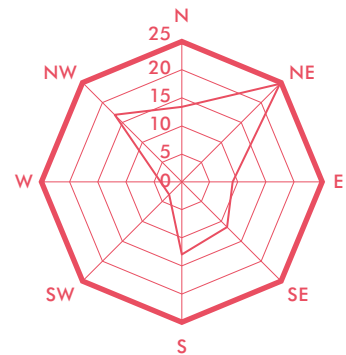
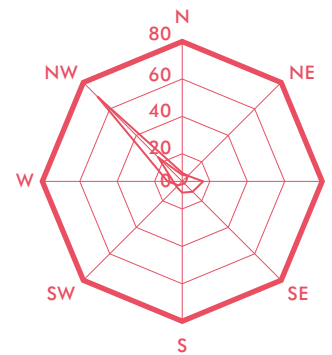
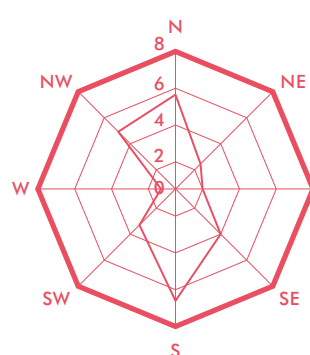
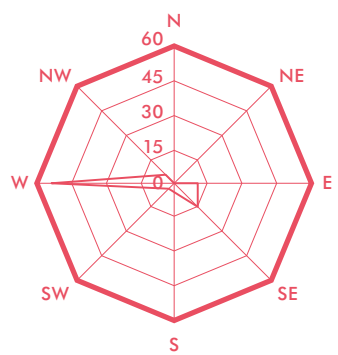
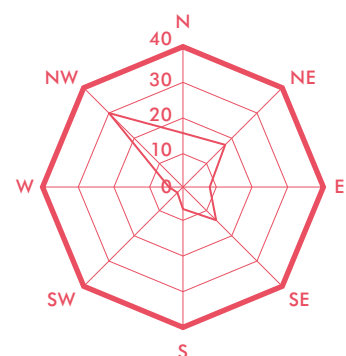
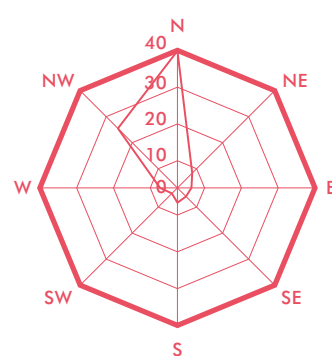
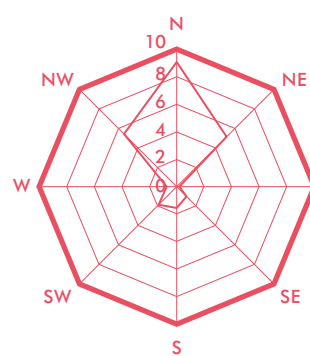
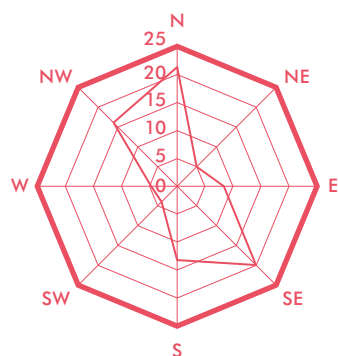
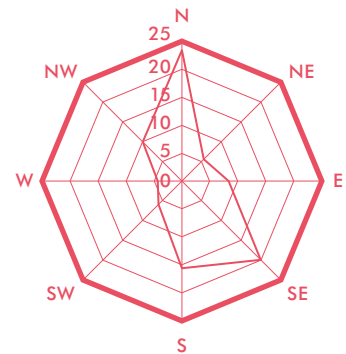
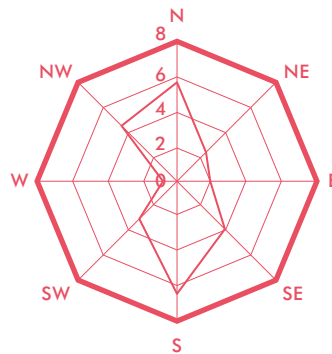
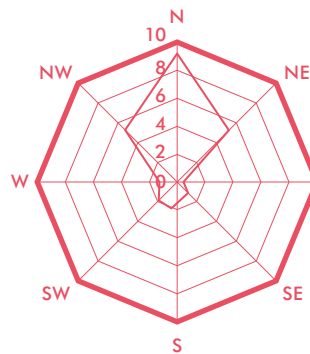
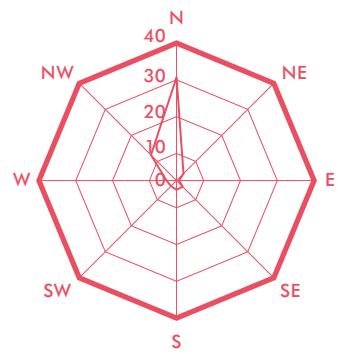
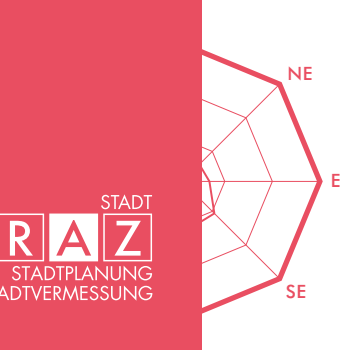
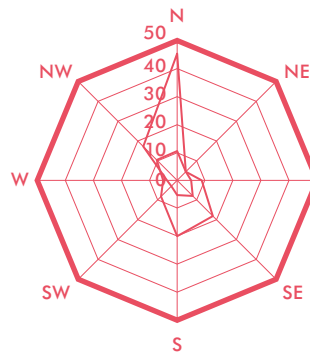
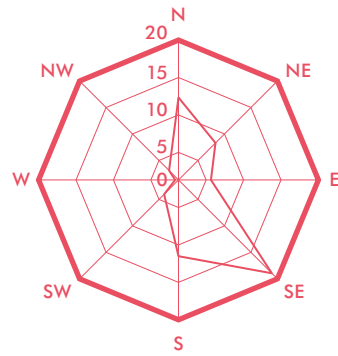
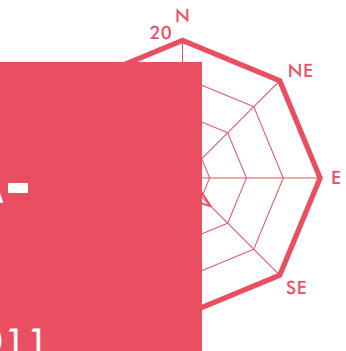
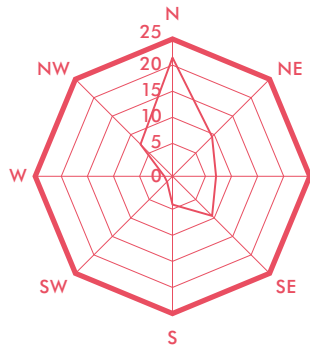
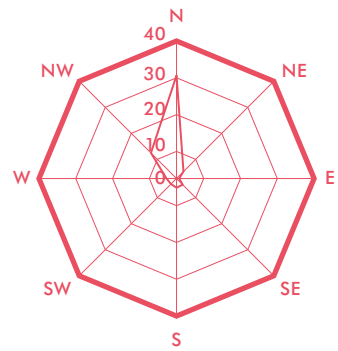


STADTKLIMA-ANALYSEN

1986, 1996, 2004 & 2011

STADT
GRAZ
STADTPLANUNG
STADTVERMESSUNG



IMPRESSUM

Autoren

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

Projektgruppe

Projekt THERMAL 04

Projektkoordination

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

Unter Mitwirkung von

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

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

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

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Zweigstelle Graz:
Alexander Podesser

Magistrat Graz, A10/6-Stadtvermessungsamt: Winfried Ganster

Abteilungsvorstände

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

Unterstützt von

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

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

Grafische Bearbeitung

Institut für Geographie und Raumforschung
EN GARDE Interdisciplinary GmbH

Konzeption

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

Gestaltung und Satz

EN GARDE Interdisciplinary GmbH

Druck

Steiermärkische Landesdruckerei
GmbH

STADTKLIMA- ANALYSEN

1986, 1996, 2004 & 2011



INHALTSVERZEICHNIS

9	EINLEITUNG		
11	1. BEFLIEGUNGEN UND DATENGRUNDLAGEN	47	2. VERSIEGELUNGS-KARTEN
14	1.1 Der DAEDALUS-Multispektralscanner	47	2.1 Einleitung
21	1.2 Der TABI-1800-Thermalsensor	48	2.2 Arbeitsablauf bei der Erstellung der Versiegelungskarten
24	1.3 Die UltraCam-Befliegungen 2007 und 2011	48	2.2.1 DAEDALUS-Daten 1986, 1996 und 2004
27	1.4 Sonstige Datengrundlagen	57	2.2.2 UltraCam-X-Daten 2004 und 2007
29	1.5 Datenvorverarbeitung/ Data Preprocessing	57	2.2.2.1 Versiegelung UltraCam-X 2007
29	1.5.1 Datenvorverarbeitung der DAEDALUS-Daten 1986 und 2004	69	2.2.2.2 Versiegelung UltraCam-X 2011
30	1.5.1.1 Radiometrische Korrektur der DAEDALUS-Daten 1986 und 2004	70	2.2.2.3 Versiegelung im Change-Detection-Verfahren
32	1.5.1.2 Entzerrung von DAEDALUS-Bildstreifen 1986 und 2004		
46	1.5.2 Datenvorverarbeitung der TABI-1800-Daten		

89	3.	KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN	112	4.	ERSTELLUNG DER TEMPERATURKARTEN VON GRAZ
90	3.1	Klimatische Messkampagnen 1986	112	4.1	Einleitung
90	3.1.1	Wetterlage zum Aufnahmezeitpunkt 1986	113	4.2	DAEDALUS-Befliegung 1986
95	3.2	Klimatische Messkampagnen 2004	120	4.3	DAEDALUS-Befliegung 1996
95	3.2.1	Erläuterungen zur Wetter- lage vom 24.10.2004 (Berliner Wetterkarte)	121	4.4	DAEDALUS-Befliegung 2004
98	3.2.2	Ballonsondierungen	122	4.4.1	Erstellung der Strahlungs- temperaturkarte: Mittagsflug 2004
102	3.3	Klimatische Messkampagnen 2011	131	4.4.2	Modellierung der Strahlungstemperaturkarte: Morgen 2004
102	3.3.1	Wetterlage am 20.12.2011	148	4.5	TABI-1800-Befliegung von 2011
107	3.3.2	Ergebnisse der Messkam- pagnen am 20.12.2011	169	4.6	Einbindung von LANDSAT-Nachtaufnahmen

**179 5. VERGLEICHENDE
ANALYSE DER THER-
MALBEFLIUGUNGEN
1986 – 1996 – 2004 –
2011**

- 179** 5.1 Datengrundlagen
-
- 186** 5.2 Möglichkeiten der Vergleichbarkeit
-
- 188** 5.3 Vergleichende Analyse der Ergebnisse 1986 bis 2011
-
- 188** 5.3.1 Vergleich Nachtaufnahmen 1986 – 2011
-
- 191** 5.3.2 Vergleich der Mittagsaufnahmen 1986 und 2004
-
- 202** 5.4 Analyse der Ergebnisse – Besonderheiten der Oberflächentemperaturen 1986 – 2004
-
- 202** 5.4.1 Besondere Oberflächen-temperaturstrukturen 1986
-
- 209** 5.4.2 Einflüsse von Bebauungsveränderungen
-
- 211** 5.4.3 Flughafen Graz
-
- 212** 5.4.4 Thermale Stadtstruktur-analyse 2011 und 1986
-

**218 6. DIE DIGITALE
KLIMATOPKARTE**

- 218** 6.1 Erläuterungen zur Klimatopkarte
-
- 219** 6.2 Die ausgewählten Baukörper-
typen und ihre Rolle zur
Definition der Stadtklimatop-
karte
-
- 221** 6.3 Geländeklimatische
Aspekte bei der Klimatop-
abgrenzung
-
- 222** 6.4 Besondere Oberflächen
und ihre Zuordnung zu
Klimatopen (als Sonder-
klimatope in der Karte
bezeichnet)
-
- 223** 6.5 Erläuterungen zum Grund-
konzept der kartographi-
schen Gestaltung
-
- 224** 6.6 Zusammenfassende
Beschreibung der
Stadtklimatope
-
- 230** 6.7 Hinweise zu den
Sonderklimatopen
-

235 7. DIE KARTE DER PLANERISCHEN HINWEISE

- | | | |
|------------|-------|----------------------------------------------------------------------------|
| 235 | 7.1 | Vorbemerkungen |
| 236 | 7.2 | Einleitung |
| 236 | 7.3 | Planerische Empfehlungen |
| 236 | 7.3.1 | Zonen 1 und 2 (Dichte Verbauung mit ausgeprägtem Wärmeinseleffekt Nachts) |
| 241 | 7.3.2 | Wohnen – Vorranggebiete (Zonen 3 bis 9) |
| 243 | 7.3.3 | Wohnen mit Einschränkungen (Zonen 9 bis 18) |
| 249 | 7.3.4 | Eignungsbereich Erholung/ Klimaökologische Ausgleichsräume („Grün-gürtel“) |
| 250 | 7.3.5 | Bereiche mit Industrie und Gewerbe (Wohnen mit Einschränkungen) |
-

