 (Klimatope 12, 13 und 18) mit überwiegender Baukörperstruktur des Typs „Gartenstadt“ besteht in einer geringen Durchlüftung und in einer Zunahme der Nebel- und Inversionsgefährdung nach Süden zu – Nachteile, die hauptsächlich das Winterhalbjahr betreffen.

Als Beispiel (Abb. 5) sei ein Ausschnitt aus dem Gartenstadtgürtel aus dem Westen von Graz (Klimatop 13) gewählt, wo die bestehende Baukörperstruktur mit der Einzelbebauung und den zugehörigen Gärten günstige bioklimatische Voraussetzungen beinhaltet. Einige Restparzellen sind teils mit verdichtetem Flachbau, wo die Ausrichtung der Häuser wegen ihrer geringen Geschosshöhe noch keine entscheidende Rolle spielt, teils mit nach Nord-Süd orientierten (damit der Hauptwindrichtung entsprechenden) Blöcken aufgefüllt.

Als Gestaltungsmöglichkeit für die verbliebenen Restparzellen käme neben der Eignung als Erholungsfunktion (z. B. Sportplatz) auch eine Auffüllung mit Wohnblöcken in Frage – allerdings unter Beachtung der Fernwärmemöglichkeit.

Abbildung 5:
Luftaufnahme eines
Teiles des Stadtrand-
gürtels Südwest
(Klimatop Nr. 13) mit
Blickrichtung Norden
(1 : Einzelbebauung,
2: Gewerbeflächen,
3: Park,
4: Hochhaus 1,
5: Hochhaus 2)



In diesem Teil der Stadt wechselt Einzelbebauung mit Gewerbebetrieben ab. Hochhäuser, wie die gekennzeichneten (4, 5), stellen eine Ausnahme dar. Einzelne isolierte Grünflächen haben als lokale Kaltluftproduktionsflächen nur geringe Bedeutung.

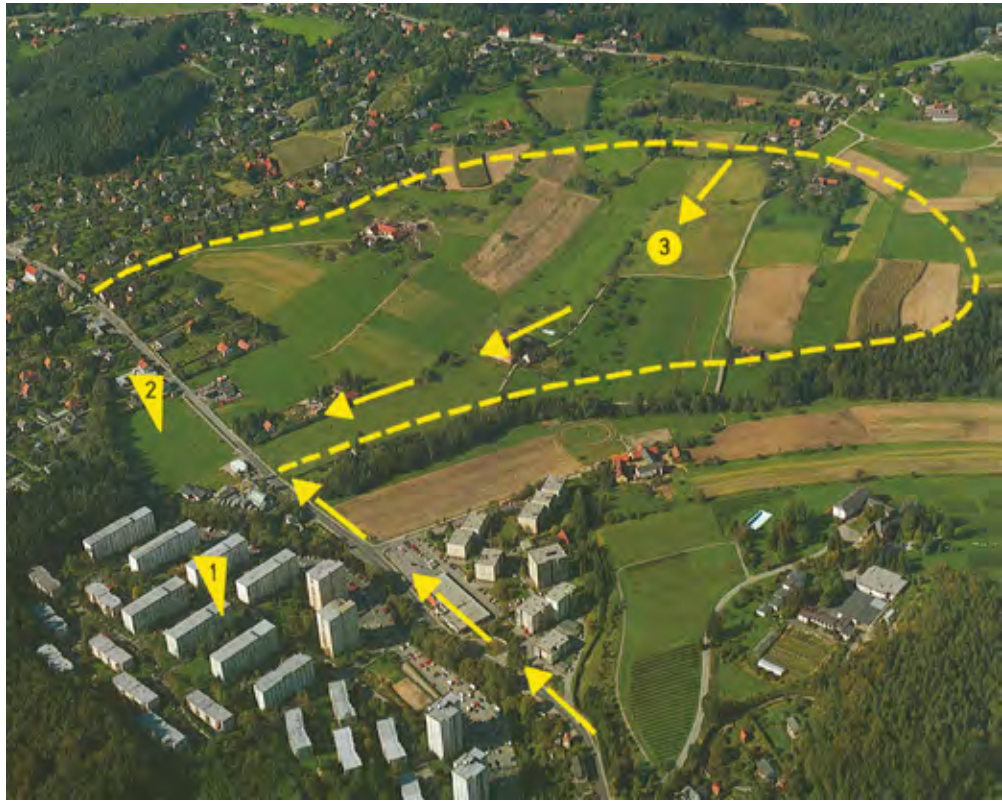
Als besonders ungünstig müssen die Ausbreitungsbedingungen in der Zone 16 (Talkesselbereich, entsprechend dem Klimatop 26) und der Zone 17 (isolierte Kaltluftfläche am Fuße des Buchkogelzuges) eingestuft werden. Das „Abriegeln“ im Peterstal durch querstehende Blöcke an der Talsohle und am Hang (jeweils Behinderung des Tal- und Hangabwindes) stellt neben dem noch zu besprechenden Beispiel des „Berliner Ringes“ einen der markantesten Eingriffe mit negativen Auswirkungen auf die Funktion der Seitentäler als Frischluftzubringer dar (Abb. 6 u. 7).

Abbildung 6:
Aufnahme eines
Seitentales (Peterstal
im Osten von Graz)
Blickrichtung Osten
mit einer Bebauung
quer zum Tal bzw.
zum Hang
(1: Talsohlenbereich
(NE-SW-Orientierung),
2: Kaltluftstaubereich,
3: Bebauung quer
zum Tal, 4: Bebauung
quer zum Hang)



Diese Bebauung bewirkt an der Talsohle talaufwärts einen Kaltluftstau (2); außerdem wird ein Kaltluftabfluss am Hang unterbunden.

Abbildung 7:
Luftaufnahme des
Berliner Ringes im
Ragnitztal stadteinwärts
mit Blickrichtung Westen
(1: Berliner Ring,
2: Bebauungslücken,
3: Kaltluftproduktions-
fläche)



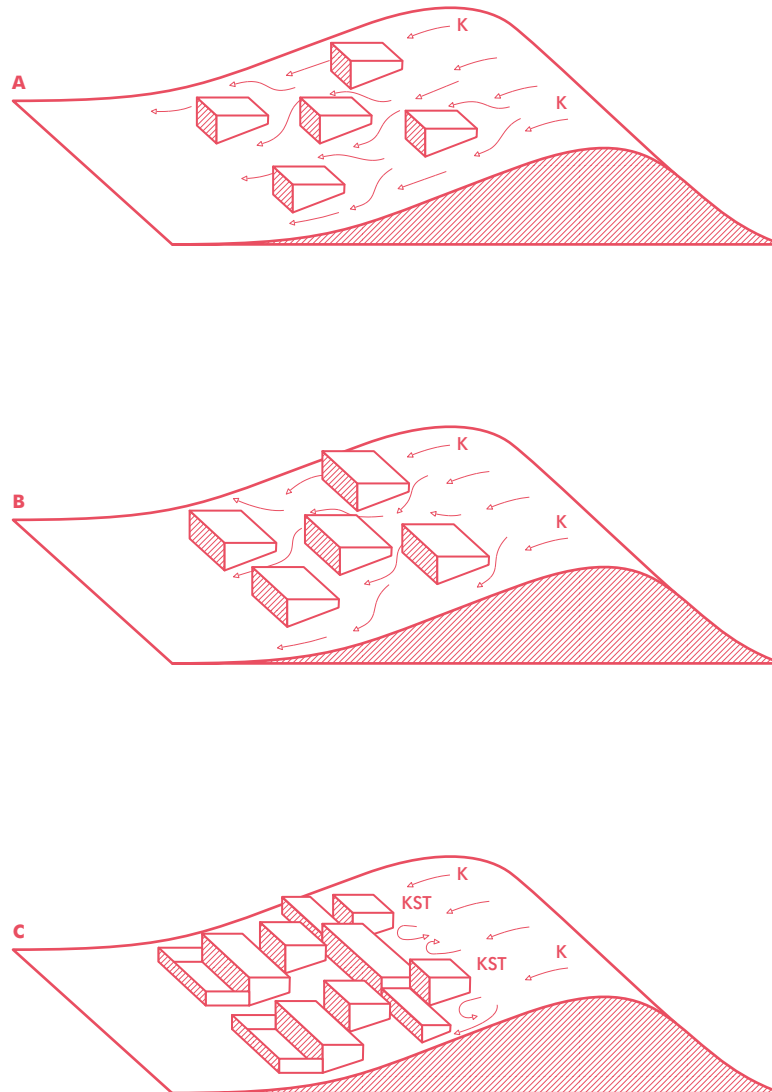
Die Hochhaussiedlung (1) im Bild links stellt für den Seitental-
auswind ein gewaltiges Hindernis dar; nur ein relativ schmaler
Bereich (Pfeile) blieb noch offen. Im Hintergrund ist eine auch
im Nachthermalbild gut erkennbare isolierte Kaltluftfläche (2)
übrig geblieben. Klimaökologisch wertvoll ist vor allem die Kalt-
luftproduktionsfläche (3) im Hintergrund, die bereits dem „Grün-
gürtel“ angehört und von einer weiteren Bebauung freigehalten
werden sollte.

Als Empfehlungen für die Seitentalkessel sind neben restriktiver
Vergabe von Widmungen (nur Restparzellen auffüllen, größere
Flächen sollten in ihrer Funktion als Kaltluftproduzenten erhalten
bleiben) die erforderlichen Maßnahmen zur lufthygienischen Sa-
nierung zu beachten.

Ähnlich lauten die Vorschläge aus immissionsklimatologischer Sicht für die relativ windschwachen Abschnitte in den Seitentälern (Zone 13, neben Fernwärme wäre als Alternative noch Erdgas denkbar, wesentlich erscheint die Reduktion der Zahl der Festbrennstoffkessel). In den übrigen Seitentalbereichen (mit Ausnahme der im Grüngürtel gelegenen) gilt, dass Restparzellen aufgefüllt werden können, da diese isolierten Kaltluftflächen stark inversionsgefährdet und windschwach sind und – vom Seitentalabwind abgekoppelt – keinen nennenswerten klimaökologischen Beitrag mehr leisten. Dabei sollte jedoch bei der Bebauung auf die Orientierung nach der Hauptwindrichtung geachtet werden. Emissionen aus bestehenden Gewerbebetrieben sollten nach dem Stand der Technik auf ein Mindestmaß reduziert werden, was insbesondere für den Annengraben (Schöcklbachtal mit Kaltluftabfluss aus dem Niederschöcklbecken) gilt. Für neue Betriebsstandorte würden sich die in der Karte ausgewiesenen Vorranggebiete in Graz viel eher anbieten, da aus lufthygienischer Sicht in Analogie zur Planung in Stuttgart die Frischluftzubringerfunktion der Seitentäler erhalten werden muss. Im Zuge eines Luftreinhalteplanes wäre anzustreben, die bestehende Vorbelastung, hauptsächlich durch Emissionen aus dem Hausbrand, durch entsprechende Maßnahmen abzubauen (Probleme der Verkehrsemissionen werden besonders behandelt).

Einschränkungen sind auch bei einer Bebauung in den Zonen 20 (Hanglagen entlang des Plabutschzuges, überwiegend Klimatop 31) und 18 (Hanglagen in den Seitentälern, Klimatop 27) zu beachten. In der Zone 20 wirkt sich erschwerend aus, dass tagsüber, bedingt durch Staueffekte bei Strömungen aus Süd bis Südost, mit denen außerdem belastete Luft zu diesen Hanglagen verfrachtet wird, nur sehr geringe Ventilation herrscht. In der Nacht ist die Zone 20 noch dazu Frischluftlieferant, wenn auch der Kaltluftabfluss nur die Hangfußlagen erfasst und deshalb bloß lokale Bedeutung hat. Daraus ergibt sich als planerische Empfehlung eine nur lockere Bebauung (Abbildung 8) bei Ausschluss von festen Brennstoffen. Dies gilt letztlich auch für die Hanglagen in den Seitentälern, deren noch offene Hänge als Kaltluftproduktionsflächen für die Seitentalabwinde anzusehen sind (restriktive Vergabe von Widmungen, kein verdichteter Flachbau). Lufthygienisch betrachtet schneiden allerdings die Hanglagen in den Seitentälern deutlich besser als jene entlang des Plabutschzuges ab.

Abbildung 8:
Möglichkeiten der
Hangbebauung mit
Einfluss auf Kaltluft-
produktion und
Kaltluftabfluss



A Strömungsangepasste Bebauung am Hang mit relativ geringem Verlust an Kaltluftproduktion und geringer Behinderung des Kaltluftabflusses (lockere Einzelbebauung)

B Einzelbebauung mit hangparalleler Firstlinie; bereits erhebliche Einbußen bei der Kaltluftproduktion (zweifelloos noch zusätzlich von der Bebauungsdichte abhängig) und starke Beeinträchtigung des Kaltluftabflusses

C Hangbebauung (häufig „verdichteter Flachbau“) mit nahezu gänzlichem Verlust des Hanges als „Kaltluftlieferant“; zusätzlich im Oberhangbereich künstlicher Kaltluftstau

Hinsichtlich der klimatischen Voraussetzungen schneidet die Zone 25 (Klimatop 19) bei Dominanz des Murtalauswindes sehr gut ab, wobei es gilt, diesen für das gesamte Stadtgebiet wichtigen Frischluftzubringer (3 bis 5 Millionen m³/s strömen durch die Murren) nicht durch zu hohe Reibungsverluste zu bremsen und damit eine verfrühte Strömungsablösung zu ermöglichen, wie dies etwa gut im Bereich des Hochhauskomplexes „Bischofsiedlung“ in Gösting nachvollziehbar ist. Als Planungsempfehlung sollte eine Bebauungshöhe von zwei bis drei Geschossen nicht überschritten werden und eine unbedingte Gebäudeorientierung gemäß der Windrichtung des Murtalauswindes erfolgen.

7.3.4 EIGNUNGSBEREICH ERHOLUNG/ KLIMAÖKOLOGISCHE AUSGLEICHSRÄUME („GRÜNGÜRTEL“)

In den Gebieten am Stadtrand mit deutlichem Überwiegen landwirtschaftlich genutzter Flächen und Wälder erschien eine Abgrenzung eines sogenannten „Grüngürtels“ aus klimaökologischer Sicht sinnvoll. Dieser in der Karte der planerischen Hinweise ausgewiesene „Grüngürtel“ muss sich dabei nicht immer mit der im Flächenwidmungsplan enthaltenen Definition und daraus resultierenden Abgrenzung decken. Zum besseren Verständnis sei vorweg betont, dass die durchgeführte Abgrenzung nicht auf irgendwelchen exakten Grundlagen beruht, sondern empirisch festgelegt wurde und daher keinesfalls den Anspruch erhebt, scharfe, klar definierte Grenzen darzustellen. Probleme ergaben sich insbesondere in den Seitentälern, wo noch Abschnitte mit stärkerer Bebauung aus dem „Grüngürtel“ ausgeklammert werden mussten. Einfacher gestaltete sich die Abgrenzung im Westen und Nordwesten, wo die Bewaldung durchwegs eine gute Grundlage bildet.

Seitentälabschnitte, insbesondere die extrem inversionsgefährdeten Seitentalbecken (Zone 19, Klimatope 24 und 25), die Talkessellagen analog zu Zone 16, die Hanglagen (Zone 20, teils Klimatop 30, teils Klimatop 27), die Riedelrücken (Zone 22, entsprechend Klimatop 28) und die höheren Hang- und Rückenlagen (Zone 21, Klimatope 32 und 33) gehören dem Grüngürtel an.

Aus Gründen der Erhaltung der Frischluftzubringerfunktion der Seitentäler muss vor einer weiteren Bebauung gewarnt werden, da schon geringe Bebau-

ungsdichten zu einer nächtlichen Temperaturerhöhung in den kalten Seitentalabschnitten führt und bei Minderung der Temperaturdifferenz zum Stadtkern eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit zur Folge hat. Hinzu kommen die bremsende Wirkung der Bau-substanz und die zusätzliche Belastung durch Emissionen (alleine schon durch den Pendlerverkehr!). Abgesehen davon handelt es sich in den Seitentalbecken um „Kältepole“, die wegen der Ausbreitungsbedingungen (extreme Inversionen und geringe Durchlüftung) als Ungunstlagen für Wohnnutzung angesehen werden müssen. Auf Grund einer bestehenden Widmung kam es in einem dieser Kältepole, dem Föllinger Becken, zu einer Bebauung, die aber im Zusammenarbeit und Konsens mit dem Bauwerber einer der besonderen klimatischen Lage angepassten Lösung zugeführt werden konnte.

Einzig auf den Riedelrücken mit klimatisch günstigen Voraussetzungen spricht nichts gegen eine lockere Einzelbebauung, wie man sie ohnedies entlang der Ausfallstraßen (Ries, Hohenrain u. a.) schon häufig antrifft.

Ferner sei noch angeführt, dass neben der Zone 22 (Riedelrücken) insbesondere der Zone 21 (höhere, überwiegend bewaldete Lagen ab 550 m Seehöhe) eine wesentliche Rolle für die Naherholung zukommt, da sie im Winter häufig über der kritischen Mischungsschicht liegen.

7.3.5 BEREICHE MIT INDUSTRIE UND GEWERBE (WOHNEN MIT EINSCHRÄNKUNGEN)

In der Karte wird zwischen dem Bestand (Zone 23) und den Vorranggebieten (Zone 24) im Süden unterschieden. Die Vorranggebiete im Süden lassen sich im Wesentlichen durch die Dominanz nördlicher Winde (nicht nur im Sinne des Murtalauswindes, sondern eher im Sinne von Gradientwinden bei Rückseitenwetterlagen) begründen, die einen Schadstofftransport in das südliche Grazer Feld gewährleisten.

