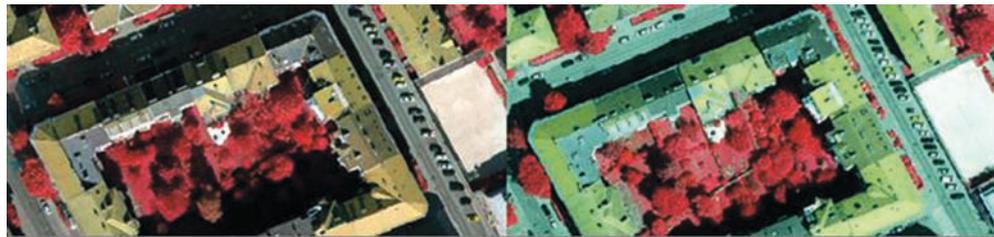


### 2.2.2.2 VERSIEGELUNG ULTRACAM-X 2011

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?

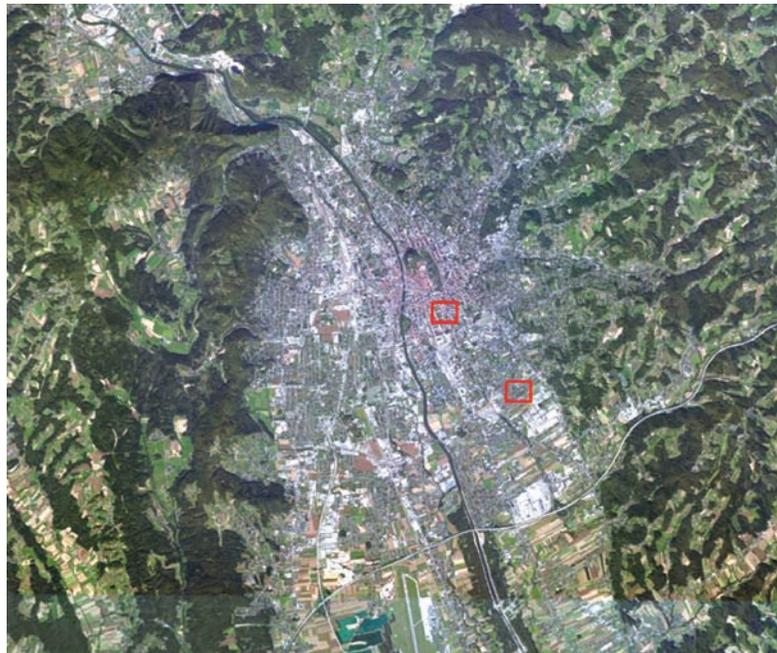
---

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 Anbetracht 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.

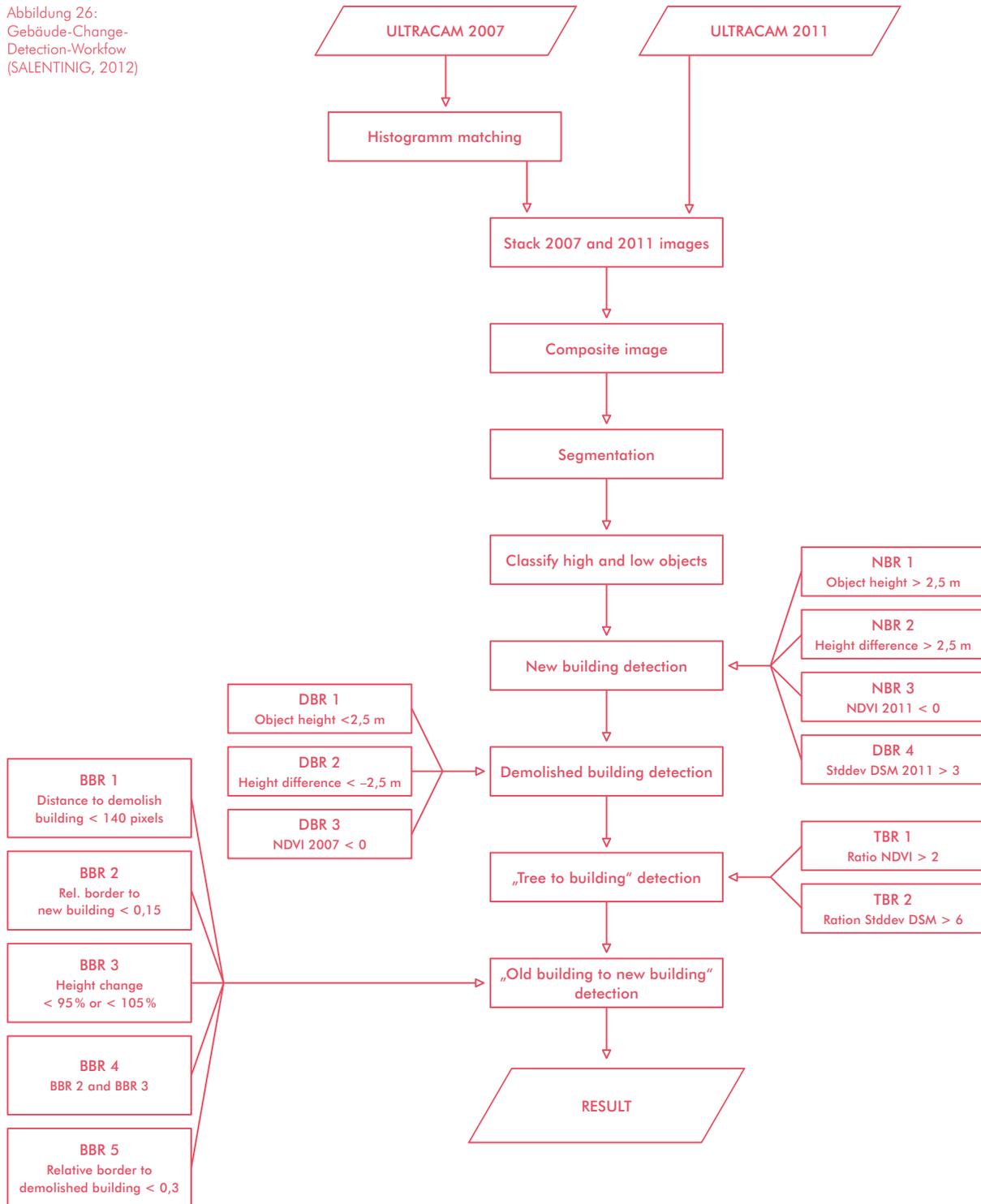
Für die Segmentierung des multitemporalen Datensatzes wurden die CIR-Daten sowie die DSMs beider Aufnahmezeitpunkte miteinbezogen. Somit wurde gewährleistet, dass veränderte Objekte möglichst gut abgegrenzt werden konnten. Tabelle 2 zeigt die Segmentierungsparameter.

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-Workfow  
(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)

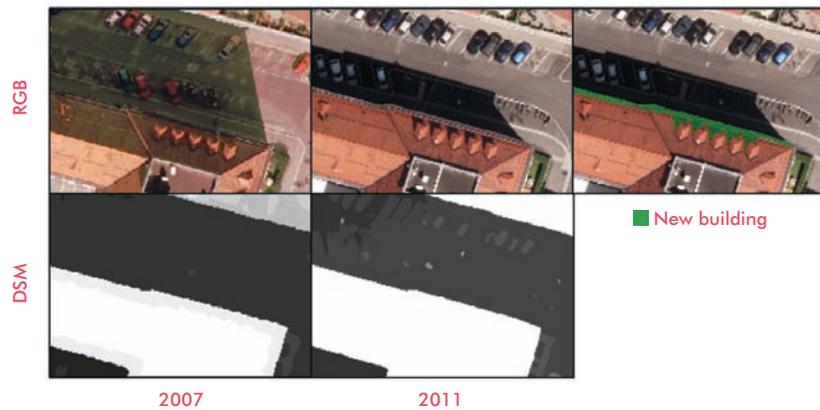


Abbildung 28:  
Falsche  
Klassifikation  
aufgrund VON  
DSM-Unterschieden  
(SALENTINIG,  
2012)



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 Lastwägen oder Autos aufgelöst werden. Lastwägen 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 *nDSMs* 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  $> 2,5$  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

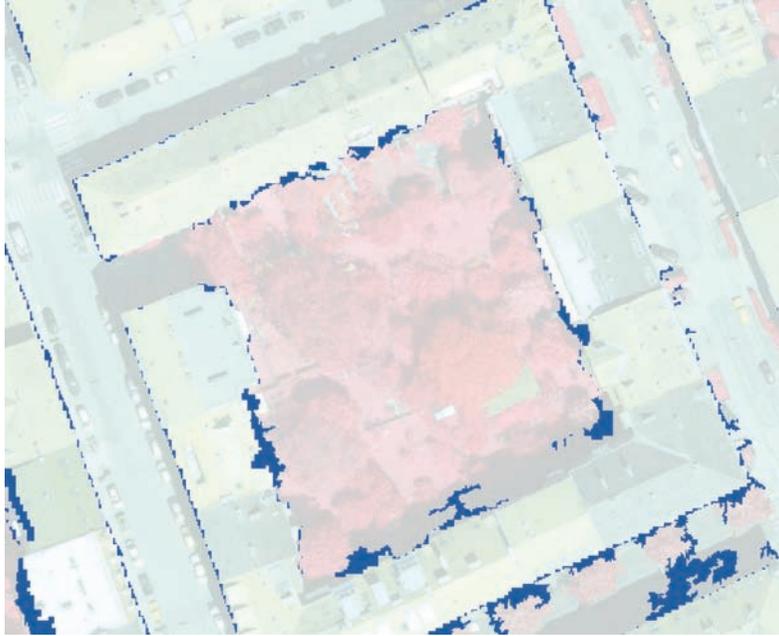


Abbildung 38:  
Ergebnisse der  
Gebäude-Change-  
Detection;  
links: Post Classification  
Comparison,  
rechts: entwickelter  
Algorithmus



**Conclusio:** Urbane Räume verändern sich rasant und im großen Ausmaß. Information über Art und Ort dieser Veränderungen sind sehr wertvoll für verschiedenste stadogeographische 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.

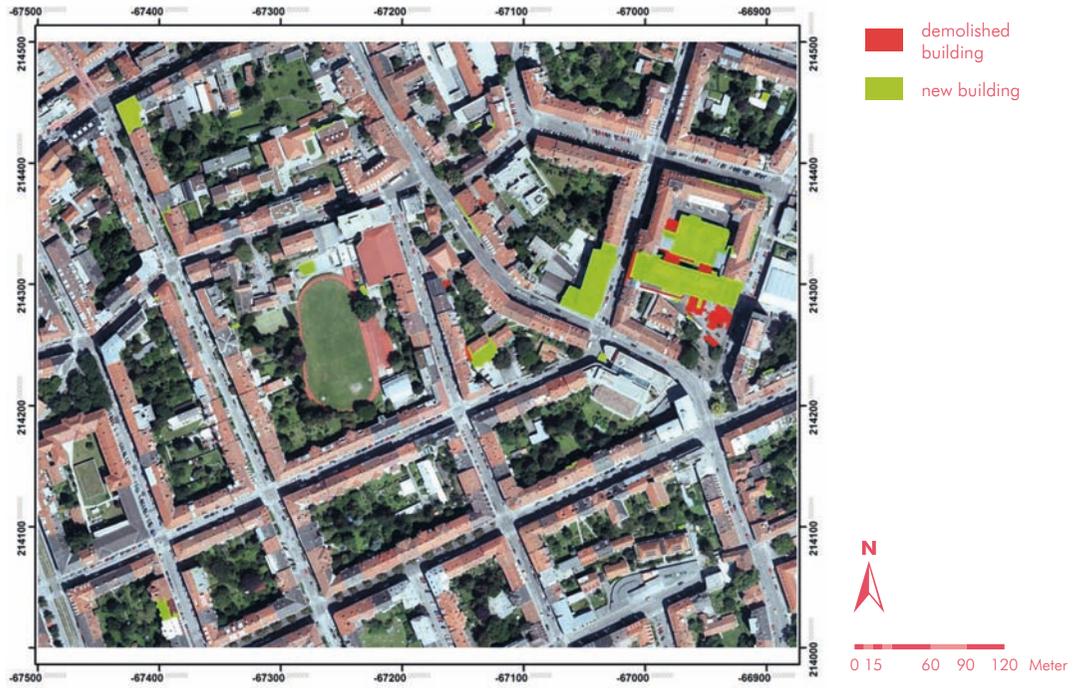
Die zur Verfügung gestandenen UltraCam-X-Daten sind „High End“-Luftbilddaten. Durch die sehr hohe räumliche Auflösung und die Aufnahme sowohl im sichtbaren als auch im nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums des Lichts eignen sie sich hervorragend für die Anwendung für eine *Change Detection* 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 Phänologie-stadien 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-

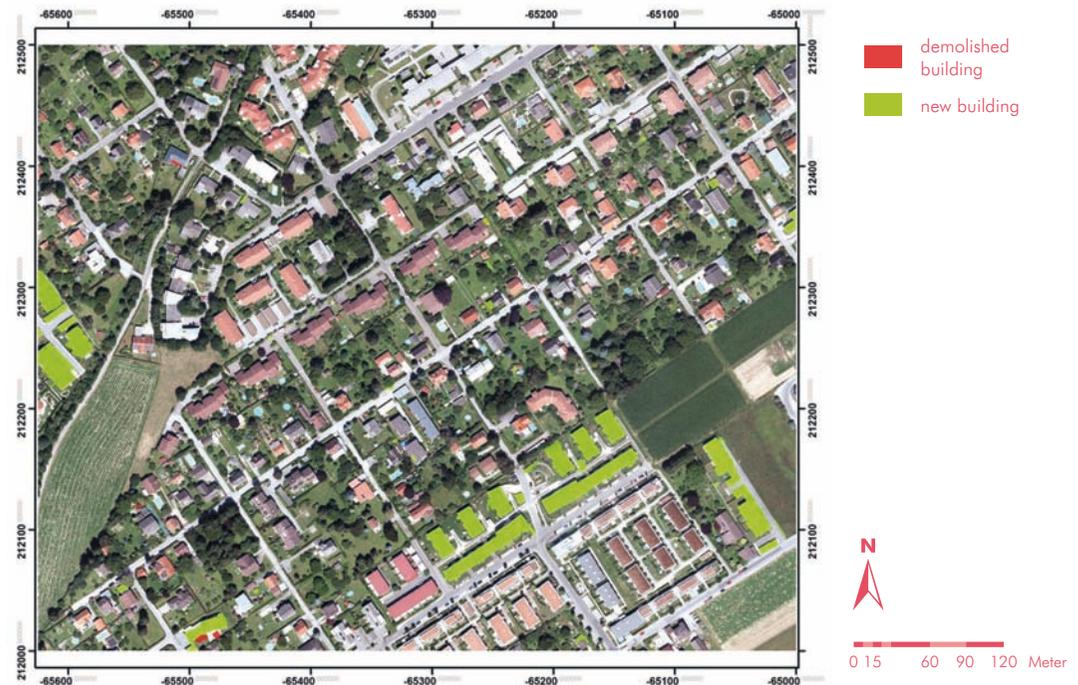
achtet wurde, dass Relativwerte als Schwellwerte für die Parameter integriert wurden. Die für die Testgebiete entwickelte Methode, die sich auf zwei Komponenten einer Hauptkomponententransformation stützt, konnte nicht auf das gesamte Gebiet angewandt werden. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Verwendbarkeit der Hauptkomponentenanalyse stark von der Charakteristik des Untersuchungsgebiets abhängig ist. Das Verhältnis von veränderten und nichtveränderten 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.

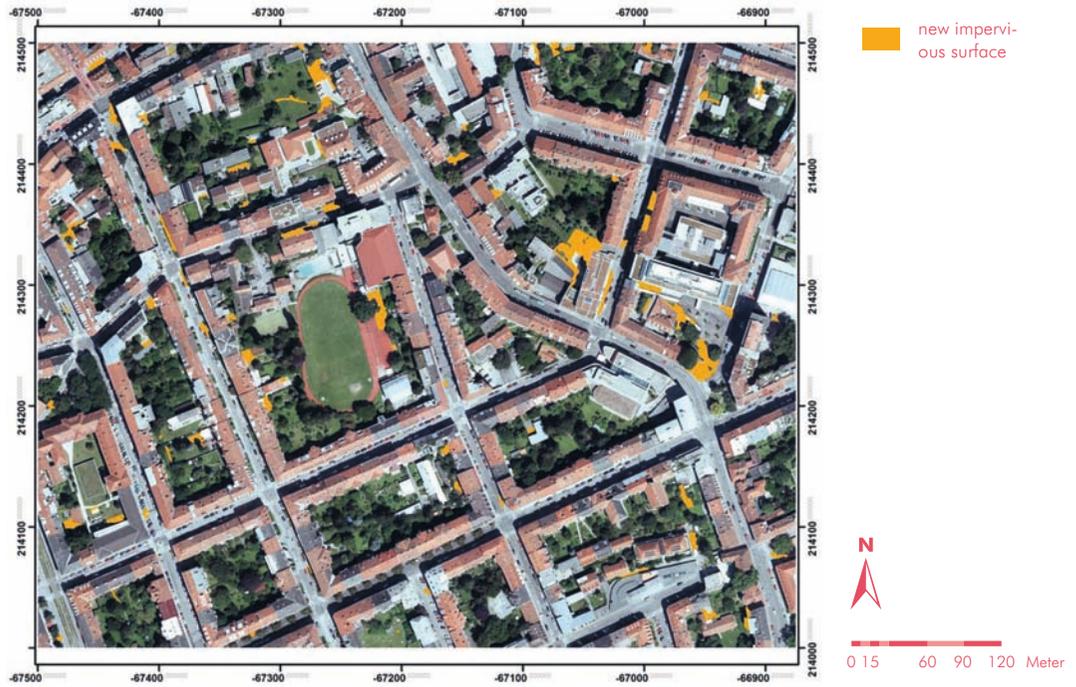
Result of the building change detection – Study area 1



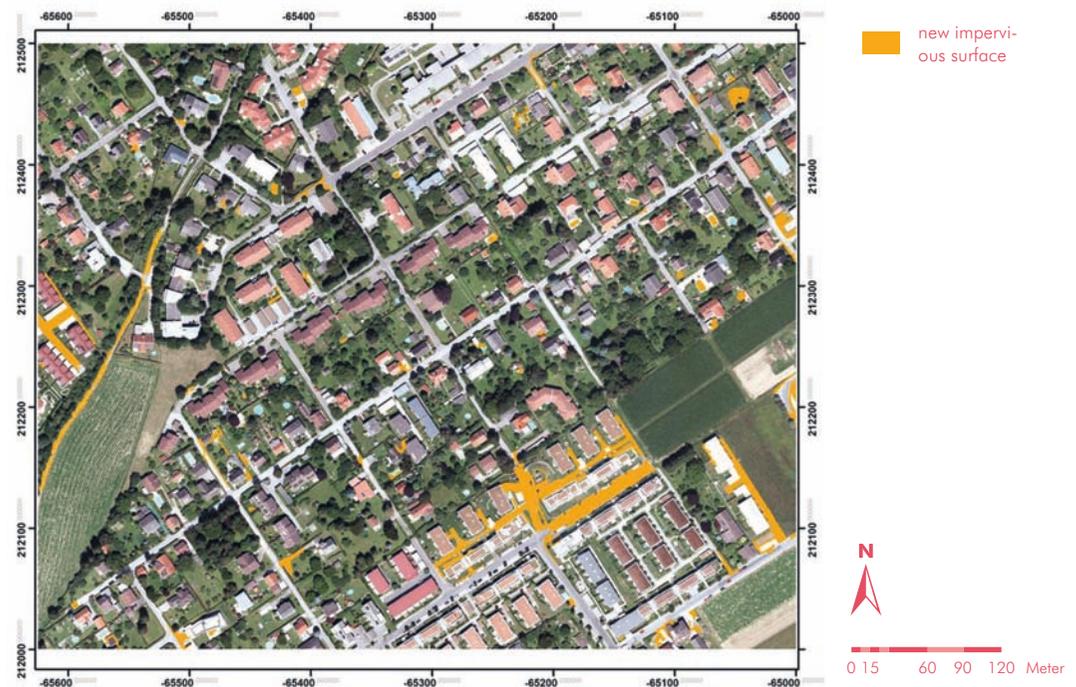
Result of the building change detection – Study area 2



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.