253 8. ANALYSE AUSGEWÄHLTER KLIMAELEMENTE

- | | | |
|------------|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 253 | 8.1 | Die Verhältnisse der Lufttemperatur in Graz in den Jahren 2004–2011 |
| 260 | 8.2 | Die Verhältnisse des Niederschlags in Graz in den Jahren 2004–2011 |
| 261 | 8.3 | Analyse der Besonderheiten der Lokalwinde |
| 261 | 8.3.1 | Allgemeines |
| 261 | 8.3.2 | Datenlage und Messmethodik |
| 264 | 8.3.3 | Ergebnisse |
| 274 | 8.3.4 | Vergleichende Betrachtung bei Modellierungen für das Grazer Windfeld |
| 276 | 8.3.5 | Weitere Besonderheiten bei den Pseudoflurwinden |
| 285 | 8.3.6 | Besonderheiten der Pseudoflurwinde im Westen von Graz |
-

292 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

292 LITERATURVERZEICHNIS

296 BIOGRAFIEN

EINLEITUNG

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

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

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

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

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

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

1. BEFLIEGUNGEN UND DATENGRUNDLAGEN

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

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

Abbildung 1:
Die Einbettung des
Untersuchungsgebietes
in das Grazer Umland



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

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

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

1990 und 2002: Revision des Stadtentwicklungsplanes unter Einbindung der Stadtklimaanalyse

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

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

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

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

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

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

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

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

Temperaturstrahlungswertekarte (Ausschnitt) nach K. ZIRM 1977

(Versuch einer Synthese Nacht-/Tag-Aufnahme)

Abbildung 2: Ausschnitt
der Thermalstudie 1977



■ „Kaltluftproduzenten“
(Wiesen, Parkanlagen)

■ Flächen mit durchschnittlicher
Wärmespeicherung

■ Flächen mit überdurchschnittlicher
Wärmespeicherung

■ „Wärmeproduzenten“
(Industriebetriebe, Bahnhof)

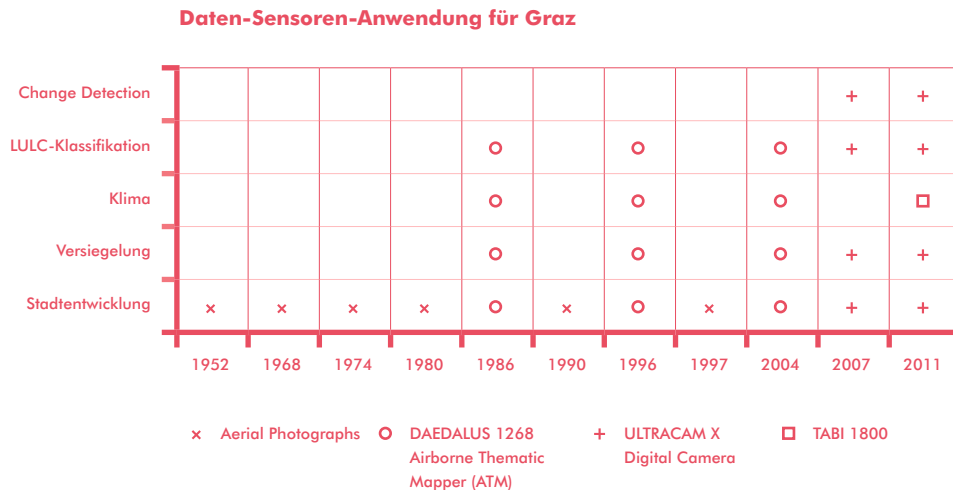


Abbildung 3:
Daten – Sensoren und
Anwendungen für Graz

1.1 DER DAEDALUS-MULTISPEKTRALSCANNER

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

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

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

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

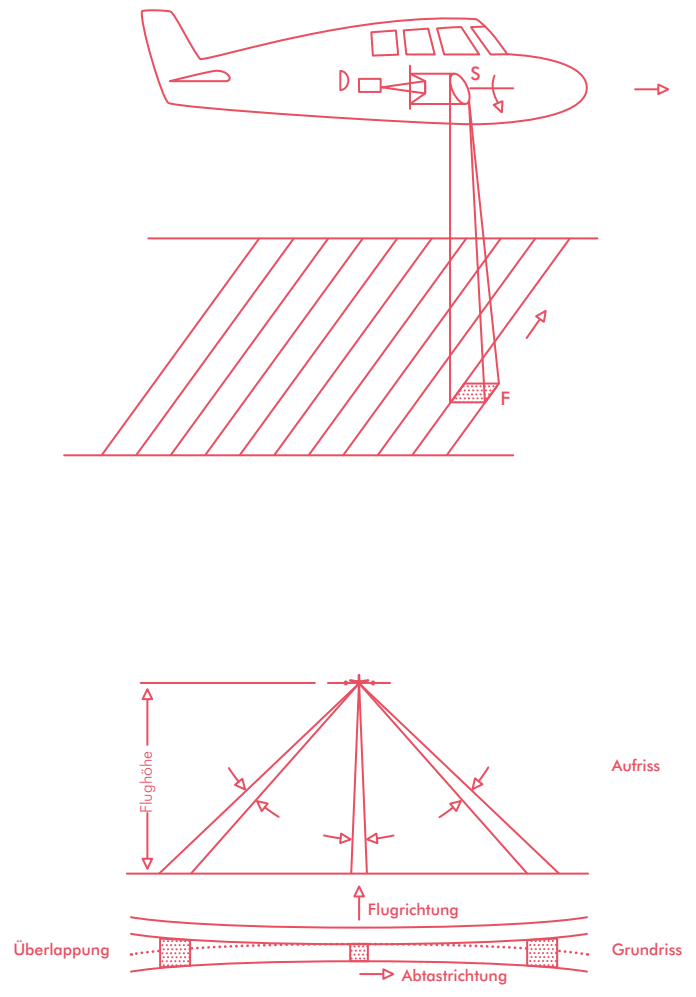



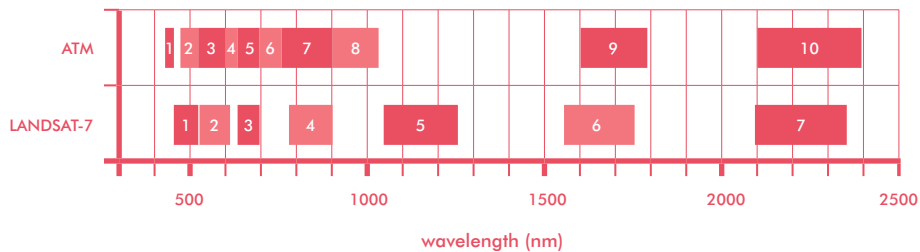
Abbildung 5:
Konfiguration des
Multispektralscanners
DAEDALUS
(Quelle: DLR)





Daedalus AADS 1268
Airborne Thematic Mapper

Abtastmodus	Weitwinkel
Gesichtsfeld, total	85,92°
Streifenbreite (h 560 m)	ca. 1040 m
Gesichtsfeld, momentan	2,5 mrad
Bodenauflösungselement (h 560 m)	1,4 x 1,4 m ² im Nadir
Bildelemente pro Scanzeile	716
Abtastrate (h 560 m)	66,7 Hz
Rollkompensation	6e-aktiviert
Spektrale Kanäle	Thematic Mapper - kompatibel
	Kanal-Nr. Spektralband (µm)
	1 0,424 – 0,450
	2 0,465 – 0,520
	3 0,522 – 0,600
	4 0,594 – 0,634
	5 0,626 – 0,691
	6 0,692 – 0,759
	7 0,756 – 0,906
	8 0,897 – 1,022
	9 1,571 – 1,780
	10 2,055 – 2,232
	11 8,60 – 11,35
	12 wie 11
Radiometrie	
Digitalisierungstele	8 Bit
Empfindlichkeit im Kanal 1-10	angepasst an städtische Bebauung
Temperatur-Einstellwerte für Kanal 11, 12	ca. +2°C Blackbody 1, ca. +42°C Blackbody 2
Kalibrierstandard für Kanal 1-10	Test Bench Daedalus AB 532
Kalibrierstandards für Kanal 11, 12	scanner-interne Schwarzkörperstrahler



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

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

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

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

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

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

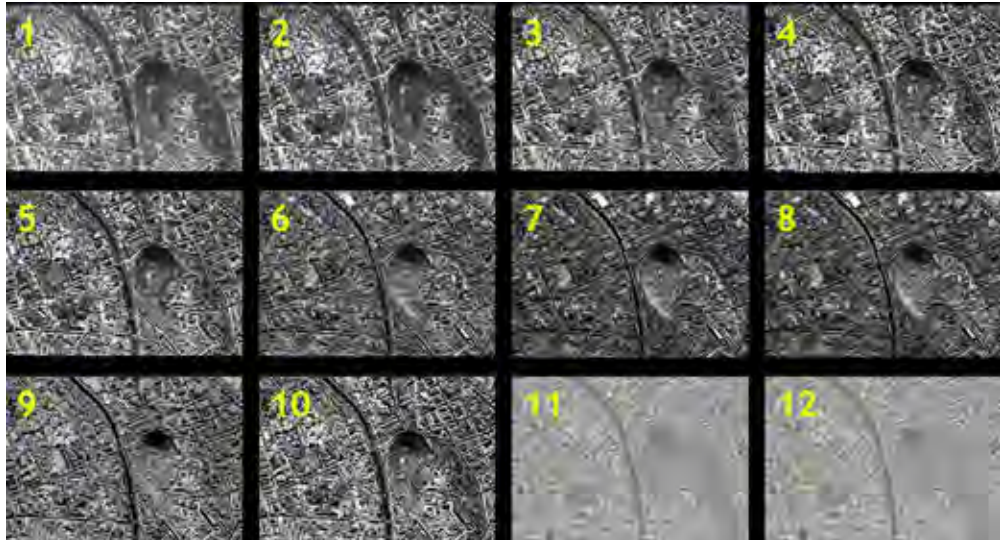
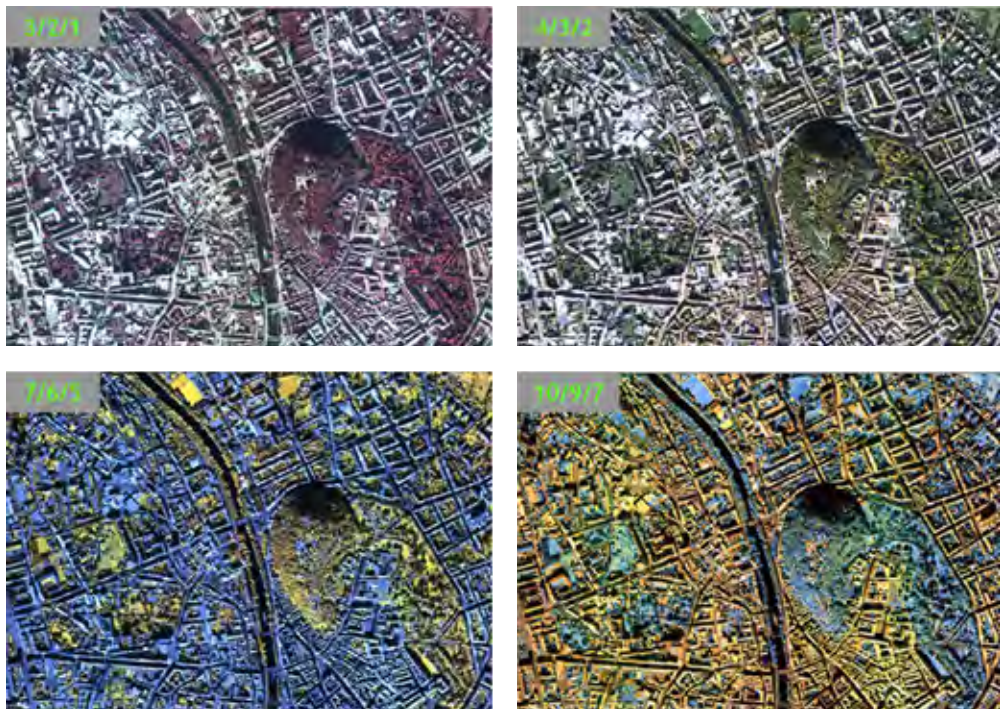


Abbildung 8:
Verschiedene RGB-
Darstellungsmöglich-
keiten bzw. Kanal-
kombinationen



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

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

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



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

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



1.2 DER TABI-1800-THERMALSENSOR

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

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

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



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

FEATURES:

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

High thermal resolving power (0.05 degrees Celsius)

Wide imaging array (1800 pixels)

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

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

Number of spectral bands: ONE (1)

Cooling: Stirling Cycle Cooler

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

Dynamic Range: 14 Bit

Standard Temperature Measurement Range: –20 to 150 °C

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

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

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



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

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

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

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

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

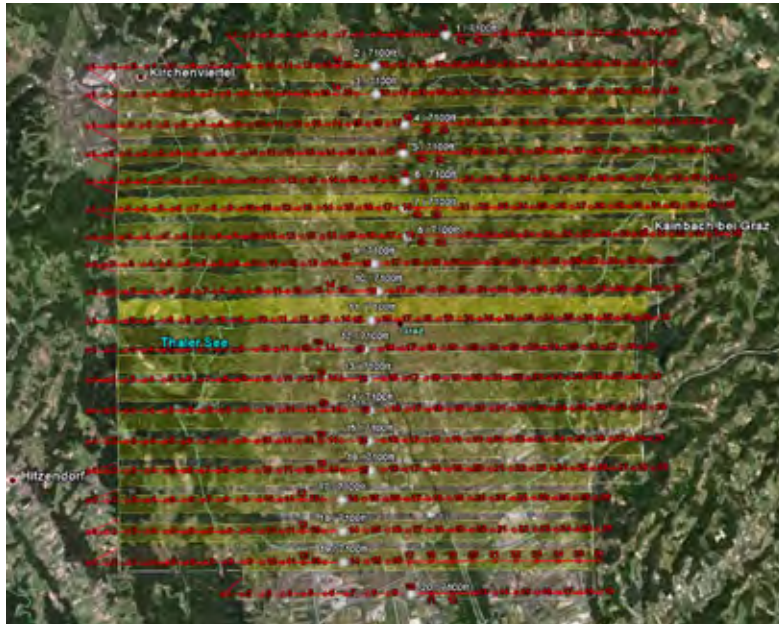


Abbildung 14:
TABI-1800-Aufnahme
vom 20.12.2011
(hell: warm, dunkel:
kalt)



1.3 DIE ULTRACAM-BEFLIEGUNGEN 2007 UND 2011

Die zwei **UltraCam-X-Befliegungen** (B, G, R und NIR; SCHNEIDER und GRUBER 2008, GRUBER et. al 2009) vom September 2007 (8 Bit) und Juni 2011 (16 Bit) wurden mit einer (resampled) geometrischen Auflösung von 25 cm (die Originalbilddaten von 2011 besitzen 7 cm Auflösung) verwendet. Aus diesen Befliegungen wurden *True Orthofotos* sowie digitale Oberflächenmodelle erstellt (BISCHOF 2011) und vom Magistrat Graz (Referat für Photogrammetrie des Stadtvermessungsamtes) bereitgestellt. Die Originalauflösung der **2007-UltraCam-X-Daten** betrug zehn Zentimeter mit Ausnahme der Region Plabutsch, die mit einer Auflösung von 20 Zentimetern zur Verfügung stand. Projiziert ist das Datenmaterial auf das Gauss-Krüger-(GK)-M34-System. Sofern nicht anders zitiert, wurden die Informationen dies Kapitels aus BISCHOF 2011 übernommen.