Voraussetzung ist allerdings eine genügend große Quellhöhe der Abgase, da ansonsten wegen der Flurwinde vor allem in der zweiten Nachthälfte mit einer unerwünschten „Rückverfrachtung“ mit den Pseudoflurwinden aus dem Sektor SE bis SW stadteinwärts zu rechnen wäre. Als Mindestquellhöhe müssten 80 bis 100 m über Grund angesehen werden; dies hat sich bei Ausbreitungsberechnungen für den Standort Eurostar als richtig erwiesen.

Die ersten 100 Höhenmeter im Süden von Graz zeichnen sich zusätzlich durch eine häufig starke inverse Temperaturschichtung mit geringen Windgeschwindigkeiten (Windscherungszone bzw. Flurwinde) und stark erhöhter Nebelgefährdung aus. Aus immissionsklimatologischer Sicht sollten deshalb die technischen Möglichkeiten zur Minimierung der Emissionen ausgeschöpft werden (Anschluss an Erdgas bzw. Fernwärme); bei Großbetrieben bzw. Kraftwerken (wie etwa in der Puchstraße) ist die Abführung der Abgase über entsprechend hohe Kamine unumgänglich.

So ist etwa der Immissionsbeitrag des Kraftwerks in der Puchstraße gerade bei Inversionswetterlagen relativ klein, da wegen der großen Quellhöhe der Verbrennungsgase unter Berücksichtigung der häufig inversen Schichtung eine Beeinflussung der bodennahen Schichten meist nicht mehr erfolgt. Dies gilt auch noch für geringere Mischungsschichthöhen (etwa bis 120 m über Grund).

Bei Mischungsschichthöhen von 200 m und mehr verbleiben die Abgase nur für wenige Stunden (speziell am frühen Nachmittag) innerhalb der Mischungsschicht und leisten damit auch einen Immissionsbeitrag.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die immissionsklimatischen Voraussetzungen des Grazer Raumes als Standort für Großemittenten denkbar ungünstig sind, aber der Süden von Graz dafür noch am ehesten geeignet erscheint, vor allem unter Berücksichtigung der Rolle des Murtalauswindes.

Hinsichtlich einer Wohnbebauung sind besonders im Winterhalbjahr Abstriche hinsichtlich der klimatischen Bedingungen vorzunehmen; ungünstig macht sich vor allem im Bereich der Murauen die sehr hohe Nebelbereitschaft bemerkbar. Im Sommerhalbjahr herrschen bei nur schwacher Überwärmung in den Siedlungskernen fast dieselben Bedingungen wie im Umland (Grazer Feld), die insgesamt als günstig zu beurteilen sind. Bei einer Blockbebauung sollte auf die Hauptwindrichtungsachse Nord-Süd Bedacht genommen werden.

8. ANALYSE AUSGEWÄHLTER KLIMAELEMENTE

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Klimaelemente im Zeitraum von 2004 bis 2011 analysiert, vorwiegend durch den Vergleich mit den Klimanormalwerten unterschiedlicher Zeiträume. Der Fokus wird dabei auf die Lufttemperatur gelegt; der Niederschlag wird hingegen nur kurz, der Wind in einem Unterkapitel ausführlich behandelt.

8.1 DIE VERHÄLTNISSSE DER LUFTTEMPERATUR IN GRAZ IN DEN JAHREN 2004–2011

Vergleich der CLINO-Perioden: Im Vergleich der CLINO-Perioden (CLINO = climate normal) der Lufttemperatur von 1971–2000 und 1981–2010, Station

Graz Universität, wird die Steigerung der mittleren täglichen Lufttemperatur vor allem im Sommer deutlich.

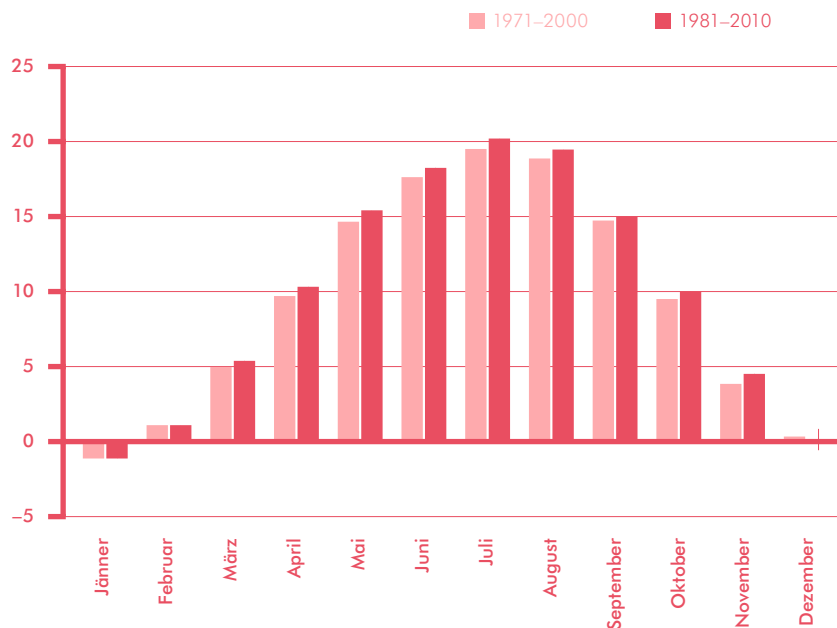


Abbildung 1:
Vergleich der
CLINO-Periode der
mittleren täglichen
Lufttemperatur von
1971–2000 sowie
1981–2010 der Station
Graz Universität
(Quelle: ZAMG,
Eigenbearbeitung)

Da die Werte der Jahre 1981–2000 in beiden Perioden ident sind, haben nur die Jahrzehnte von 1971–1980 bzw. 2001–2010 Einfluss auf das Ergebnis. In dieser Hinsicht kann man gut erkennen, dass bis auf den Winter, wo die Werte praktisch ident geblieben sind, in jeder Jahreszeit eine Steigerung von bis zu 0,7 K zu verzeichnen ist. Vor allem der Sommer zeigt eine stark ausgeprägte Erhöhung der Lufttemperatur, das Maximum im Juli liegt nun mit 20,2 °C über der

20-°C-Marke. Darüber hinaus ist die relativ deutliche Steigerung im November zu hinterfragen, da in den kalten Monaten (inkl. März) ansonsten kaum Änderungen erkennbar sind. Dies dürfte mit der geringeren Nebelhäufigkeit in dieser Zeit zusammenhängen. Es ist wenig überraschend, dass auch bei den mittleren täglichen Minima bzw. Maxima ein ähnliches Bild erkennbar ist.

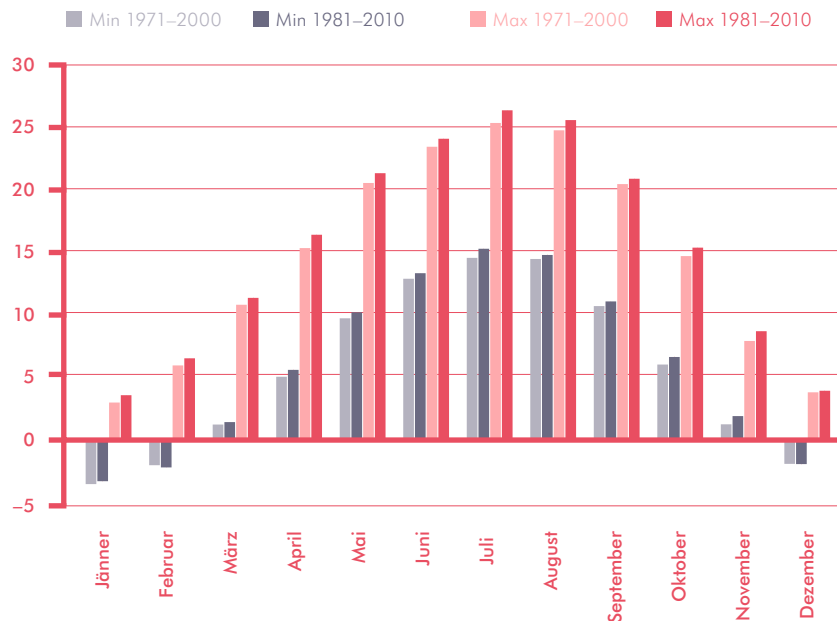


Abbildung 2: Vergleich der Mittleren täglichen Minima bzw. Maxima der CLINO-Periode der Lufttemperatur von 1971–2000 sowie 1981–2010 der Station Graz Universität (Quelle: ZAMG, Eigenbearbeitung)

Bei den Minima (in Blau gehalten) zeigt sich genau dasselbe Bild wie bei den mittleren täglichen Lufttemperaturen, bis auf die 3 Wintermonate erhöhte sich das Minimum um bis zu 0,7 K. Bei den Maxima gibt es deutlichere Unterschiede von bis zu 1 K (Juli), und

auch in den Wintermonaten zeigt sich eine Erhöhung der Werte.

Bei den absoluten Tagesminima und -maxima zeigt sich ein etwas differenzierteres Bild.

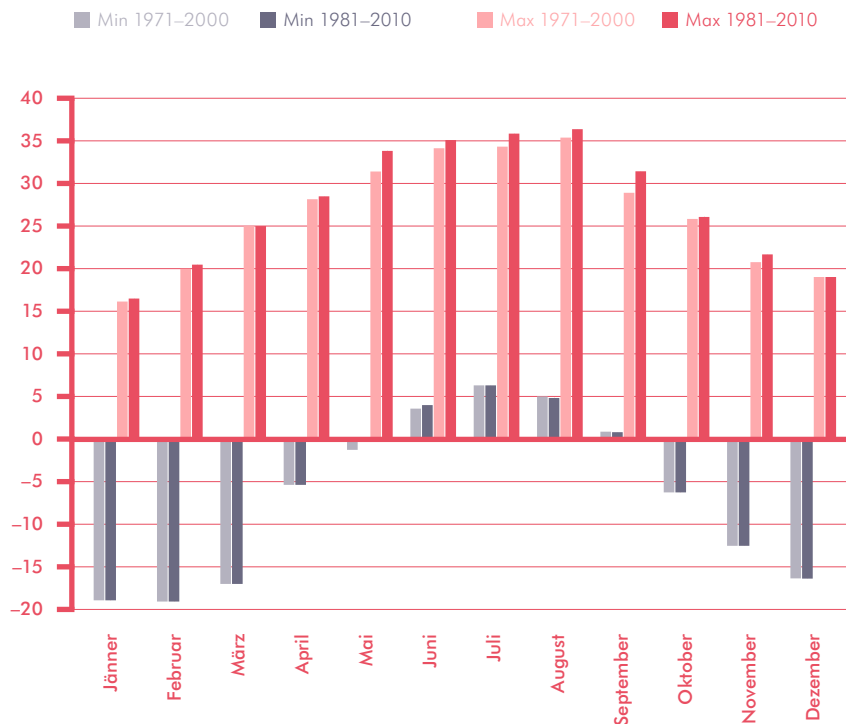


Abbildung 3:
Vergleich der absoluten
Tagesminima und
-maxima der CLINO-
Periode der Lufttempe-
ratur von 1971–2000
sowie 1981–2010 der
Station Graz Universität
(Quelle: ZAMG, Eigen-
bearbeitung)

Bei den Minima gibt es bis auf Mai und Juni Änderungen, was bedeutet, dass beinahe sämtliche absolute Minima in den Zeitraum von 1981–2000 fielen. Im Mai und Juni hingegen gab es Minima im Zeitraum von 1971–1980. Im Zeitraum von 2001–2010 gab es hingegen kein einziges neues absolutes Minimum. Die absoluten Maxima erhöhten sich hingegen bis auf den März und Dezember in jedem Monat, was so viel bedeutet, dass diese Werte aus dem Zeitraum von 2001–2010 stammen. Die neuen Spitzenwerte liegen dabei bis zu 2,7 K über dem Wert aus der Periode 1971–2000, was eine sehr deutliche Erhöhung darstellt.

Vergleich mit der CLINO-Periode von 1951–80: Der direkte Vergleich der CLINO-Periode von 1981–2010 mit den 30 Jahren davor, also der CLINO-Periode von 1951–1980, zeigt schon deutlichere Unterschiede. So liegt die Jahresmitteltemperatur bei der älteren Periode noch bei 9,1, wobei sie für den Zeitraum von 1981–2010 bereits auf 9,8 gestiegen ist. Die folgende Tabelle zeigt die Station Graz Universität im Vergleich mit anderen Stationen in Graz. Auffallend dabei ist die Tatsache, dass die Station Platte im Jahresdurchschnitt genau denselben Wert aufweist. Durch den Wärmeinseleffekt ist Graz Universität um 0,8 K wärmer als die Station Flughafen (Thalerhof). Die Station Mariatrost/Fölling weist mit einer Jahresmitteltemperatur von 6,9 °C einen äußerst tiefen Wert auf.

Tabelle 1:
CLINO-Werte der
Lufttemperatur des
Zeitraums 1951–80
an mehreren Stationen
in Graz
(Quelle: ZAMG)

| Monatsmittel der Temperatur in °C | | | | | | Periode 1951–80 |
|-----------------------------------|---------------|-----------|----------|-------------|--------|------------------------|
| Station | Graz/ Uni. | Thalerhof | Joanneum | Messendbfg. | Platte | Mariatrost/ Fölling |
| Seehöhe | 369 m | 342 m | 355 m | 429 m | 660 m | 435 m |
| J | 0,6 | −3,4 | −1,2 | −1,5 | −1,0 | −4,9 |
| F | 4,5 | −0,8 | 1,0 | 0,6 | 0,9 | −2,4 |
| M | 4,5 | 3,6 | 5,1 | 4,7 | 4,5 | 2,0 |
| A | 9,5 | 8,8 | 10,0 | 9,5 | 9,0 | 7,2 |
| M | 14,0 | 13,6 | 14,5 | 14,0 | 13,3 | 12,2 |
| J | 17,7 | 17,2 | 18,2 | 17,3 | 16,5 | 15,6 |
| J | 18,9 | 18,5 | 19,5 | 18,7 | 18,0 | 17,2 |
| A | 18,1 | 17,6 | 18,7 | 18,2 | 17,8 | 16,3 |
| S | 14,6 | 14,0 | 15,2 | 15,0 | 15,2 | 12,7 |
| O | 9,4 | 8,5 | 10,0 | 9,8 | 10,0 | 7,2 |
| N | 4,1 | 3,2 | 4,6 | 4,3 | 4,5 | 2,0 |
| D | −0,3 | −1,6 | 0,3 | 0,0 | 0,6 | −2,8 |
| Mittel | 9,1 | 8,3 | 9,7 | 9,2 | 9,1 | 6,9 |

Die Unterschiede der einzelnen Monate sind in der folgenden Grafik gut zu erkennen. Am geringsten sind diese in den Wintermonaten, wo der Unterschied teilweise nur 0,2 K beträgt. Am deutlichsten sind die Unterschiede in den Sommermonaten Juli und August, wo die alten Werte um 1,3 K übertroffen werden.

Vergleich mehrerer Stationen in Graz im Zeitraum 2004–2011: Beim Vergleich mehrerer Stationen in

Graz wurde versucht, das Stadtgebiet möglichst gut abzudecken. Die Stationen im Norden und Westen wurden ebenso untersucht, wie die Station Graz Universität sowie der Schlossberg. Die Station Graz Süd liefert erst seit 2006 Daten, und im Osten gibt es für diesen Zeitraum keine Station des Landes Steiermark mit dem Parameter Lufttemperatur. Als Vergleichswert wurde die CLINO-Periode von 1981–2010 der Station Graz Universität herangezogen.