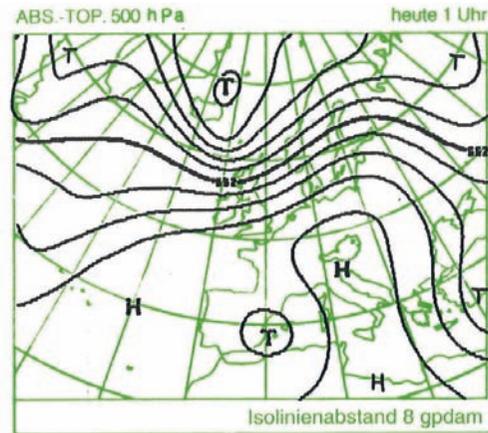
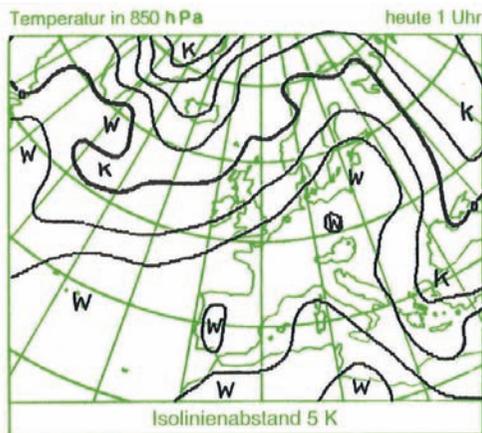
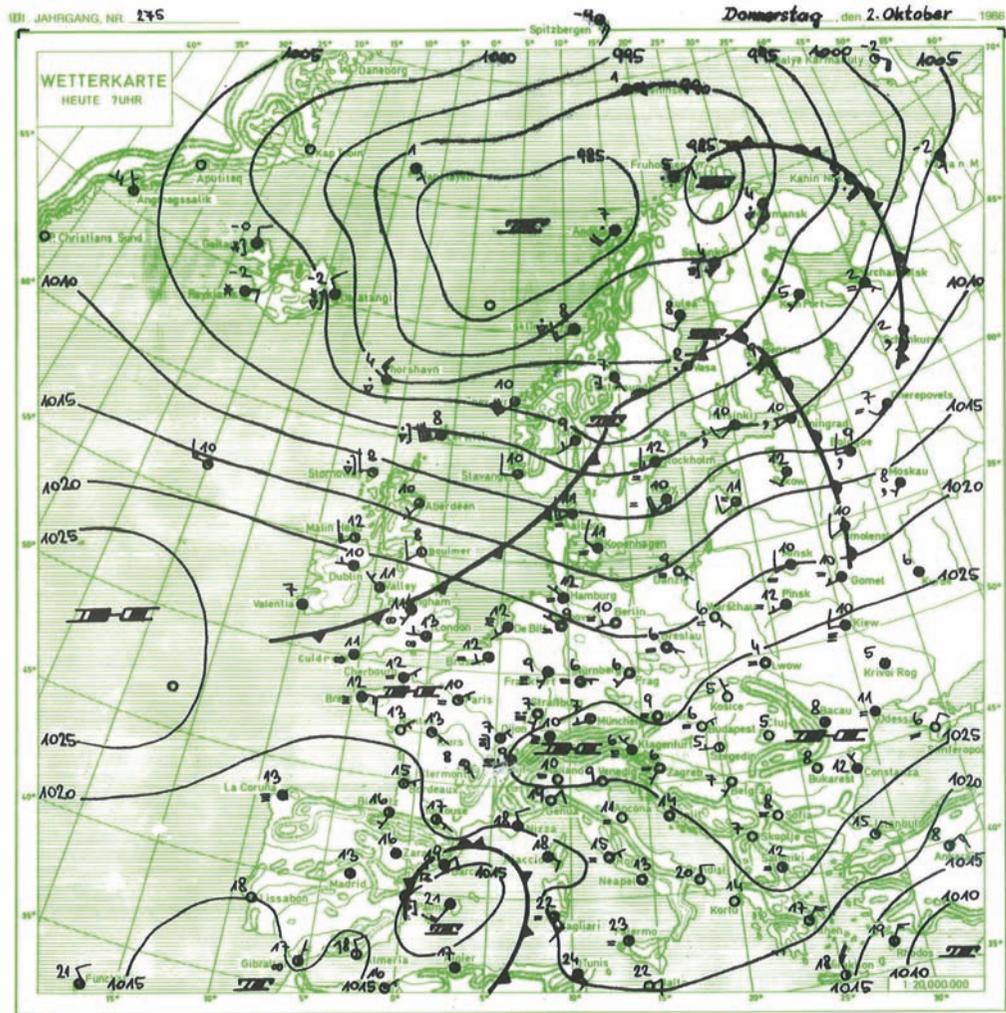
#### 3.1.1 WETTERLAGE ZUM AUFNAHMEZEITPUNKT 1986

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.

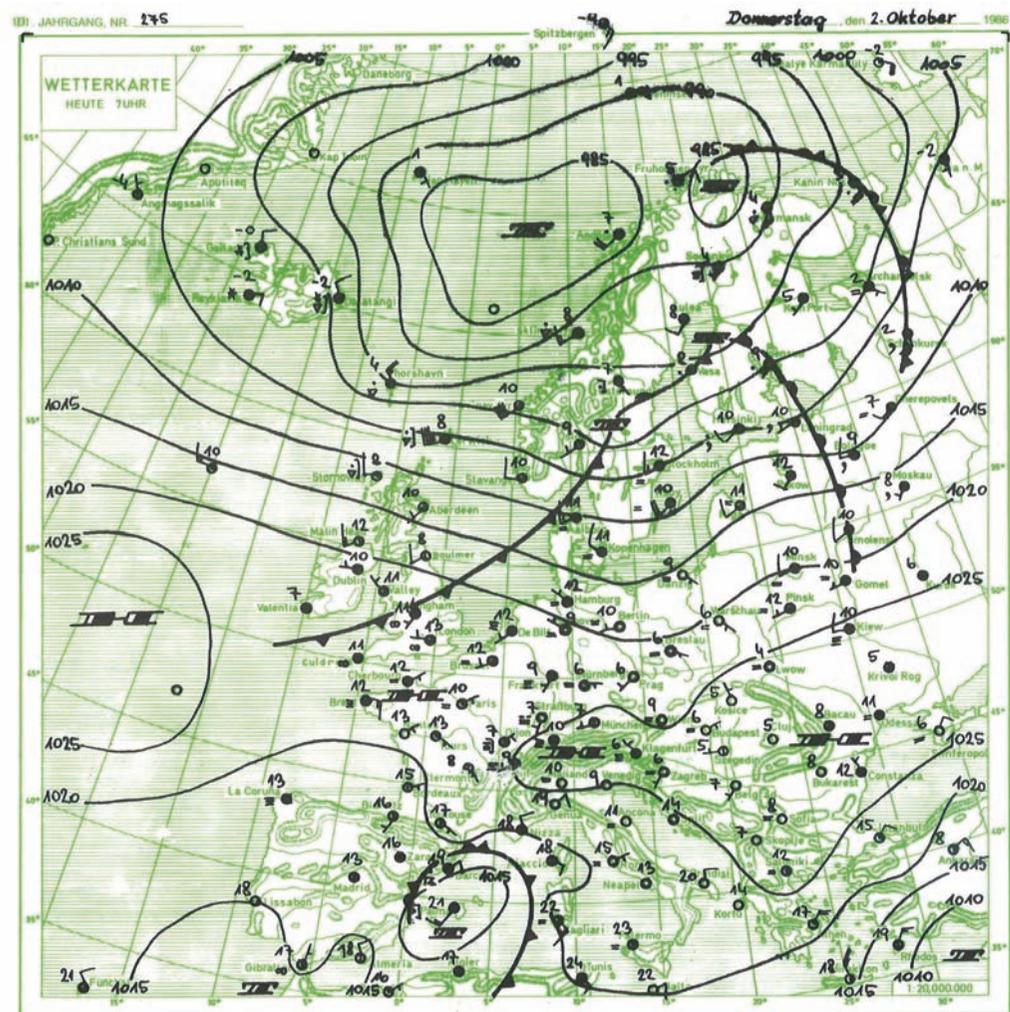
Abbildung 1: Bodenwetterkarte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien – Hohe Warte vom 2. Oktober 1986, 7 Uhr (ergänzt durch die Temperaturverteilung in der 850-hPa-Fläche und die absolute Topographie in der 500-hPa-Fläche für 1 Uhr)

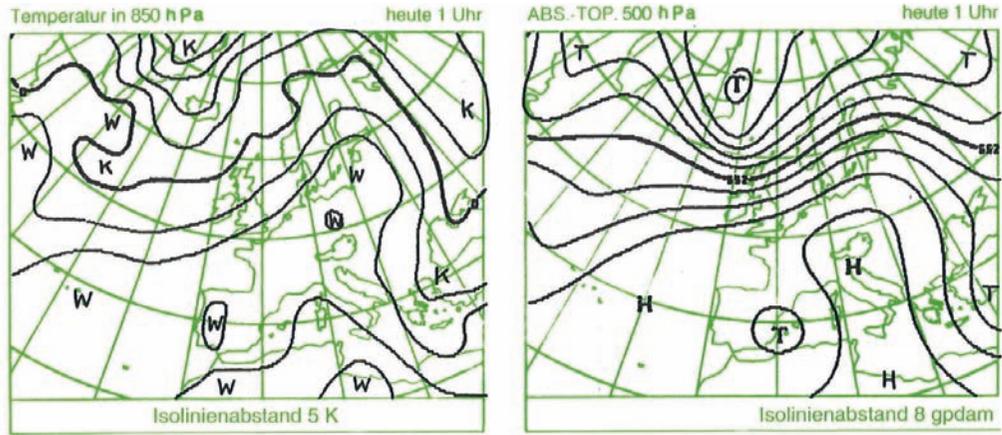


Zusätzlich zu den an den Flugterminen durchgeführten Sondaufstiegen am Thalerhof wurde noch am 3. Oktober am Vormittag ein Messflug mit einem Motorsegler durchgeführt. Der in Abbildung 3 dargestellte vertikale Temperaturverlauf zeigt um 6 Uhr eine kräftige Bodeninversion mit 12 K bis ca. 400 m über Grund (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 Grundschicht dominieren Winde aus südlichen Richtungen (Murtaleinwind mit überlagerter Antirandgebirgswind aus Südost), darüber stößt man wieder auf modifizierte Gradientwinde aus westlichen Richtungen.

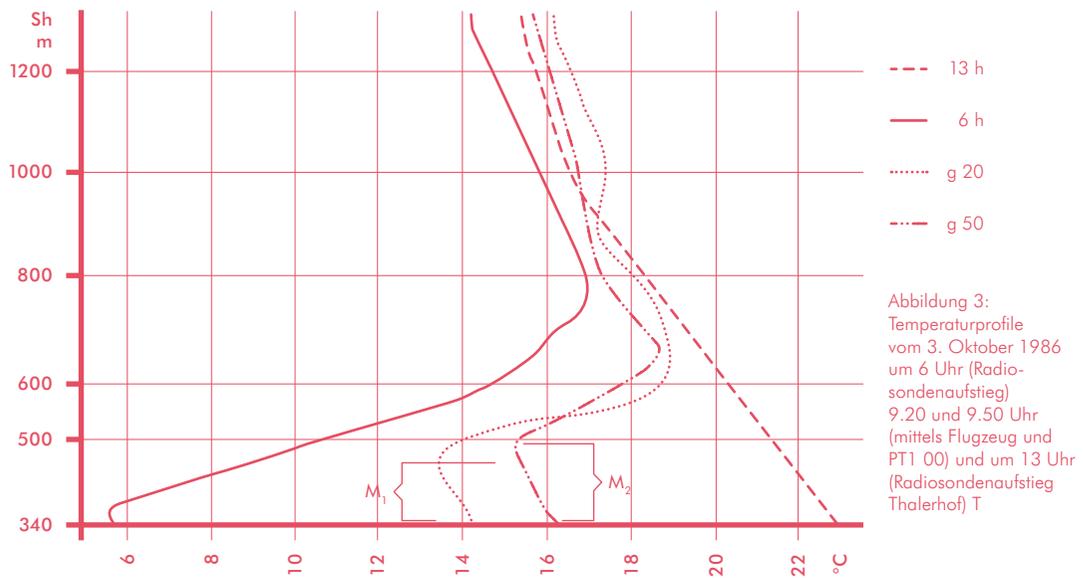
Abbildung 2:  
Bodenwetterkarte der  
Zentralanstalt für  
Meteorologie und  
Geodynamik in Wien-  
Hohe Warte vom 3.  
Oktober 1986, 7 Uhr  
(Zu beachten ist die  
Schwerpunktverlage-  
rung des Bodenhochs  
nach NW)





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 vereinzelt 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.

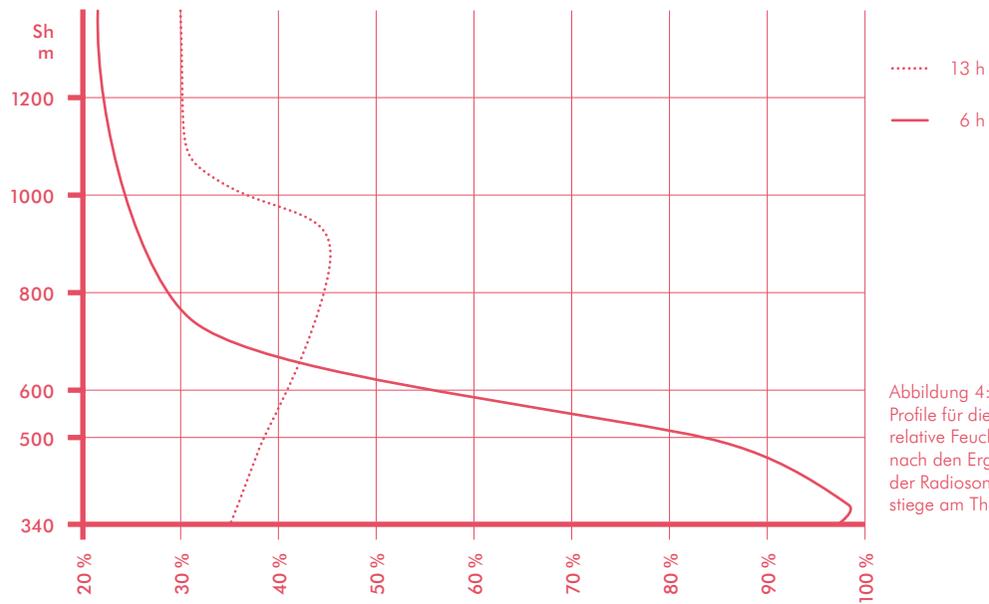


Abbildung 4:  
Profile für die  
relative Feuchte  
nach den Ergebnissen  
der Radiosondenauf-  
stiege am Thalerhof

Die Zunahme der relativen Feuchte innerhalb der Grundsicht 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)

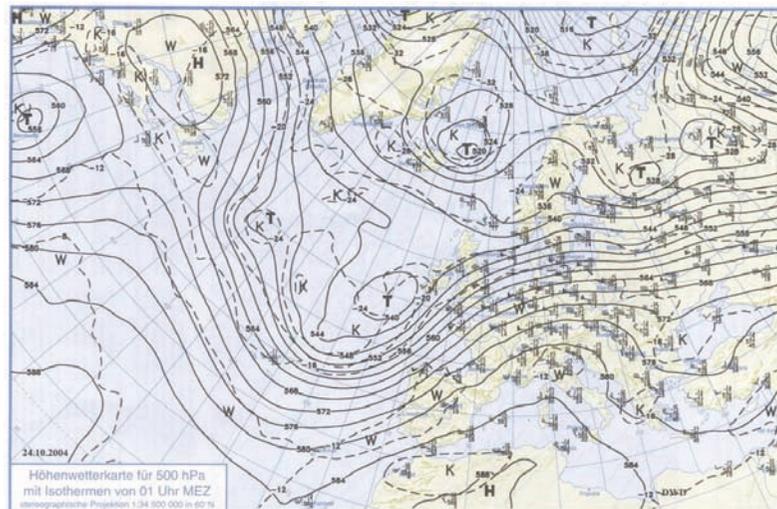
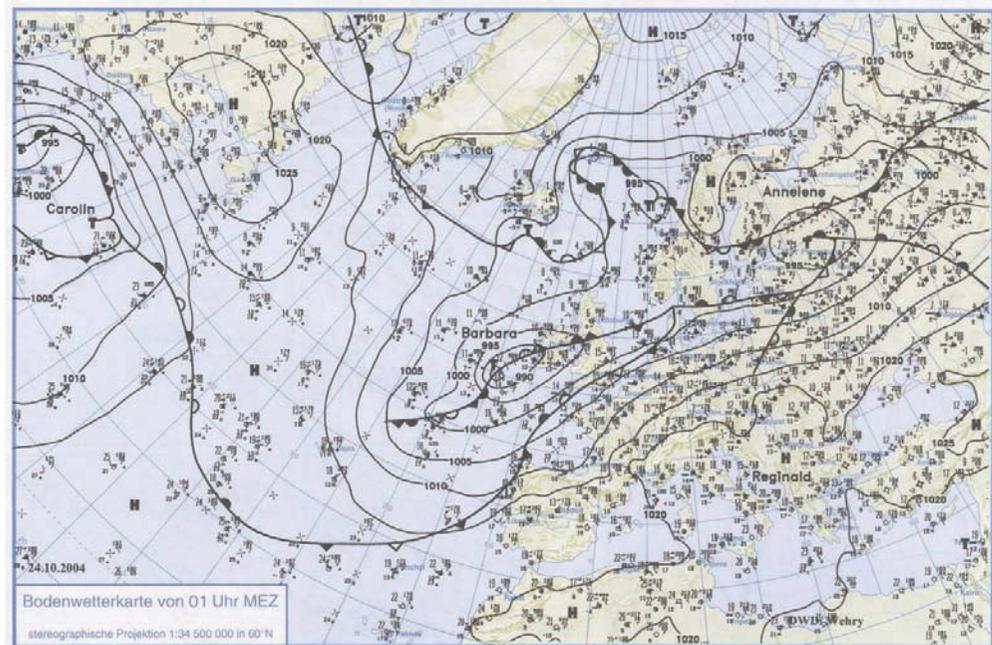