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

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

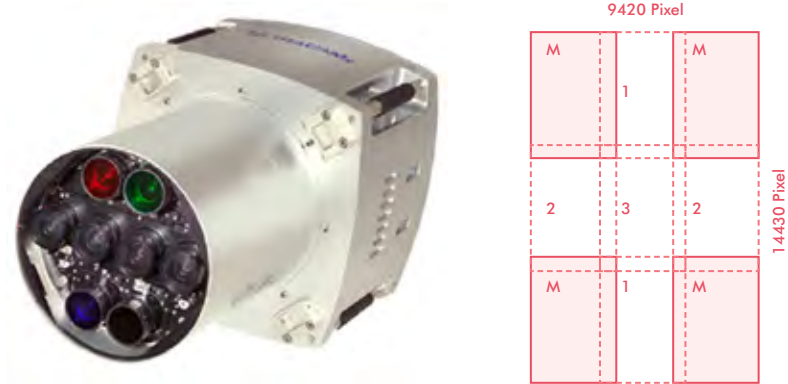
Panchromatisch

Echtfarben-RGB

Nahes Infrarot

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

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



FOLGENDE PRODUKTE ENTSTANDEN AUS DER ULTRACAM-X-BEFLIEGUNG:

Orthobilder und True Orthobilder im Blattschnitt der Grazer Mappe

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

Orientierungsdaten aus Aerotriangulation und Bündelausgleich

Digitales Oberflächenmodell im Mappenblattschnitt 1:1000

Digitales Geländemodell im Mappenblattschnitt 1:1000

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



1.4 SONSTIGE DATENGRUNDLAGEN

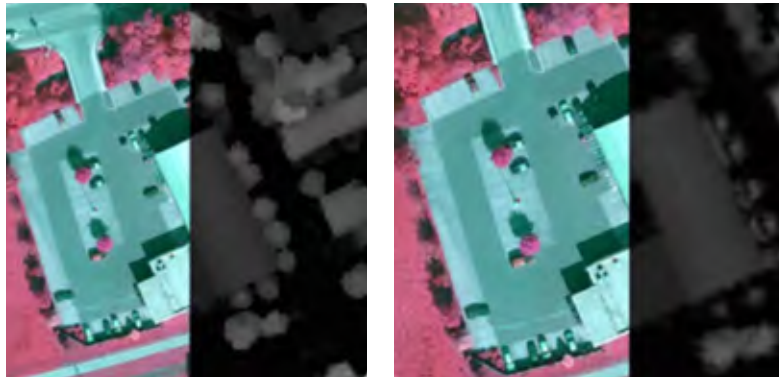
Für den Verarbeitungsprozess bzw. die Analyse der verschiedenen Befliegungen müssen zusätzliche Geodaten eingebunden werden, die größtenteils vom Vermessungsamt und der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt wurden.

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

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

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

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



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

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

FOLGENDE LASERSCANNER WURDEN VERWENDET

(HERSTELLER ALLER GERÄTE: RIEGL GMBH):

LMS-Q560/200 kHz

LMS-Q560/240 kHz

LMS-Q680i/240 kHz

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

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

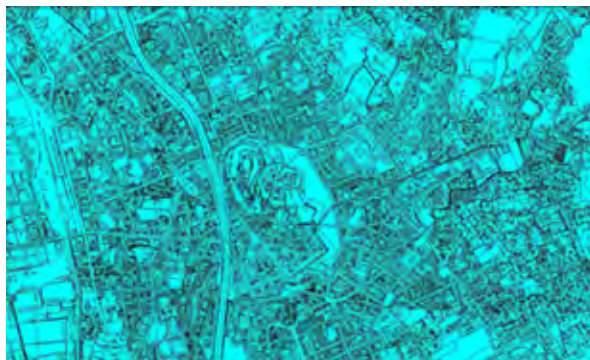
Abbildung 18:
Die Datengrundlagen:
INTENSITÄTSBILD
(LiDAR) – ULTRACAM –
DGM – NDSM
(von links nach rechts,
Quelle: SULZER et al.,
2013)



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

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

Abbildung 19:
Ausschnitt der digitalen
Katastermappe



1.5 DATENVORVERARBEITUNG/ DATA PREPROCESSING

1.5.1 DATENVORVERARBEITUNG DER DAEDALUS-DATEN 1986 UND 2004

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

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

Abbildung 20:
Datenvorverarbeitung
der DAEDALUS
Aufnahmen



1.5.1.1 RADIOMETRISCHE KORREKTUR DER DAEDALUS-DATEN 1986 UND 2004

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

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

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

Untersuchung des Materials auf systembedingte Störungen einzelner Scanzeilen

Absorption der Strahlung durch Optik, Filter und Sensor

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

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

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

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

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

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

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

Streustrahlung in der Atmosphäre

Reflektierte Strahlung des betroffenen Pixels

Reflektierte Strahlung von Pixeln aus der Nachbarschaft

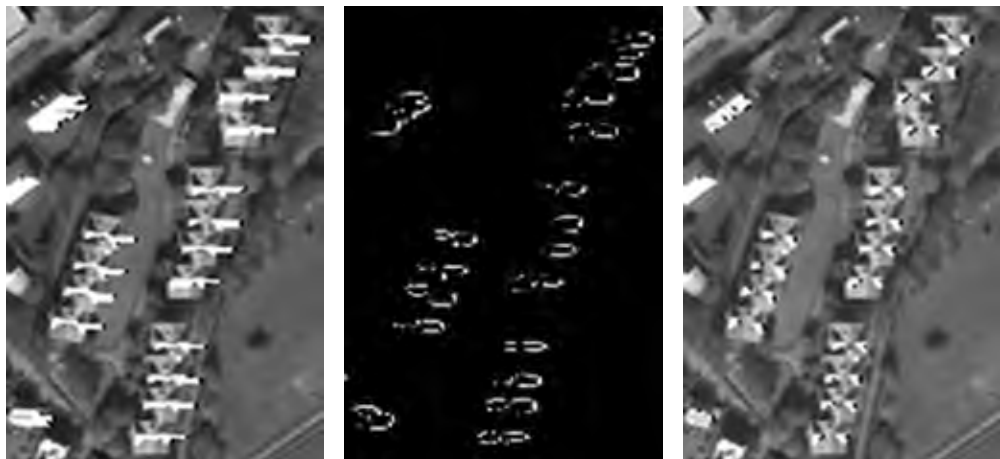
Bei der atmosphärischen Korrektur gilt es nun aufgrund von Korrekturmodellen, präzisen Informationen aus den Kalibrierungsprotokollen des Scanners und den gegebenen Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Befliegung, die unerwünschten Informationen 1 und 3 zu eliminieren, um ausschließlich die Strahlung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

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

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

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

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



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

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

1.5.1.2 ENTZERRUNG VON DAEDALUS-BILDSTREIFEN 1986 UND 2004

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

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

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

FOLGENDE URSACHEN KÖNNEN BILDVERZERRUNG BEDINGEN:

Schwankungen der Fluggeschwindigkeit

Kursabweichungen

Neigungsänderungen des Flugzeuges

Einflüsse der Geländeform

Sensorbedingte Panoramaverzerrung

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

ZIELE DIESER ARBEITEN WAREN:

Sicherung und Aufbereitung des gesamten Datenmaterials

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

Erstellung einer Versiegelungskarte

Erstellung einer Landnutzungskarte

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

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

Abbildung 22:
Verzerrungen in der
DAEDALUS-Aufnahme
von 1986



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

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

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

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

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

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

DIE ENTZERRUNG ERFOLGT MITTELS EINES PARAMETRISCHEN GEOKODIERUNGSVERFAHRENS UNTER EINBEZIEHUNG VON:

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

Einem digitalen Höhenmodell

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

DIE ENTZERRUNG UMFASST JE BILDSTREIFEN FOLGENDE GLOBALE ARBEITSSCHRITTE:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



Abbildung 25:
DAEDALUS-Bildstreifen
der Flugmesskampagne
Graz 2004

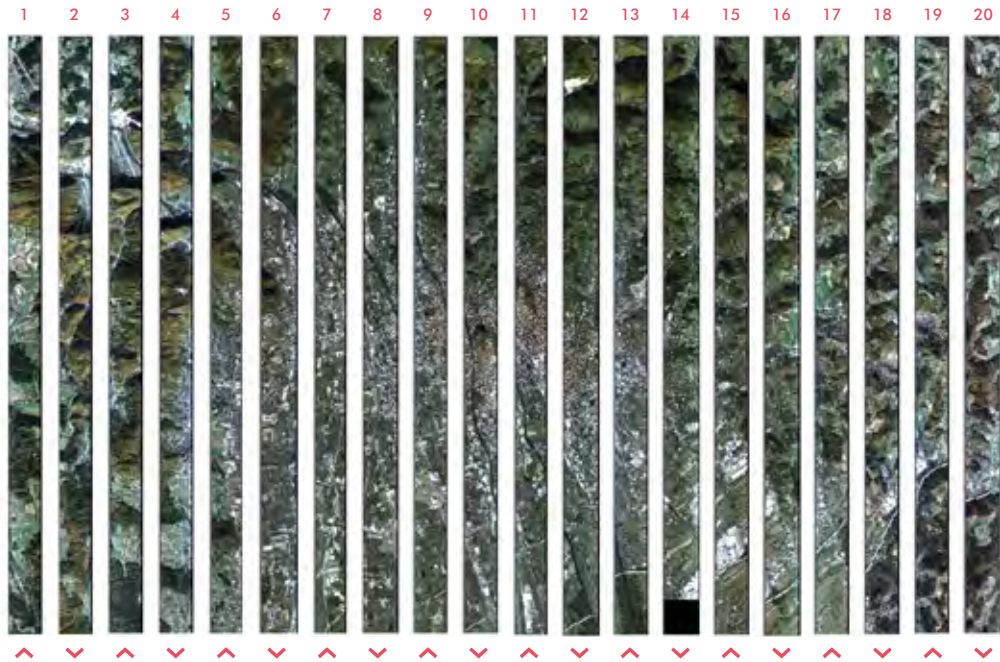


Abbildung 26:
Orthophotomosaik
(Pixelauflösung
1 Meter)

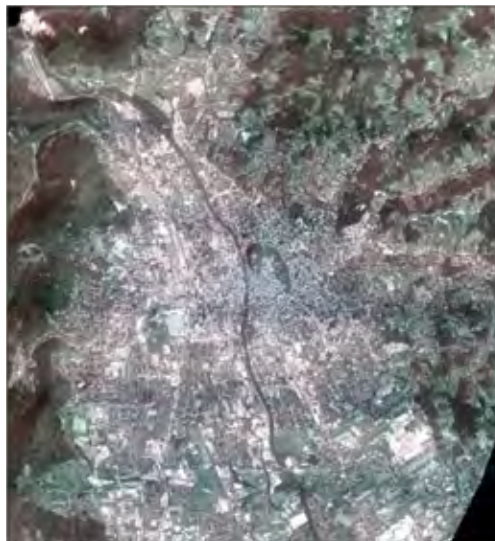


Abbildung 27:
Digitales Höhenmodell
(Pixelauflösung
2 Meter)



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

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

Abbildung 28:
Nominelle Punkt-
residuen

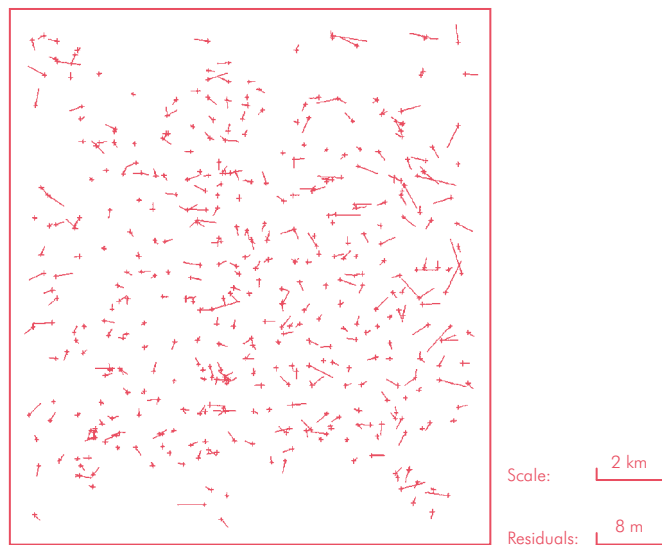
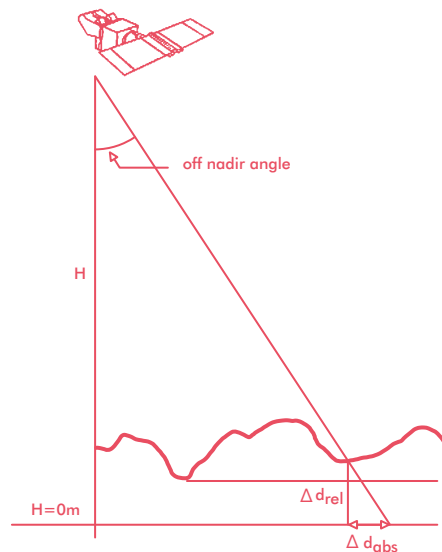