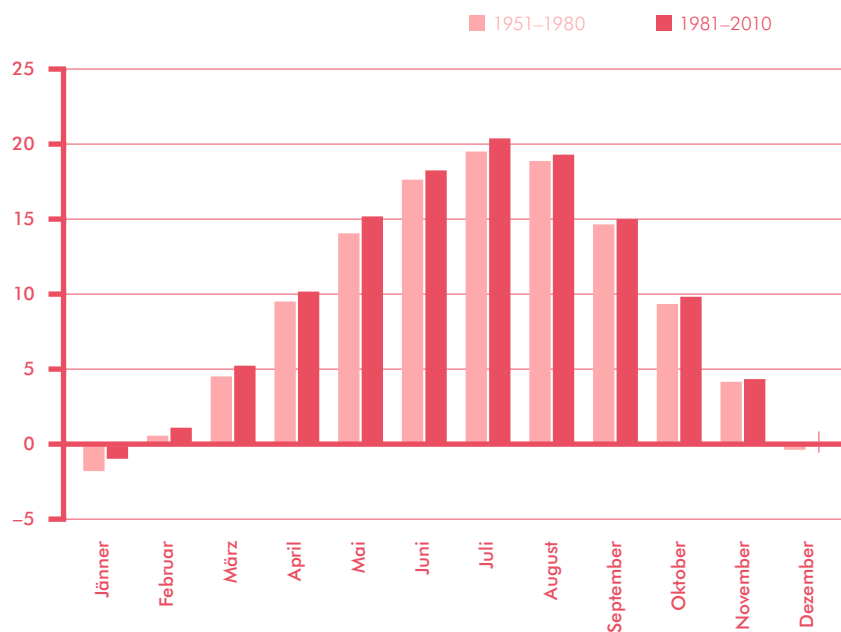


Abbildung 4:
Vergleich der CLINO-
Periode der mittleren
täglichen Lufttemperatur
von 1951–1980 sowie
1981–2010 der Station
Graz Universität
(Quelle: ZAMG,
Eigenbearbeitung)

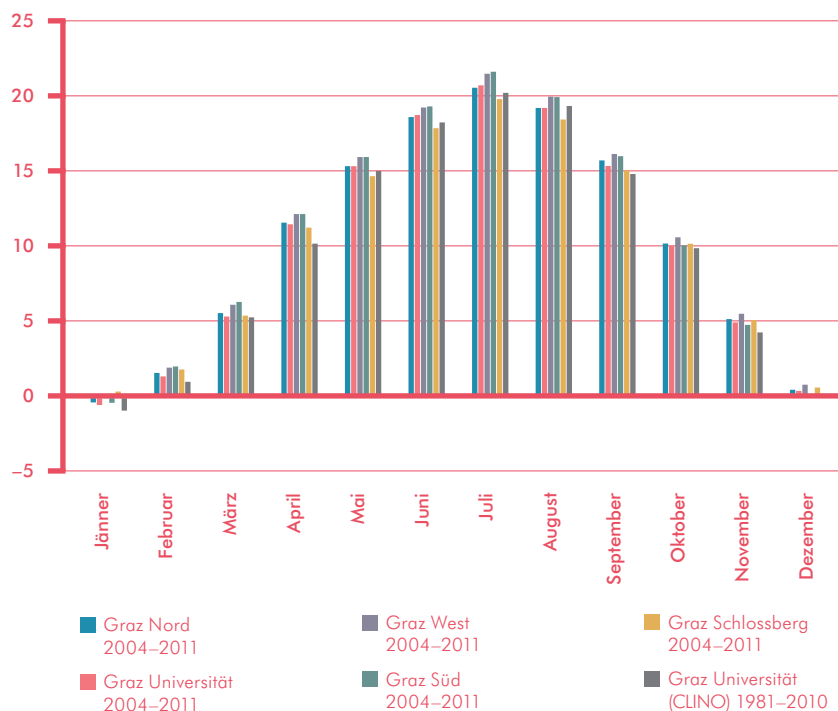


Abbildung 5:
Vergleich der mittleren
täglichen Lufttempera-
tur mehrerer Stationen
in Graz (2004 bzw.
2006–2011) sowie
der CLINO-Periode
der Lufttemperatur von
1981–2010 der Station
Graz Universität
(Quellen: ZAMG,
Eigenbearbeitung)

Die Station Graz Nord ist in den Jahren 2004–11 im Vergleich zur CLINO-Periode der Universität Graz durchgehend etwas wärmer, ausgenommen der August. Am größten ist die Erwärmung im April zu spüren, wo der Wert knapp 1,5 K über jenem der CLINO-Periode liegt. Dasselbe gilt für die Station Graz Universität im Zeitraum von 2004–11, auch sie liegt bis auf den August durchgehend über den Vergleichswerten aus den Jahren 2008–2010. Die Stationen Süd und West verlaufen parallel und deren Werte liegen durchschnittlich zwischen 0,5 und 1 K über jenen der Stationen Nord und Universität. In den Monaten Oktober bis Jänner kann sich die Station West von Süd etwas absetzen, was mit der häufigeren Bodennebel-Wahrscheinlichkeit der südlichen Station zusammenhängt. Die gemittelten Daten der beiden Stationen sind durchgehend wärmer als jene der CLINO-Periode, am größten ist der Unterschied von April bis Juli mit bis zu 2 K. Die Station Schlossberg ist in den Monaten Mai bis August etwas kühler als die

CLINO-Normalwerte, in den übrigen Monaten aber teilweise deutlich wärmer.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Werte der CLINO-Periode fast durchwegs unter jenen der anderen Stationen mit Daten von 2004–2011 liegen. Am deutlichsten fällt dieser Unterschied im April aus, wohingegen im Oktober kaum Unterschiede festzustellen sind.

Zum besseren Verständnis des Verhältnisses der einzelnen Grazer Stationen untereinander folgt eine Übersicht über die Monate Mai bis August 2012. Die eindeutig kühlsite Station ist wenig überraschend der Schlossberg, dann folgen die neue Station Graz Ost (Lustbühel) und Graz Reininghaus. Die übrigen Stationen Graz Nord, Süd und West liegen in diesem Zeitraum praktisch gleichauf. Das ist wenig überraschend, da in den Sommermonaten der negative Einfluss des Bodennebels, der verstärkt in den südlichen Gebieten der Stadt auftritt, wegfällt.

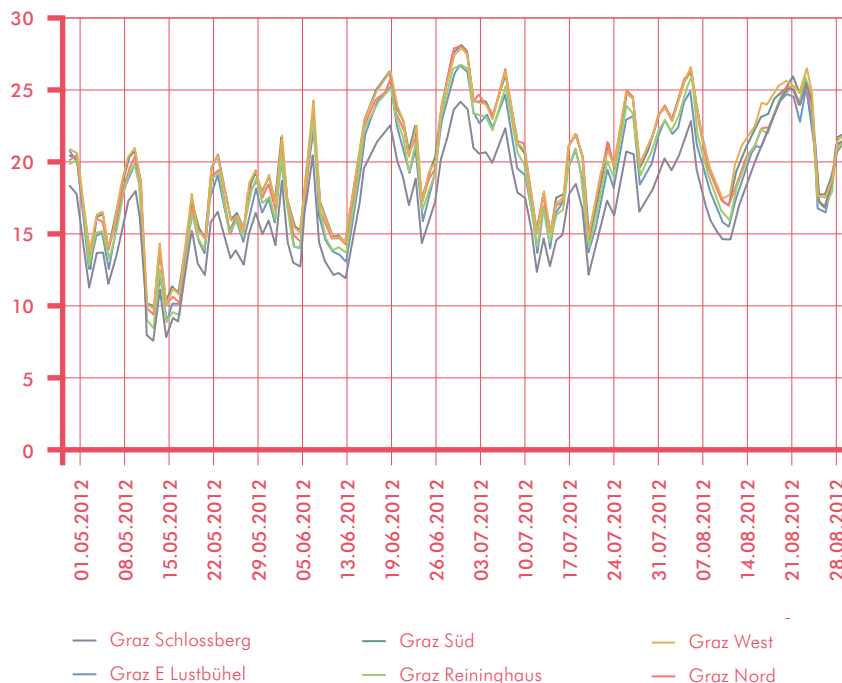


Abbildung 6:
Vergleich der mittleren
täglichen Lufttempera-
tur mehrerer Stationen
in Graz von Mai–August
2012 (Quelle: Land
Steiermark, Eigenbear-
beitung)

Vergleich zwischen Graz Mariatrost und Graz Thalerhof: Im Vergleich der im NW von Graz gelegenen

Station Mariatrost und jener des Flughafens werden deutliche regionale Unterschiede erkennbar.

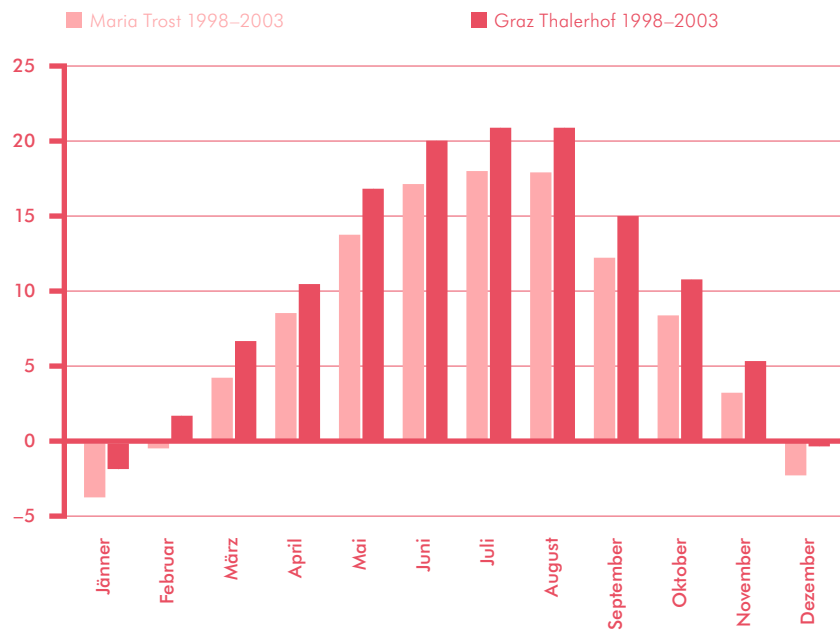


Abbildung 7: Vergleich der mittleren Lufttemperatur der Stationen Mariatrost und Graz Thalerhof, 1998–2003 (Quelle: ZAMG, Eigenbearbeitung)

Die Station Mariatrost stellt mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,0 °C (Zeitraum 1998–2003) einen ausgeprägten Kältepol dar, der beispielsweise nur unwesentlich über den ausgeprägtesten Kältepolen im Flachland Österreichs, wie beispielsweise Zeltweg

(Jahresdurchschnitt von 7,6 °C in diesem Zeitraum), liegt. Im Vergleich mit der Station Graz Flughafen (Thalerhof) ist diese Station um bis zu 3 K kälter, wobei die größten Unterschiede im Sommer auftreten. Im Winter beträgt der Unterschied etwa 2 K.

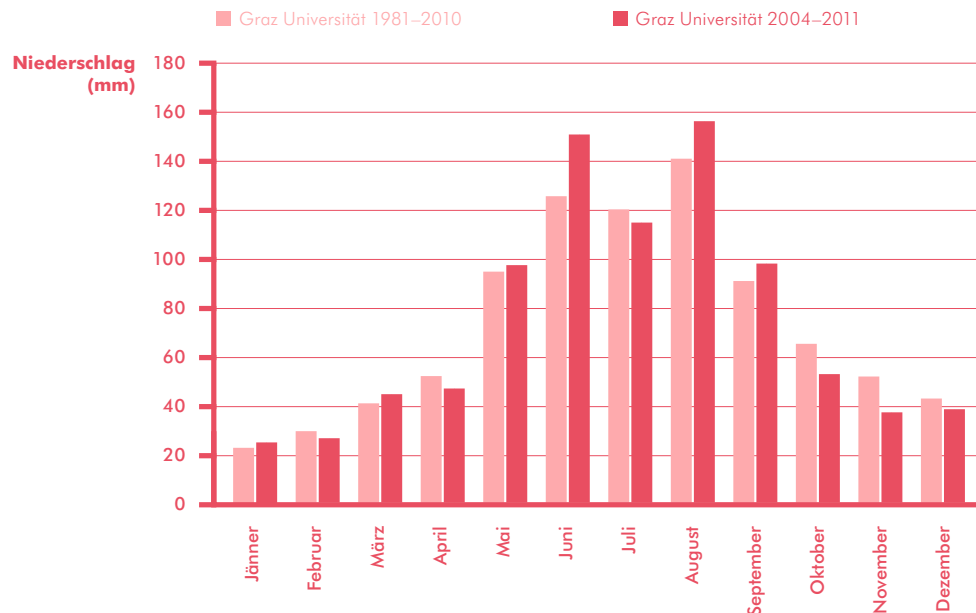


Abbildung 8:
Niederschlagswerte
der Jahre 2004–2011
im Vergleich mit der
CLINO-Periode von
1981–2010 der Station
Graz Universität
(Quelle: ZAMG,
Eigenbearbeitung)

8.2 DIE VERHÄLTNISSSE DES NIEDERSCHLAGS IN GRAZ IN DEN JAHREN 2004–2011

Graz weist im langjährigen Mittel von 1981–2010 die deutlich höchsten Niederschlagswerte im Sommer auf (Maximum: August mit 142 mm), was vorwiegend auf Konvektionsniederschläge zurückzuführen ist. Im Jänner erreichen die Werte durchschnittlich nur etwa 23 mm, was gleichzeitig das Minimum darstellt. In den Jahren von 2004–11 zeigten sich noch ausgeprägtere Maxima im Juni sowie August, wohingegen im Oktober und November die Niederschläge etwas zurückgingen. Die restlichen Monate passen sehr gut mit dem langjährigen Schnitt überein.

Diese Steigerung der Niederschlagswerte im Sommer ist zu kurzfristig, um daraus fundierte Rückschlüsse zu ziehen. Sie resultieren allerdings vorwiegend aus Starkregeneignissen, was als eine mögliche Folge der Klimaerwärmung angesehen werden kann. Eine genaue Analyse einzelner Stationen in Graz ist nicht sinnführend, da alle Stationen annähernd gleiche Werte aufweisen.

8.3 ANALYSE DER BESONDERHEITEN DER LOKALWINDE

8.3.1. ALLGEMEINES

Im Zuge von Detailstudien mit adaptierter Messmethodik (Druckmessfahrten) wurde das Phänomen der Pseudoflurwinde in Graz näher untersucht. Die Flurwinde in Graz stellen deshalb so eine Besonderheit dar, weil sie im Vergleich mit anderen Städten eine bedeutende größere Mächtigkeit aufweisen. Üblicherweise erreichen die Flurwinde eine Schichtdicke von 10–15 m, in Graz sind es der Regel 30–80 m. Demnach sind die Flurwinde in Graz nicht nur thermisch induziert – also über den Temperaturunterschied zwischen der Wärmeinsel und dem kalten Grazer Feld, sondern auch über Druckunterschiede erklärbar. Diese stehen in Zusammenhang mit dem Murtalauswind, der im Nordwesten von Graz (Bereich Weinzöttlbrücke) erhöhte Windgeschwindigkeiten erzielt, teilweise über 5 m/s), dort mit dem Düseneffekt einen Unterdruck bewirkt, und somit mit dem höheren Druck über dem Grazer Feld eine druckinduzierte Strömung von Süden nach Norden bewirkt.

8.3.2. DATENLAGE UND MESSMETHODIK

Das Stationsnetz in Graz ist glücklicherweise recht umfangreich, wie aus der nachfolgenden Karte (Abbildung 9) zu entnehmen ist. Bei der Bearbeitung spielt neben der Lage auch die Höhe über Grund eine wichtige Rolle. Mit zunehmender Höhe über Grund nimmt der Anteil der Flurwinde markant ab. Als Vergleichsstationen wurden die Stationen Schlossberg und Weinzöttl herangezogen, die beide ein ausgeprägtes Maximum bei nordwestlichen Winden haben, während die im Süden gelegenen Stationen, vor allem die Station Murfeld, eine starke Dominanz der südlichen Winde aufweisen.

Abbildung 9:
Lage der Stationen
(nach L. Kraack 2004)

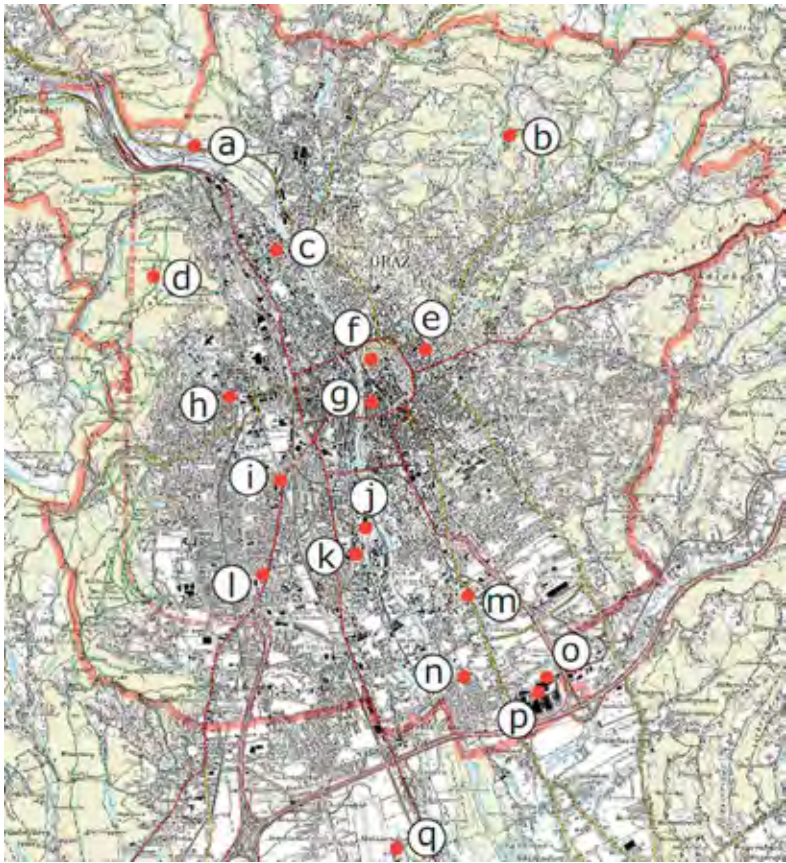


Abbildung 10:
Daten der Stationen
(nach KRAACK 2004)

| | | | |
|----------|------------------|-------|----------|
| a | Graz Weinzödl | 369 m | Luftgüte |
| b | Platte | 661 m | Luftgüte |
| c | Graz Nord | 348 m | Luftgüte |
| d | Plabutsch | 754 m | Luftgüte |
| e | Graz Universität | 369 m | ZAMG |
| f | Schlossberg | 450 m | Luftgüte |
| g | Graz Mitte | 352 m | Luftgüte |
| h | Graz West | 365 m | Luftgüte |
| i | Don Bosco | 358 m | Luftgüte |

| | | | |
|---|----------------|--------|-----------|
| j | Graz Süd | 345 m | Luftgüte |
| k | Puchstraße | 350 m | Luftgüte |
| l | Kärtnerstraße | 350 m | Luftgüte |
| m | Südgürtel | 340 m | Luftgüte |
| n | Murfeld | 340 m | Sonderst. |
| o | Eurostar | 340 m | Luftgüte |
| p | Eurostar Kamin | 340 m | Luftgüte |
| q | Graz Thalerhof | 342 m | ZAMG |
| * | Schöckel | 1442 m | Luftgüte |
| * | Wundschuh | 322 m | Luftgüte |

Mittels Messfahrten bei verschiedenen Wetterlagen wurden die Druckdifferenzen erhoben, um die Auswirkung des Düseneffekts auf die Druckverhältnisse im Norden von Graz abzuklären. In der Tat stellte sich nämlich heraus, dass sich dort häufig ein Unterdruck im Vergleich zum Süden von Graz einstellt, der dann für eine Kombination einer drucktechnisch und thermisch induzierten Strömung – eben den sogenannten Pseudoflurwind – sorgt.