Abbildung 6:  
Bodenwetterkarte  
vom 24.10.2004  
(Quelle: Berliner  
Wetterkarte)



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 Hochnebel 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 Ballonsondierung am  
24.10.2005



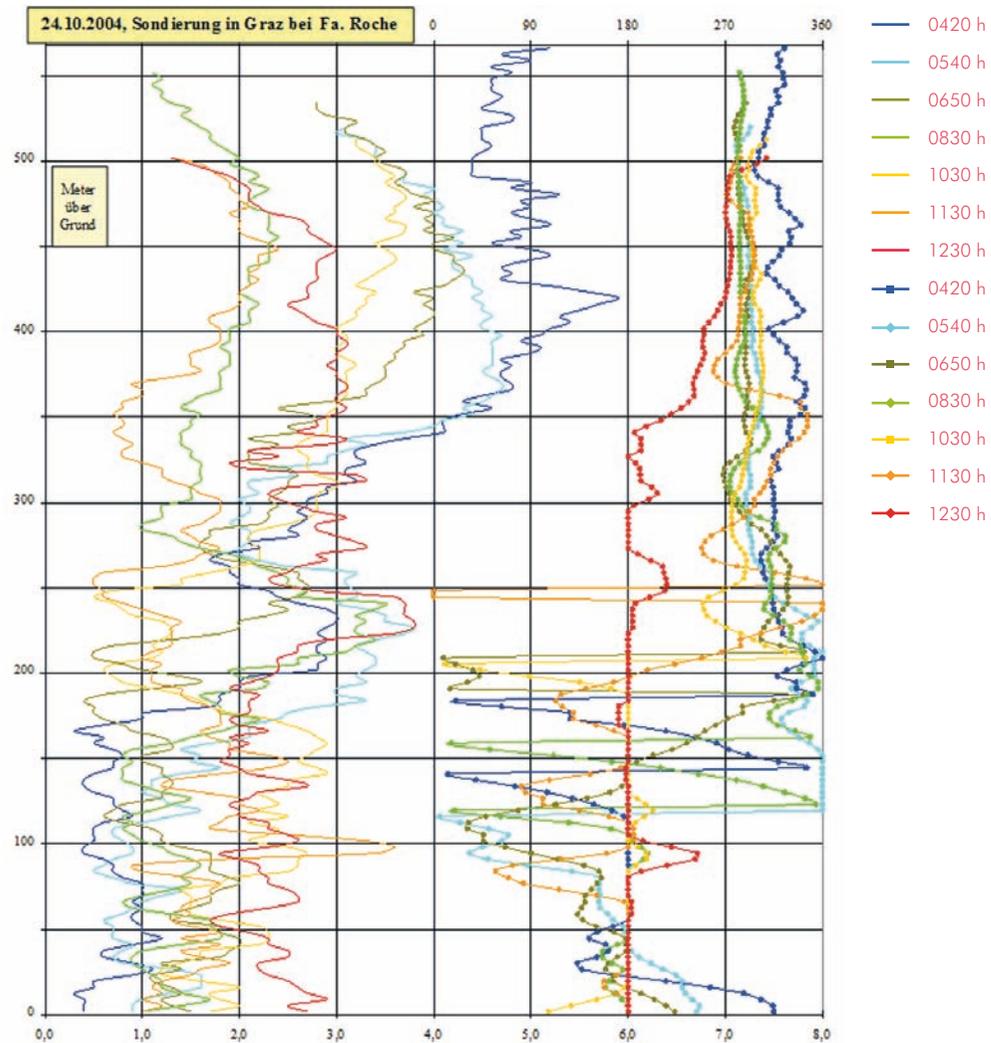
Abbildung 8:  
Ballonsondierung  
mit Eindringen von  
Nebel aus dem Grazer  
Feld (Aufnahme K.  
Hubeny, 08.39 Uhr)



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



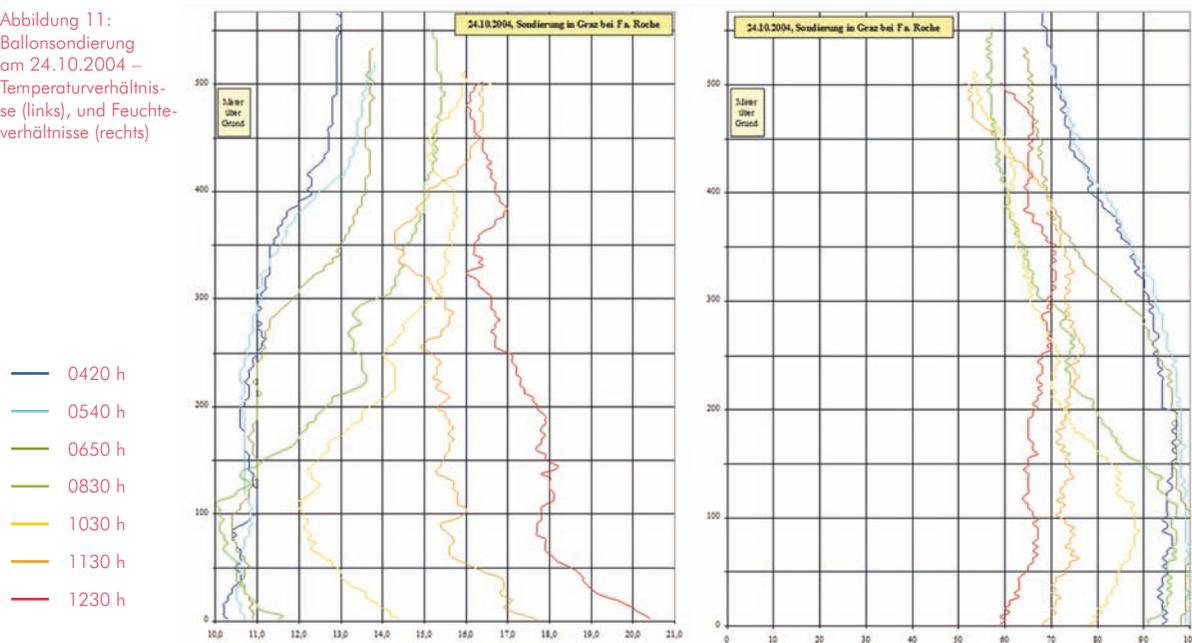
Abbildung 10:  
Ballonsondierung  
am 24.10.2004 –  
Windverhältnisse



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)



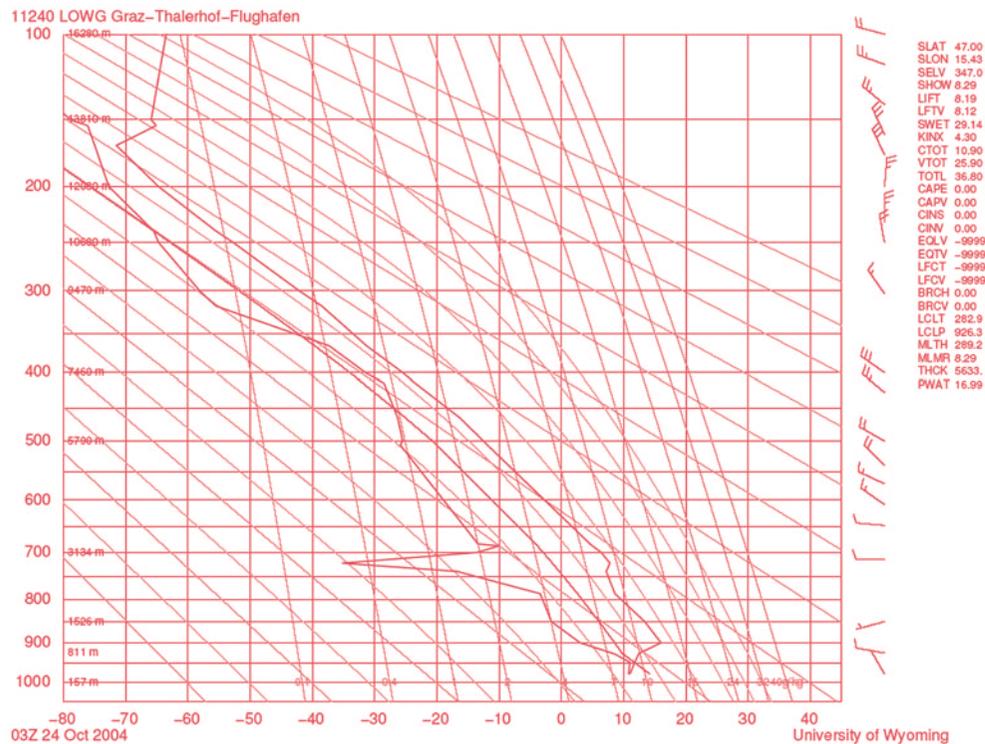
Im weiteren Verlauf setzt mit der Nebelauflösung eine Erwärmung ein und die Inversion wird sukzessive abgebaut, bis schließlich der 12:30-Aufstieg eine nahezu durchgehende Durchmischung zeigt, nur in ca. 320 m ist noch ein Rest einer freien Inversion angedeutet, wobei die Zunahme von 1 K nicht überbewertet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

Abbildung 12:  
Sondenaufstieg von  
24.10.2005 am  
Thalerhof (Quelle:  
ZAMG, Regional-  
stelle Steiermark)



### 3.3 KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN 2011

#### 3.3.1 WETTERLAGE AM 20.12.2011

**Die Wetterlage in Mitteleuropa:** Die Wetterlage ist dadurch charakterisiert, dass in der 500-hPa-Fläche eine ausgeprägte Nordwestströmung herrscht, wobei annähernd eine schwache Trogausbildung erkennbar ist. Im Gegensatz dazu konnte sich in Bodennähe ein gut entwickelter Hochausläufer bis über die Alpen vorschieben und damit auch eine deutliche Wetterbesserung einleiten. Dieser Hochdruckkeil ist auch in der 850-hPa-Analyse schön erkennbar, wobei in der Berliner Wetterkarte (Abbildung 13 u. 14) als Luftmasse eine maritime Arktikluft ausgewiesen ist, was aber südlich des Alpenhauptkammes unter Leeinfluss sicher nur als Polarluft einzustufen ist. Insgesamt kann die Wetterlage als relativ typische und recht häufige Wetterlage angesehen werden. Betrachten wir nun die 13-Uhr-Analyse der Bodenwetterkarte (Abbildung 15) mit dem Detailausschnitt von Mitteleuropa, so ist die Auswirkung des Hochs gut an der geringen bis fehlenden Bewölkung erkennbar. Damit wurde auch der Einsatzleitung „Grünes Licht“ für die Durchführung der Flugkampagne gegeben.

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)

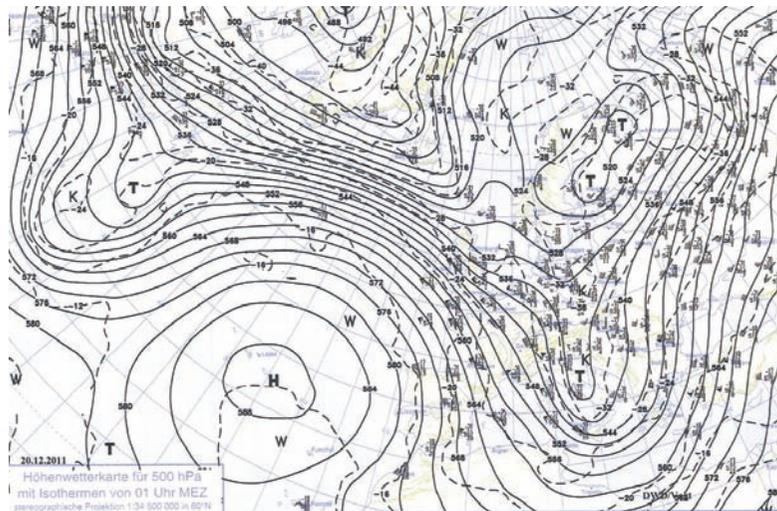


Abbildung 14:  
Berliner Wetterkarte  
mit der Wetterlage  
vom 20.12.2011  
im 850-hPa-Niveau,  
01:00 Uhr (Quelle:  
Berliner Wetterkarte)

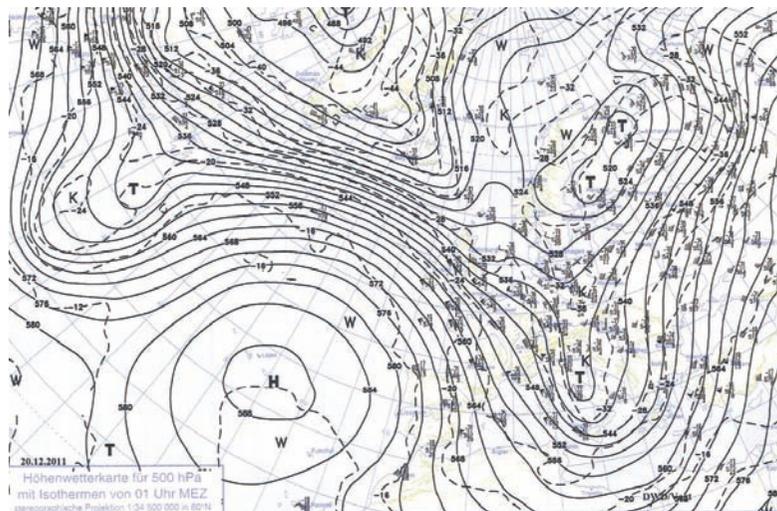
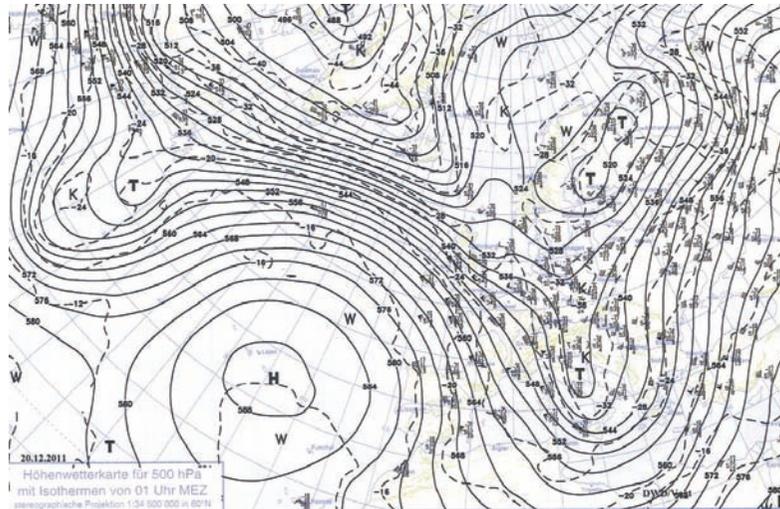


Abbildung 15:  
Berliner Wetterkarte  
mit der Wetterlage  
vom 20.12.2011,  
13:00 Uhr (Quelle:  
Berliner Wetterkarte)



Der Verlauf an den Stationen in Graz: Nach einem klaren Morgen mit Werten von  $-5$  bis  $-7$  °C (in der Innenstadt um  $-2/-3$  °C) erwärmt sich die Luft infolge des niedrigen Sonnenstandes (Wintersonnenwende am 21.12.) nur mäßig bis auf  $2-3$  °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  $3-4$  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 Weinzöttlbrücke beobachten, denn hier werden bei typischer Ausprägung des Murtalauswindes Werte von wenigstens  $2-3$  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 ( $0-0,5$  °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  $2-3$  °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  $4-5$  K, wobei die höchsten Temperaturen schon in den ersten  $100-200$  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)



Abbildung 17: Windgeschwindigkeiten mehrerer Stationen in Graz und Umgebung zum Zeitpunkt der Befliegung am 20.12.2011 (Quelle: Land Steiermark, Eigenbearbeitung)

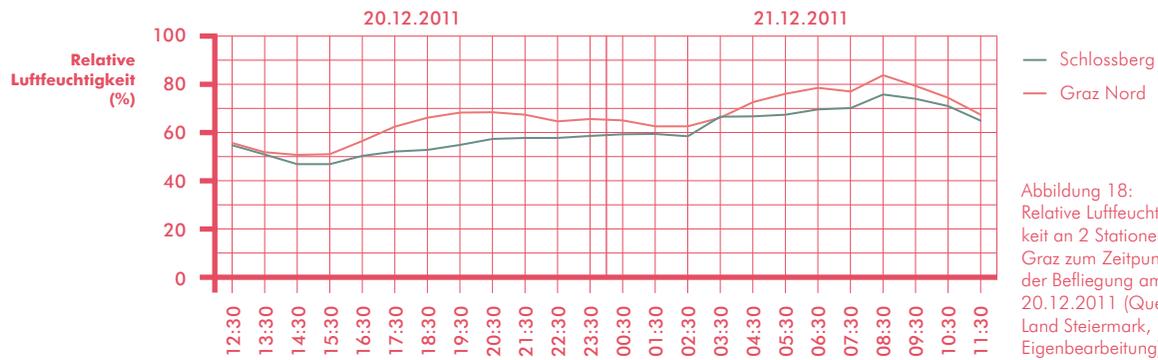


Abbildung 18: Relative Luftfeuchtigkeit an 2 Stationen in Graz zum Zeitpunkt der Befliegung am 20.12.2011 (Quelle: Land Steiermark, Eigenbearbeitung)