Abbildung 29:
Zusammenhang
zwischen Höhen- und
Punktlagefehler



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

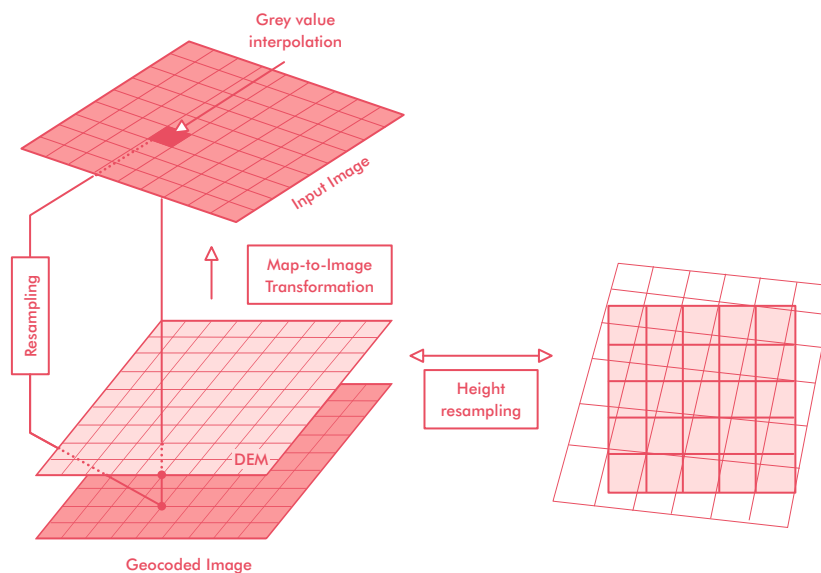
DIE ENTZERRUNG ERFOLGT PIXEL FÜR PIXEL UND UMFASST FOLGENDE PROZESSIERUNGSSCHRITTE:

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

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

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

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



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

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

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

Abbildung 33:
Qualitätskontrolle durch
Überlagerung
mit Orthophotos



Puntigam



Straßgang



Liebenau



Webling

Abbildung 34:
Visueller Daten-
vergleich
(Jakominiplatz)



Graz 10



Graz 11



Ortho-Photo

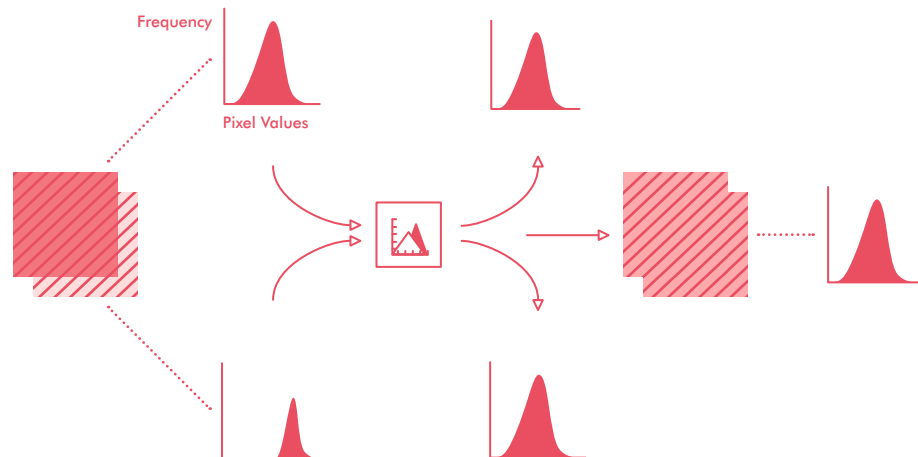
Abbildung 35:
Visueller Daten-
vergleich (Liebenau)



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

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

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



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

Abbildung 37:
Verschiedene
Möglichkeiten der
Cutline-Setzung



Geometry-based Cutline



Digitalisierte Cutline



Weighted Cutline

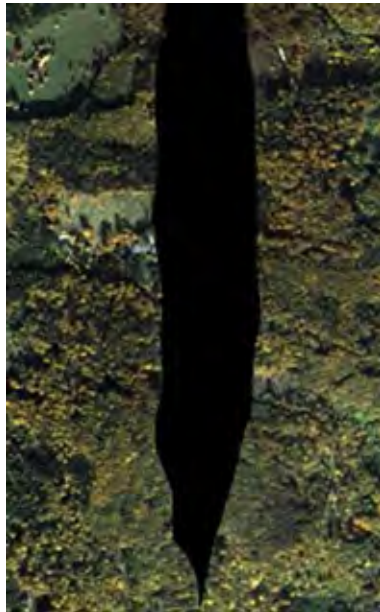


Digitalisierte Cutline

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

„Löcher“

Abbildung 38:
Datenlöcher



1.5.2 DATENVORVERARBEITUNG DER TABI-1800-DATEN

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

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

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

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

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

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

2. VERSIEGELUNGSKARTEN

2.1 EINLEITUNG

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

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

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

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

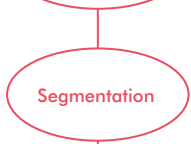
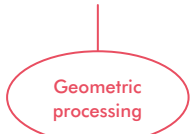
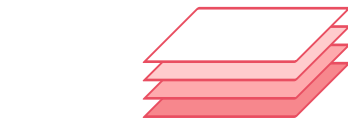
Die Analyse von Versiegelungskarten kann u. a. für klimabezogene Fragestellungen eingesetzt werden, sei es um Grundwasserinfiltrationen zu bestimmen oder auch um Wärmeinseleffekte zu untersuchen.

2.2 ARBEITSABLAUF BEI DER ERSTELLUNG DER VERSIEGELUNGSKARTEN

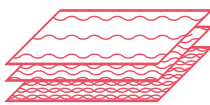
2.2.1 DAEDALUS-DATEN 1986, 1996 UND 2004

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

Multispectral image 2004



Segmentation levels

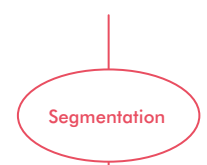
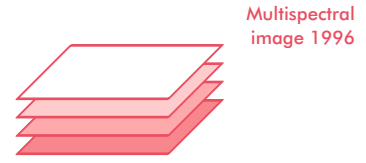


Sealing map 2004



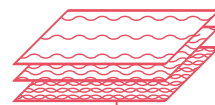
Features:
 Grey values
 Shape
 Texture
 Neighbourhood relations
 Hierarchy

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



Multispectral image 1996

Segmentation levels



Sealing map 1996



Accuracy matrix

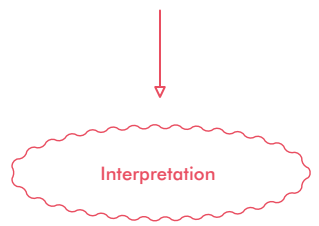
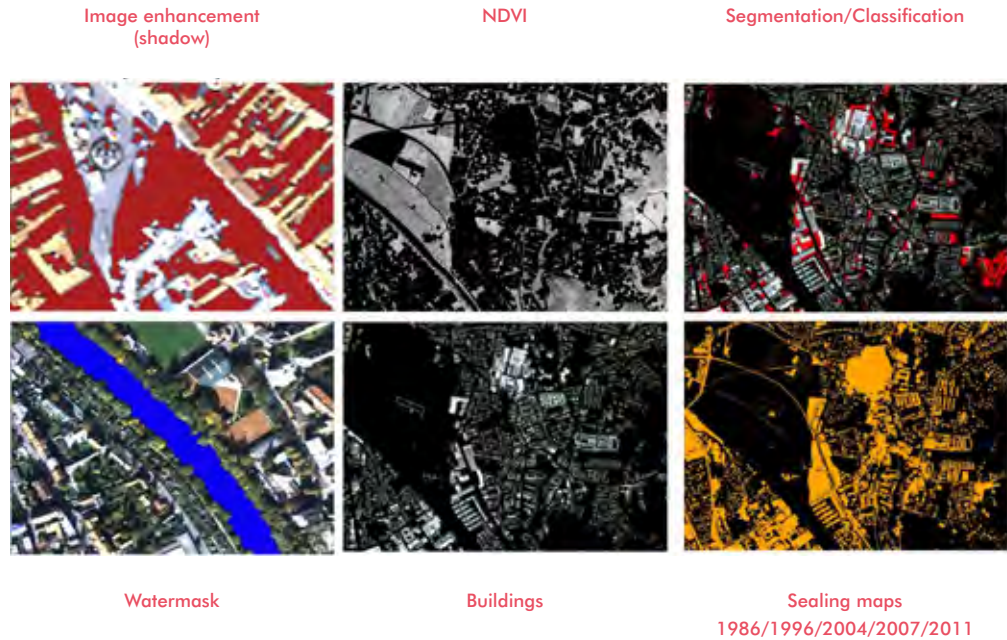


Abbildung 2:
Workflow der
Versiegelungsanalyse
der DAEDALUS-Daten



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

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

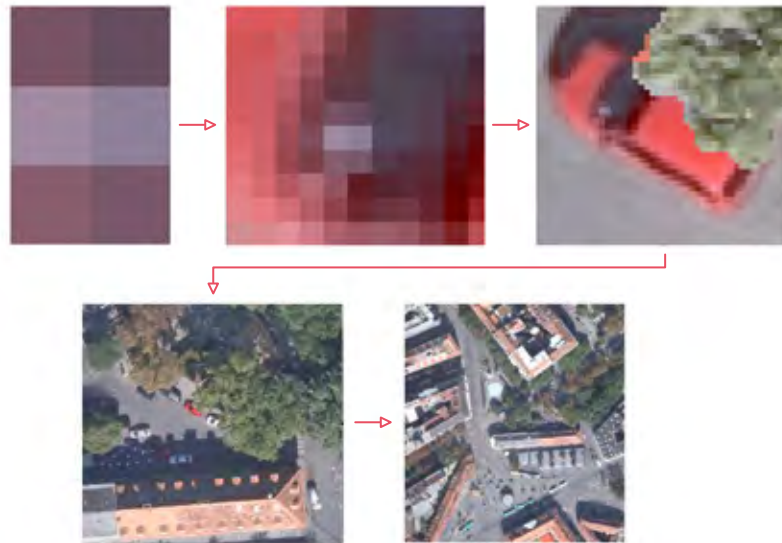
Hier werden nun Pixel zu nicht-überlappenden Pixelgruppen (Segmenten bzw. Objekten) zusammengefasst.

DIE OBJEKTBASIERTE KLASSTIFIKATION LÄSST SICH IN ZWEI BLÖCKE AUFSPALTEN:

Segmentierung

Klassifikation

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



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

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

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

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

Tabelle 1:
Segmentierungs-
parameter von
1986

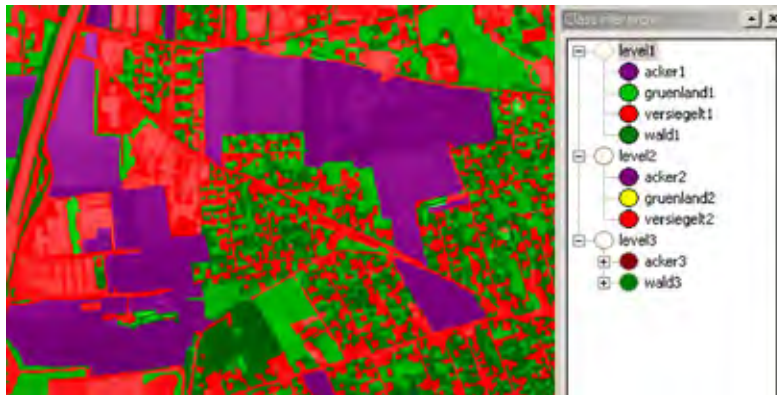
Level	Scale- Parameter	Colour	Shape	Compact- ness	Smooth- ness
1	6	0,8	0,2	0,2	0,8
2	20	0,7	0,3	0,3	0,7
3	45	0,6	0,4	0,5	0,5

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

Abbildung 4:
Beispiel für die
Segmentierungs-
ebenen



Abbildung 5:
Klassifikationshierarchie



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

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

Spektrale Eigenschaften

Form-Parameter

Beziehungen zu Nachbarobjekten

Beziehungen zu übergeordneten Objekten

Beziehungen zu untergeordneten Objekten

Beziehungen zu anderen Klassen

FOLGENDE KLASSEN WURDEN IM RAHMEN DIESER KLASSEFIKATION ERSTELLT:

Ackerflächen

Grünflächen

Wald

Wasserflächen

Abbaufächen

Versiegelte Flächen

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

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

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

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

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

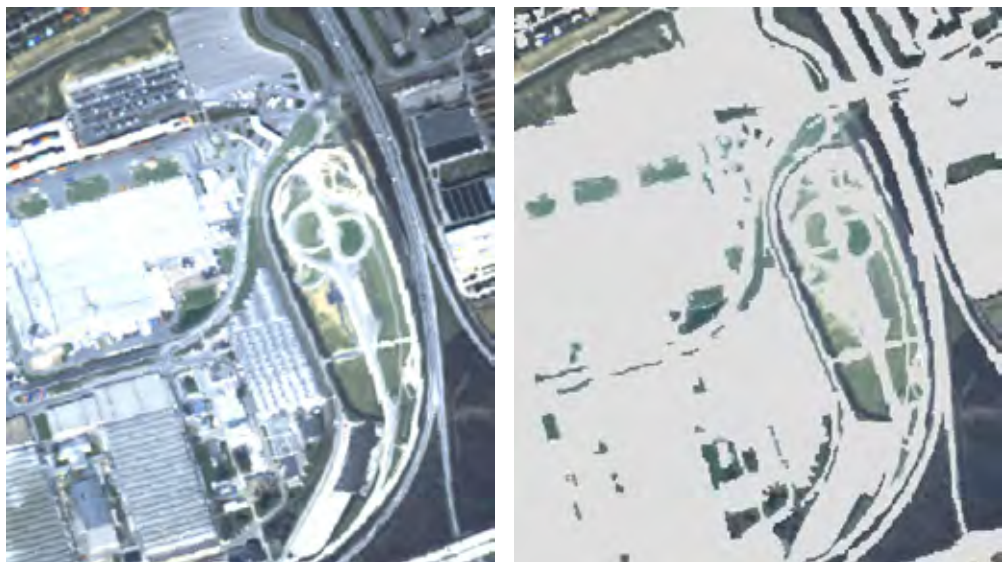
Abbildung 6:
Versiegelte Flächen
1986



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

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

Abbildung 7:
Beispiel einer
versiegelten Fläche
von 1996

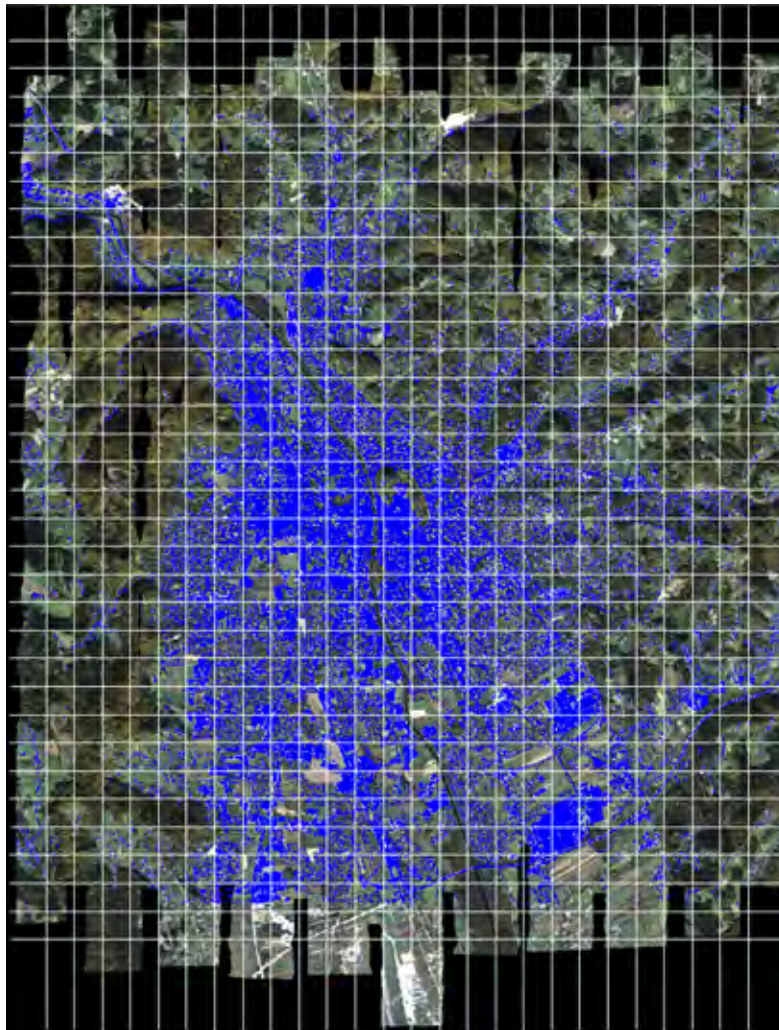


Auf Grund des jahreszeitlich späten Befliegungszeitpunktes (24. Oktober **2004**) zeigt sich trotz Mittagszeit deutlich der Schattenwurf von Bäumen und Gebäuden. Um diese relativ dunklen Flächen sowohl visuell als auch digital zu verbessern, wurde eine radiometrische Korrektur der Schatten durchgeführt.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

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

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

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



2.2.2 ULTRACAM-X-DATEN 2004 UND 2007

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

2.2.2.1 VERSIEGELUNG ULTRACAM X 2007

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

Methodik für eine Landbedeckungsklassifikation des Grazer Stadtgebietes erarbeitet werden.

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

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

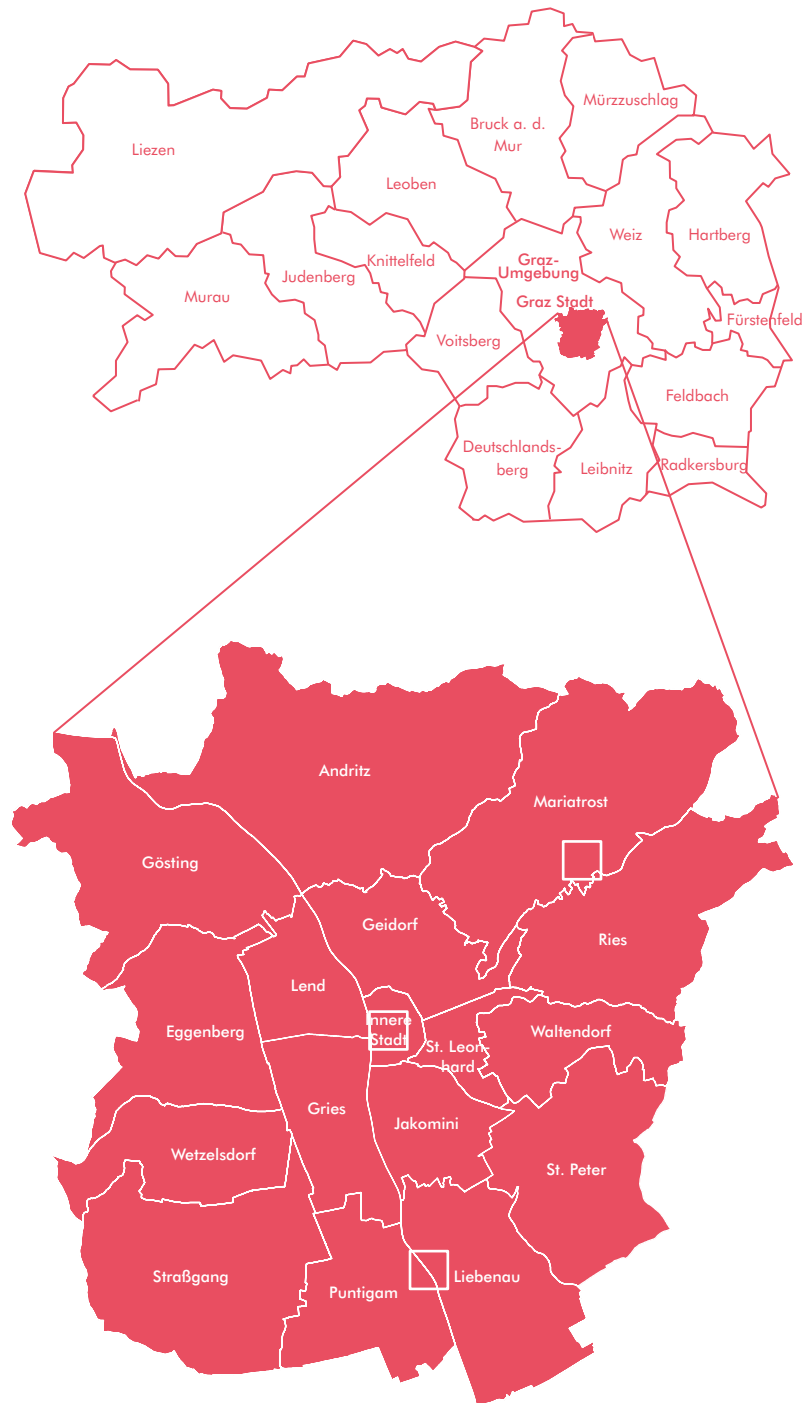


Abbildung 10:
Die Untersuchungs-
gebiete, 1 Mariatrost,
2 Zentrum Innere Stadt,
3 Liebenau-Puntigam
(MUICK 2011)



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

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

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

Ndsm aus LiDAR-Daten

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

Intensitätsbild aus LiDAR-Daten

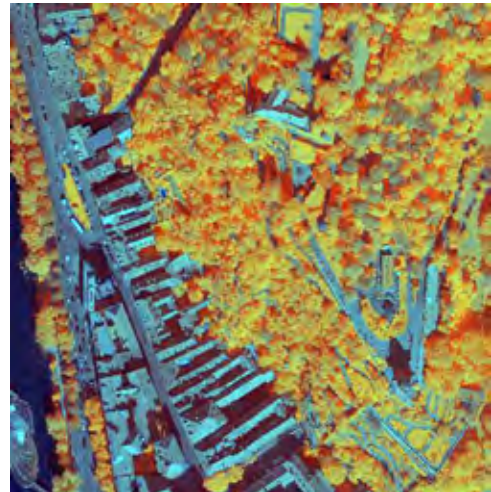
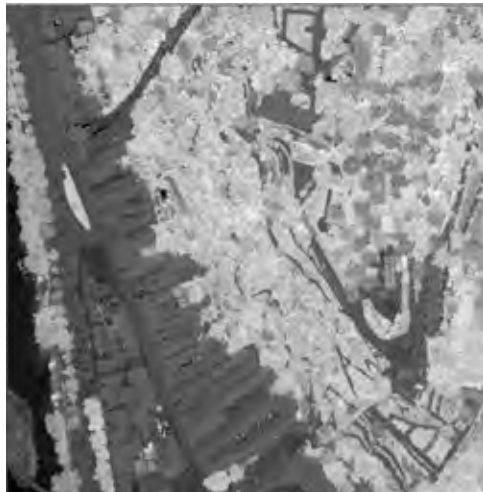
Return Layer aus LiDAR-Daten

Intensitätsbild der mittleren und hohen Vegetation

Berechnung des NDVI

Slope Layer

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



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

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

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

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

EINEN KURZEN ÜBERBLICK ÜBER DIE ARBEITSSCHRITTE GIBT FOLGENDE AUZÄHLUNG:

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

Segmentierung der Rasterdatenlayerstacks:

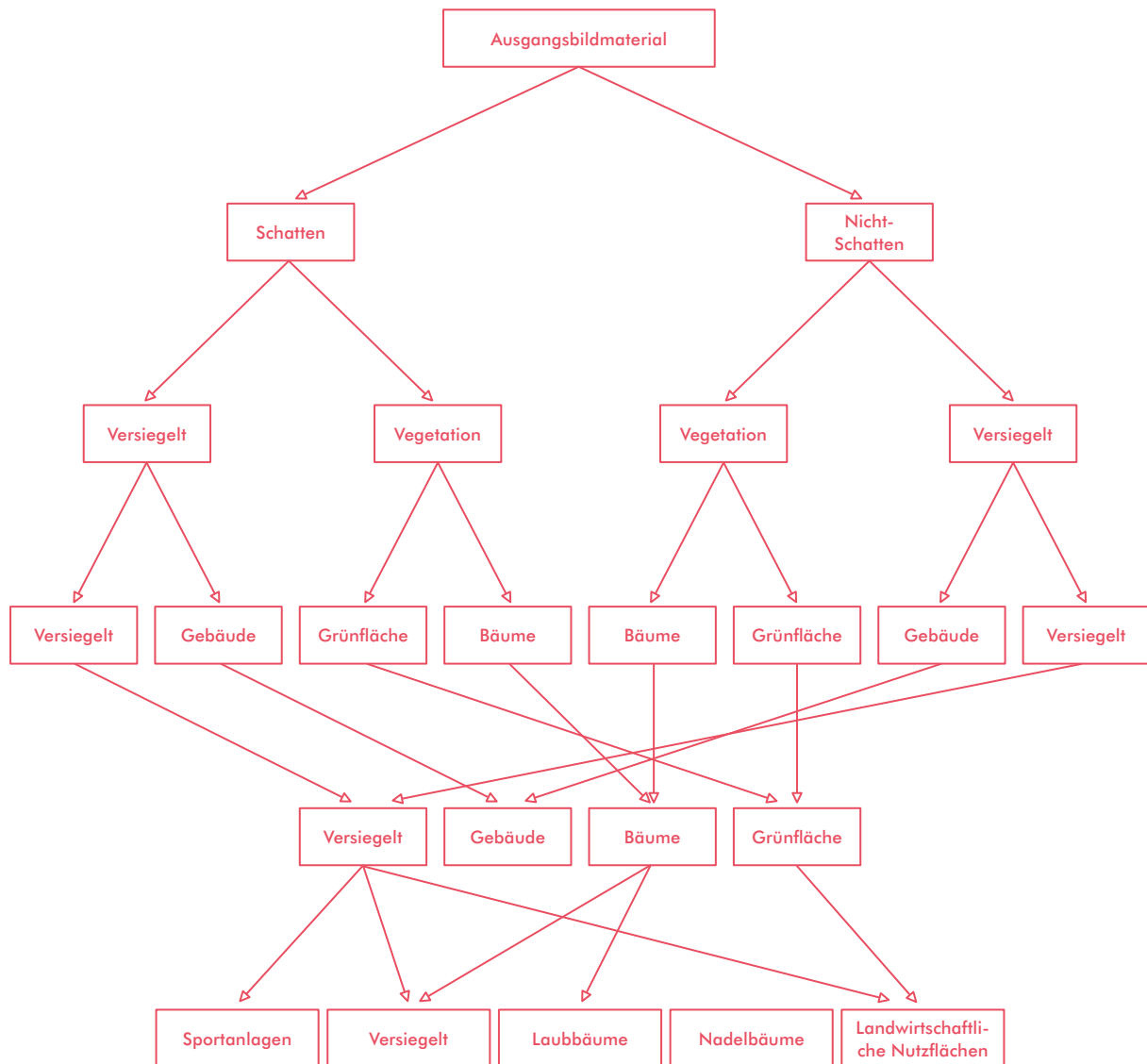
Um die geeigneten Einstellungen für die Segmentierung zu ermitteln, wurde eine große Anzahl an Testsegmentierungen durchgeführt, da es für die korrekte Erstellung einer Segmentierung keine echte Anleitung gibt. Dies resultiert daraus, dass bereits die Segmentierung auf den jeweiligen Anwendungszweck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

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

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

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

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



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

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

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

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



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

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

Versiegelt

Gebäude

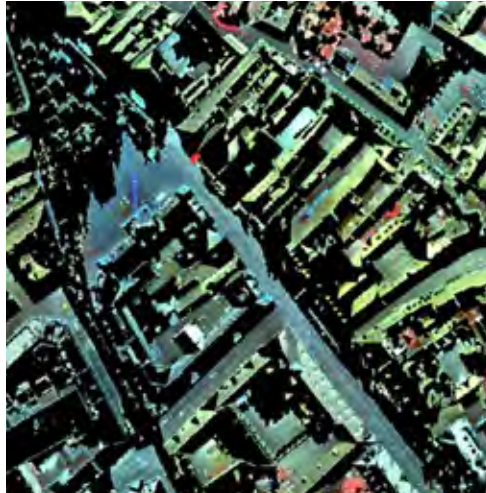
Vegetation (allg.)