Abbildung 11:
Hauptwindrichtungen
in heiteren Nächten
(nach KRAAK 2004)



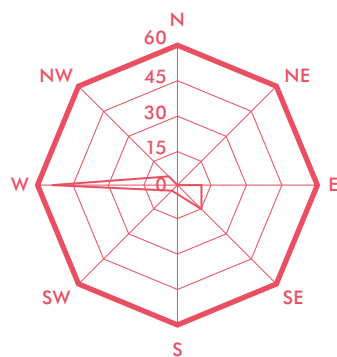
8.3.3 ERGEBNISSE

In einer umfangreichen Diplomarbeit wurden für die meisten Windmessstationen Windrosen erstellt, wobei in der Regel auch ein kürzerer Zeitraum genügt (zumeist 2 Jahre). Für einige Stationen wurde auch eine getrennte Auswertung nach Winter- und Sommerhalbjahr vorgenommen.

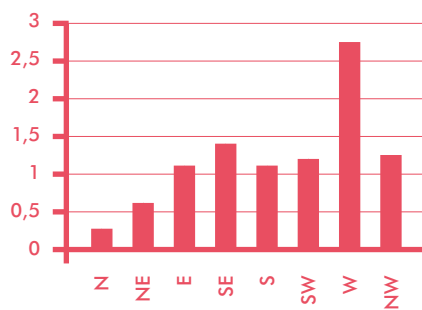
Beginnen wir im Norden mit der Station Weinzödl, die eine klare Dominanz der westlichen Richtungen innehat – und das bei nur 8 % Kalmen, was auf eine sehr günstige Durchlüftung hinweist. Dies hängt auch letztlich mit der starken Abhängigkeit vom Murtalauswind zusammen.

Abbildung 12:
Windrichtung
Graz Weinzödl
(nach KRAAK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Weinzödl 1994–1995,
31547 Fälle, Kalmen: 8,15 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz Weinzödl 1994–1995



Wie in dem Diagramm mit den Windgeschwindigkeiten klar zur Geltung kommt, prägen die Westwinde auch das Gesamtmittel, das bei ca. 2,2 m/s liegt und in Graz nur noch vom exponierten Schlossberg übertroffen wird (ca. 2,6 m/s).

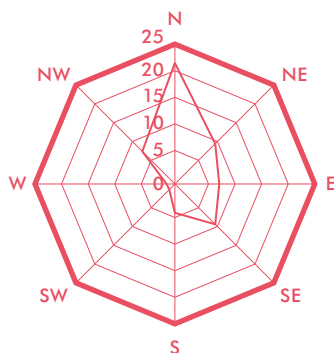
Von Norden nach Süden folgt dann die Station Graz Nord, welche wegen der Reibungseffekte schon deutliche Verluste hinnehmen muss, was wir am Windgeschwindigkeitsdiagramm erkennen können; auch der

Kalmenanteil ist merklich erhöht (21 %).

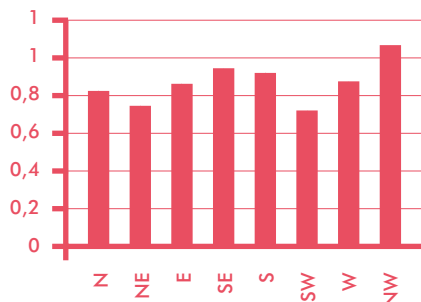
Bei der Windrichtungsverteilung ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Station Weinzödl die Stadtstationen nicht völlig frei aufgestellt werden konnten, wodurch sich Einflüsse von Gebäuden nicht ganz verhindern lassen. Immerhin kommt die Dominanz der nördlichen Winde sehr gut zur Geltung. Die mittlere Windgeschwindigkeit kann mit ca. 0,9 m/s angegeben werden.

Abbildung 13:
Windrichtung
Graz Nord (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Nord 1994–1995,
30423 Fälle, Kalmen: 20,83 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz Nord 1994–1995

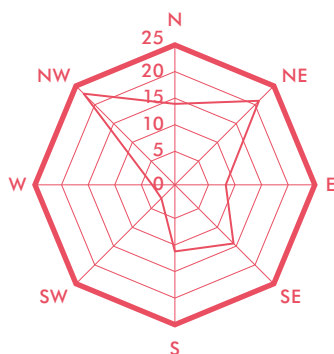


Die Station Graz Universität weist eine interessante Windrichtungsverteilung auf, da sich vor allem in der ersten Nachthälfte der Seitentalauswind aus dem Mariatroster Tal bemerkbar macht (NE); in der zweiten Nachthälfte übernimmt der Murtalauswind die Herrschaft, wobei auch hier die erhöhten Windgeschwindigkeiten auffallen. Es kommt somit zur Unter-

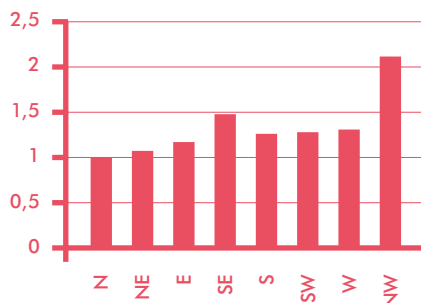
drückung des Seitentalauswindes zumindest im Dachniveau. Immerhin steht die Station auf dem Dach des Chemiegebäudes in ca. 25 m über Grund sehr frei anströmbar, wodurch die geringe Kalmenanzahl (nur 2 %) erklärbar wird. Das Gesamtmittel der Windgeschwindigkeit kann mit ca. 1,7 m/s angegeben werden.

Abbildung 14:
Windrichtung
Graz Universität
(nach KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Universität 1994–1995,
17494 Fälle, Kalmen: 2,4 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz Universität 1994–1995

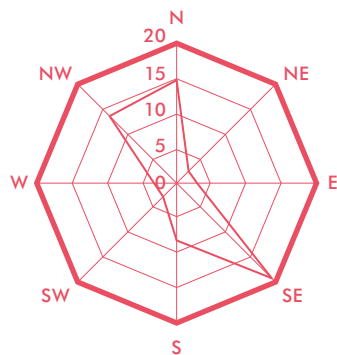


Die Station Graz West repräsentiert einen Bereich, der durch das Fehlen von Seitentälern charakterisiert wird und von der Durchlüftung betrachtet am ehesten noch vom Murtalauswind profitiert. Dazu sollte angemerkt werden, dass im Nordwesten von Graz ein Rotoreffekt besteht, wobei die alte Station – genannt „Algertsdorf“ – deutlich nördliche Winde aufweist, wäh-

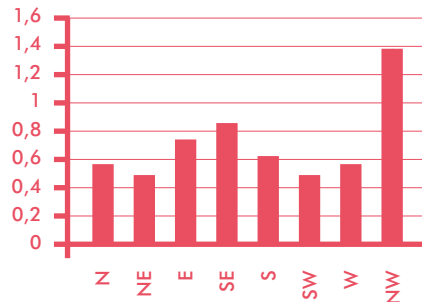
rend bei Messfahrten im Bereich der Barmherzigen Brüder (Krankenhaus) und des UKH eher südliche Winde beobachtet wurden. Dieser Effekt wurde unter anderem auch mittels des GRAMM-Modells nachgewiesen. Der vorspringende Hubertushöhe-Sporn bewirkt beim Murtalauswind leeseitig einen Unterdruck und erzeugt diesen Rotor.

Abbildung 15:
Windrichtung
Graz West (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz West 1994–1995,
28434 Fälle, Kalmen: 31,4 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz West 1994–1995

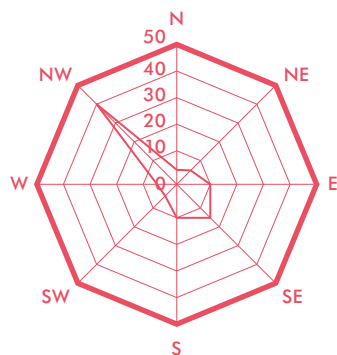


Bei der Windrichtungsverteilung fällt erstmals auf, dass die Dominanz der nördlichen Winde fehlt und die Bedeutung des Sektors SE bis S zugenommen hat. Der Anteil an Kalmen mit 31 % hat vergleichsweise ebenfalls zugenommen, was unter anderem auch darauf zurückzuführen ist, dass die Geschwindigkeit des Murtalauswindes nicht mehr ausreicht, um bis zum Boden durchgreifen zu können. Im Mittel darf eine Geschwindigkeit von ca. 1 m/s angenommen werden. Im Westen von Graz wurde auf dem Dach der Mälzerei eine Klimastation (ca. 55 m über Grund)

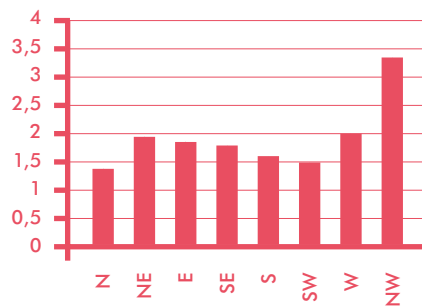
errichtet, um die Ausbreitungsverhältnisse in den Reininghausgründen besser erfassen zu können. Bei sehr geringem Kalmenanteil unter 5 % dominieren klar die Winde aus dem Sektor NW bis NNW. Die Windgeschwindigkeiten dürften etwas niedriger als am exponierten Schlossberg ausfallen (ca. 2,5 m/s). Wenn wir uns die Situation am Schlossberg näher anschauen, fällt die Dominanz der NW-Richtung auf, die im Wesentlichen auf das Konto des Murtalauswindes, aber auch der Rückseitenwinde („Nordföhn“) geht.

Abbildung 16:
Windrichtung Graz
Schlossberg (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Schlossberg 1994–1995,
34340 Fälle, Kalmen: 5,09 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz Schlossberg 1994–1995



Der Kalmenanteil ist ähnlich niedrig wie an der Station Graz Universität mit 5 %. Die Windgeschwindigkeit liegt im Mittel bei 2,6 m/s.

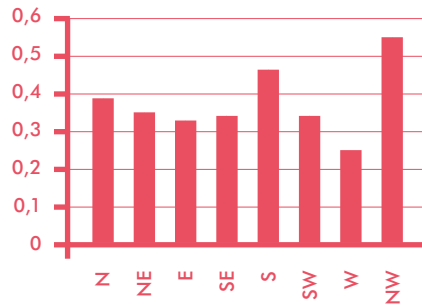
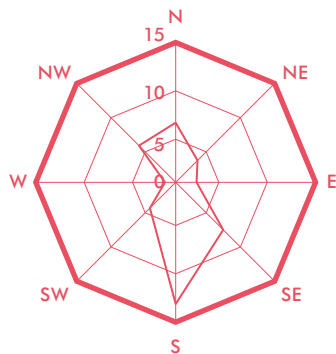
In Graz Süd überwiegen nun bereits die südlichen Winde, wobei auch der Kalmenanteil typisch für viele Bereiche im Süden und Westen von Graz auf über

50 % gestiegen ist (55 %); am höchsten dürfte der Anteil im Südwesten am Fuß des Buchkogels (nördlich vom Schloss St. Martin) liegen und dort Werte von über 70 % erreichen. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt gemäß unseres Diagrammes mit den zugehörigen Windrichtungen bei 0,4 m/s.

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994–1995,
34525 Fälle, Kalmen: 55,04 %

Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Graz Süd 1994–1995

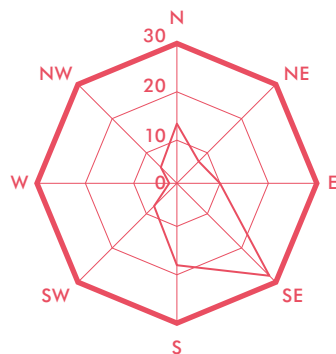
Abbildung 17:
Windrichtung Graz
Süd (nach KRAACK
2004)



Am stärksten im Süden von Graz ist der Flurwindanteil mit südlichen Winden an der Station Murfeld vertreten.

Abbildung 18:
Windrichtung Graz
Murfeld (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Murfeld 1992,
4335 Fälle

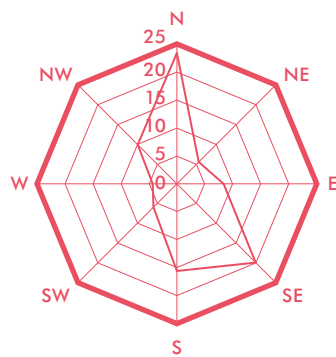


Die Windgeschwindigkeiten sind wegen der erhöhten Lage am Dach eines Einfamilienhauses etwas höher als an der Station Graz Süd (ca. 1 m/s). Die nördlichen Winde sind nur mehr auf Rückseitenwinde bei Störungsdurchzug und Nordföhn zurückzuführen. Wenn wir dazu passend uns eine Station in erhöhter Lage betrachten, wie etwa die Station in Puchstraße oder nachfolgend gleich in der Reihenfolge die Station in der Kärntnerstraße, kommt klar zur Geltung,

dass der Anteil der nördlichen Winde auch im Dachniveau zurückgeht. Dabei überwiegen bereits an der Station Puchstraße die südlichen Winde, während an der Station Kärntnerstraße ein Gleichgewicht besteht. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit ist die freiere Lage und etwas größere Höhe am Dach eines Hochhauses vermutlich der Grund für die höheren Geschwindigkeiten (2,1 zu 1,7 m/s).

Abbildung 19:
Windrichtung Graz
Puchstraße (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Puchstraße 1994–1995,
32930 Fälle, Kalmen: 7,84 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Puchstraße 1994–1995

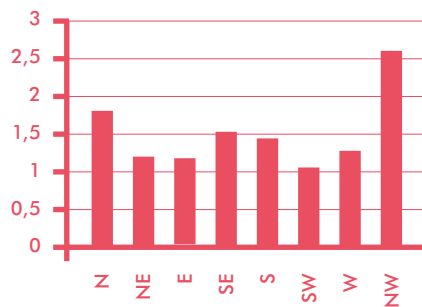
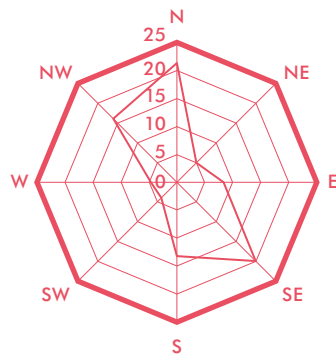
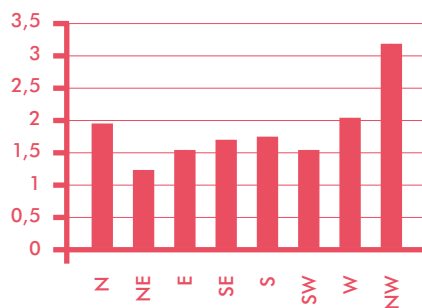


Abbildung 20:
Windrichtung Graz
Kärntnerstraße (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Kärntnerstraße 1994–1995,
32353 Fälle, Kalmen: 9,05 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung
Kärntnerstraße 1994–1995

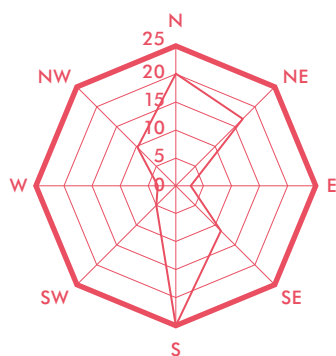


Zum Vergleich dient noch auf der anderen Murseite die Station EUROSTAR Kamin, die Ähnlichkeiten mit der Puchstraße aufweist. Nördliche und südliche Winde halten sich die Waage, was bedeutet, dass zu einem noch recht beachtlichen Anteil (ca. 10 %) Windscherungen mit den Verhältnissen am Schlossberg

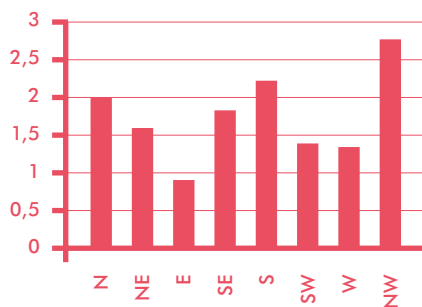
existieren, da die Mächtigkeit des Pseudoflurwindes noch über die Höhe der Station am Kamin hinausreicht. Eine weitere Erklärung wäre die zeitliche Verzögerung des Übergangs vom Murtalaus- zum Murtaleinwind, der sich im Süden von Graz rascher vollzieht.

Abbildung 21:
Windrichtung Graz
Eurostar Kamin (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%) Eurostar Kamin 1994–1995, 16946 Fälle, Kalmen: 7,6 %



Windgeschwindigkeit nach Windrichtung Eurostar Kamin 1994–1995

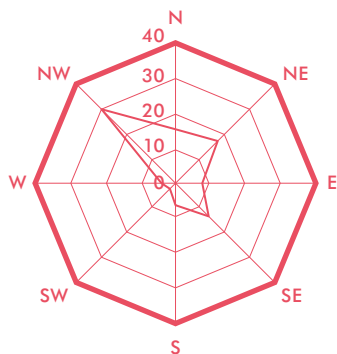


Bei den jahreszeitlichen Unterschieden fällt am ehesten die Station Graz Universität auf, da das sekundäre

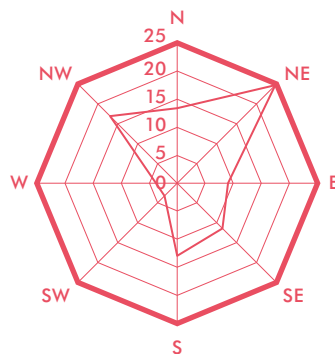
Maximum im Nordosten nur im Winterhalbjahr vertreten ist.