### 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 Murtalauswind 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)

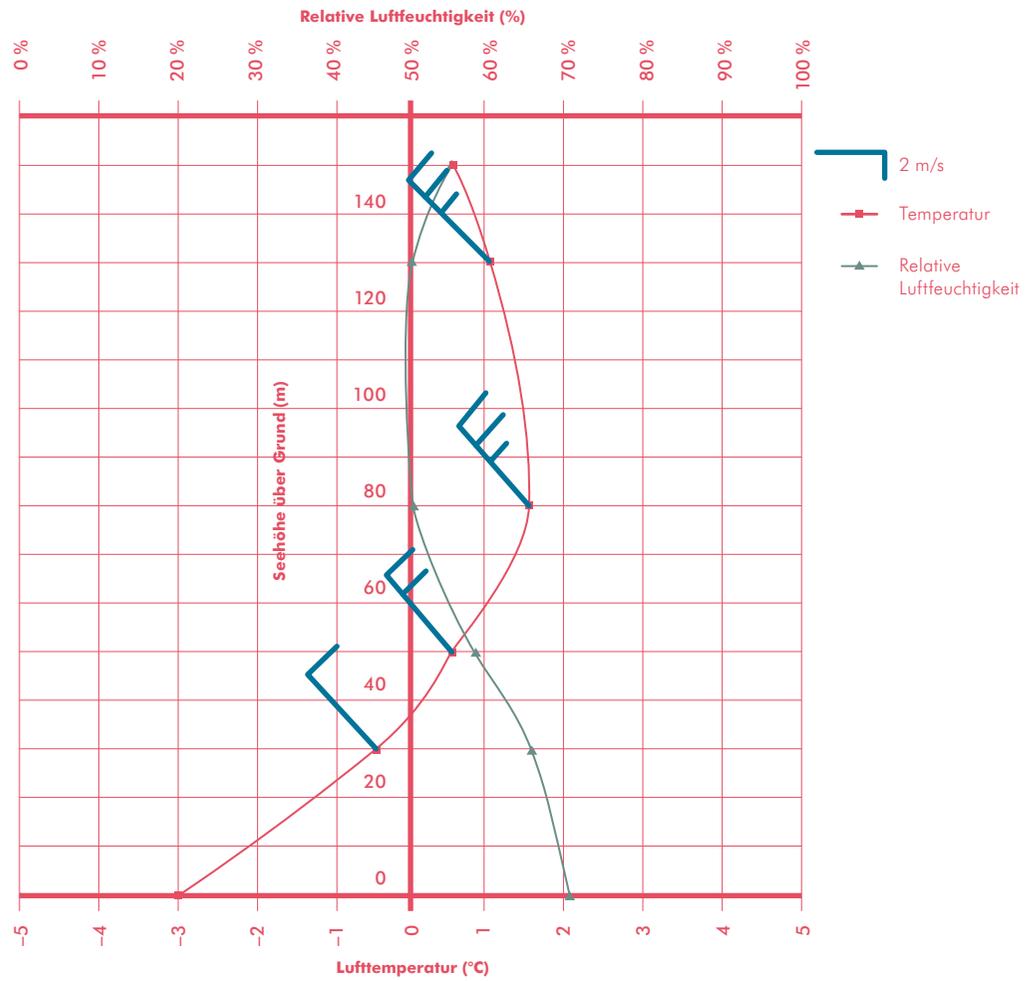


Abbildung 20:  
Ballonsondierung  
im Wasserwerk Nord  
am 20.12.2011  
(Photo: Hubeny)

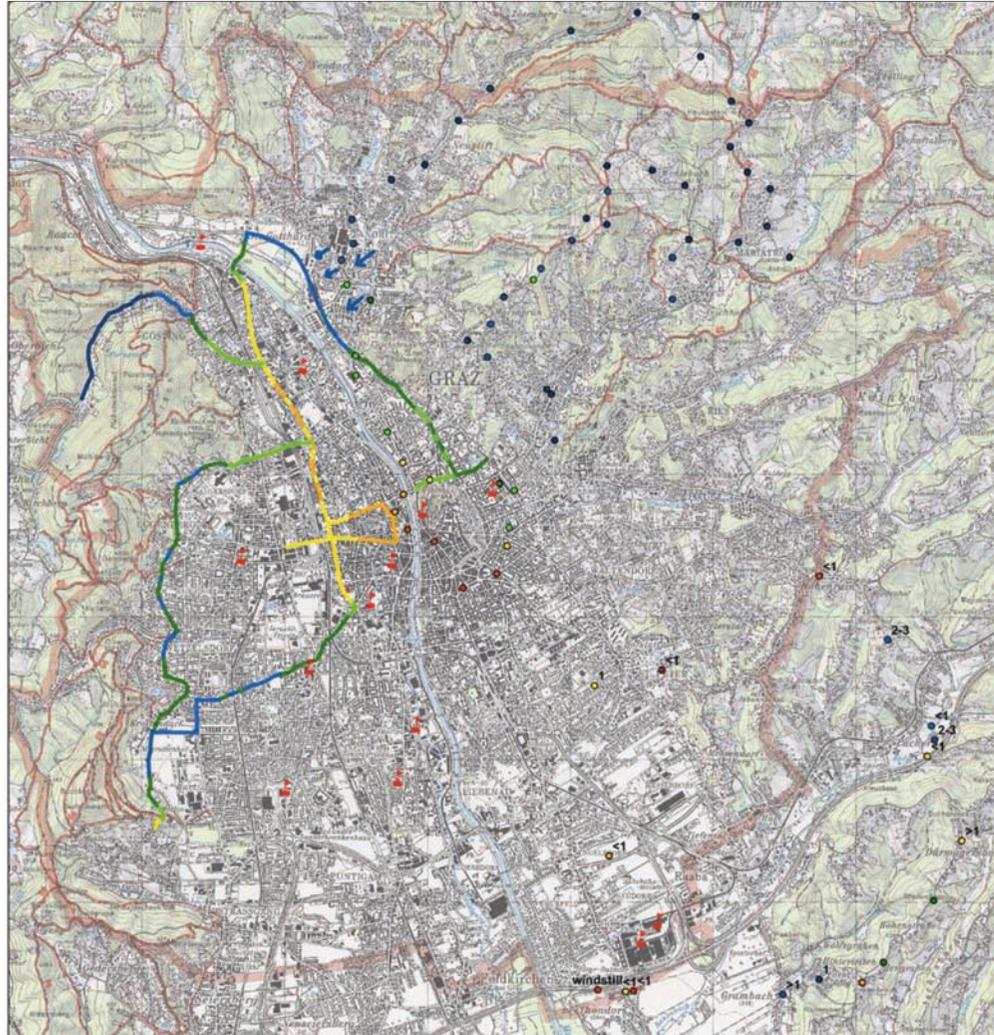


Gesamtbeurteilung der Wetterverhältnisse und der erfassten Daten: Hinsichtlich einer Gesamtbeurteilung der Wetterlage für eine derartige Messkampagne lässt sich folgern, dass die angetroffenen Temperaturunterschiede zwar nicht das Ausmaß jener bei einer Superhochdrucklage wie Anfang Oktober 1986 erreicht 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 Wärmeflüsse 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  $\mu\text{m}$  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 Auswerteprogramme. 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  $3072 \times 3072$  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

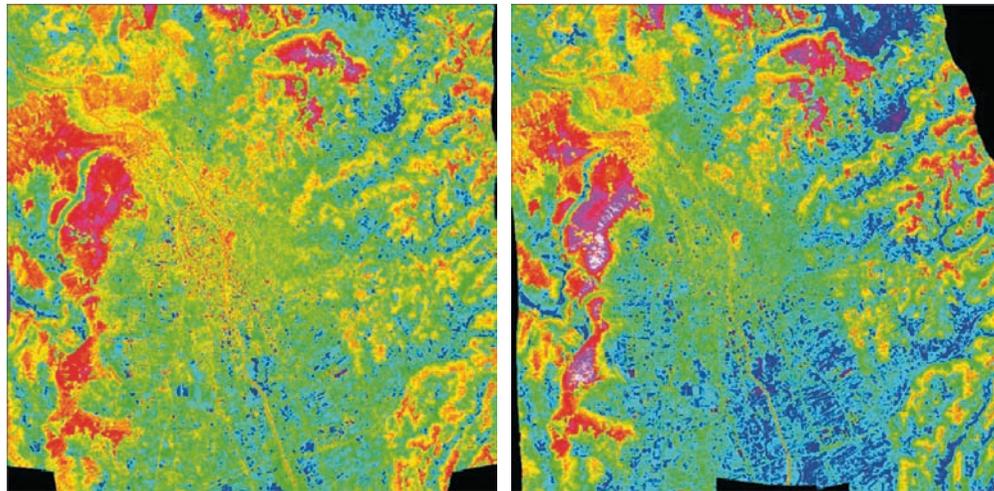
---

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.

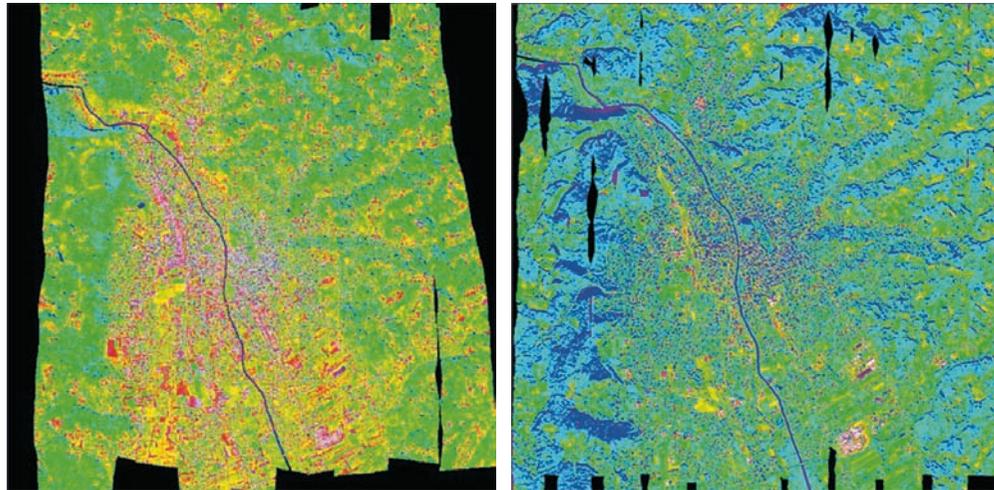
Die Nacht-, Morgen- und Mittagstermine von 1986 wurden farbkodiert dargestellt und anschließend analysiert: Die folgenden Darstellungen wurden als Grundlage für die Überarbeitung der Klimatopkarte und der Karte der planerischen Hinweise verwendet.

Abbildung 1:  
Farkodierte  
Nacht- (links),  
Morgenthermal-  
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



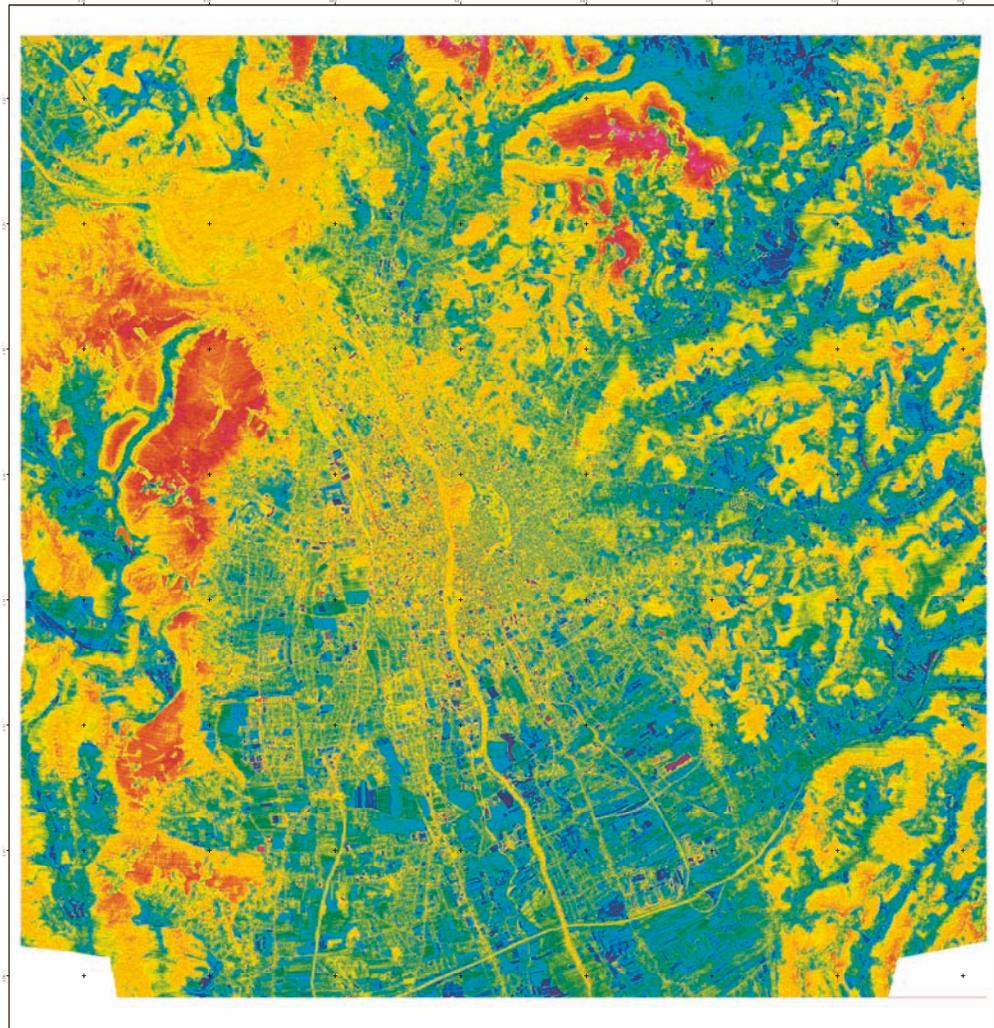
0	0	7	20.4–21.6	14	29.8–31.4
1	< 12.4	8	21.6–22.8	15	31.4–32.9
2	12.4–14.1	9	22.8–23.9	16	32.9–34.6
3	14.1–15.8	10	23.9–25.2	17	34.6–36.5
4	15.8–17.4	11	25.5–26.2	18	36.5–38.9
5	17.4–18.9	12	26.2–28.2	19	38.9>
6	18.9–20.4	13	28.2–29.8		

Für die einzelnen Flüge 1986 (Nacht-Morgen-Mittag) wurden 2004 neue Thermalkarten erstellt und der Datenlieferung beigelegt. 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

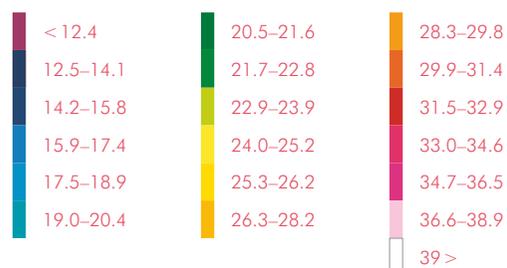
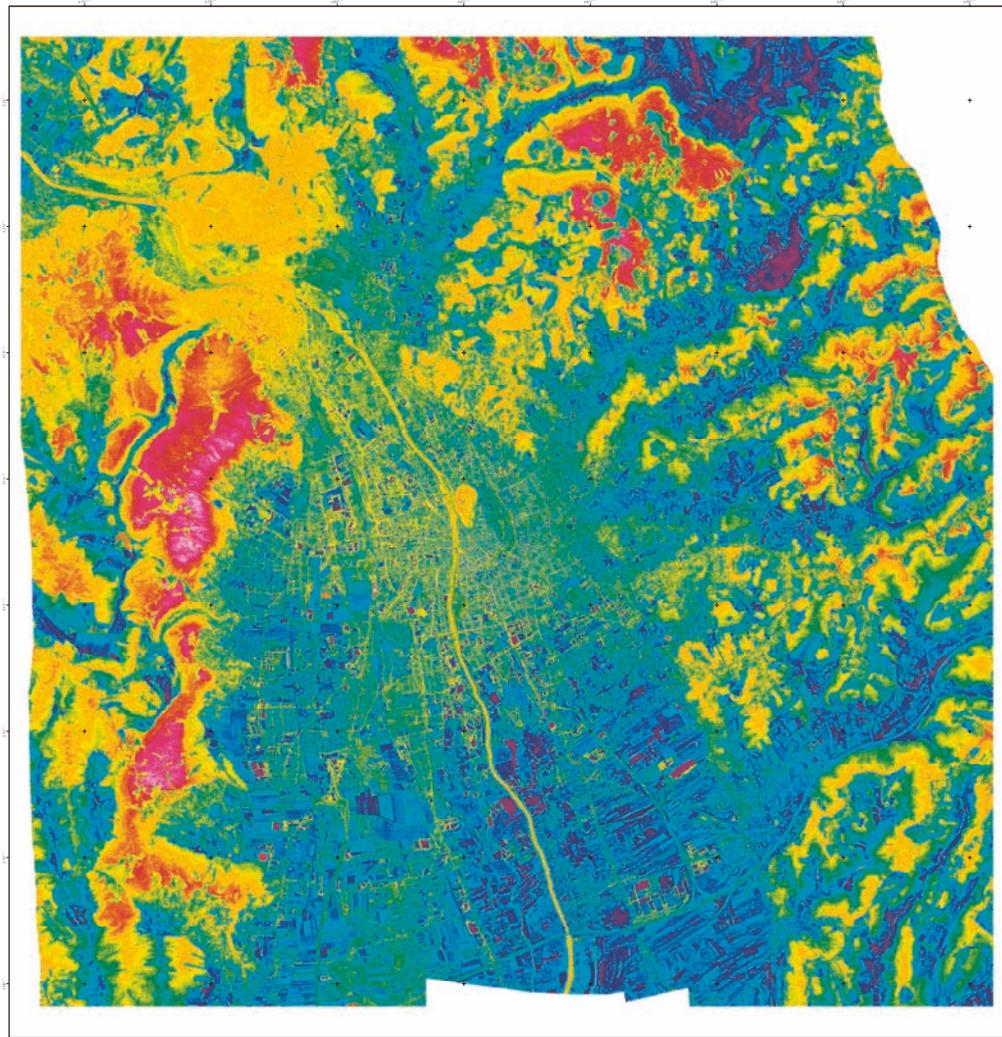