Waldflächen

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

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

Abbildung 14:
Gespreizte Schatten-
flächenmaske
(MUICK 2011)



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

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

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

UltraCam-X: roter Kanal

UltraCam-X: grüner Kanal

UltraCam-X: blauer Kanal

UltraCam-X: roter Kanal

UltraCam-X: naher Infrarot Kanal

NDVI

Ndsm Photogrammetrie

Ndsm LiDAR

Intensität LiDAR allgemein

Intensität LiDAR nur Bäume

Returnnummer LiDAR

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

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

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



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

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

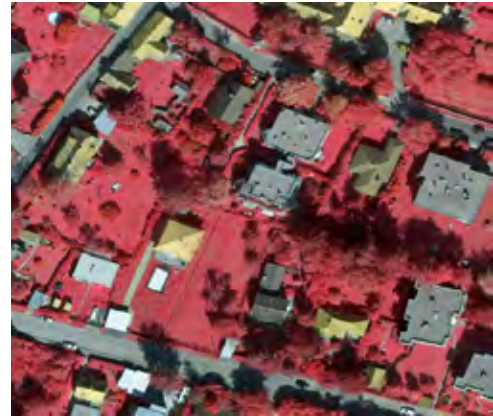
Abbildung 16:
Die Klasse „Gebäude“
im Innenstadtbereich
(MUICK 2011)



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

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

Abbildung 17:
Unterschiedlicher
Schattenwurf, RGB
links, CIR rechts



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

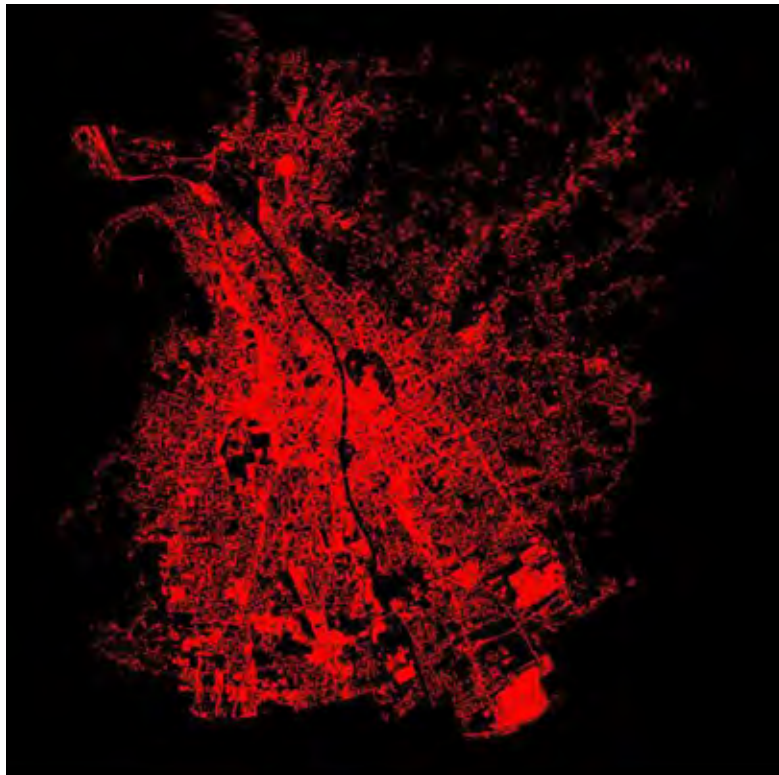
Resultat: Das Resultat zeigt eindeutig, dass die Wahl eines objektorientierten Ansatzes für diese Problemstellung die richtige war. Denn selbst die auf hochauflösende Daten geeignete Software kommt mit der bestehenden Blockgröße und einer bereits reduzierten Auflösung von 30 cm an ihre Grenzen. Eine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

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

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



Abbildung 19:
Versiegelungsmaske
der Stadt Graz 2007



2.2.2.2 VERSIEGELUNG ULTRACAM-X 2011

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

Abbildung 20:
Schattenflächen
(links 2007,
rechts 2011)



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

GENAUIGKEITSABSCHÄTZUNG 2011:

Versiegelte Flächen 92,7 Prozent

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

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

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



2.2.2.3 VERSIEGELUNG IM CHANGE-DETECTION-VERFAHREN

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

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

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

FOLGENDE FORSCHUNGSFRAGEN SOLLEN IM ZUGE DIESES ARBEITSPAKETS BEANTWORTET WERDEN:

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

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

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

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

Abbildung 22:
Räumliche Lage der
Testgebiete in Graz



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

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

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

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

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

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



Change-Detection-Methodik – Allgemein

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

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

LU (2004) HAT DIE ÜBRIGEN BEDINGUNGEN TREFFEND ZUSAMMENGEFASST:

Präzise (Co-)Registrierung des multitemporalen Datensatzes

Sorgfältige radiometrische und atmosphärische Kalibrierung zwischen den Daten des multitemporalen Datensatzes

Ähnliche phänologische Stufen zu den Aufnahmezeitpunkten

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

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

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

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

Sensor- und umwelteinflusspezifische 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.

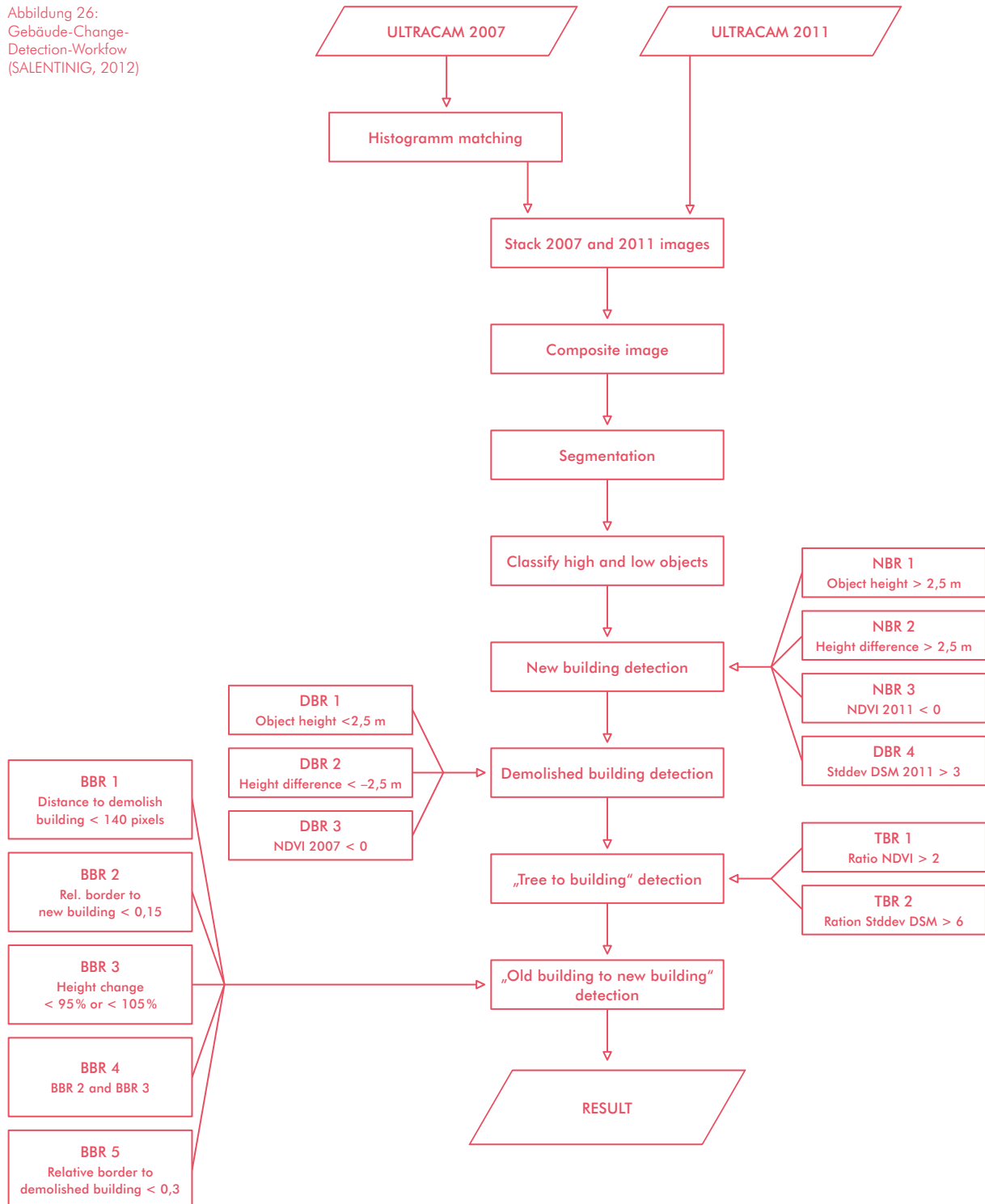
Für die Segmentierung des multitemporalen Datensatzes wurden die *CIR*-Daten sowie die *DSMs* beider Aufnahmezeitpunkte miteinbezogen. Somit wurde gewährleistet, dass veränderte Objekte möglichst gut abgegrenzt werden konnten. Tabelle 2 zeigt die Segmentierungsparameter.

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-Workflow
(SALENTINIG, 2012)



Versiegelte Flächen sind niedrige Objekte. Daher wurden für die Detektion von neuen versiegelten Flächen nur Objekte mit einer minimalen Höhe von 2,5 m behandelt. Versiegelte Flächen weisen keine Photosyntheseaktivität auf. Für die Ausnutzung dieser Tatsache wurde wiederum der NDVI verwendet ($NDVI_{2011} < 0$). 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)

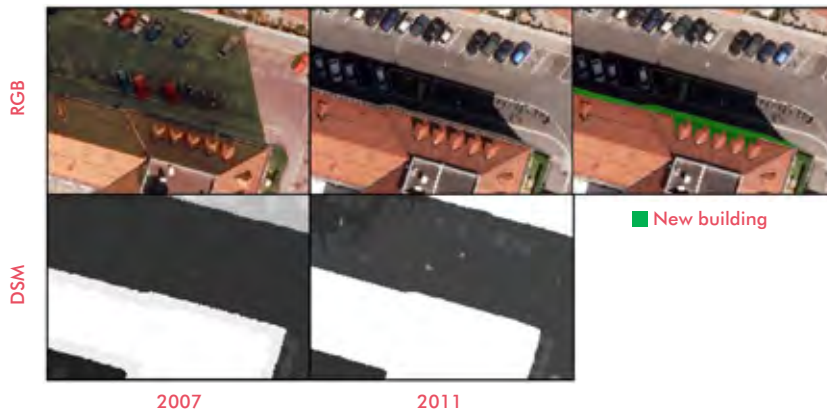


Abbildung 28:
Falsche
Klassifikation
aufgrund VON
DSM-Unterschieden
(SALENTINIG,
2012)



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

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

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

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

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

Gebäudeveränderungen: Das erste Programmpaket des Gebäudealgorithmus widmete sich der Detektion von neuen Gebäuden an vormals un bebauten 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