Abbildung 22:
Windrichtung Graz
Universität Sommer
und Winter (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse Sommer (%) Graz Universität 1994–1995, 4409 Fälle, Kalmen: 1,18 %



Windrichtungsverhältnisse Winter (%) Graz Universität 1994–1995, 4307 Fälle, Kalmen: 4,44 %



Eine weitere Station, die Puchstraße, beinhaltet eindeutige Hinweise auf Pseudoflurwinde bis in die Stationshöhe, denn im Winterhalbjahr treten die südlichen Winde häufiger auf. Bei den anderen erwähnten Stationen fallen die Unterschiede weniger ins Gewicht

bzw. sind nicht so eindeutig in einer Abhängigkeit zu den Pseudoflurwinden zu sehen. Bezüglich der jahreszeitlichen Unterschiede der Windgeschwindigkeiten gibt die folgende Grafik einen guten Überblick.

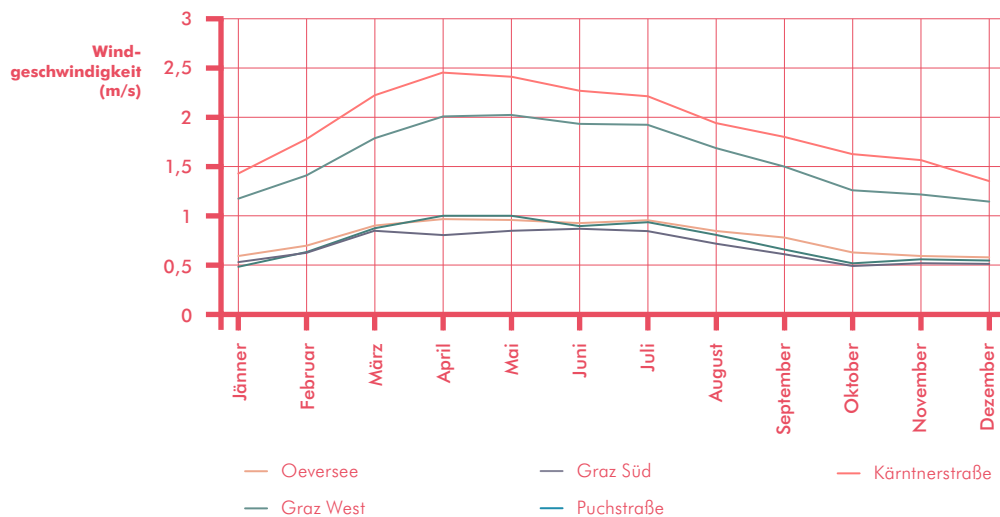


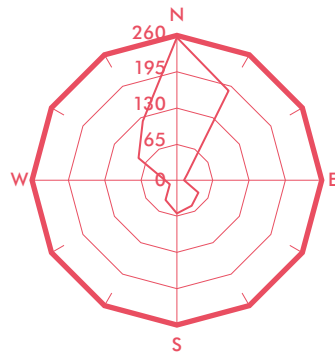
Abbildung 23:
Jahresgang des
Windes (Basis: Daten
vom Jahr 2011, nach
PFAFFINGER 2012)

Die tageszeitlichen Unterschiede bei der Windrichtungsverteilung sind im Norden auffälliger als im Süden von Graz. An den Stationen im Norden sind bis auf zyklonale Lagen mit advektiver Anströmung aus S bis E (in der Regel nur wenige Prozent) alle Windrichtungen aus dem Sektor W bis N und dem Murtalauswind bzw. sowie Rückseiteneffekte bei Störungsdurchzug sowie Nordföhn zurückzuführen. Im Süden von Graz, speziell an der Station Graz Murfeld, werden die südlichen Flurwinde von den Taleinwinden abgelöst, ohne dass dabei eine deutliche Trennung zu erkennen wäre. Im Sommer ist die Dominanz nördlicher Winde während der Nacht auch im Süden erkennbar, im Winter hingegen überwiegend die südlichen Winde. Dazu soll angemerkt werden, dass im Winterhalbjahr die zeitlichen Anteile mit advektiver Anströmung aus S bis E im Zusammenhang mit Hochnebellagen stärker vertreten sind als im Sommer; dies ist unter anderem an einer Station ohne Flurwindein-

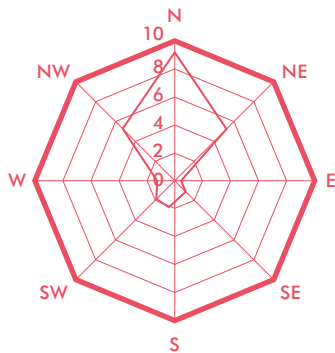
fluss (Schlossberg) sehr gut nachweisbar. Bei der Station Graz Süd fällt ferner auf, dass die Kalmenhäufigkeit gegenüber den Verhältnissen tagsüber merklich erhöht ist und ein Ausmaß von über 70 % erreicht. Dies könnte unter anderem auf die zu geringen Windgeschwindigkeiten der Pseudoflurwinde zurückzuführen sein; Ähnliches gilt aber auch für den Murtalauswind, der im Sommerhalbjahr wenn auch abgeschwächt im Süden von Graz sich immer wieder durchsetzen kann. Die oft stärkere Intensität des Murtalauswindes im Sommer dürfte auch der Grund dafür sein, dass an der Station Graz Universität die Bedeutung der Seitentalauswinde (in dem Fall der Mariatroster Talauswind) deutlich zurückgeht, wie dies bei den jahreszeitlichen Unterschieden schon aufgezeigt wurde. Bei den höher gelegenen Stationen im Süden von Graz kommt der Einfluss mächtigerer Pseudoflurwinde ebenfalls zum Ausdruck (Diagramm mit der Station Puchstraße).

Abbildung 24:
Windrichtung
diverser Stationen in
Graz, Sommer und
Winter (nach KRAACK
2004)

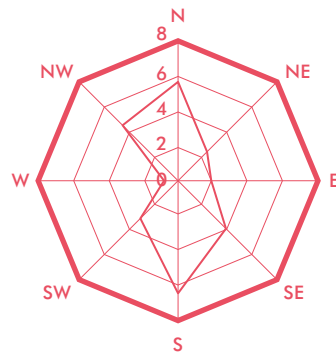
**Windrose Graz Nord
910101-921231,
Winter: Nacht
Anzahl der Fälle: 7635**



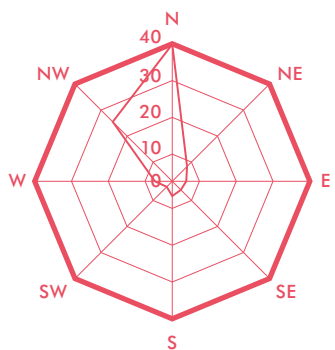
**Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994-1995,
Sommer: Nacht
3378 Fälle, Kalmen: 75,87 %**



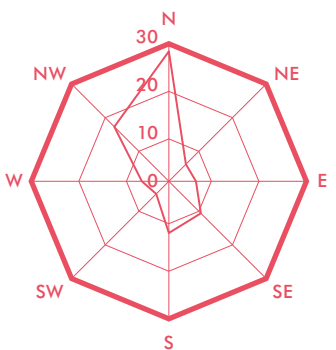
**Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994-1995,
Winter: Nacht
5569 Fälle, Kalmen: 70,52 %**



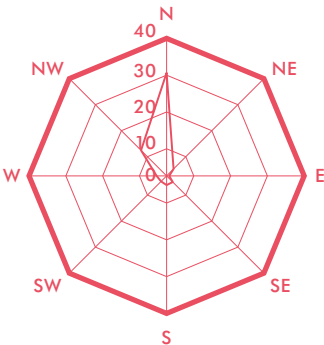
**Windrichtungsverhältnisse (%)
Kärntnerstraße 1994-1995,
Sommer: Nacht
3333 Fälle, Kalmen: 8,04 %**



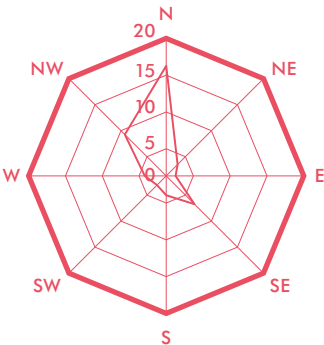
**Windrichtungsverhältnisse (%)
Kärntnerstraße 1994-1995,
Winter: Nacht
5099 Fälle, Kalmen: 12,02 %**



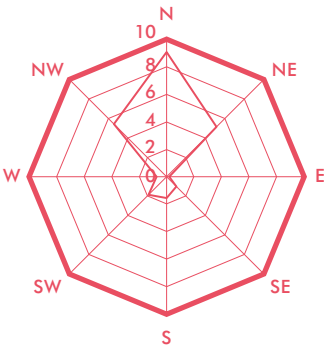
Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz West 1994–1995,
Sommer: Nacht
2758 Fälle, Kalmen: 41,23 %



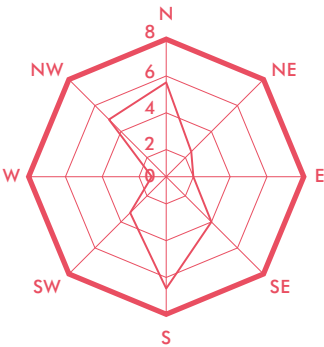
Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz West 1994–1995,
Winter: Nacht
4283 Fälle, Kalmen: 53,7 %



Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994–1995,
Sommer: Nacht
3378 Fälle, Kalmen: 75,87 %



Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994–1995,
Winter: Nacht
5569 Fälle, Kalmen: 70,52 %



Windgeschwindigkeit nach
Windrichtung, Nacht
Graz Süd 1994–1995

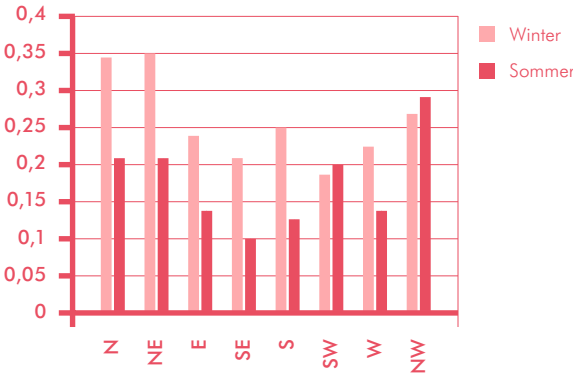


Abbildung 25:
Windgeschwindigkeit
Graz Süd, Nacht
(nach KRAACK 2004)

Die tageszeitlichen Unterschiede für die Windgeschwindigkeit sind im Sommerhalbjahr stärker ausgeprägt als im Winter, wobei an der Station Schlossberg überwiegend umgekehrte Verhältnisse mit einem Maximum in der Nacht und einem Minimum zur Zeit des Windrichtungswechsels aufscheinen. Die geringsten Windgeschwindigkeiten herrschen in Graz im Süd-

den und Südwesten mit Werten unter 1 m/s und im Mittel unter 0,6 m/s. Dies hat vor allem für den Sommer bei Maxima über 30 °C Bedeutung, weil dann die Hitze stärker wahrgenommen wird. Im Winter liegt die Kalmenhäufigkeit teilweise bei 70 % und darüber.



Abbildung 26:
Mittlerer jährlicher
Tagesgang der Wind-
geschwindigkeit
(PIRINGER 1994)

8.3.4 VERGLEICHENDE BETRACHTUNG BEI MODELLIERUNGEN FÜR DAS GRAZER WINDFELD

Für Graz liegen zwei Modellergebnisse vor. Im ersten Fall wurde das Modell MUKLIMO angewendet, das die Strömungsverhältnisse wenigstens abschnittsweise gut wiedergibt. Der Düseneffekt beim Murtalauswind kommt nicht zur Geltung (höchste Werte in der Talenge von Raach), damit sind auch die Überwärmungseinflüsse (sekundäre Wärmeinsel) nicht betroffen. Die Bedingungen in den Seitentälern samt Temperaturmustern passen recht gut, auch der Rotoreffekt im Lee der Hubertushöhe ist zumindest im Ansatz erkennbar. Ab der Stadtmitte nach Süden zu wird die Situation sehr verworren, da zwar keine Flurwinde erkennbar sind, aber andererseits von Osten einströmende Seitentalauswinde sehr weit nach West vordringen, was klarerweise unrealistisch ist.

Im anderen Fall wurde mit KLAM gerechnet, und da hängt es wesentlich davon ab, inwieweit größere Windsysteme wie der Murtalauswind mit einbezogen werden können, da ihr Einzugsgebiet in der Regel viel zu klein gewählt wird. Deshalb kommt es im Nordwesten von Graz zu einer Fehlaussage, während andererseits die Seitentäler sehr gut getroffen werden. Die Reichweite der Seitentäler in Richtung Stadtzentrum weicht allerdings noch etwas von den Messfahrten ab. Fazit ist, dass mit Modellierungen im Grazer Raum wegen der komplexen Rahmenbedingungen derzeit nur unbefriedigende Ergebnisse erzielt werden. Eine Ausnahme stellt das sehr aufwendige Modell GRAMM von der TU Graz dar, das unter anderem für den Nachweis des Rotoreffektes im Nordwesten von Graz angewendet wurde. Der Vorteil bei diesem Modell ist, dass die Randbedingungen – speziell für den Grazer Murtalauswind, belegt durch Stationsdaten und Messfahrtunterlagen – viel realer in die Berechnung eingehen und damit realistischere Ergebnisse erzielt werden.

Abbildung 27:
Temperaturfeld in der
Höhe von 5 m über
Grund (MUKLIMO)

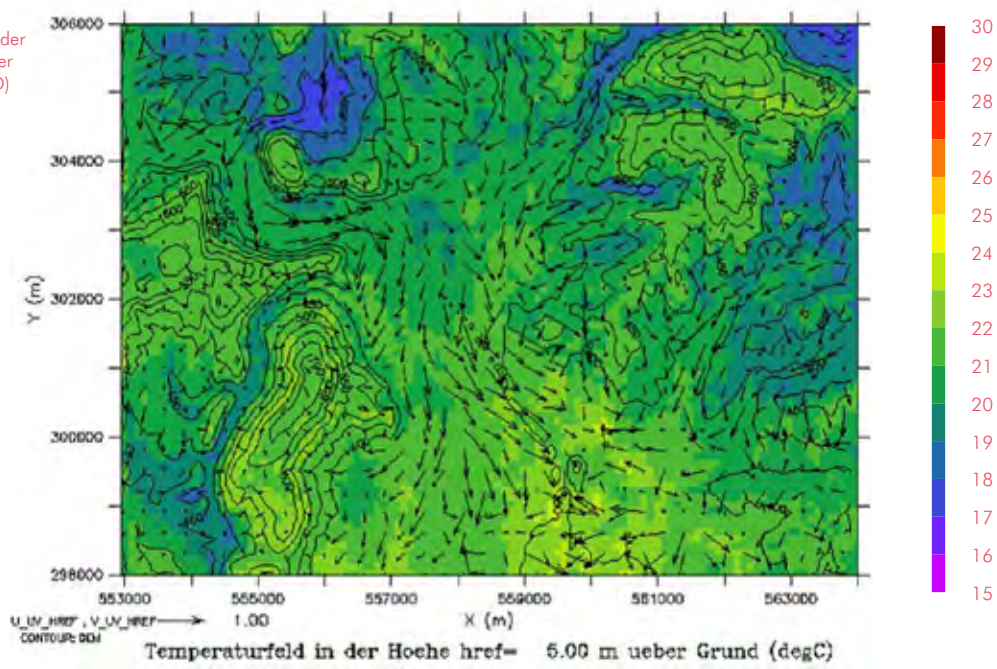
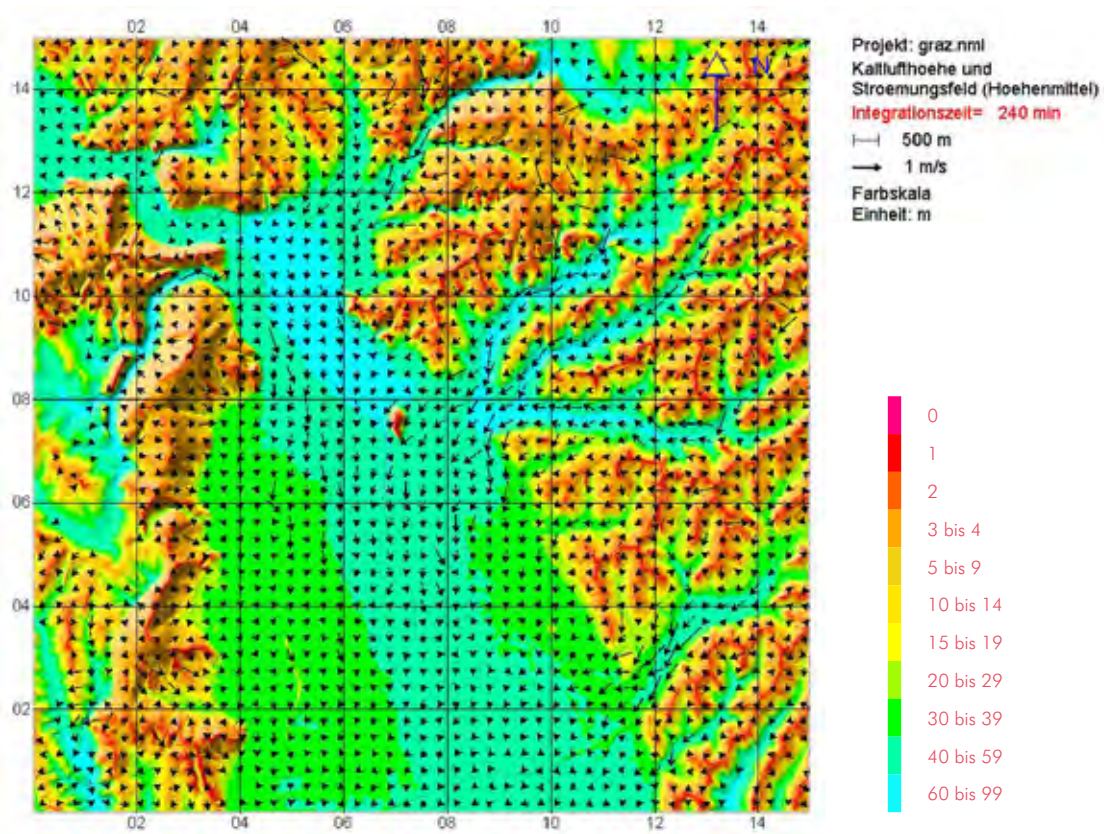


Abbildung 28:
Temperaturfeld in der
Höhe von 5 m über
Grund (berechnet mit
Software des Deutschen
Wetterdienstes, KLAM)



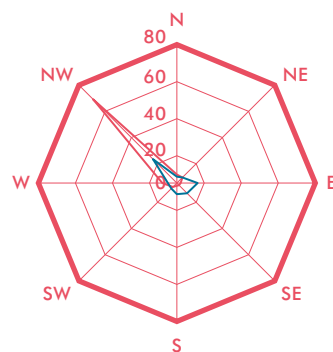
8.3.5 WEITERE BESONDERHEITEN BEI DEN PSEUDOFLURWINDEN

a) Unterschiede infolge von schwach und stark entwickeltem Murtalauswind

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass der Pseudoflurwind in Graz nicht nur auf thermische Unterschiede, sondern auch auf Druckunterschiede und zusätzlich auf Unterschiede in der Geschwindigkeit des Murtalauswindes beruht. Immerhin handelt es sich damit um drei Variable, wobei eine der wichtigsten Variablen, die erst jüngst dank Auswertungen von L. Kraack 2004 erkannt wurde, die Dynamik des Murtalauswindes darstellt. Bei starker Ausprägung bleibt – wie die beigefügten Karten dies schön nachweisen – von der Druckdifferenz (also trotz lokalem Tief in Gösting und relativ höherem Druck im Grazer Feld) der Pseudoflurwind in seiner Entwicklung bestenfalls auf den bodennahen Bereich im Süden begrenzt (also nur an Stationen wie Murfeld und Eurostar nachweisbar). Bei schwachem Murtalauswind hingegen kann sich der Pseudoflurwind weiter nach Norden durchsetzen.