Abbildung 4:  
Strahlungstemperaturkarte der  
Thermalscanner-  
befliegung von 1986  
(Morgenflug)

### Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 3. Oktober 1986  
05:06–06:26 MEZ (Morgenflug)



Temperaturangaben in °C

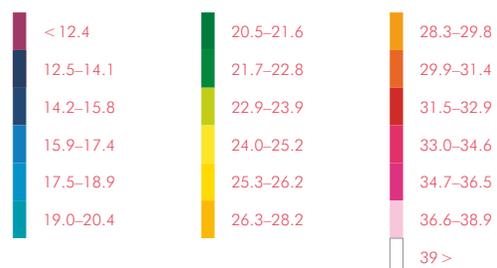
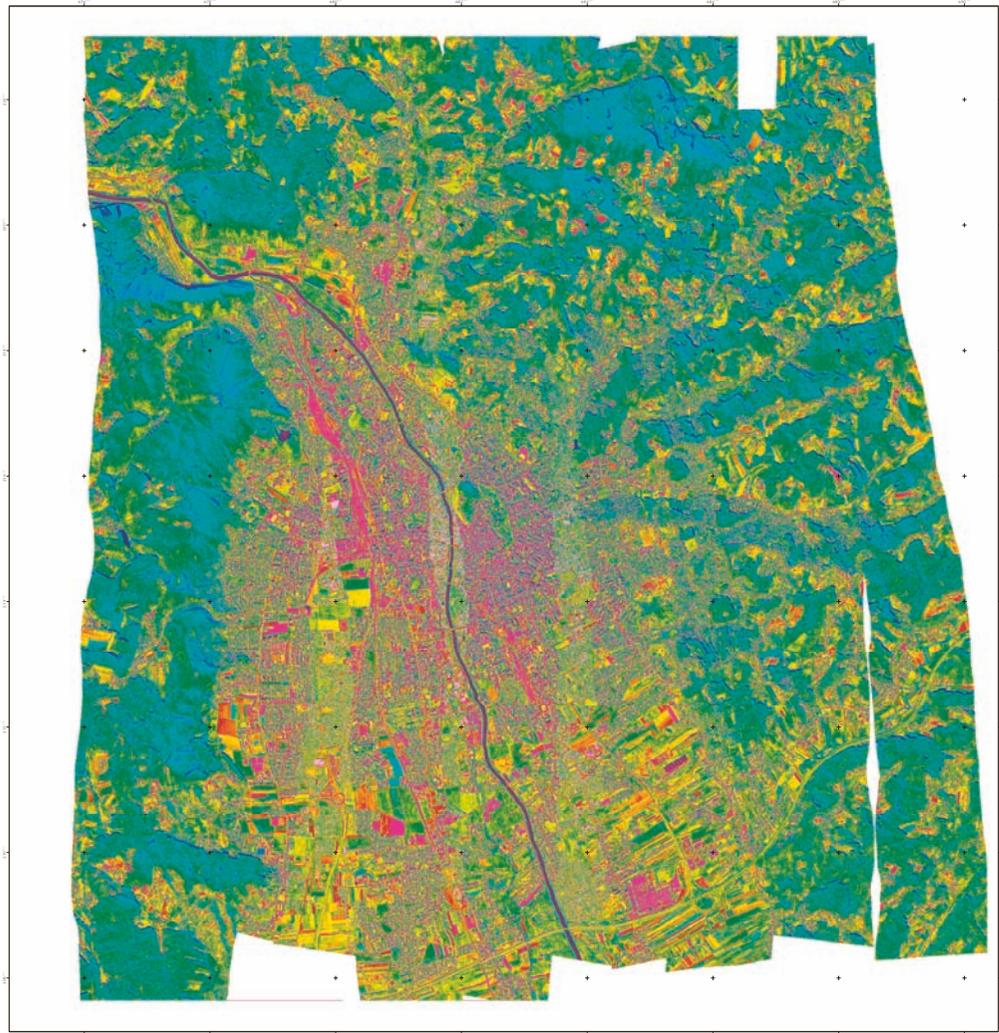


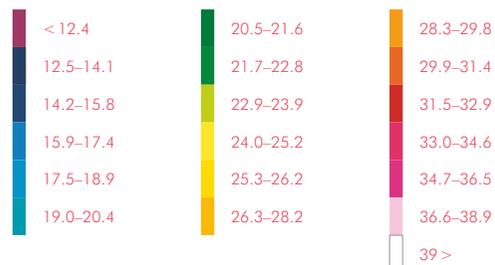
Abbildung 5:  
Strahlungstemperaturkarte der  
Thermalscanner-  
befliegung von 1986  
(Mittagsflug)

### 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)

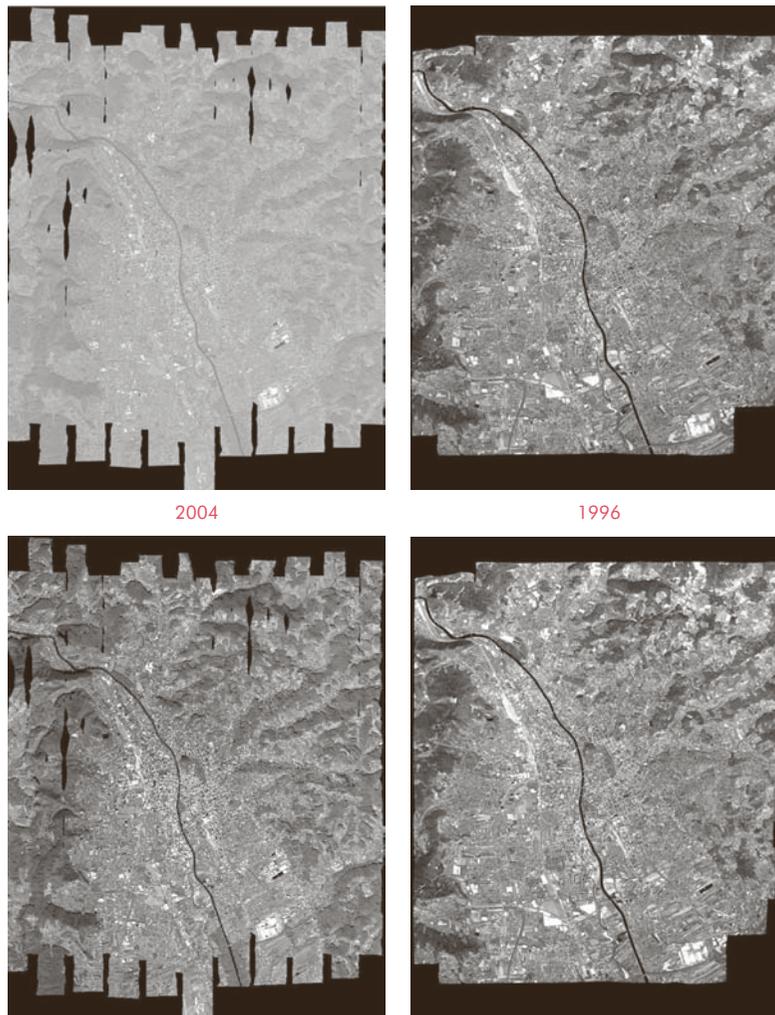


Abbildung 6 dokumentiert, dass die Grauwerte des thermalen Bandes aus dem Jahre 1996 auch in den Originaldaten durch eine Bildverbesserung angepasst wurden. Die Daten von 2004 zeigen eine deutliche Veränderung.

#### 4.4 DAEDALUS-BEFLIEGUNG 2004

Anlog 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 STRALUNGSTEMPERATURKARTE: MITTAGSFLUG 2004

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

##### HIERFÜR WURDEN FOLGENDE SCHRITTE DURCHFÜHRT:

---

Umrechnung der Grauwerte in absolute Temperatureinheiten

---

Kalibrierung der Daten

---

Erstellen von Temperaturklassen

---

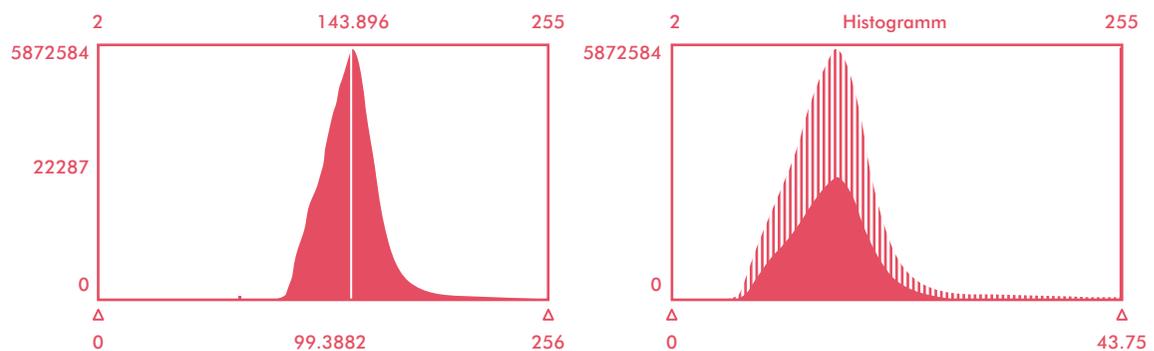
Kartengestaltung

---

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

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

Abbildung 7:  
Grauwertverteilung  
vor und nach der  
Umrechnung in  
absolute Temperatureinheiten



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
<b>BB (°C) Low</b>	<b>1,8</b>	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
<b>BB (°C) High</b>	<b>40,9</b>	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
<b>BB (°C) Low</b>	1,9	1,9	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1
<b>BB (°C) High</b>	43,2	43,3	43,2	43,3	43,2	42,2	43,2	<b>43,3</b>	43,2	<b>43,3</b>

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 Bandstrahlungs-pyrometer der Marke „Heimann“ durchgeführt, welches mit einem Objektiv von 90 mm Brennweite ausgestattet und für den Spektralbereich von 8 bis 20  $\mu\text{m}$  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 Strahlungs-pyrometer 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				LUFTEMPERATUR	
			1	2	3	$\bar{x}$	Boden- nähe	Körper- höhe
1	12:45	Acker (ug)	22,4	23,0	22,3	<b>22,6</b>	19,8	19,1
2	12:45	Acker (begrünt)	19,4	18,8	19,3	<b>19,2</b>	21,1	20,2
3	12:50	Maisfeld (ag)	24,8	25,2	25,3	<b>25,1</b>	21,0	21,8
4	12:55	Schotterfläche	26,2	21,7	22,2	<b>23,4</b>	18,7	19,3
5	13:00	Asphalt (P)	23,6	20,6	20,8	<b>21,6</b>	19,2	19,6
6	13:10	Maisfeld (ug)	25,7	26,6	25,2	<b>25,8</b>	21,8	20,6
7	13:20	Acker (WG)	20,0	19,7	19,6	<b>19,8</b>	22,5	21,2
8	13:25	Wiese	19,2	19,1	19,3	<b>19,2</b>	19,0	20,8
9	13:31	Acker (ug)	20,7	21,9	20,4	<b>21,0</b>	21,8	23,2
10	13:42	Erdbeerfeld	23,8	21,8	18,3	<b>21,3</b>	---	---
11	13:50	Wiese (gemäht)	18,1	18,5	18,2	<b>18,3</b>	---	---
12	14:00	Kleewiese	19,4	20,0	19,6	<b>19,7</b>	22,8	21,2
13	14:12	Verwildert	21,3	19,5	20,8	<b>20,5</b>	24,8	23,3
14	14:26	Wiese	12,5	12,9	11,0	<b>12,2</b>	22,9	24,0
15	14:36	Wiese	19,5	18,6	20,1	<b>19,4</b>	22,8	23,4
16	14:44	Wasser	15,1	13,8	15,9	<b>14,9</b>	12,8 (H <sub>2</sub> O-T.)	---
17	14:56	Maisfeld (ag)	23,3	22,0	22,8	<b>22,7</b>	24,4	21,6
18	15:09	Wiese	20,4	21,1	19,7	<b>20,4</b>	23,4	21,5
19	15:15	Asphalt (P)	25,3	24,8	24,9	<b>25,0</b>	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

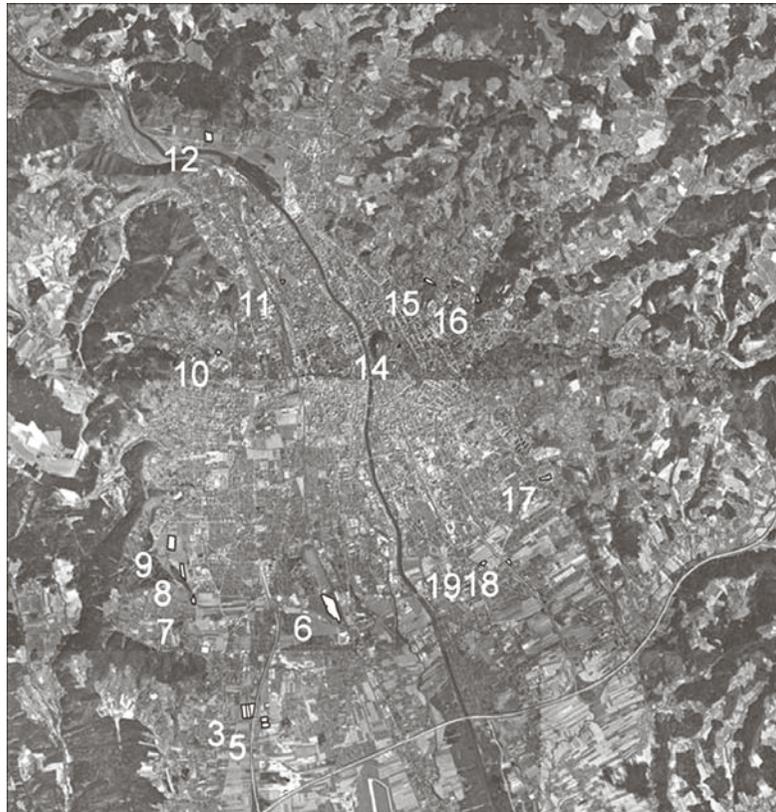


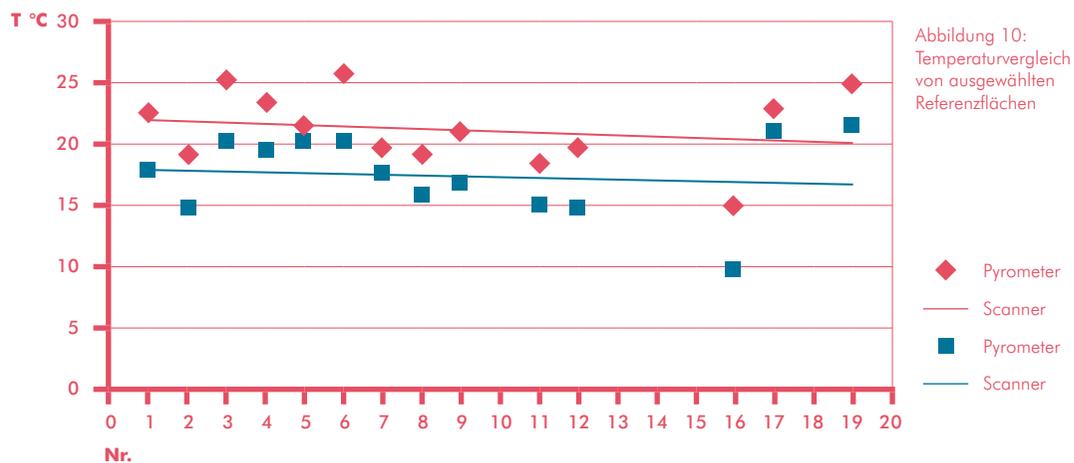
Tabelle 3:  
Vergleich der thermalen Passpunkte mit vom Scanner gemessenen Temperaturen  
\*: nicht eindeutig lokalisierbar

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.

**Temperaturvergleich: Pyrometer – Scanner**



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

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

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  $2,5^{\circ}\text{C}$  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  $0,5\text{--}1,0 \text{ K}$  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 Hrn. 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

$T_{\bar{x}}$ Mur (24.10.2004)	$T_{\text{Scanner}}$	$K_{\text{Hydro}} = \Delta T$
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.

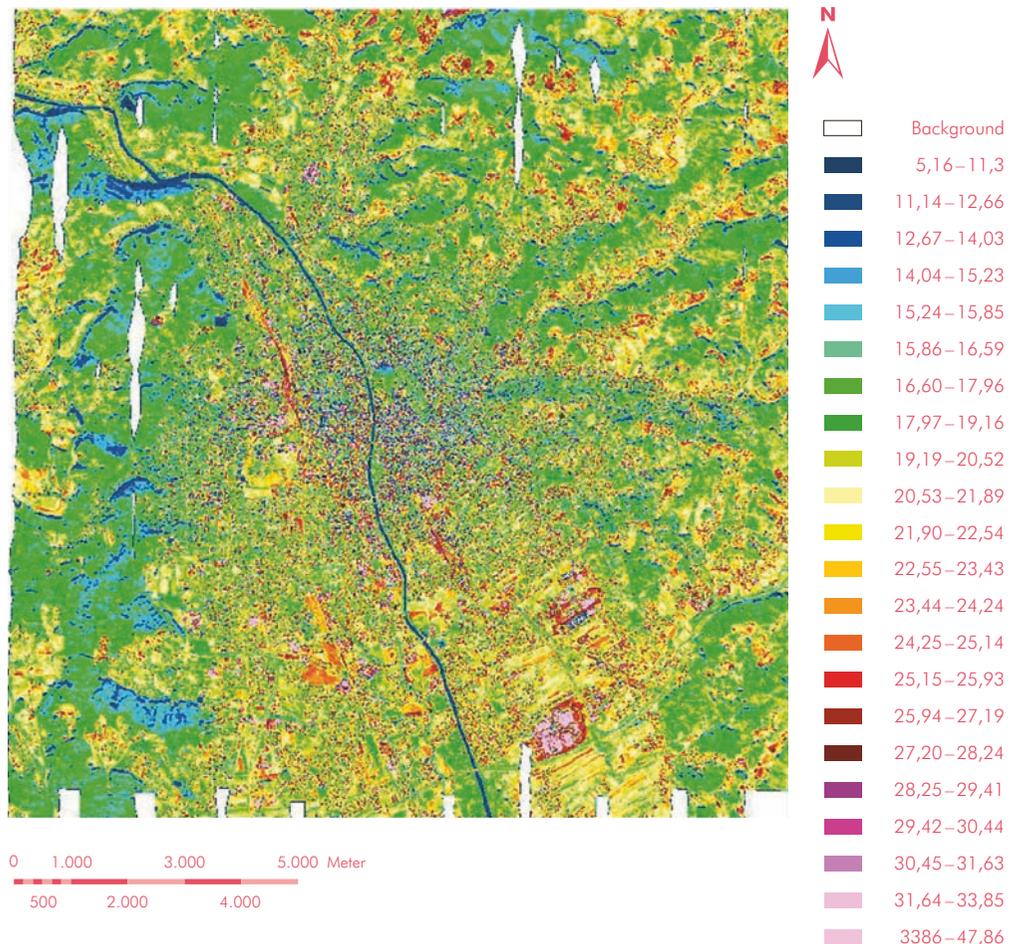
Dies wurde zum einen dadurch erreicht, dass die Klassenbreiten in einem Bezug zur Bodenbedeckung, die aufgrund ihrer Strahlungsverhalten auch ähnliche Oberflächentemperaturen aufweisen, gewählt wurden, und dadurch, dass die Farbgebung jener von 1986 entsprach.