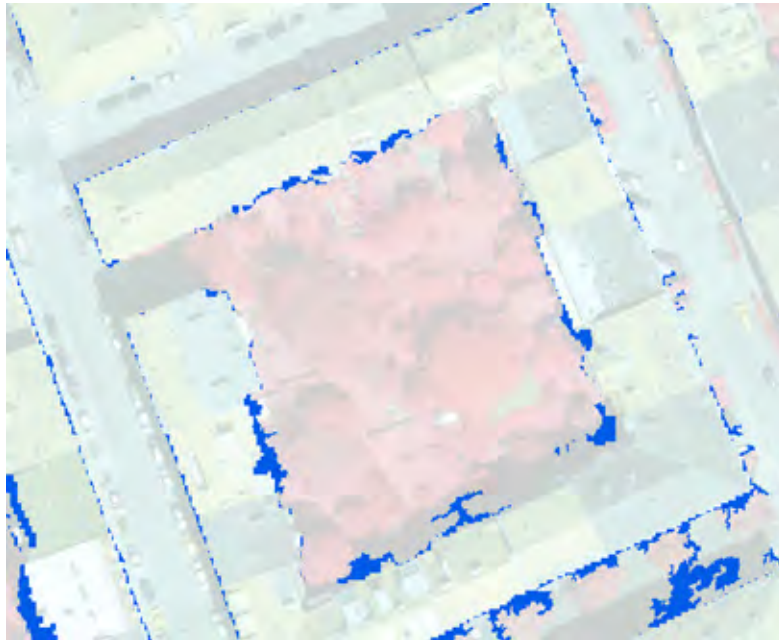


Abbildung 38:
Ergebnisse der
Gebäude-Change-
Detection;
links: Post Classification
Comparison,
rechts: entwickelter
Algorithmus



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

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

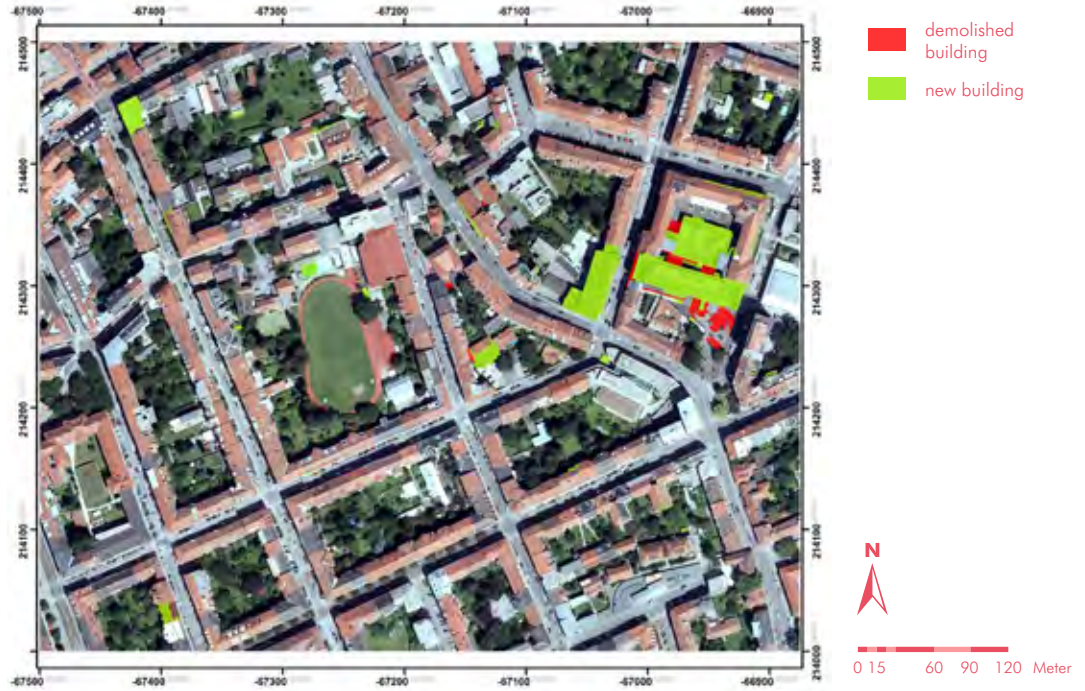
Die zur Verfügung gestandenen UltraCam-X-Daten sind „High End“-Luftbilddaten. Durch die sehr hohe räumliche Auflösung und die Aufnahme sowohl im sichtbaren als auch im nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums des Lichts eignen sie sich hervorragend für die Anwendung für eine *Change Detection*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

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

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

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

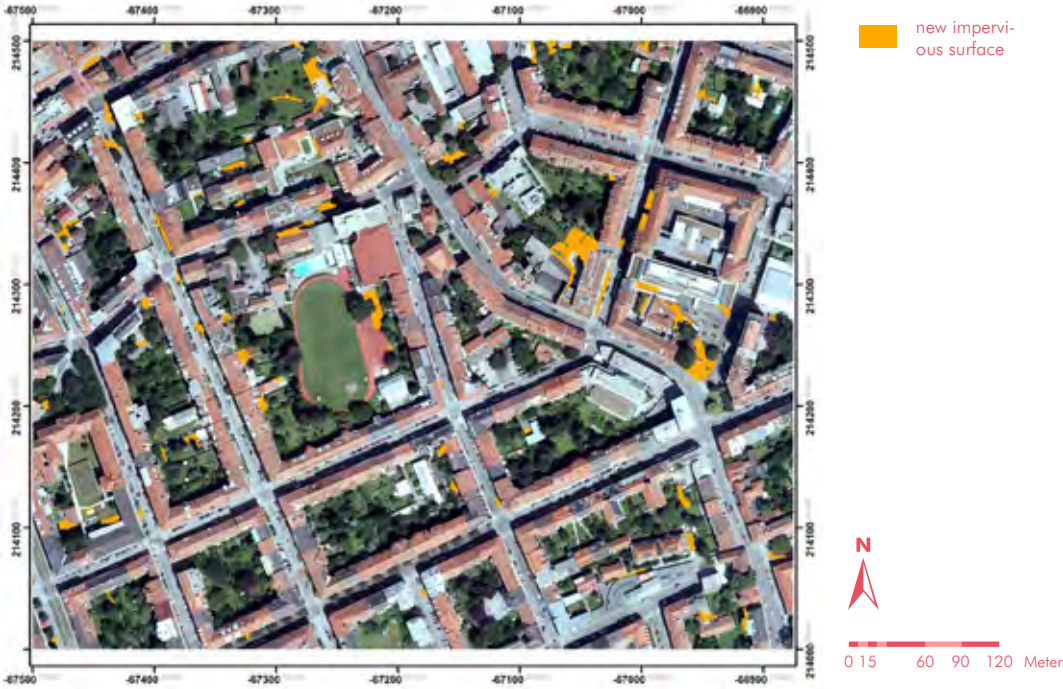
Result of the building change detection – Study area 1



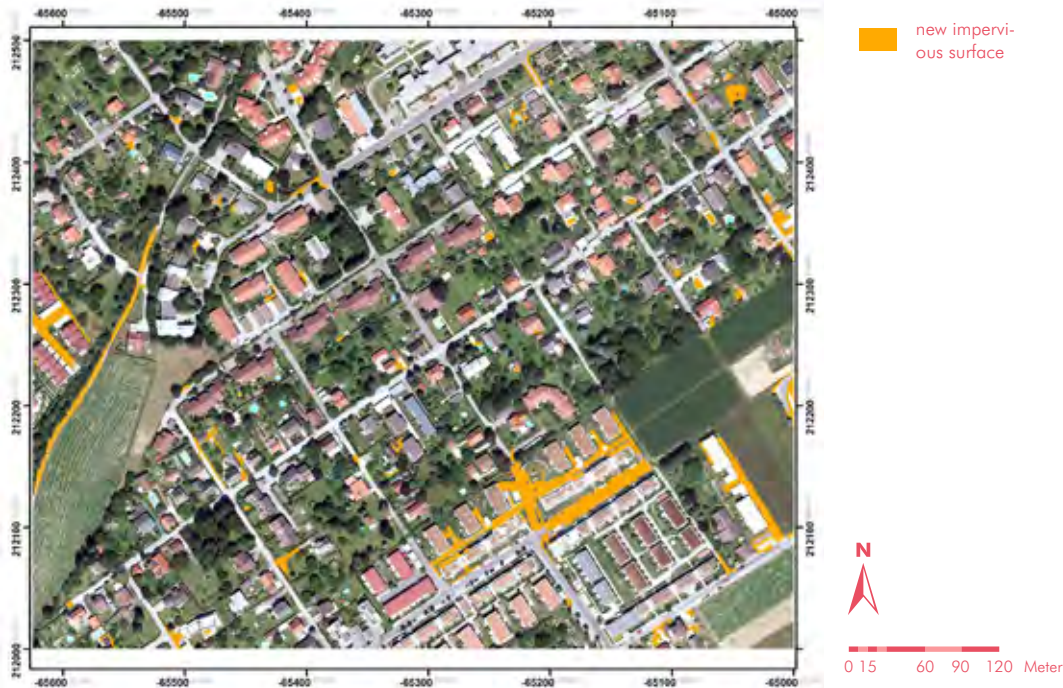
Result of the building change detection – Study area 2



Result of the impervious surface change detection – Study area 1



Result of the building change detection – Study area 1



3. KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN

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

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

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

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

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

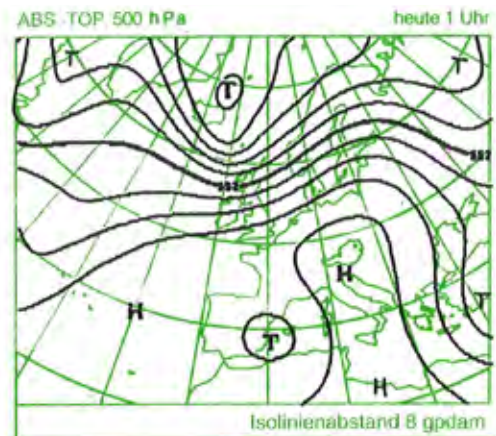
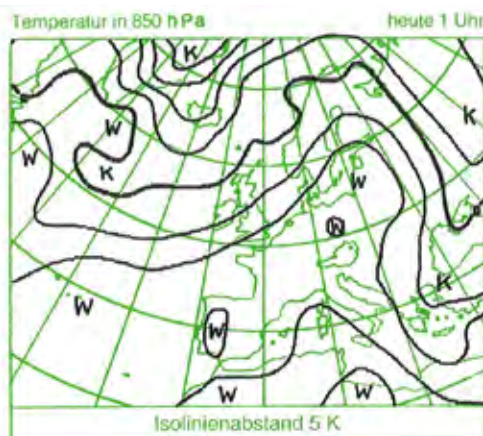
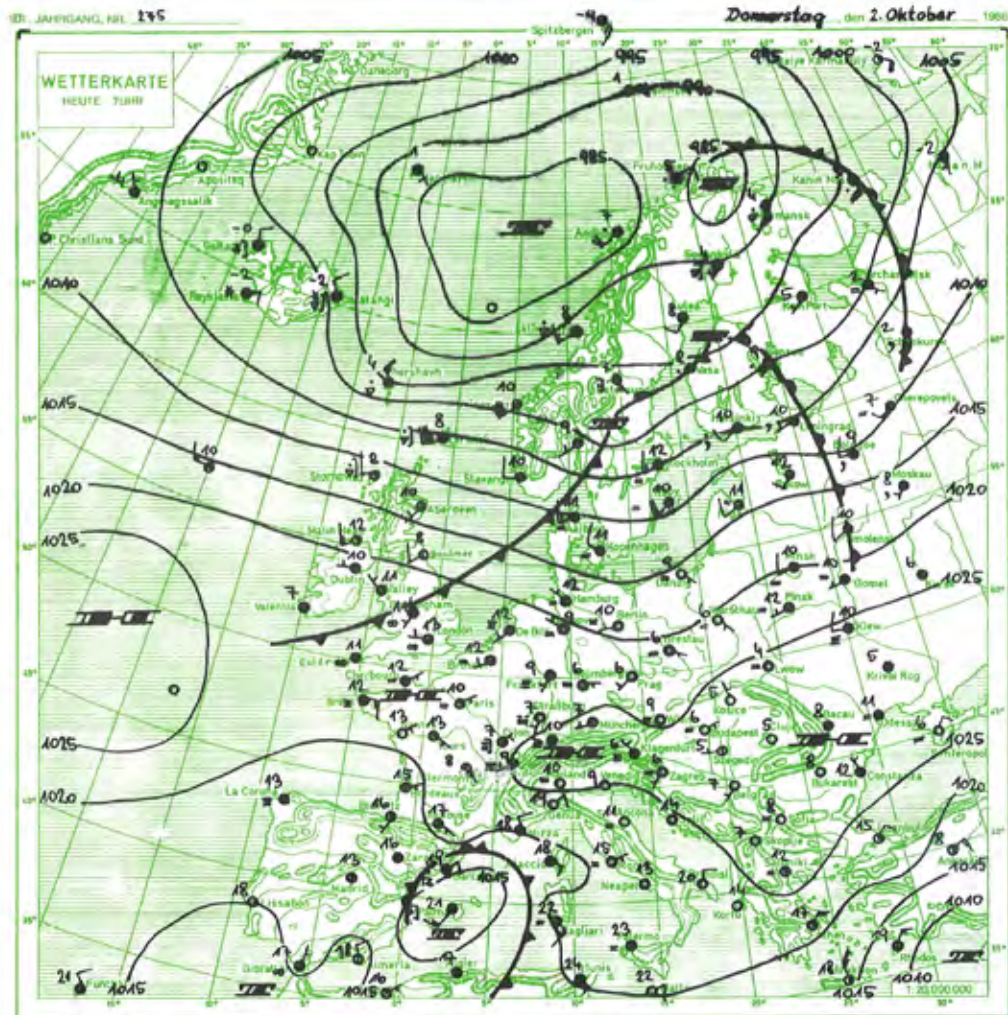
3.1.1 WETTERLAGE ZUM AUFNAHMEZEITPUNKT 1986