Abbildung 29:
Windrichtungen Graz
Schlossberg, Nacht
(nach KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%) Schlossberg 1994–1995, Nacht



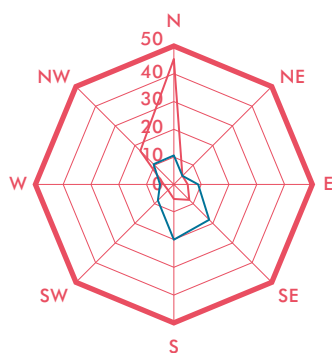
st. AW: 1353 Fälle
Kalmen: 1,85 %
 Δv : 3,75 m/s

sch. AW: 1780 Fälle
Kalmen: 16,74 %
 Δv : 1,16 m/s

— Starker AW
— Schwacher AW

Abbildung 30:
Windrichtungen Graz
Kärntnerstraße, Nacht
(nach KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Kärntnerstraße 1994–1995,
Nacht



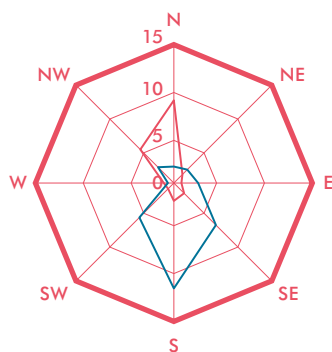
st. AW: 1299 Fälle
Kalmen: 7,7%
 Δv : 2,04 m/s

sch. AW: 1744 Fälle
Kalmen: 17,95%
 Δv : 1,03 m/s

— Starker AW
— Schwacher AW

Abbildung 31:
Windrichtungen Graz
Süd, Nacht (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994–1995,
Nacht



st. AW: 1364 Fälle
Kalmen: 75,22%
 Δv : 0,26 m/s

sch. AW: 1915 Fälle
Kalmen: 66,21%
 Δv : 0,23 m/s

— Starker AW
— Schwacher AW

Abbildung 32:
Luftdruck und Wind-
richtungen in Graz
am 18.12.2003
(nach KRAACK 2004)

**Luftdruck und Windrichtungen in Graz
am 18.12.2003 zwischen 04:00 und 05:00**

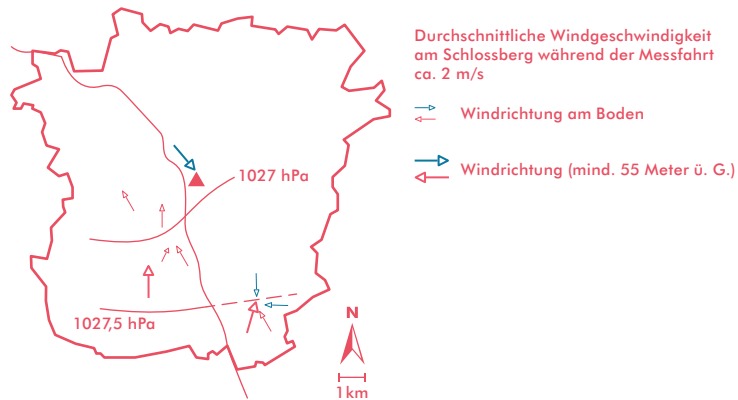
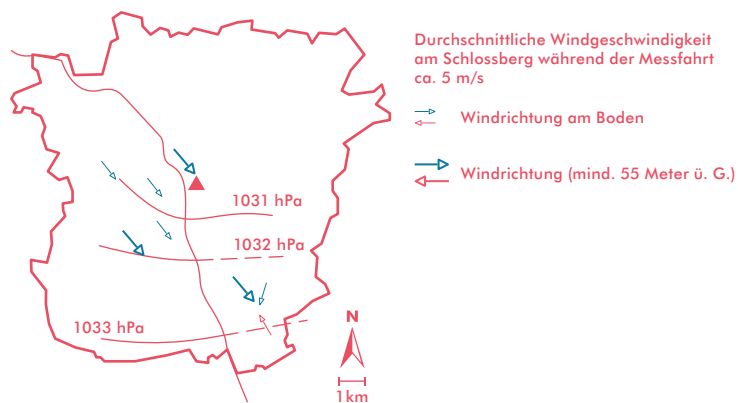


Abbildung 33:
Luftdruck und
Windrichtungen in
Graz am 24.12.2003
(nach KRAACK 2004)

**Luftdruck und Windrichtungen in Graz
am 24.12.2003 zwischen 04:30 und 05:30**



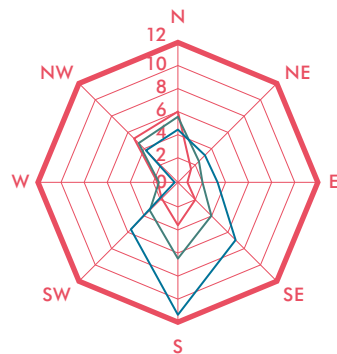
b) Abhängigkeit der Pseudoflurwinde von der Ausprägung der Grazer Wärmeinsel

Hier geht es im Wesentlichen um den thermisch induzierten Anteil der Flurwinde – was sie ja laut Literatur auch sind. Nur in Graz haben wir die Besonderheit der Kombination beider Auslöser. Bemerkenswert ist nun, dass an der Station Graz Süd die Häufigkeit der südlichen Winde in den Nächten ohne Wärmeinsel größer ist als während der Nächte mit Wärmeinsel. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Fälle mit Hochnebel oder zyklonale Lagen mit überwiegender Anströmung aus dem Sektor S bis E. Das Problem der eindeutigen Zuordnung, ob es an den Tagen mit Wärmeinsel einen Flurwind gegeben hat oder nicht, hängt noch stark von der großen Kalmenhäufigkeit ab, die Werte über 70 % erreicht. Es darf angenommen werden, dass ein Großteil der Kalmen zu schwachen südlichen Winden zuzuordnen ist.

Unten findet sich eine Tabelle mit der Auflistung der Wärmeinseltage samt zugehöriger Intensitäten. Insbesondere im Jänner 1995 sind dabei recht beachtliche Unterschiede bis fast 10 K aufgetreten.

Abbildung 34:
Windrichtungen in
Graz Süd, Nacht
(nach L. Kraack 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Graz Süd 1994–1995,
Nacht



WI: 1860 Fälle
Kalmen: 77,96 %

ohne WI: 1699 Fälle
Kalmen: 61,21 %

Winter: 5569 Fälle
Kalmen: 70,52 %

— Nächte mit WI
— Nächte ohne WI
— Winter

Tabelle 2:
Wärmeinselintensitäten:
Unterschiede zwischen
Graz Mitte und Graz
Thalerhof (nach
KRAACK 2004)

| Datum | ΔT_{u-r} | Datum | ΔT_{u-r} | Datum | ΔT_{u-r} |
|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|
| 11.01.1995 | 9,7 | 12.02.1995 | 5,9 | 18.12.1994 | 4,9 |
| 03.01.1995 | 9,1 | 20.02.1994 | 5,9 | 28.12.1995 | 4,9 |
| 15.01.1995 | 8,1 | 16.02.1994 | 5,8 | 10.01.1994 | 4,9 |
| 17.01.1995 | 8,0 | 30.12.1994 | 5,8 | 28.02.1994 | 4,8 |
| 01.02.1995 | 7,9 | 02.01.1994 | 5,7 | 06.12.1994 | 4,8 |
| 04.01.1995 | 7,7 | 09.01.1994 | 5,7 | 31.12.1994 | 4,8 |
| 26.01.1995 | 7,7 | 17.02.1994 | 5,7 | 16.02.1995 | 4,6 |
| 09.02.1995 | 7,6 | 31.01.1995 | 5,4 | 21.02.1995 | 4,5 |
| 25.12.1995 | 7,4 | 04.02.1995 | 5,4 | 05.02.1995 | 4,4 |
| 14.01.1995 | 7,1 | 08.01.1995 | 5,4 | 12.12.1994 | 4,4 |
| 13.02.1995 | 7,1 | 18.02.1994 | 5,4 | 16.01.1995 | 4,4 |
| 12.01.1995 | 7,1 | 22.02.1994 | 5,4 | 28.01.1995 | 4,4 |
| 29.01.1995 | 7,0 | 07.02.1995 | 5,4 | 14.02.1995 | 4,3 |
| 02.02.1995 | 6,8 | 06.02.1995 | 5,3 | 30.01.1995 | 4,3 |
| 08.02.1995 | 6,7 | 22.02.1995 | 5,2 | 07.02.1994 | 4,2 |
| 29.12.1995 | 6,6 | 03.01.1994 | 5,2 | 27.02.1994 | 4,2 |
| 25.01.1995 | 6,4 | 10.01.1995 | 5,1 | 18.02.1995 | 4,1 |
| 24.12.1995 | 6,3 | 26.02.1994 | 5,1 | 13.01.1995 | 4,0 |
| 18.01.1995 | 6,0 | 08.01.1994 | 5,1 | 23.01.1995 | 4,0 |
| 03.02.1995 | 6,0 | 09.01.1995 | 4,9 | 11.01.1995 | 4,0 |

c) Abhängigkeit der Pseudoflurwinde von der Bewölkung am Beispiel der heiteren Nächte

Während die Stationen im Norden von Graz ganz eindeutig auf den Murtalauswind reagieren und fast ausschließlich Winde aus dem Sektor NW bis NE aufweisen, liegt der Anteil speziell bei der Station Graz Murfeld recht hoch (ca. 30–35 %). Ähnlich ist die Situation an der Station Eurostar, wo sich in Bodennähe zu den südöstlichen Winden noch östliche Richtungen gesellen, die vom Seitentalauswind aus dem Autaler Bereich (auch Raaba) stammen könnten. Die Station am Kamin weist jedenfalls dominant wieder nördliche Winde auf. Ähnlich ist die Situation an der Puchstraße zu beurteilen. Es darf angenommen werden, dass in ca. 15–20 % der Fälle der Pseudoflurwind noch bis in die Höhe der Station Puchstraße reicht (damit Schichtdicke von ca. 30–40 m).

Zu den angesprochenen Windrichtungsverteilungen (als Beispiel die Verteilung mit dem höchsten Anteil an Flurwinden in Abb. 35) sind noch zwei Karten (Abb. 36 und 37) beigelegt, die die Verhältnisse jeweils getrennt für die bodennahen Stationen und die Stationen in ca. 25 bis 40 m über Grund sehr gut charakterisieren.

Abbildung 35:
Windrichtungen und
Geschwindigkeiten in
Graz Murfeld (nach
KRAACK 2004)

Windrichtungsverhältnisse (%)
Murfeld 1994–1995,
Klare H, 199 Fälle, Kalmen: 36,68 %

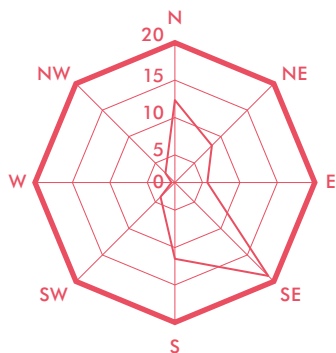
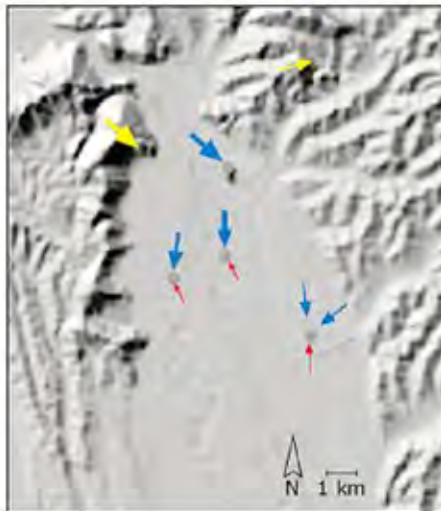


Abbildung 36 und 37:
Hauptwindrichtungen in
Nächten mit Hochdruck
ohne Bewölkung (nach
KRAACK 2004)



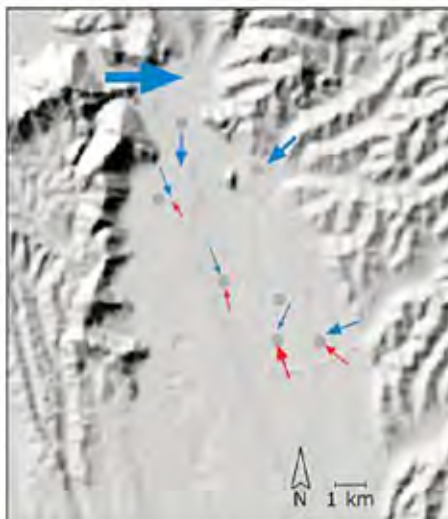
Hauptwindrichtungen in Nächten mit Hochdruck ohne Bewölkung (24 Winternächte 1994-1995)

Kamin bzw. Kammstationen

Kartengrundlage: A-MAP,
Bundesamt für Eich- und
Vermessungswesen

Stationen:

Platte
Plabutsch
Schloßberg
Puchstraße
Kärntnerstraße
Eurostar Kamin (1998-99)



Hauptwindrichtungen in Nächten mit Hochdruck ohne Bewölkung (24 Winternächte 1994-1995)

Stationen in 8-10m Höhe, bzw.
25m (Graz Uni)

Kartengrundlage: A-MAP,
Bundesamt für Eich- und
Vermessungswesen

Stationen:

Weinzödl
Graz Nord
Graz Uni
Graz West
Graz Süd
Südgürtel (1998-99)
Murfeld
Eurostar (1998-99)

d) Zusammenfassende Betrachtungen zu den Pseudoflurwinden in Graz

Die Besonderheit der Kombination von drucktechnisch und thermisch induzierten Flurwinden, die mit dem darüberwehenden, übergeordneten Murtalauswind einen beachtlichen Anteil von Windscherungen im Süden von Graz bedingen, scheint in der Tat zumindest in dieser Dimension in Mitteleuropa einzigartig zu sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Süden von Graz mit der Bezugsstation Graz Süd ca. 20–25 % der Nächte mit der Ausbildung eines Flurwindes zu rechnen ist. Wählt man als Bezugsstation Graz Murfeld, dürfte der Anteil noch deutlich höher ausfallen, da die Kalmenhäufigkeit an dieser Station geringer ist, und die Windgeschwindigkeit der schwachen Flurwinde auch noch ausreicht, um erfasst zu werden; es darf von einem geschätzten Anteil von 35–40 % ausgegangen werden, wo am Schlossberg NW-Wind herrscht und gleichzeitig im Süden von Graz südliche Winde dominieren. Fakt ist demnach, dass die Bedeutung der Flurwinde von Norden nach Süden markant zunimmt, was mit Reibungseffekten und Ablösungserscheinungen für den Murtalauswind zusammenhängt. Mit zunehmender Höhe über Grund nimmt der Einfluss des Murtalauswindes wieder deutlich zu, so dass nur in 7–12 % der Fälle am Beispiel der Kärntnerstraße Pseudoflurwind auftritt.