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 STRALUNGSTEMPERATURKARTE – 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 Mittagsituation 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)

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

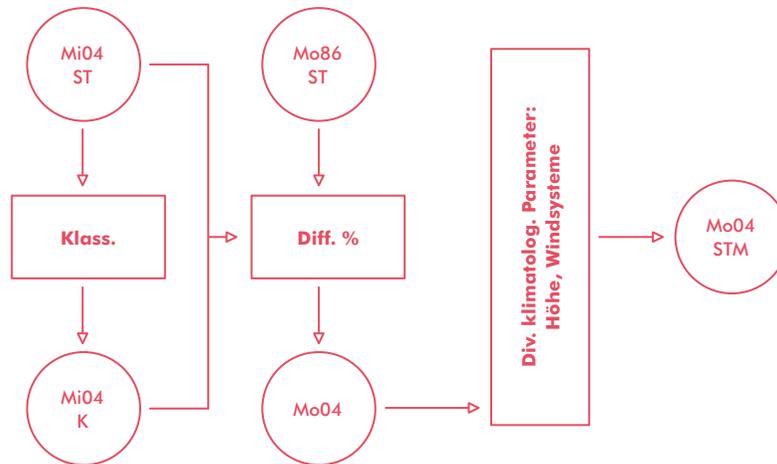
**Arbeitsablauf:** Die Vorgehensweise kann grundsätzlich in zwei Teilen beschrieben werden. Da die Zusammenhänge der Temperaturen auf der Bodenbedeckung basieren, wurde zunächst eine Bodenbedeckungsklassifizierung der Mittagssituation 2004 (Mi04 ST) durchgeführt, um die Klassen und in weiterer Folge 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.

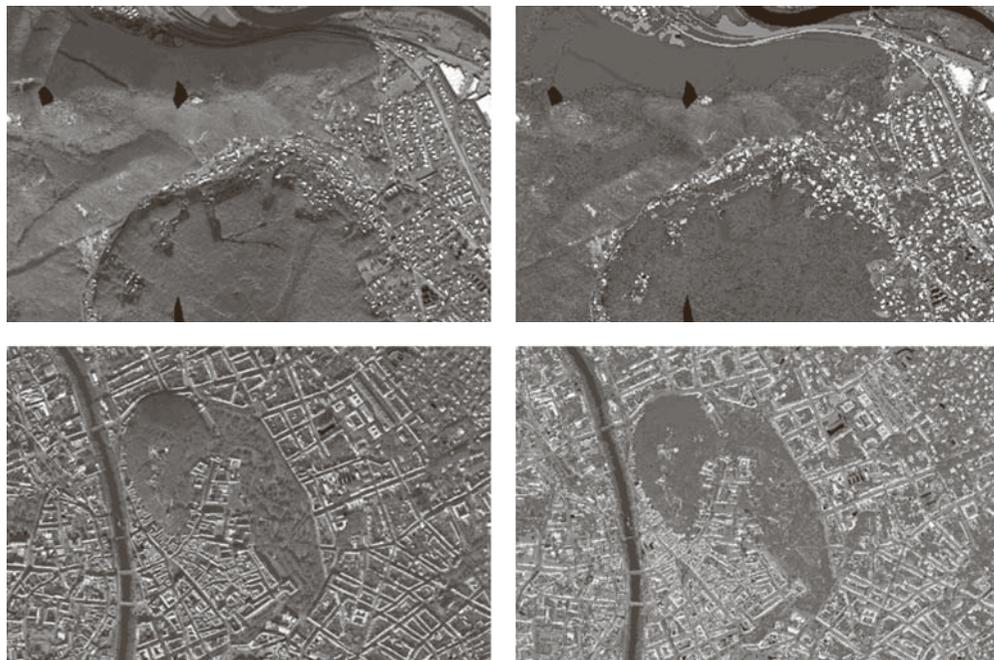
Da aber in dieser Klassifizierung für die versiegelten Gebiete keine Unterscheidung zwischen Straßen, Häusern, Abstellflächen, Bauflächen und Bahnanlagen getroffen wurde, mussten diese Klassen nachträglich durch Verschneidung mit zusätzlichen Datenquellen erstellt werden. Hierbei konnte aber unter Zuhilfenahme 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).

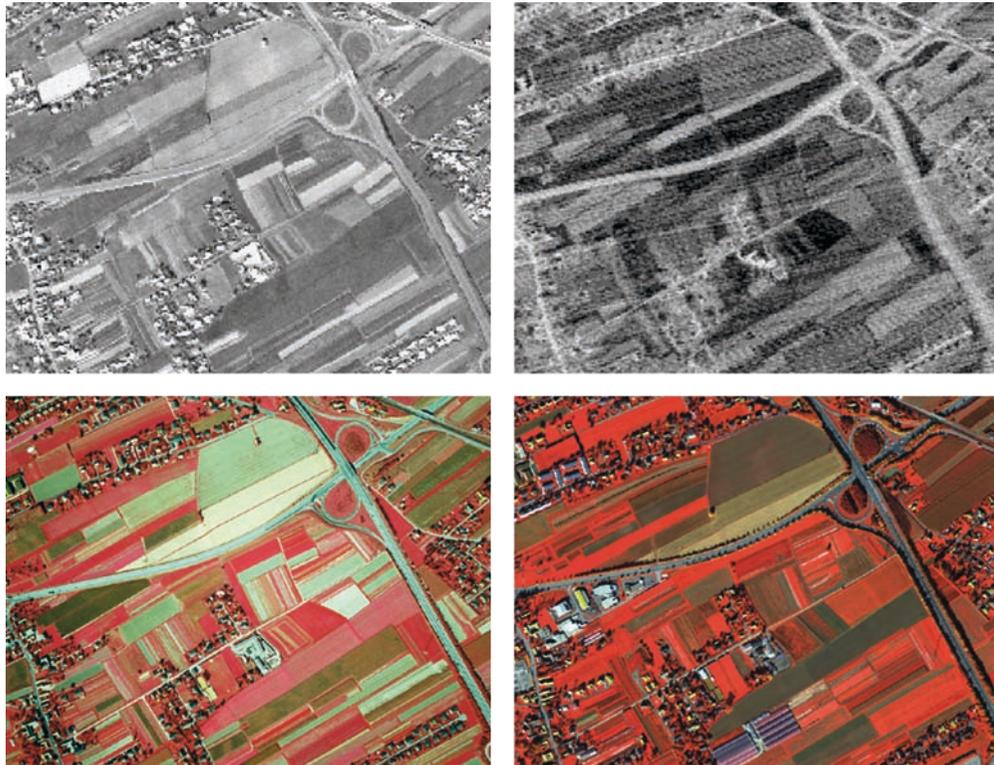
Abbildung 14:  
Korrektur von  
Schattenflächen



**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  $5 \times 5$  m der Befliegungen von 1986 gegenüber  $1 \times 1$  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 Bauzustand 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 (%)
<b>1</b>	Abbaufld.	7,1	29,3	22,4	<b>22,2</b>	6,9	75,8	<b>31,8</b>
<b>2</b>	Gewässer	11,8	13,5	12,3	<b>1,7</b>	1,2	91,0	<b>96,2</b>
<b>15</b>	Acker	5,4	32,0	21,1	<b>26,6</b>	10,9	65,9	<b>25,5</b>
<b>16</b>	Grünland	5,2	22,5	19,9	<b>17,3</b>	2,7	88,2	<b>26,3</b>
<b>17</b>	Wald	5,2	24,0	18,5	<b>18,8</b>	5,5	77,2	<b>28,1</b>
<b>19</b>	Sonder- kultur	5,6	23,3	19,0	<b>17,7</b>	4,3	81,5	<b>29,6</b>
<b>20</b>	Sportplatz	6,0	27,5	22,3	<b>21,5</b>	5,2	81,5	<b>26,8</b>
<b>22</b>	Abstellfl.	8,3	32,3	23,8	<b>24,0</b>	8,5	73,5	<b>34,8</b>
<b>23</b>	Bahn	7,5	35,3	24,4	<b>27,9</b>	10,9	69,0	<b>30,6</b>
<b>24</b>	Baufläche	9,0	31,9	22,0	<b>22,9</b>	9,9	68,6	<b>41,0</b>
<b>25</b>	Häuser	5,8	36,8	38,5	<b>30,9</b>	-1,7	104,6	<b>15,1</b>
<b>26</b>	Straße	7,8	25,9	21,5	<b>18,1</b>	4,3	83,8	<b>36,2</b>

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).

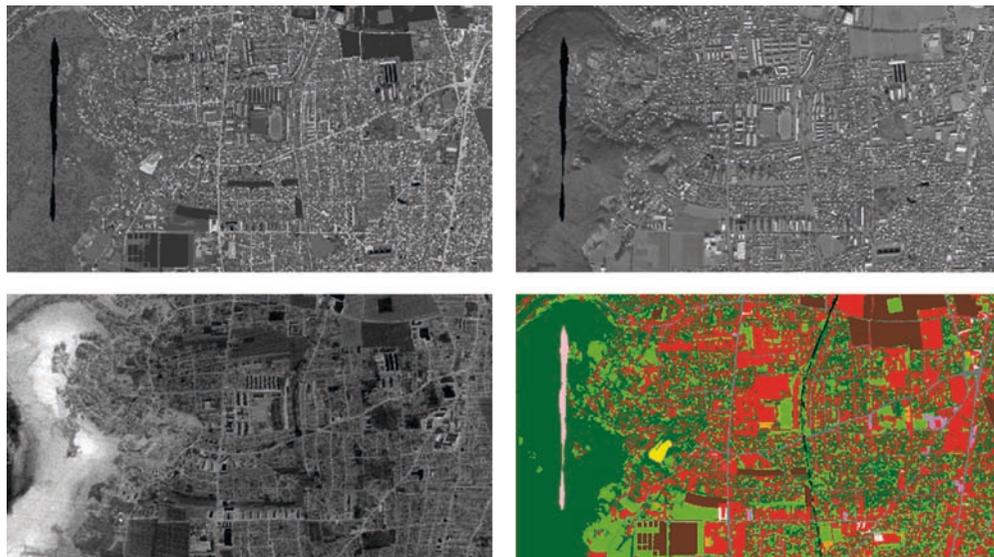
Tabelle 7:  
Temperaturgegensätze  
der einzelnen Klassen

<b>GERINGE GEGENSÄTZE</b>	<b>MITTLERE GEGENSÄTZE</b>	<b>GROSSE GEGENSÄTZE</b>
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 Gärtnerschen 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).

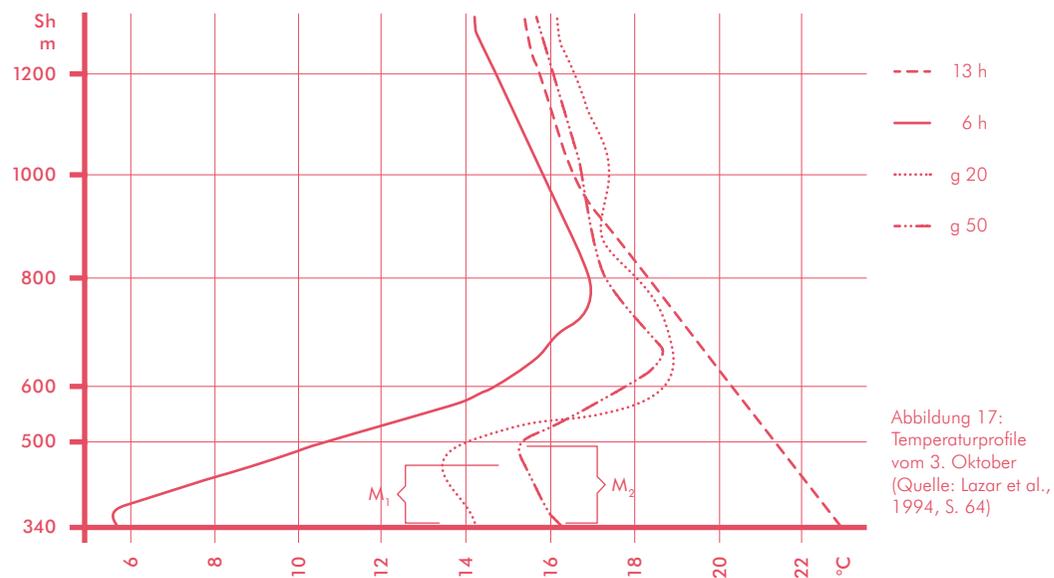


Abbildung 17:  
Temperaturprofile  
vom 3. Oktober  
(Quelle: Lazar et al.,  
1994, S. 64)

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

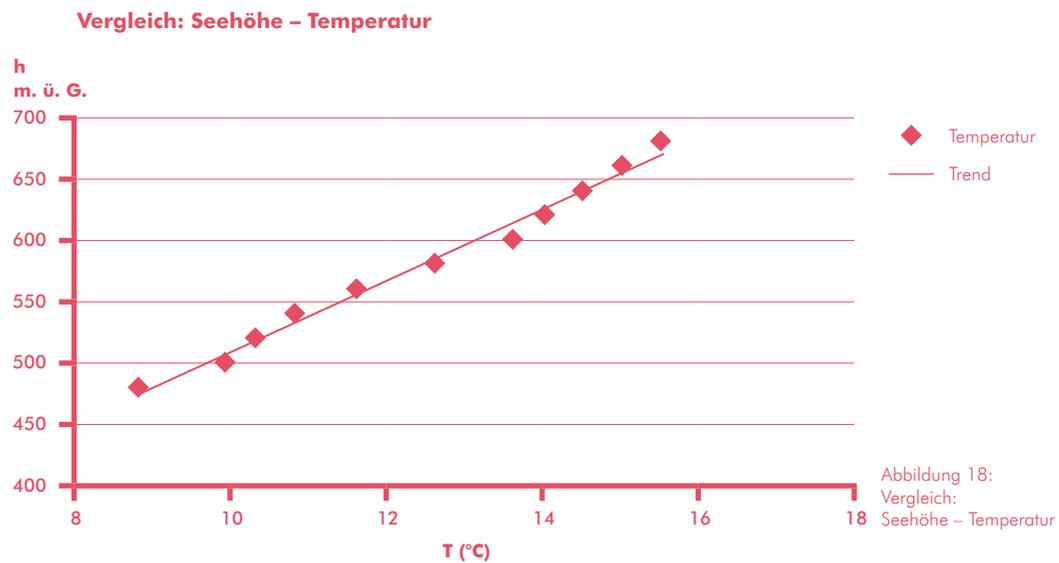
aber aufgrund folgender Erkenntnisse verworfen: wie in Abbildung 17 ersichtlich, konnte sich in der Nacht auf den Befliegungstag keine Bodeninversion entwickeln, was aus den Temperaturprofilen der Radiosondenaufstiege von 04:20, 05:40 und 06:50 Uhr hervorgeht. Lediglich zum Zeitpunkt des 4. Aufstieges 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	
T (°C)	8,8	9,9	10,3	10,8	11,6	12,6	13,6	14	14,5	15	15,5	<b>C = 0,994</b>



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).