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

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

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

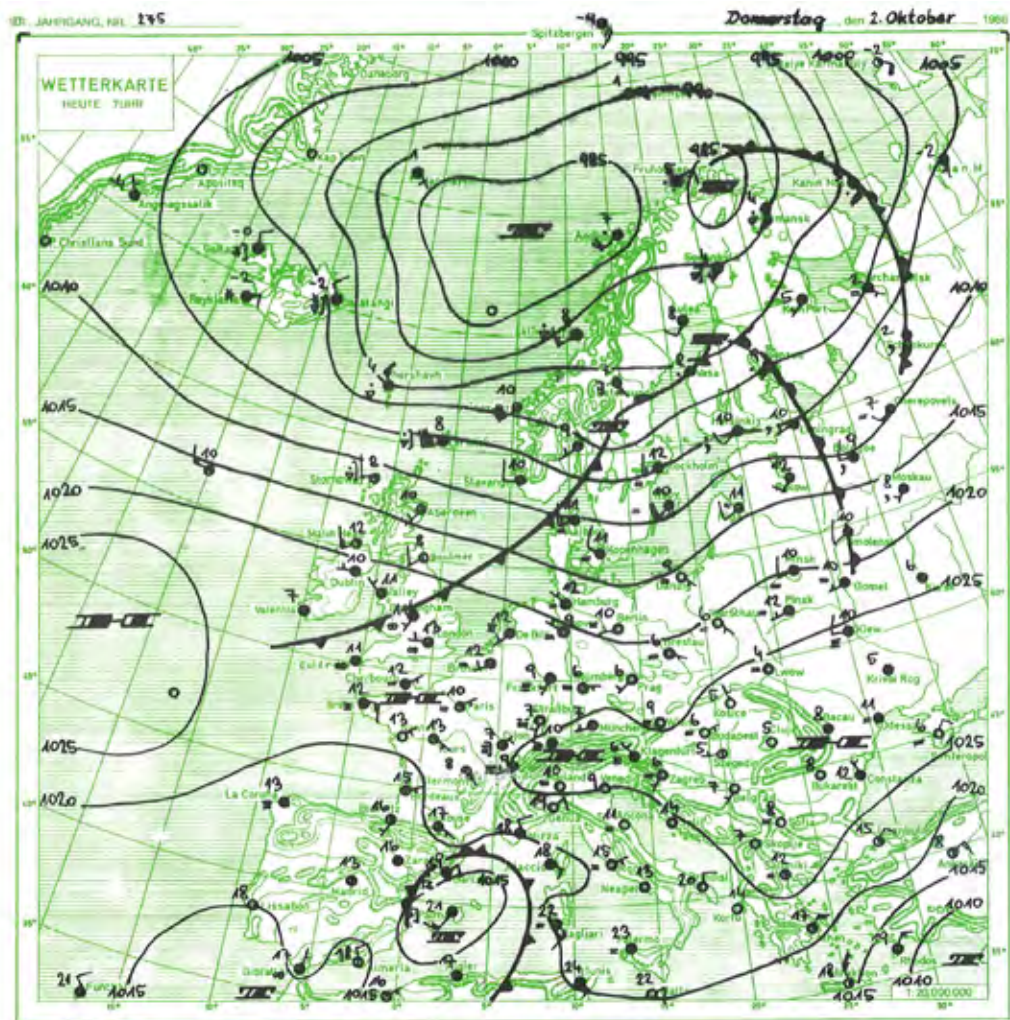
Abbildung 1:
 Bodenwetterkarte
 der Zentralanstalt
 für Meteorologie
 und Geodynamik in
 Wien – Hohe Warte
 vom 2. Oktober 1986,
 7 Uhr (ergänzt durch
 die Temperaturverteilung
 in der 850-hPa-
 Fläche und die absolute
 Topographie in der
 500-hPa-Fläche für
 1 Uhr)

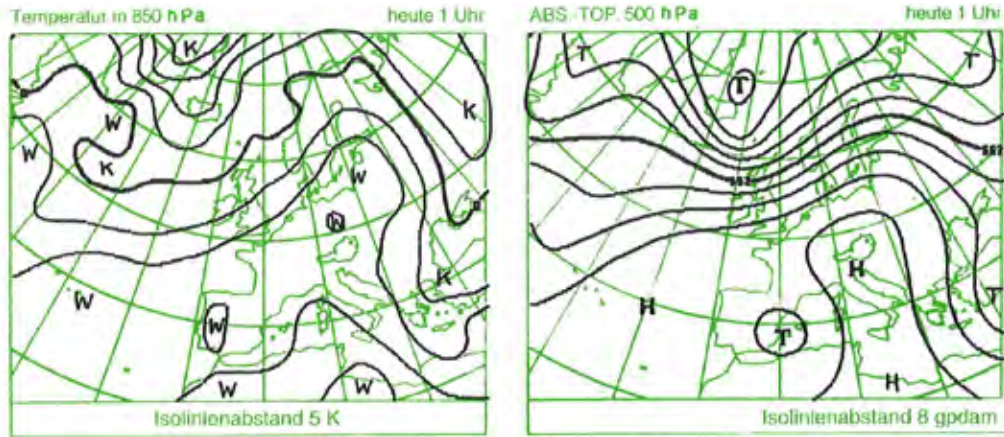


Zusätzlich zu den an den Flugterminen durchgeführten Sondaufstiegen am Thalerhof wurde noch am 3. Oktober am Vormittag ein Messflug mit einem Motorsegler durchgeführt. Der in Abbildung 3 dargestellte vertikale Temperaturverlauf zeigt um 6 Uhr eine kräftige Bodeninversion mit 12 K bis ca. 400 m über Grund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

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

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





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

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

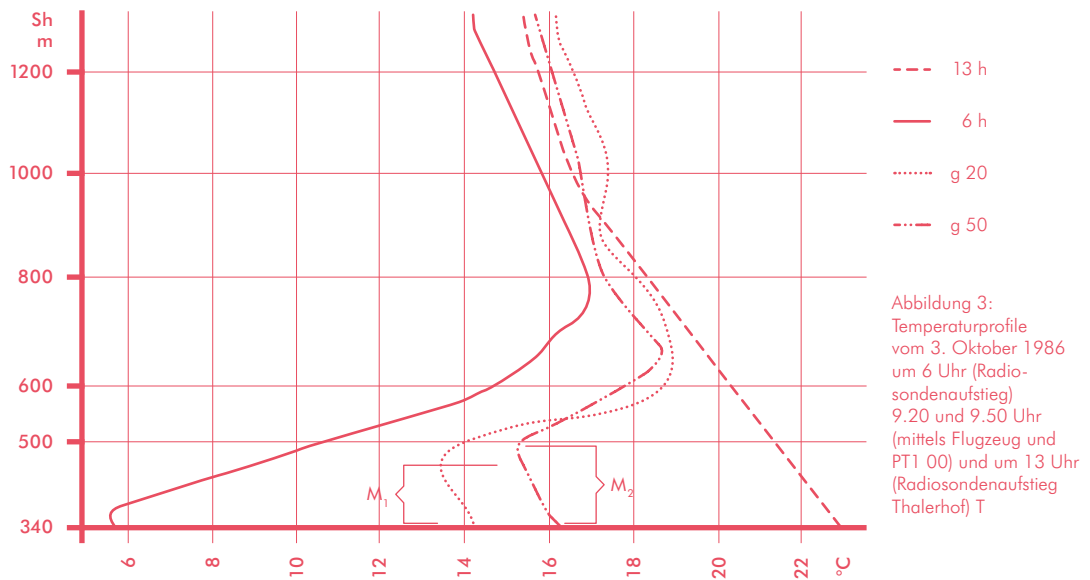
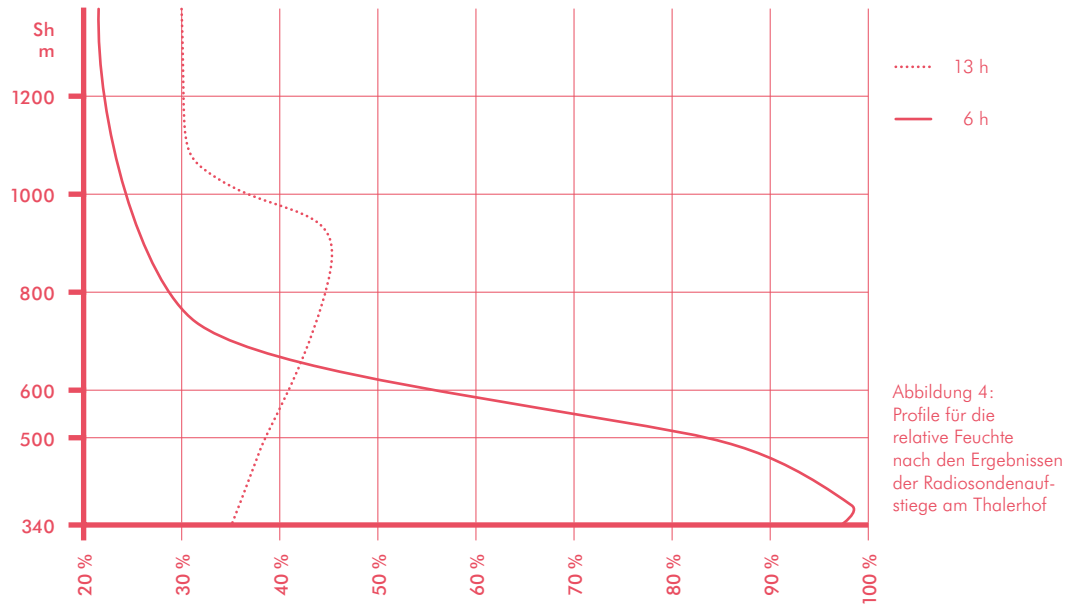


Abbildung 3: Temperaturprofile vom 3. Oktober 1986 um 6 Uhr (Radiosondenaufstieg) 9:20 und 9:50 Uhr (mittels Flugzeug und PT1 00) und um 13 Uhr (Radiosondenaufstieg Thalerhof) T

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

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



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

3.2 KLIMATISCHE MESSKAMPAGNEN 2004

3.2.1 ERLÄUTERUNGEN ZUR WETTERLAGE VOM 24.10.2004 (BERLINER WETTERKARTE):

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

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

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

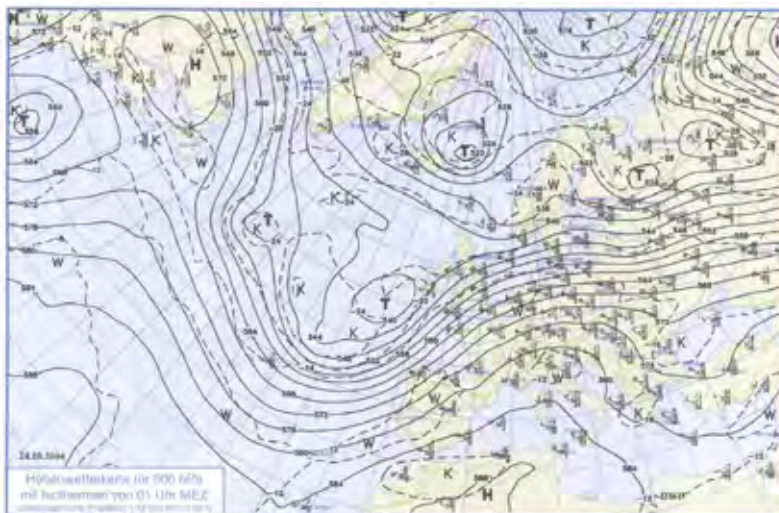
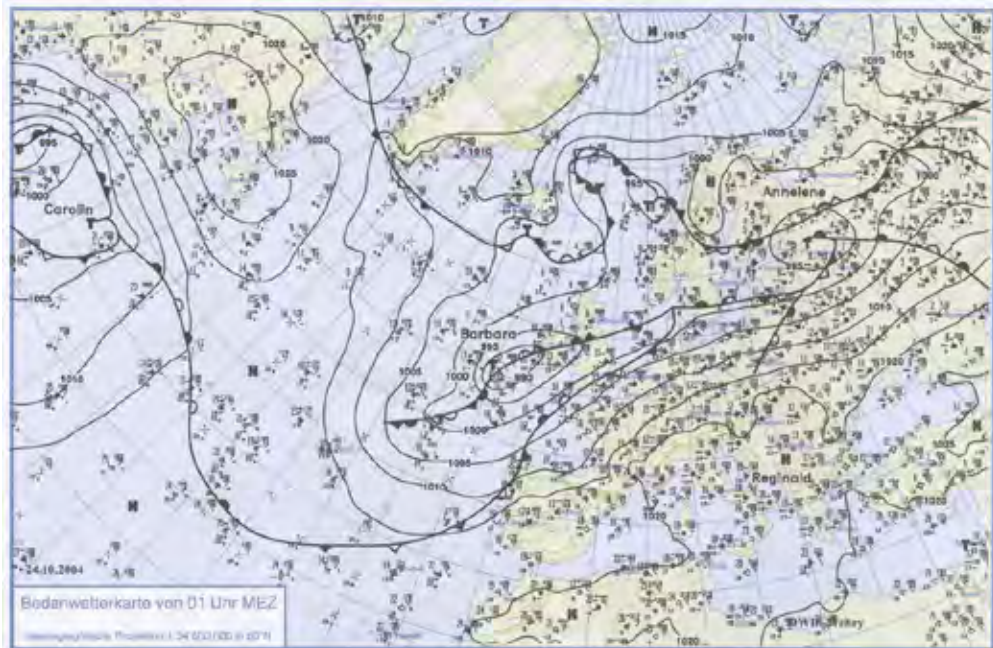


Abbildung 6:
Bodenwetterkarte
vom 24.10.2004
(Quelle: Berliner
Wetterkarte)



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

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

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

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

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

3.2.2 BALLONSONDIERUNGEN

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

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

Diagramm mit den Windverhältnissen, dass in der Folge die Geschwindigkeiten weiter nachlassen, was an der Talbasis das Eindringen von Kaltluft mit Nebel aus dem Grazer Feld (Abbildung 8 und Abbildung 9) stark begünstigt. Bei nun schwachen südlichen Winden – offensichtlich als Folge einer Anströmung advektiv aus dem ungarischen Raum, wo sich überraschenderweise ein 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