Die Ursachen für den Pseudoflurwind liegen nur zum Teil neben der Wärmeinsel (thermisch induzierter Erklärungsanteil) in den Druckdifferenzen, die eine Strömung von Süden nach Norden ermöglichen und unterstützen (immerhin bis zu 2 hPa Unterschied) sondern auch in der Stärke des Murtalauswindes, der dann in der starken Ausprägung mit 5 m/s (an der Station Weinzödl bzw. an der Station Schlossberg) den Flurwind bis weit über die Stadtmitte hinaus unterdrücken kann – an solchen Tagen fehlt auch die sonst typische Windscherung, die wir bei unterschiedlich hohen Abgasfahnen schön beobachten können. Nur die ganz im Süden und Südosten gelegenen Stationen Murfeld und Eurostar reagieren auch in solchen Fällen mit südlichen Winden oder melden Kalmen.

Bemerkenswert ist weiters, dass selbst bei Hochnebel mitunter ein nach Graz gerichtetes Windsystem erkennbar ist, wodurch die Stationen im Norden – etwa Graz Nord – ein eindeutiges Maximum von nördlichen und die im Süden gelegenen Stationen ein klares Maximum von südlichen Winden aufweisen. Dies ist in Hinblick auf die Schadstoffausbreitung und die Genehmigung von Anlagen mit Emissionen bis hin zu Einkaufszentren mit Parkplätzen mit Kfz-Emissionen zu berücksichtigen.

Was die Mächtigkeit der Flurwinde anbelangt, geben die folgenden Diagramme sowie der zweite Teil der Tabelle Auskunft. So beispielsweise verdreifacht sich die Häufigkeit des Auftretens von Flurwinden an der Station Graz Süd gegenüber der erhöhten Station Kärntnerstraße. Die größte Häufigkeit tritt an der Station Murfeld mit freier Anströmbarkeit aus dem Sektor Süd bis Südost auf, wo infolge der geringeren Kalmenhäufigkeit gegenüber der Station Graz Süd (mehr im verbauten Stadtgebiet) die geringen Windgeschwindigkeiten des Flurwindes zur Registrierung ausreichen.

Tabelle 3:
Halbstundenmittel
werte mit NW-Wind
am Schlossberg und
Wind aus S an den
Stationen Graz Süd
und Kärntnerstraße
(nach KRAACK 2004)

| | | GÜLTIGE HMW | HMW MIT NW ZU S* | % |
|-----|----------------|-------------|---------------------|------|
| SÜD | Nacht (Jahr) | 13415 | 2913 | 21,7 |
| | Nacht (Sommer) | 3337 | 881 | 26,4 |
| | Nacht (Winter) | 5000 | 1015 | 20,3 |
| KÄR | Nacht (Jahr) | 12365 | 931 | 7,5 |
| | Nacht (Sommer) | 3291 | 361 | 11,0 |
| | Nacht (Winter) | 4598 | 299 | 6,5 |

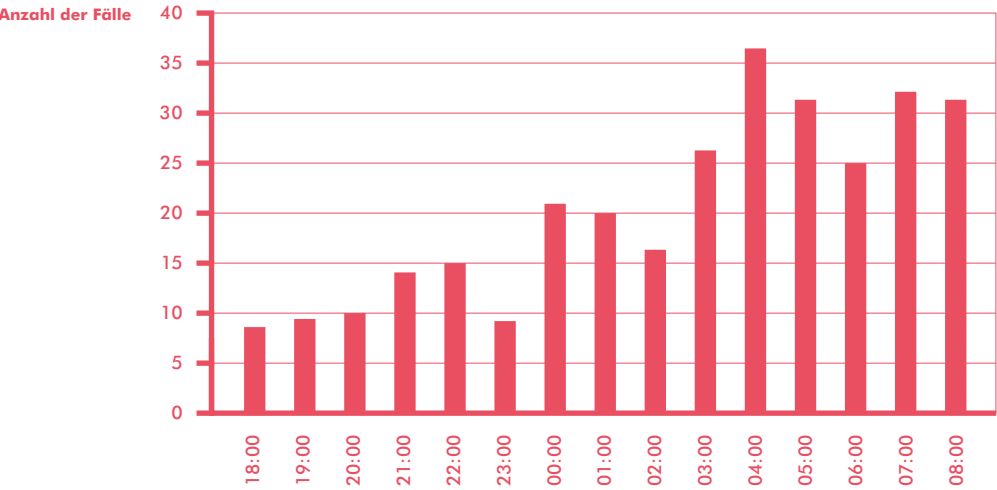
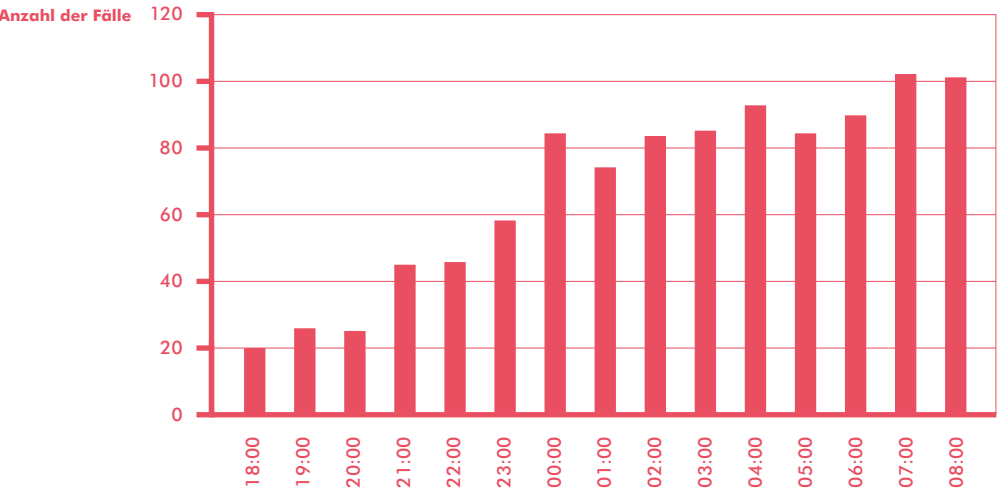


Abbildung 38:
Fälle mit NW-Wind
am Schlossberg und
S-, SE- oder SW-Wind
in Graz Kärntnerstraße
zwischen 18 und 8 Uhr
(nach KRAACK 2004)



8.3.6 BESONDERHEITEN DER PSEUDOFURWINDE IM WESTEN VON GRAZ

Im Westen von Graz werden die Windverhältnisse einerseits durch die Rezirkulation mit dem Plabutschzug geprägt, und andererseits ist auch noch eine Verzahnung mit den Flurwinden gegeben, wie aus den folgenden Abbildungen und insbesondere im Überblick (Abb. 39) mit anderen Stationen ersichtlich ist. Die neu errichtete Station auf der Mälzerei liefert sehr gute Daten für die Verhältnisse in der freien Anströmung durch den Murtalauswind, während die Station Graz West einen vergleichsweise hohen Anteil an südlichen Winden in der Nacht aufweist.

Es sind dies erste Ergebnisse; weitere klimatische Detailstudien werden im Rahmen der Bebauung der Reininghausgründe noch folgen.

Abbildung 39:
Strömungsverhältnisse bei Nacht an verschiedenen Stationen im Westen von Graz (bezogen auf das Jahr 2011, nach PFAFFINGER 2012)

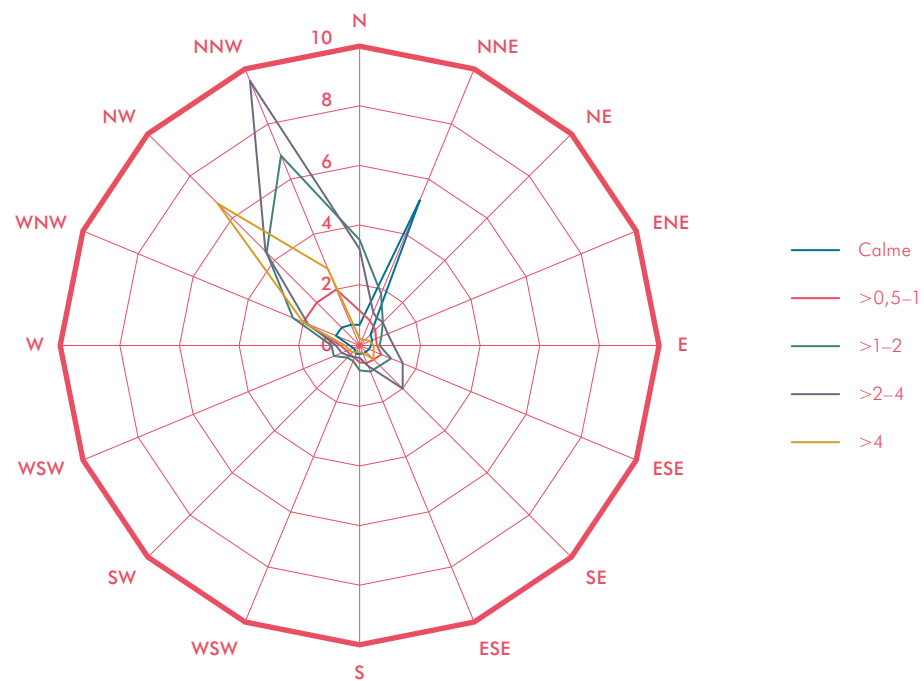


Abbildung 40:
Strömungsverhältnisse
am Tag an verschiede-
nen Stationen in Graz
(für 2011, nach
PFAFFINGER 2012)

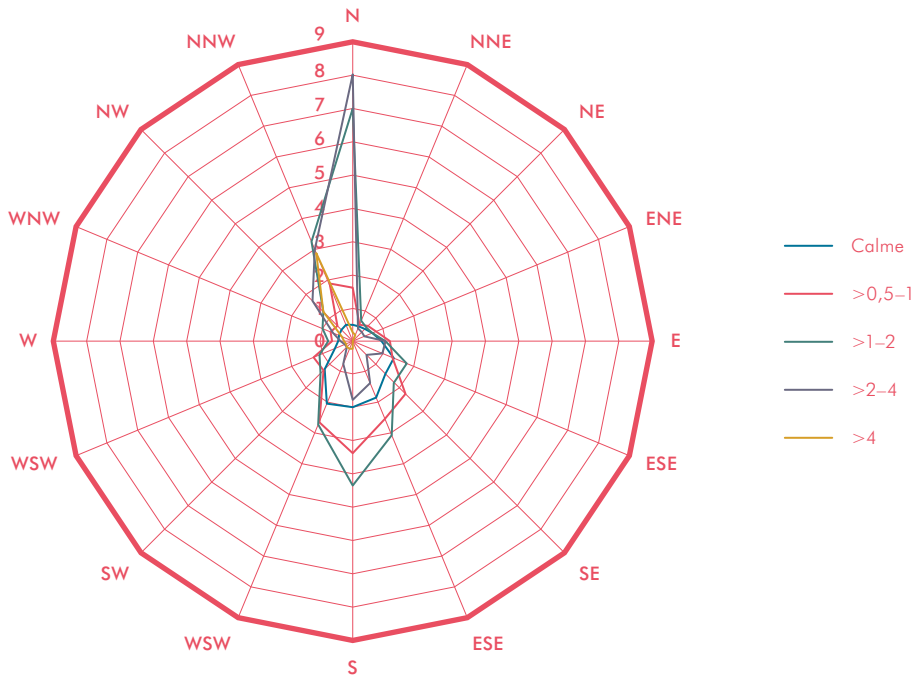


Abbildung 41:
Strömungsverhältnisse
in der Nacht an ver-
schiedenen Stationen
in Graz (für 2011,
nach PFAFFINGER
2012)

Windrichtungsverteilung: Mälerei in der Nacht



Windrichtungsverteilung: Kärntnerstraße in der Nacht



Windrichtungsverteilung: Graz West in der Nacht

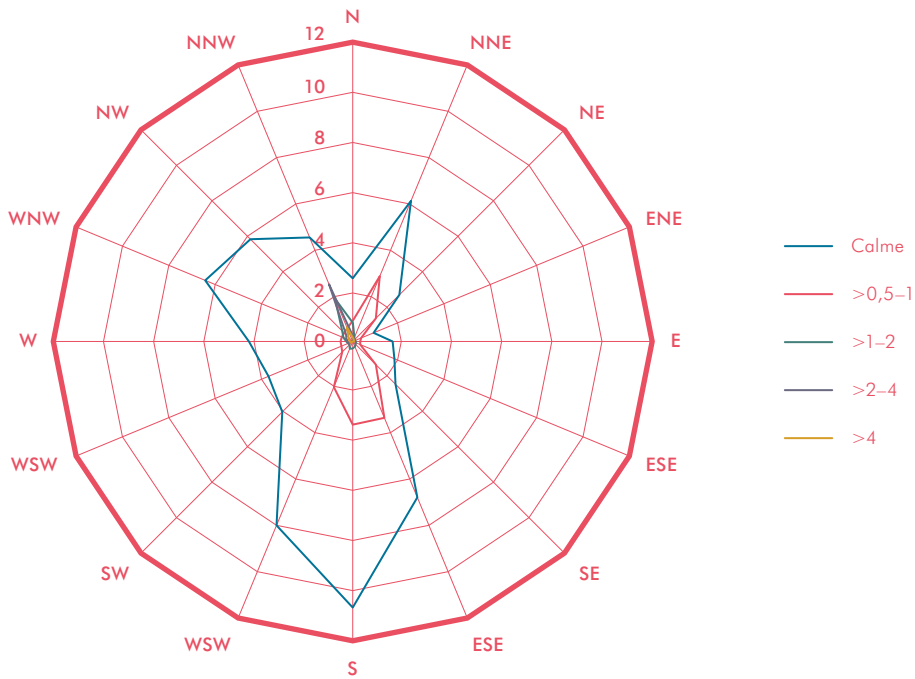
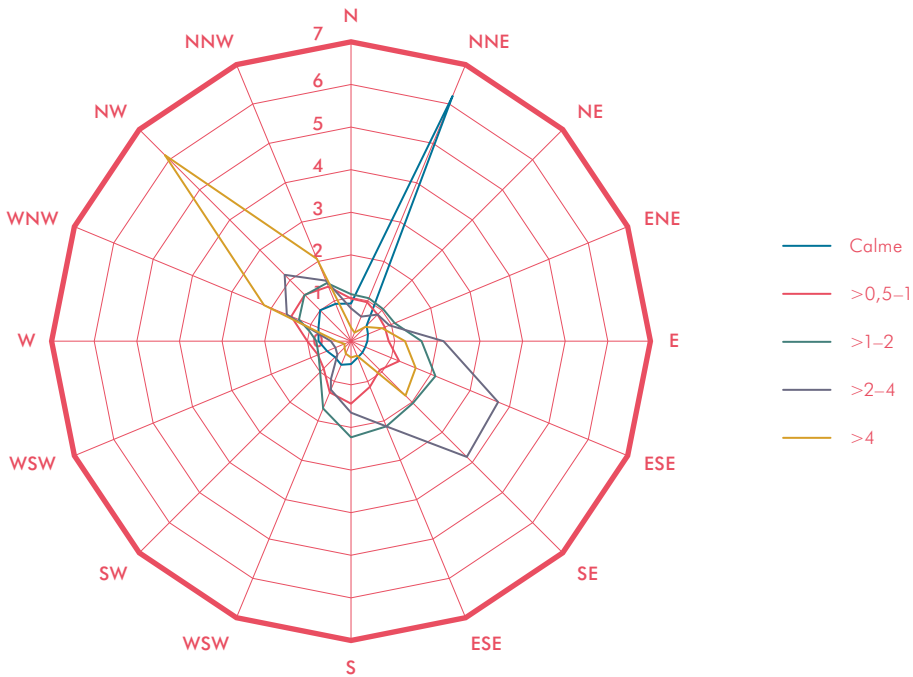
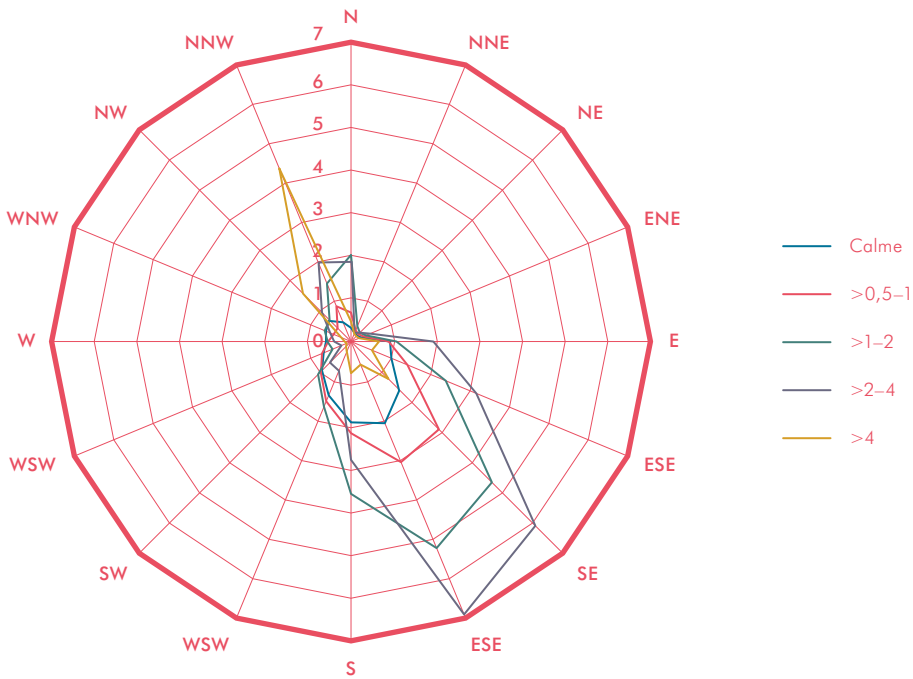


Abbildung 42:
Strömungsverhältnisse
am Tag an verschiede-
nen Stationen in Graz
(für 2011, nach
PFAFFINGER 2012)