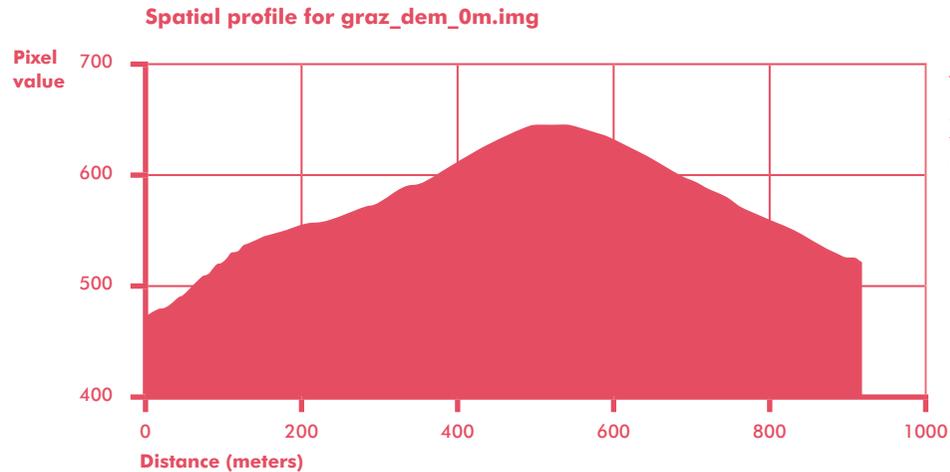
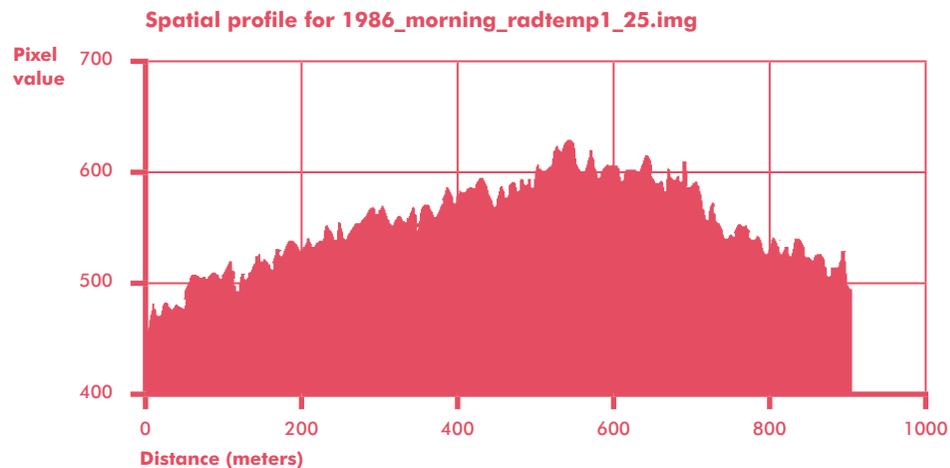


Abbildung 19:  
Beziehung zwischen  
Seehöhe und Tempera-  
tur (links: Höhenprofil,  
rechts: Thermisches  
Profil)



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

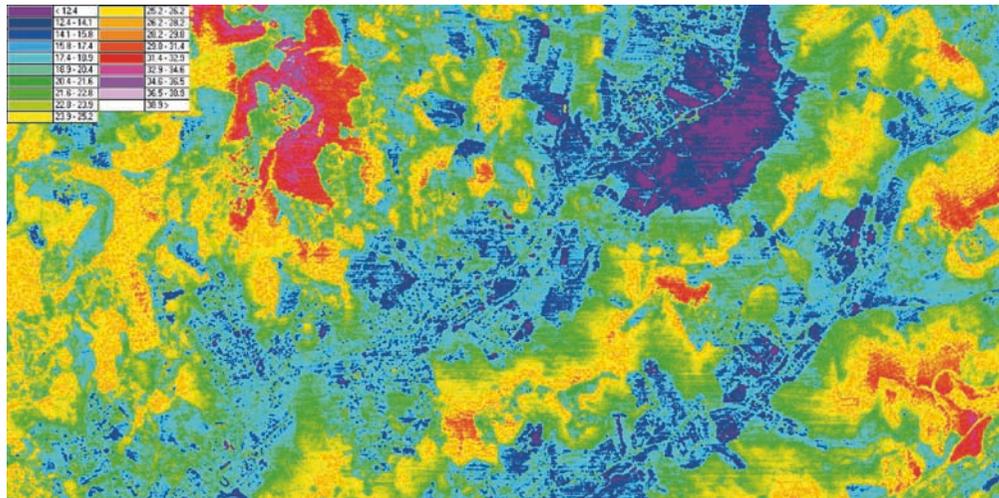
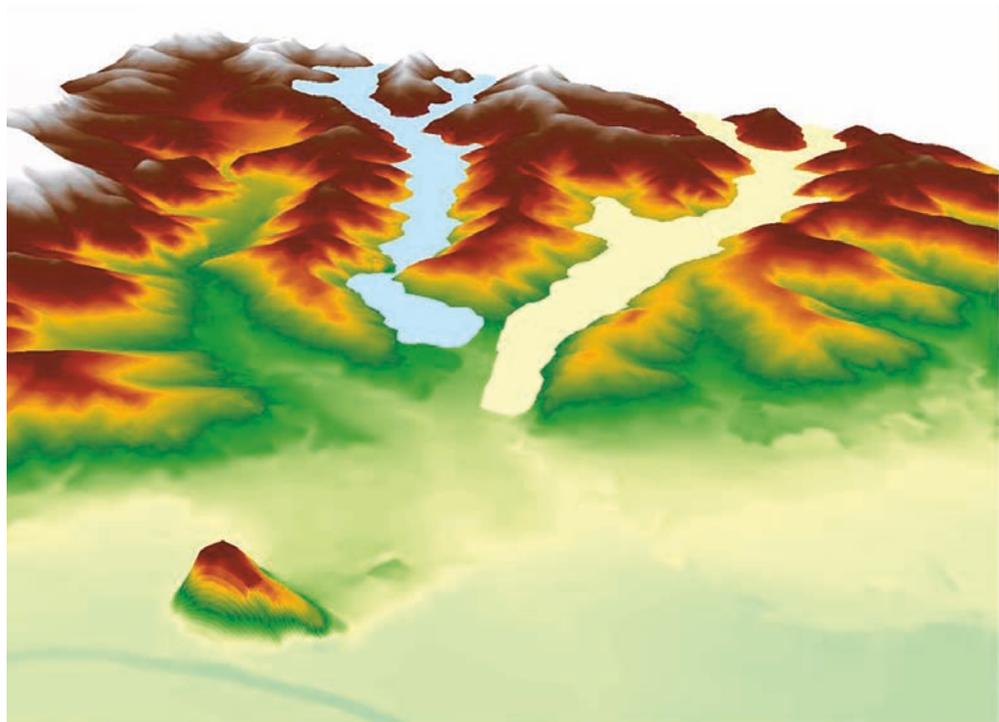


Abbildung 21:  
Modellierung des  
Seitentalauswindes.  
(hier: Ragnitz- und  
Stiftingtal) Blickrichtung:  
NNE

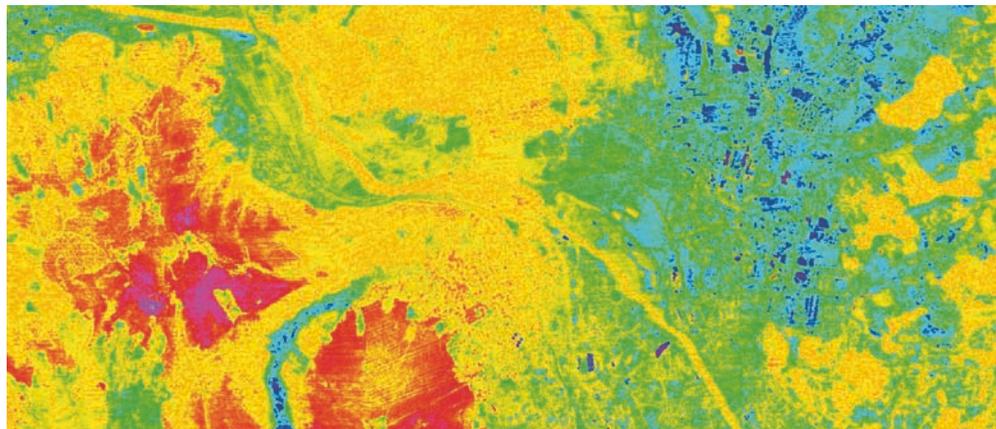


Die Wirkungsweise der Seitentalauswinde kann in abstrahierter und vereinfachter Form in Abbildung 21 betrachtet werden. Zu sehen ist das Riedelland im Osten von Graz mit dem Mariatrostertal, dem Ragnitztal und dem Stiftingtal. Für die beiden Letzteren sind die Seitentalauswinde in ihrer Mächtigkeit dargestellt, 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.

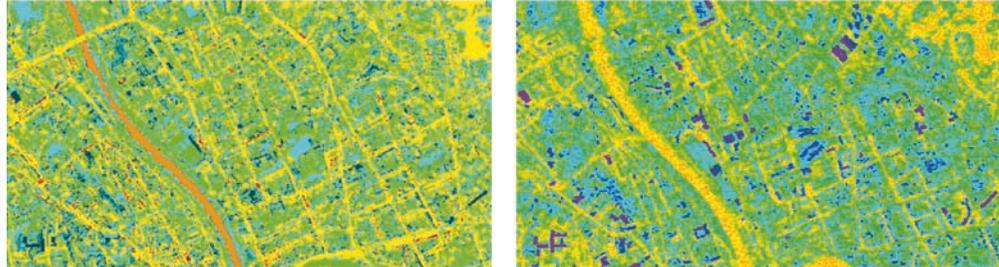
Abbildung 22:  
Düseneffekt bei  
Gösting



**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.

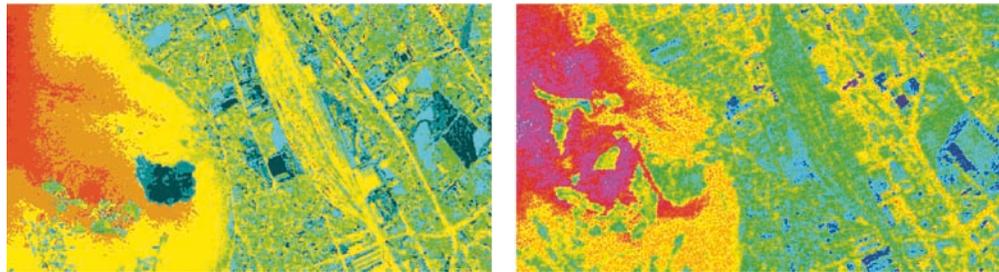
Abbildung 23:  
Differenzierung von  
Straßen (links: Morgen  
2004, rechts: Morgen  
1986)



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.

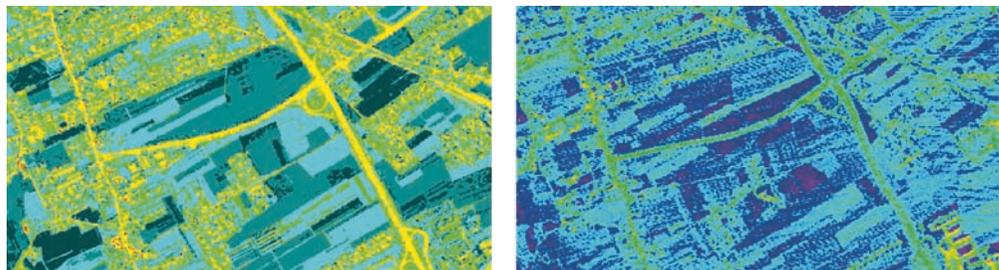
Abbildung 24:  
Undeutliche Differen-  
zierung des Bahnhof-  
geländes (links: Morgen  
2004, rechts: Morgen  
1986)



**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.

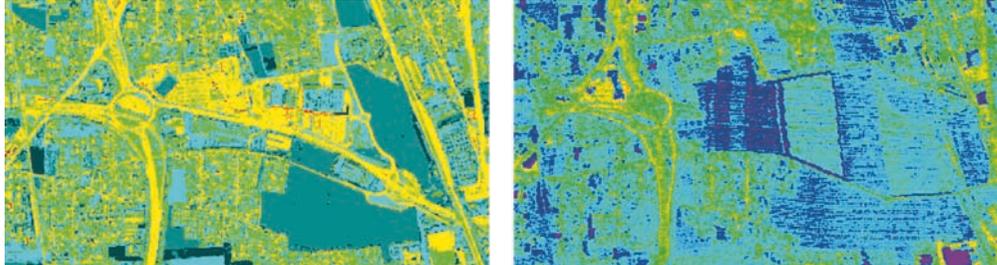
Abbildung 25:  
Nutzungsstatus von  
landwirtschaftlichen  
Nutzflächen  
(links: Morgen 2004,  
rechts: Morgen 1986)



**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.

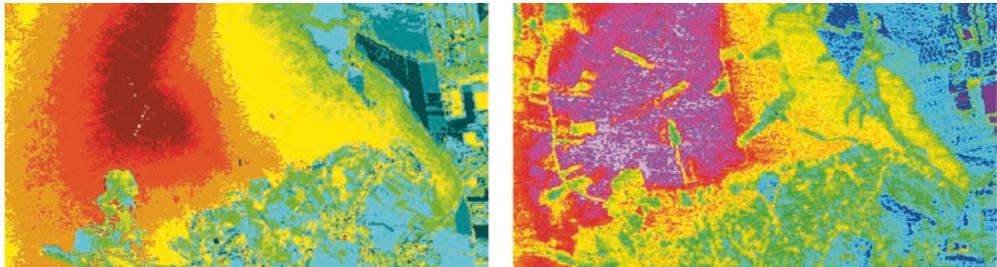
Abbildung 26:  
Veränderung der  
Bastruktur  
(links: Morgen 2004,  
rechts: Morgen 1986)



**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)

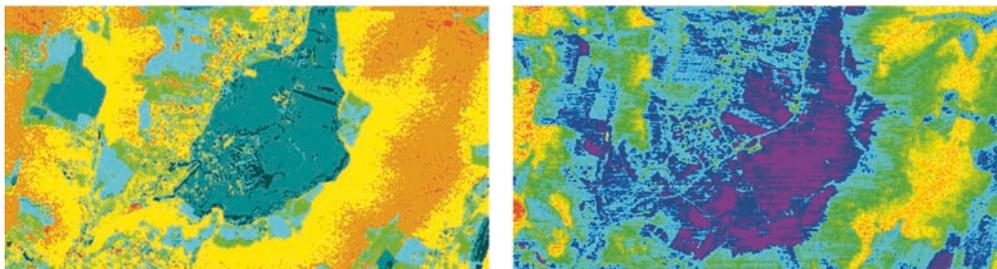
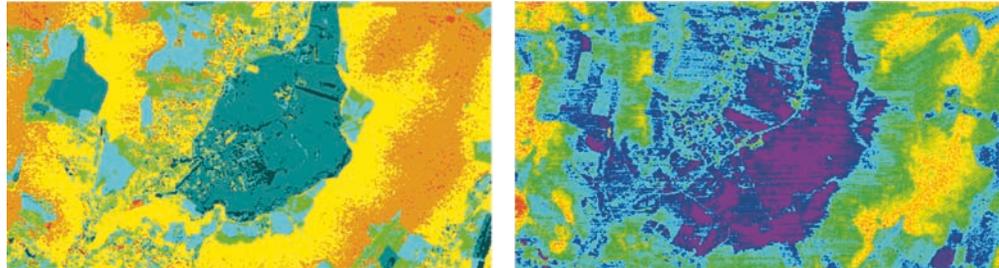


Abbildung 29:  
Düseneffekt bei Gösting  
(links: Morgen 2004,  
rechts: Morgen 1986)



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

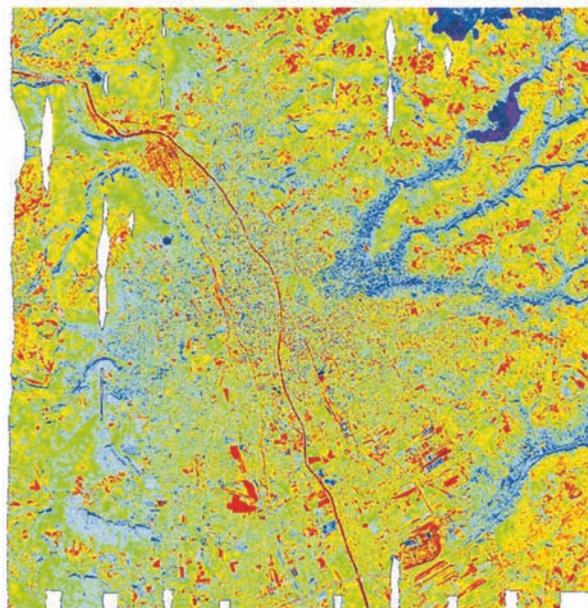


Abbildung 31:  
Strahlungstemperatur-  
karte von 2004  
(simulierter Morgen-  
flug)

### Strahlungstemperaturkarte Graz

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

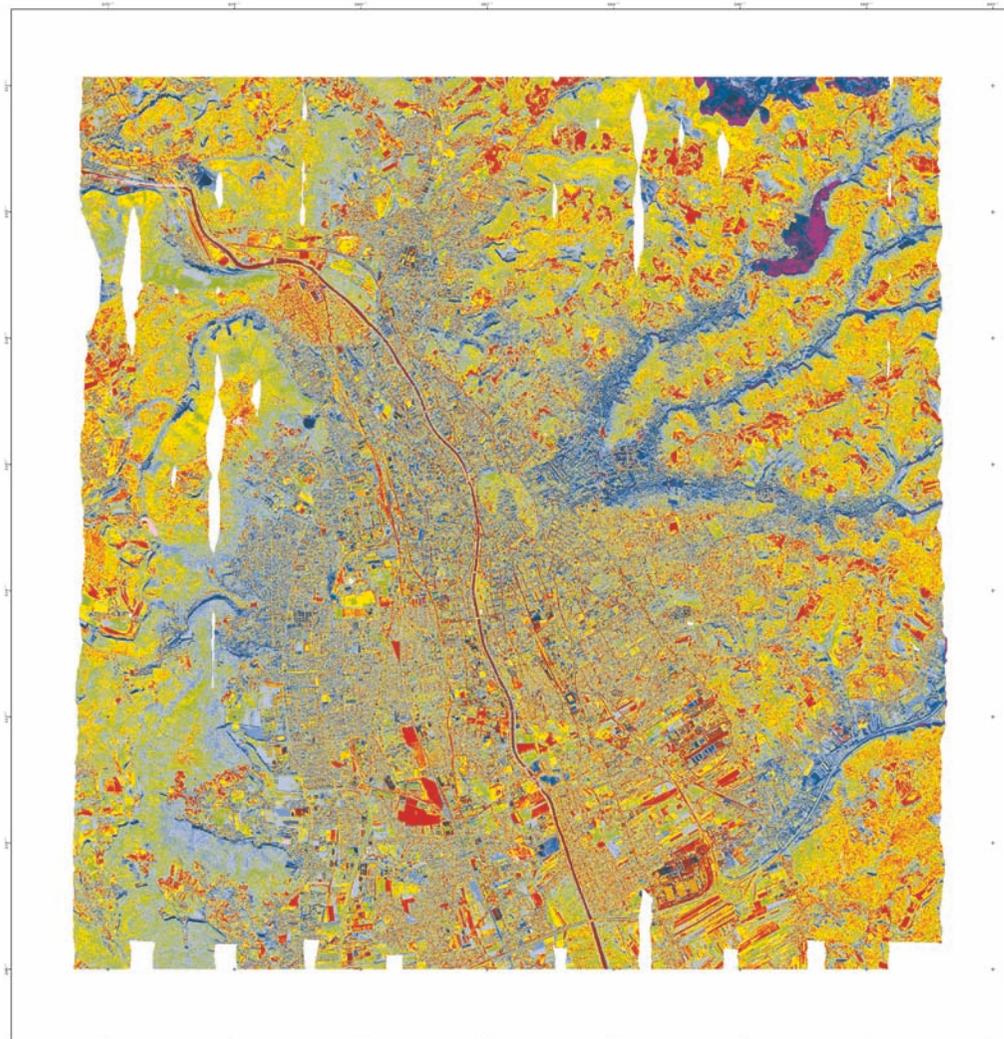
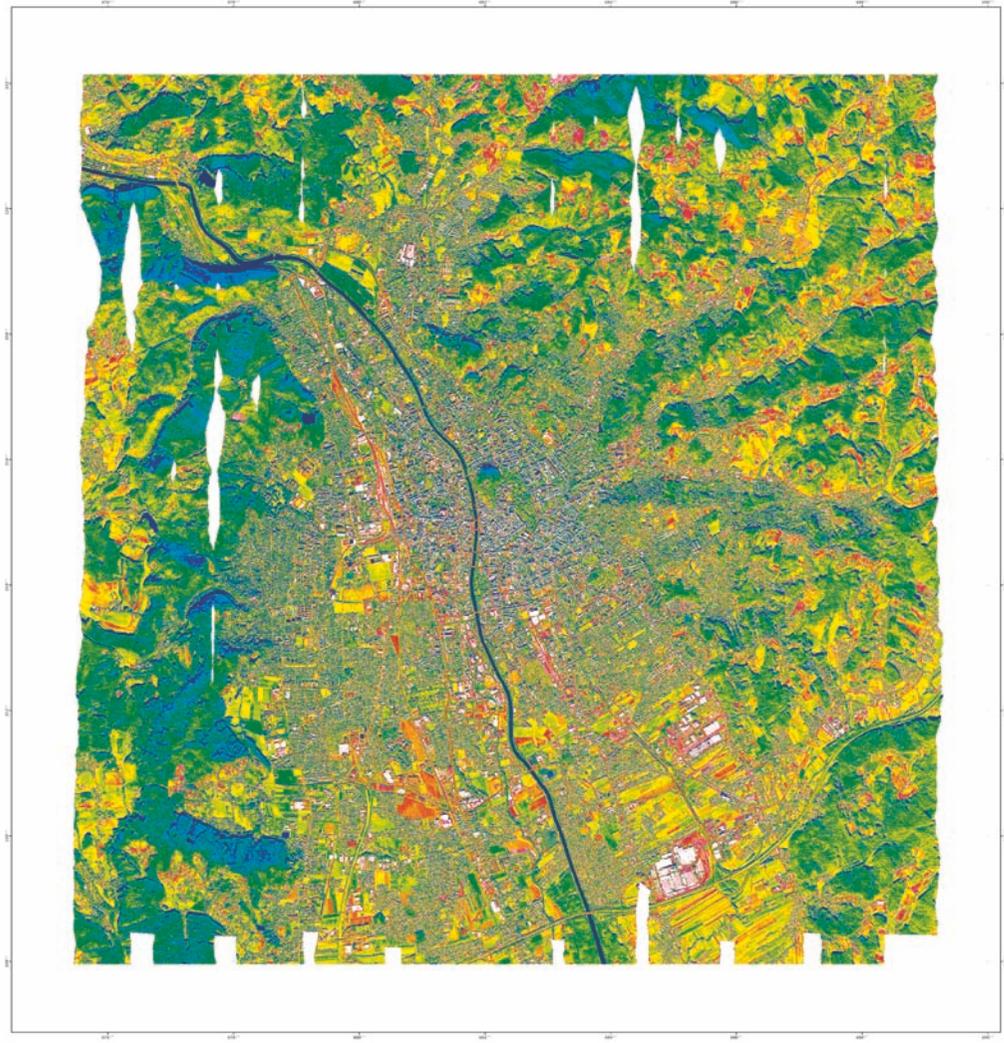


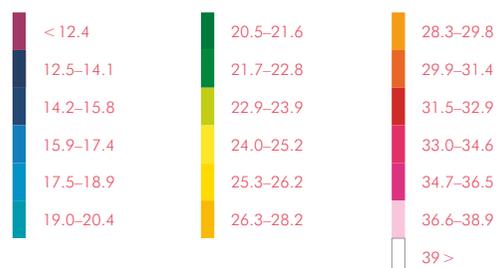
Abbildung 32:  
Strahlungstemperatur-  
karte der Thermal-  
scannerbefliegung  
von 2004 (Mittagsflug)

### 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

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

**$T_{\text{rad}}$  die Strahlungstemperatur,**

**$\epsilon$  der Emissionskoeffizient und**

**$T_{\text{kin}}$  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  $\mu\text{m}$  auf. Für diesen Wellenbereich gibt es ausführliche Dokumentationen der Emissionsgrade von einer Vielzahl von Oberflächen. Für den Wellenlängenbereich zwischen 3,7 und 4,8  $\mu\text{m}$  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.

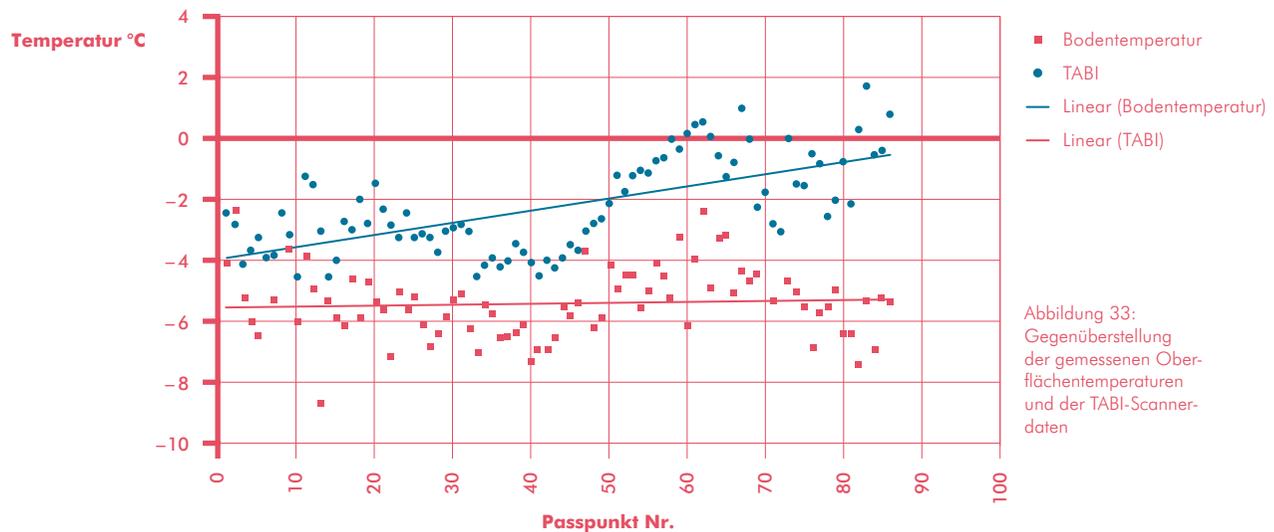
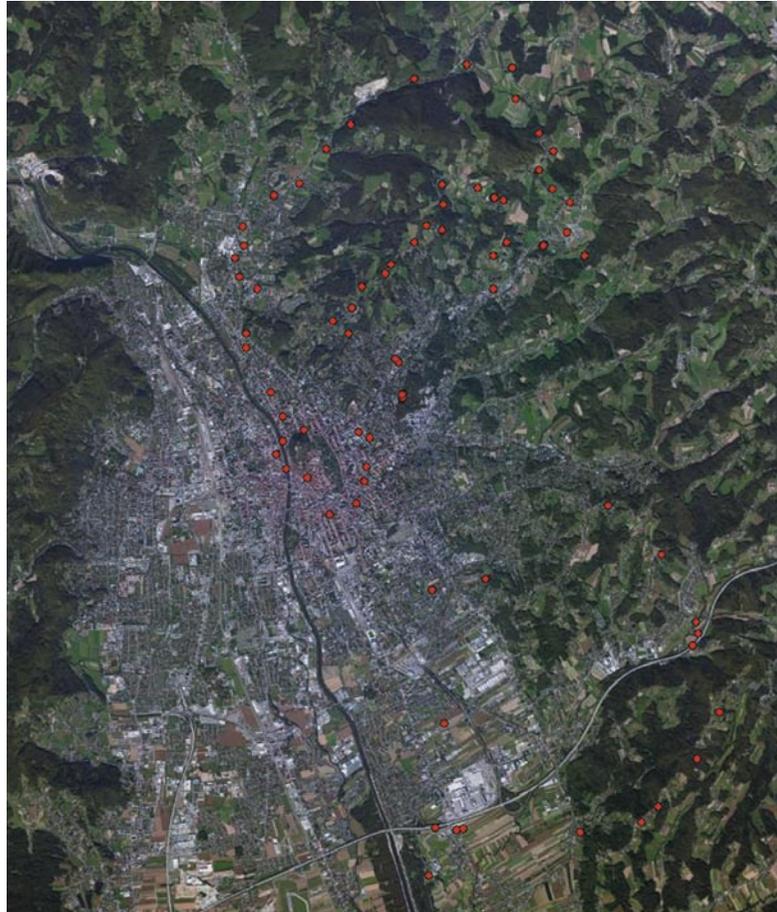


Abbildung 33:  
Gegenüberstellung  
der gemessenen Ober-  
flächentemperaturen  
und der TABI-Scanner-  
daten

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 Temperaturdifferenzen berechnet. Die Werte der Messungen werden in Abbildung 34 dargestellt.

Die Berechnungen ergaben eine mittlere Differenz:

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

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:

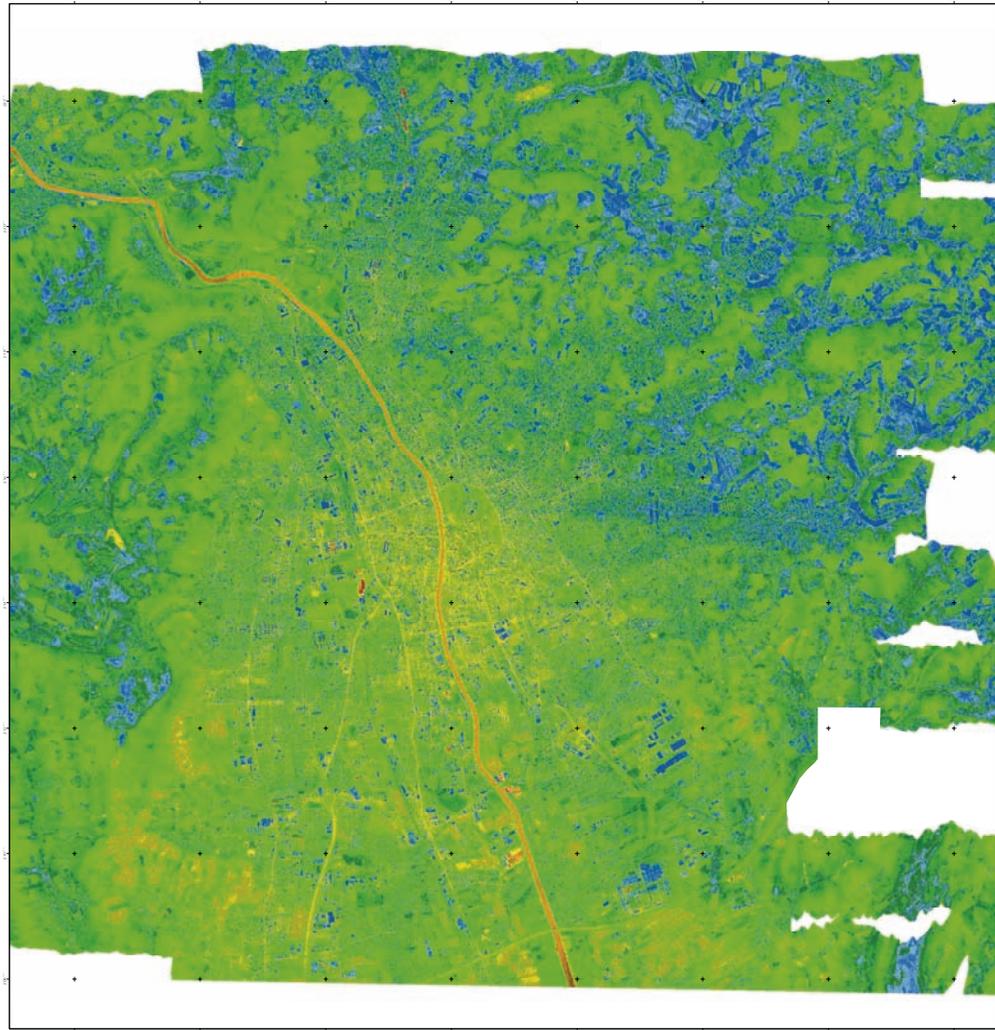
$$\text{Diff. Gesamt} = \frac{\text{Dif. Messung} + \text{Dif. Hydro}}{2} = 3,7 \text{ K.}$$

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



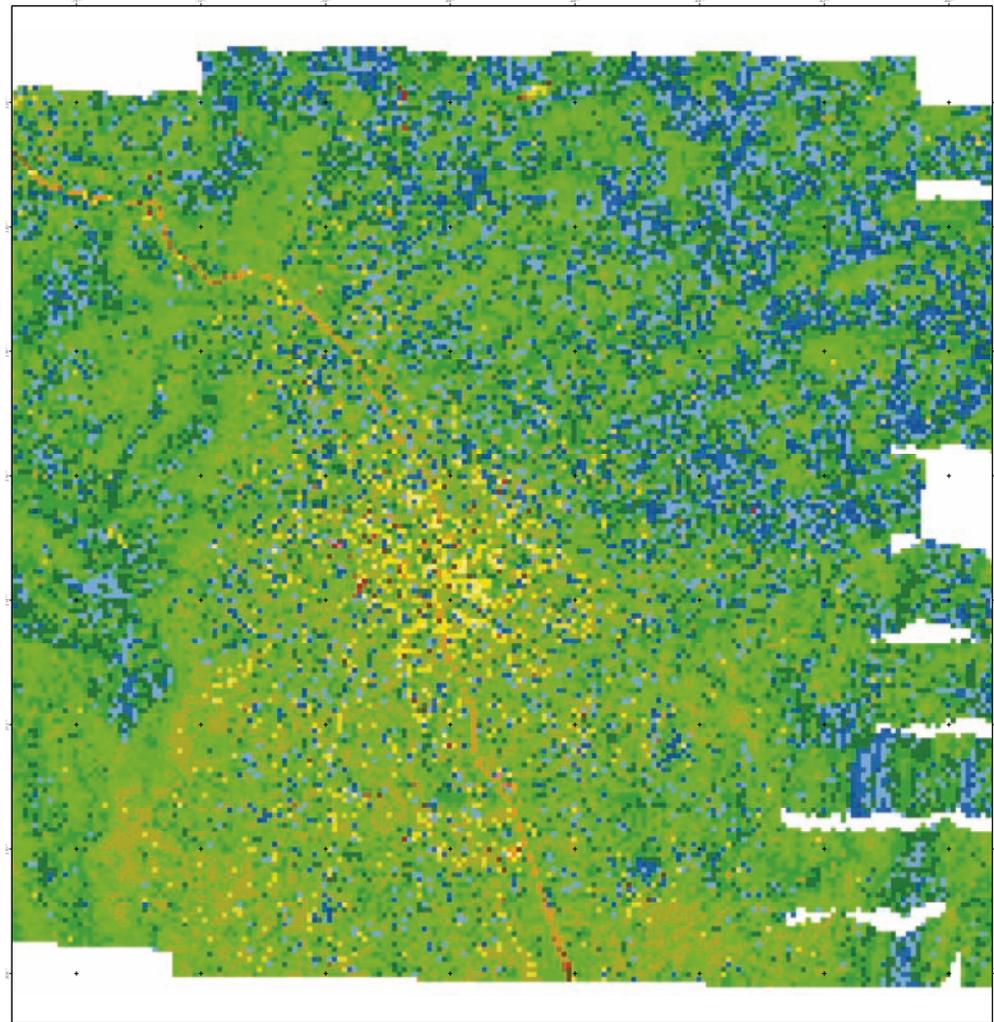
Temperaturangaben in °C



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

### Strahlungstemperaturkarte Graz

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



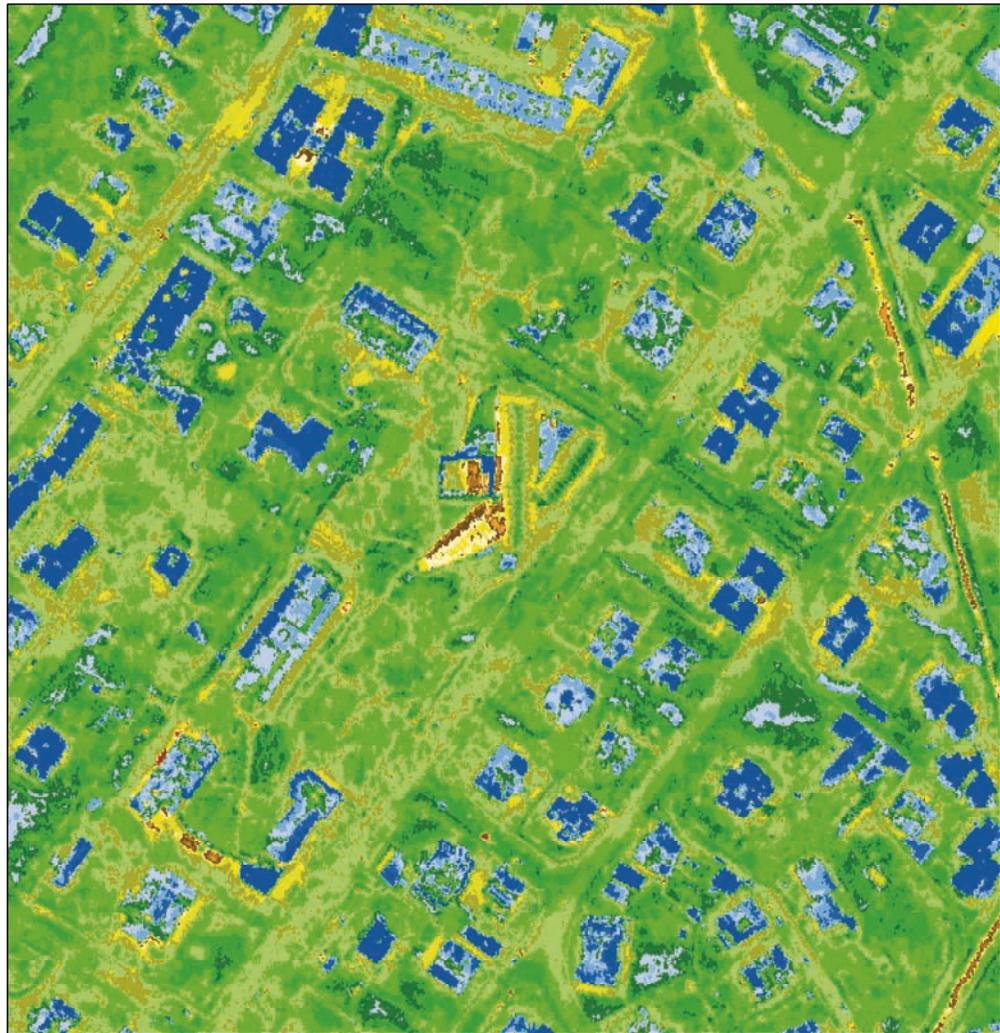
Temperaturangaben in °C



Abbildung 37:  
Strahlungstemperaturkarte 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