Windrichtungsverteilung: Mälzerei bei Tag



Windrichtungsverteilung: Kärntnerstraße bei Tag



ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalysen der letzten 30 Jahre zeigen anschaulich, wie sich in Graz die Stadtklimaforschung und die damit verbundenen Aspekte der Fernerkundung gut entwickelt haben. Man kann davon ausgehen, dass es inzwischen einen relativ breiten Anwenderkreis beginnend von der Stadtplanung bis hin zum Umweltamt gibt und dass es eine sehr gute Zusammenarbeit bzw. Vernetzung zwischen den einzelnen Abteilungen und Referaten des Magistrates einerseits und dem Institut für Geographie und Raumforschung andererseits gibt. Die Situation in Graz lässt sich am ehesten mit Stuttgart vergleichen, wo sogar hauptamtlich Klimatologen arbeiten. Die weiteren Schritte in der Forschung sind durch die Dynamik in der Stadtentwicklung mit der künftigen Bebauung der Reininghausgründe, aber auch Versionen in Richtung „Smart City“ vorgegeben. Die ersten Klimamessungen mit einer Station auf der Mälzerei der ehemaligen Brauerei Reininghaus haben schon wertvolle Daten gebracht. Tatsache ist, dass bezüglich der Reininghausgründe eine begleitende Detailstudie erstellt werden sollte, um sowohl den Anforderungen bezüglich der Luftgüte (Fragestellung der Durchlüftung und Intensivierung der Wärmeinsel) als auch dem Klimawandel gerecht zu werden. Gerade die Sommertemperaturen sind in den letzten drei Jahrzehnten in einem Maße gestiegen, dass heiße Sommer wie der von 2003 nicht mehr so extrem erscheinen werden. Hier gilt es, mit einer entsprechend gut abgestimmten Baukörperstruktur in den Quartieren einerseits und der Erhaltung von Grünflächen als Ausgleichsflächen andererseits ein städtisches Kleinklima zu schaffen, das den zu erwartenden Hitzestress minimiert. Dies betrifft nicht nur die Situation tagsüber mit der Zunahme der Tropentage (Maximum über 30 °C), sondern vor allem die erhöhten nächtlichen Temperaturen (Tropennächte, Minimum über 20 °C), die den Menschen mehr und mehr belasten. Weiters wird es darum gehen, auch die Oberflächenentwässerung nicht nur bezogen auf die Reininghausgründe, sondern allgemein für Graz zu überdenken, denn es mehren sich die Zeichen einer Zunahme der Starkregenereignisse, was gut in Übereinstimmung mit den zu erwartenden höheren Sommertemperaturen steht. Dazu stehen nun dank der Thermalflüge sehr gute Datengrundlagen (Versiegelungskarte) zur Verfügung; sie werden für die Beurteilung der gesamten Oberflächenwässer und der damit verbundenen Belastung für das Kanalnetz in Graz herangezogen werden. In den letzten Jahren waren von Überschwemmungen die Bezirke Andritz und St. Peter betroffen. Die schon errichteten Retentionsbecken

stellen zweifellos eine wichtige Maßnahme zur Verringerung des Überschwemmungsrisikos dar. Bezüglich der Feinstaubbelastung werden weitere Untersuchungen folgen, wobei derzeit ein Projekt mit Unterstützung der Landesregierung gestartet wurde, das die Vorbelastung der Seitentäler näher beleuchten wird.

Die in dieser Studie generierten Datengrundlagen eignen sich in weiterer Folge auch für die Erhebung von Entsiegelungspotentialen. Zur Überprüfung der bisherigen Siedlungstätigkeit und der Ableitung von möglichen Sanierungsmaßnahmen fehlten bislang oftmals die erforderlichen Daten, sowohl was die Feststellung des Versiegelungsgrades betrifft, als auch was die Einschätzung angeht, wo aus heutiger Sicht eine übermäßige Versiegelung vorhanden ist. Diese Daten wurden bislang lediglich von einigen Großstädten Deutschlands selbstständig, z. B. für Entsiegelungsprogramme oder im Rahmen von Umweltinformationssystemen, Umweltleitplänen etc. erhoben. Hier könnte eine Folgestudie eine praxisnahe Handlungsgrundlage zur Erhebung der Entsiegelungspotenziale für die Stadt Graz darstellen. Mit möglichst einfachen Instrumenten und mit vertretbarem Aufwand sollten dabei der Versiegelungsgrad der Siedlungsflächen der Stadt dargestellt, der Umfang der bestehenden Versiegelung kritisch überprüft und die Entsiegelungs- sowie Belagsänderungspotenziale sichtbar gemacht werden. Bei der zumindest teilweisen Wiederherstellung des Bodens mit seinen Funktionen muss insbesondere der Schutz des Grundwassers gewährleistet sein. Ziel wäre, eine Übersicht über die relevanten Entsiegelungs-/Belagsänderungspotenziale zu erhalten.

LITERATUR

- ALBERTZ, J., 2001: *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern.* – Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 250 S.
- AMANN, V., 2004: *Bericht zur Flugmeßkampagne GRAZ 2004.* – Unveröffentlichter Bericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen, 18 S.
- BISCHOF, H., 2011: *Bildflug Graz 2007 und Forschungsbericht zum Bildflug 2007*, unpublizierter Befliegungs- und Entzerrungsbericht.
- CHEN, L-C., CHIANG, T-W., TEO, T-A., o. J.: *Fusion of LiDAR data and high resolution images for forest canopy modeling*, Center for Space and Remote Sensing Research, National Center University, Jhong-Li, Taiwan.
- EICHBERGER S. and SULZER W., 2005: *Urban development of Graz – a time series analysis with historical aerial photographs.* In: *Remote Sensing and GIS for Environmental Studies – Göttinger geographische Abhandlungen*, Vol. 113, pp. 63
- FEZER, F., SEITZ, R., 1977: *Klimatologische Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum. Studien für die Regional- und Siedlungsplanung.* Heidelberg, 243 S.
- GRUBER, M., o. J.: *UltraCam-X, the new Digital Aerial Camera System by Microsoft Photogrammetry.*
- KAUFMANN, V., & Sulzer, W., 1997: *Über die Nutzungsmöglichkeit hochauflösender amerikanischer Spionage-Satellitenbilder (1960–1972).* In: *Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, Heft 97/3, Wien, 166–174.
- KAUFMANN, V., 1989: *Thermalkartierung Graz 1986.* – Unveröffentlichte Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, 210 S.
- Das Land Steiermark, Landesumweltinformationssystem LUIS*, August 2012: *Klimaatlas Steiermark*, Kapitel 1 – Strahlung; <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/beitrag/10703586/16178332/>.
- KURTA, M., 2008, *Die Auswirkungen der luftreinhal- terechtlichen Bestimmungen in Bezug auf Feinstaub (PM10) auf das gewerbliche Betriebsanlagenrecht*, Diplomarbeit, KF-Uni-Graz, 89 S.
- LAZAR, R., 1982: *Stadtklimatische Besonderheiten von Graz. Tagungsband „10 Jahre Grazer Luft beobachtet“.* Magistrat Graz, 35 S.
- LAZAR, R., 1991: *Stadtklimaanalyse Graz und ihre Bedeutung für die Stadtplanung.* Arb. Geograph. Institut Graz, Bd. 30, S. 141–170.
- LAZAR, R., BADER, T., BRAUN, N., KUNCIC, E., & SULZER, W., 1993: *Geländeklimatologische Untersuchungen in der Steiermark.* *Wetter und Leben*, 3 (93), 45–51.
- LAZAR, R., BUCHROITHNER, M. F., & KAUFMANN, V., 1994: *Stadtklimaanalyse Graz.* – Magistrat Graz, Stadtplanungsamt, Graz, 163 S.
- LAZAR, R., & PODESSER, A., 1999: *An urban climate analysis of Graz and its significance for the planning in the lateral valleys east of Graz.* *Atmospheric Environment*, 33, 4195–4209
- LAZAR, R., & SULZER, W., 2006: *Thermalbefliegung 2004 Graz. Endbericht und Ergebnisdokumentation zur Thermalbefliegung 2004 Graz.* – Studie im Auftrag des Magistrats Graz, Graz, 144 S.
- MOSKOPP, E., LEGAT, K., 2013: *Projektbericht Thermalflug Graz 2011.* Unveröffentlichter Projektbericht, Imst, 4 S.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E., and MORAN, E., 2004: *Change detection techniques.* In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, pp. 2365–2401.
- RICHTER, R., 2006: *Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery.* – ATCOR-4 User Guide, Version 4.1, 107 S., http://www.rese.ch/pdf/atcor4_manual.pdf.
- SCHNEIDER, S., & GRUBER, M., o. J.: *Radiometric quality of Ultracam – X images.* In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, Beijing 2008, pp. 539–544.

- STOCK, P., et al., 1986: *Klimaanalyse Stadt Dortmund*. Essen, 39 S.
- SULZER, W., 2002: *Climatological Research and its possible contribution to re-gional Planning in an Alpine Environment*. In: Steininger, K. W., und Weck-Hannemann, H., (Hrsg.): *Global Environmental Change in Alpine Regions – Recognition, Impact, Adaption and Mitigation*. Edward Elgar Publishing limited, Cheltenham, 150–160.
- SULZER, W., 2002: *Die Eignung von LANDSAT-TM Thermal-Nachtaufnahmen bei der Erstellung von Klimaeignungskarten*. In: *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung* 38, 255–262.
- SULZER, W., & EICHBERGER, St., 2005: *Urban development Graz – A time series analysis with historical aerial photographs*. GGRS – 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days – Environmental Studies – Göttingen, 07.–08.10.2004, Göttinger Geographische Abhandlungen, Heft 113, S. 63–70.
- SULZER, W., & KERN, K., 2008: *High resolution airborne scanner data for multitemporal sealing maps of Graz – and their applicability in town planning*. *Remote Sensing – New Challenges of High Resolution*. EARSeL Joint Workshop Bochum, March 5–7, 2008. Selbstverlag des Geographischen Instituts für Geographie der Ruhr-Universität Bochum. S. 265–274.
- SULZER, W., KERN, K., & EICHBERGER, St., 2008: *Urban change extraction from aerial photographs and multispectral scanner – an applied study from Graz/Austria*. *Remote Sensing for a Changing Europe*, Proceedings of the 28th Symposium of European Association of Remote Sensing Laboratories, Istanbul, Turkey, 2.–5. June 2008, 551–557.
- SULZER, W., WURM, M., & LAZAR, R., 2009: *The use of multitemporal airborne DAEDALUS ATM data for climatological investigations in Graz/Austria*. Abstract Book of the 29th EARSeL Symposium „Imagine Europe“, 15–18. June 2009, Chania, Griechenland.
- SULZER, W., & KERN, K., 2009: *Derivation of multi-temporal soil sealing maps using high resolution Airborne Thematic Mapper (ATM) imagery and an examination of their usefulness in town planning*. EARSeL eProceedings, 8 (1), 1–10.
- SULZER, W., LAZAR, R., & WURM, M., 2011: *Der Einsatz von multitemporalen DAEDALUS ATM Aufnahmen für stadtklimatologische Analysen in Graz/Österreich*. Tagungsband/Abstract des 30. Jahrestreffens des Arbeitskreises Klima der Deutschen Gesellschaft für Geographie, 2 S.
- SULZER, W., MUICK, M., & GANSTER, W., 2013: *Objektorientierte Landbedeckungsklassifikation von Graz (Österreich) unter besonderer Berücksichtigung der dritten Dimension*. In: Manfred SCHRENK, Vasily V. POPOVICH, Peter ZEILE, Pietro ELISEI (Ed.), 2013: *Proceedings REAL CORP 2013*, 651–660.
- TABI-1800, 2012: *Product Information*. <http://www.itres.com/products/imagers/tabi1800/> (Letzter Zugriff: 21.05.2012).
- VOOGT, J. A., OKE, T. R., 2003: *Thermal remote sensing of urban climates*. – *Remote Sensing of Environment* 86, 370–384.

Diplom- und Masterarbeiten:

- BÖHM, R., 2013: *PM 10 Beitrag durch Fernverfrachtung im steirischen Alpenvorland*. – Unveröffentlichte Masterarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 183 S.
- EICHBERGER, S., 2002: *Stadtentwicklung Graz: Eine Zeitreihenanalyse mit historischen Luftbildaten*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 169 S.
- FALINSKI, Th., 2004: *Analyse der Temperatur- und Windverhältnisse im Raum Graz*. Diplomarbeit am Institut für Geographie, 54 S.
- FRÜHWIRTH, G., 1995. *Analyse des Murtalwindsystems zwischen Bruck und Wildon*, Diplomarbeit Karl-Franzens-Universität Graz, 171 S.
- GRAFL, J., 2010: *Monitoring der Luftgüte im Grazer Becken mit Schwerpunkt Feinstaub*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 130 S.
- GUZELNIK, I., 2006: *Die Ausbreitungsbedingungen im Südwesten von Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 68 S.
- HUBENY, K., 2011: *Das Vertikalprofil für Temperaturen in Graz im Vergleich mit Fesselballonsondierungen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 80 S.
- KERN, K., 2007: *Objektorientierte Klassifikation von Scannerdaten am Beispiel der Thermalbefliegung 2004 Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 86 S.
- KRAACK, L., 2004: *Die Lokalwindzirkulation in Graz, unter besonderer Berücksichtigung der „Flurwinde“*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 117 S.
- LAZAR, W., 1994: *Ergebnisse von Fesselballonsondenaufstiegen in Hinblick auf Schadstoffausbreitung im Raum Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 121 S.
- MUICK, M., 2011: *Objektorientierte Landbedeckungsklassifikation unter besonderer Berücksichtigung der dritten Dimension*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 86 S.
- NIEMETZ, N., 2007: *Die kritischen Wetterlagen in Graz und ihre Bedeutung für die Schadstoffbelastung*, Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, 158 S.
- PAFFINGER, E., 2012. *Stadtökologische Untersuchungen im Westen von Graz im Zuge der Planung eines neuen Stadtteils*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 149 S.
- POSTORFER, M., 2000: *Industrieschnee am Beispiel Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 73 S.
- RAFELSBERGER, S., 1999, *Tagesgänge der Konzentration ausgewählter Luftschadstoffe in Abhängigkeit von bestimmten Wetterlagen im Raum Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 116 S.
- REICH, C., 1994: *Fernerkundung und Stadtklimaanalysen unter besonderer Berücksichtigung von Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 74 S.
- REICH, C., 1999: *Ausgewählte Methoden der Fernerkundung und deren Anwendung auf Stadtklimaanalysen*. – Unveröffentlichte Dissertation, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 214 S.

SALENTINIG, A., 2012: *Remote sensing change detection of urban environments with very high resolution Ultracam data*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 112 S.

SCHÖN, K., 2013: *Verkehrslärm – Auswirkungen und Lärmschutzmaßnahmen in Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 123 S.

SENGL, M., 2008: *Die Feinstaubproblematik in Graz und deren regionale Unterschiede*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 71 S.

TRIEBNIG-LÖFFLER, C., 1992: *Analyse einer LANDSAT 5-Thermalaufnahme der Mittelsteiermark (Österreich)*. Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, 160 S.

WURM, M., 2007: *Erstellung von Strahlungstemperaturkarten am Beispiel der Thermalbefliegung 2004 Graz*. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 96 S.

AO.UNIV.-PROF. DR.PHIL. REINHOLD LAZAR**Karl-Franzens-Universität Graz/Institut für Geografie und Raumforschung**

Schon während seines Studiums – Geographie und Mathematik – fokussierte er sich auf angewandte Klimatologie und setzte dies dann auch mit dem Dissertationsthema über das Lokalklima in der Südwest-Steiermark fort. Ab dem Jahre 1981 rückte das Stadtklima von Graz mehr und mehr in den Schwerpunkt seines Forschungsinteresses. So wurden die ersten Sonderstationen und Messfahrten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Tagung – „10 Jahre Grazer Luft beobachtet“ – im Jahre 1982 präsentiert. Der erste große Höhepunkt der Stadtklimaforschung in Graz erfolgte dann 1986 mit der Thermalbefliegung. Erstmals wurden auf der Basis der Ergebnisse die Hinweise aus klimatologisch-lufthygienischer Sicht im Stadtentwicklungskonzept (STEK) sowie im Flächenwidmungsplan berücksichtigt. Im Jahre 1990 habilitierte er sich für den Bereich „Physische Geographie“. In den nachfolgenden Jahren verlagerte sich vermehrt der Schwerpunkt der Aktivitäten auch auf andere Länder und Städte. In den Jahren 1997 bis 2008 war dabei vor allem Südamerika stark im Fokus. So wurden z. B. Forschungen zum Stadtklima und Luftgüte in den Städten La Paz und Cochabamba (Bolivien) sowie Bucaramanga in Kolumbien durchgeführt. Im Jahre 2002 wurde in Laibach/Ljubljana, in Kooperation mit dem dortigen Stadtplanungsamt eine Stadtklimaanalyse durchgeführt. Neben der Stadtklimaforschung fokussierte er sich auch auf geländeklimatische Untersuchungen mit dem Schwerpunkt auf die Erfassung von Schadstoffausbreitungsbedingungen. Dies nicht zuletzt deshalb, um die mögliche Immissionsbeeinflussung durch größere Emittenten wie z. B. Kraftwerke, abzuklären. Unabhängig von diesen Aktivitäten initiierte er ab dem Jahre 1998 eine zusätzliche Forschungsrichtung, durch die Errichtung von Klimastationen auf extrem hochgelegenen Berggipfeln wurde eine neue Form der Klimabeobachtung ermöglicht bzw. eingerichtet. Dieses laufende Hochgebirgsklimamonitoring (höchste Klimastation am Aconcagua auf 6950 m) liefert hochwertige Daten und dient primär dazu, um Trends im Zuge des Klimawandels auch in diesen Höhenlagen zu erfassen.

