

Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

**„Abschätzung von Persistent Scatterers mit digitalen
topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten“**

**„Evaluierung der Einsatzmöglichkeit des Persistent Scatterer
Radarinterferometrie Verfahrens“**

vorgelegt von

**Dipl.-Geol. Simon Manuel Plank
U1521, UNIGIS MSc Jahrgang 2010**

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Olching, 06.11.2011

Erklärung

"Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet."

Olching, 6. November 2011

Dipl.-Geol. Simon Manuel Plank

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Kurosch Thuro und Herrn Prof. Dr. John Singer (beide Technische Universität München) für ihre Unterstützung und hilfreiche Diskussionen recht herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Christian Minet, Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für seine wertvollen Tipps und die Beantwortung meiner Fragen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Richard Bamler, Herrn Dr. Michael Eineder und Herrn Nico Adam (IMF, DLR) für ihre Beratung bedanken.

Bei Herrn Martin Huber (Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, DLR) bedanke ich mich für die Informationen über die vom DLR zur Geokodierung von Radardaten verwendeten digitalen Geländemodelle.

Vielen Dank Herrn Dr. Alessandro Ferretti (Tele-Rilevamento Europa), Herrn Dr. Oliver Lang und Herrn Dr. Michael Riedmann (beide Astrium Infoterra), Herrn Werner Liebhart (IMF, DLR) und Herrn Dr. Michael Foumelis (Universität Athen) für die Bereitstellung von geokodierten Persistent Scatterer Datensätzen. Ohne diese Daten wäre eine Validierung der Ergebnisse dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Bei Herrn Prof. Dr. Josef Strobl (Universität Salzburg) und dem ganzen UNIGIS Team – und insbesondere bei Herrn Karl Atzmanstorfer – möchte ich mich recht herzlich für das sehr interessante und lehrreiche Studium bedanken.

Kurzfassung

Die leistungsfähige Fernerkundungsmethode Persistent Scatterer Radarinterferometrie (PS-InSAR) ermöglicht vom Weltraum aus die Erfassung und millimetergenaue Messung von Deformationen der Erdoberfläche wie zum Beispiel Setzungen und Hangbewegungen. Die Bewegungen werden dabei an bestimmten Objekten, den Persistent Scatterers (PS) gemessen. Diese zeichnen sich durch konstante Rückstreuungseigenschaften (= hohe Kohärenz) der eingefallenen Radarstrahlung über lange Zeiträume hinweg aus. Als PS dienen vor allem künstliche Objekte wie Gebäude, Bahngleise, etc.

Sinnvolle und nutzbare Ergebnisse können mit der PS-InSAR Methode jedoch erst bei Verwendung von mindestens 15 bis 50 Radaraufnahmen (abhängig von der Landbedeckung des Untersuchungsgebiets) erzielt werden. Vor allem für die kommerzielle Nutzung des PS-InSAR Verfahrens ist diese große Anzahl an benötigten Radaraufnahmen ein bedeutender Kostenfaktor, da zum Beispiel die Kosten für eine hochauflösende Radaraufnahme bei mehreren tausend Euro liegen.

Die bisherigen Forschungen zur Abschätzung von PS verwendeten bereits aufgenommene Radardaten. Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Abschätzung von PS bereits vor einer erfolgten Radaraufnahme durchzuführen. Die Arbeit beschreibt ein Verfahren mit dem mittels kostenfreier bzw. -günstiger topographischer Karten und *OpenStreetMap* (OSM) Daten die für ein bestimmtes Gebiet zu erwartende Anzahl an PS (und damit auch ihre Dichte – PS/km²) vor einer Radaraufnahme abgeschätzt werden kann. Des Weiteren werden die Abstände zwischen den abgeschätzten PS berechnet und bezüglich der Verwendbarkeit in der PS-InSAR Prozessierung klassifiziert. Außerdem wird die Verteilung der PS im Testgebiet mittels der *Nearest Neighbor Analysis* untersucht.

Die hier entwickelte Methode zur PS-Abschätzung vor einer Radaraufnahme wird in vier Testgebieten mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen getestet. Für diese Testgebiete stehen verschiedene Arten von topographischen Karten mit unterschiedlichen Maßstäben zur Verfügung. In der Arbeit werden die hier verwendeten topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten einer Kosten- / Nutzenanalyse bezüglich ihrer Verwendbarkeit bei der PS-Abschätzung unterzogen.

Zur Validierung des Verfahrens werden die Ergebnisse der PS-Abschätzung mit Datensätzen echter Persistent Scatterers (Ergebnissen aus echten Radaraufnahmen) verglichen. Mit dieser Validierung ist es möglich, für die verwendeten Kartenmaßstäbe die Wahrscheinlichkeit anzugeben, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist. Diese Wahrscheinlichkeitswerte sollen in neuen Untersuchungsgebieten – für die noch keine Radaraufnahmen zur Verfügung stehen – angewendet werden.

Mit der hier entwickelten Methode soll den Anwendern und potentiellen Nutzern des PS-InSAR Verfahrens ein objektives Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem vor der Bestellung der teuren Radaraufnahmen die Anwendbarkeit der PS-InSAR Methode für ein bestimmtes Gebiet abgeschätzt werden kann.

Abstract

Persistent scatterer radar interferometry (PS-InSAR) is a powerful remote sensing technique to detect and measure deformation of the Earth's crust – such as subsidence and landslides – with an accuracy of a few millimeters. Thereby the deformation is measured at specific objects called persistent scatterers (PS). These objects are characterized by long-term constant backscattering properties (= high coherence) of the radar signal. PS are mainly restricted to artificial objects, such as buildings, rail tracks, etc.

However, to ensure a PS-InSAR processing with useable results, a stack containing at least 15 to 50 radar images (depending on the test site's land cover) is required. This high amount of radar images is a very important cost factor when applying this method, especially for commercial use. For instance, the price of one high resolution radar image is several thousand Euros.

Previous research for PS estimation used already acquired radar data. The goal of this thesis is to estimate PS prior to the radar recording of the area of interest. This thesis describes a procedure using freely available or low-cost topographical maps and *OpenStreetMap* (OSM) data to estimate the expectable number of PS (and thereby the PS density – PS/km²) at a certain test site, prior to its radar recording. Moreover, the distance between the estimated PS is calculated and classified regarding to the usability for PS-InSAR processing. Additionally, the dispersion of the estimated PS within the test site is analyzed using the *Nearest Neighbor Analysis* method.

The procedure to estimate PS prior to radar recording developed in this thesis is tested at four test sites of different climate properties. For these test sites various types of topographical maps of different scales are available. The topographical maps and *OpenStreetMap* data used in this thesis undergo a use-of-potential analysis regarding to their applicability for the PS estimation procedure.

The results of the PS estimation are validated using real persistent scatterer datasets (results of real radar data). This validation enables one to calculate for each map scale the probability for an estimated PS being a real PS. These probability values should be used at new test sites with not yet available radar data.

The procedure developed in this thesis is intended as an objective decision support system for handlers and potential users of the PS-InSAR technique to estimate the applicability of PS-InSAR at a certain test site.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	x
1. Einführung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Hypothese.....	2
1.3 Struktur der Master Thesis	2
1.4 Erwartete Ergebnisse.....	3
1.5 Lösungsansatz	3
1.5.1 Theorie und Methoden	3
1.5.2 Beschreibung der Testgebiete und der verwendeten Daten	5
1.5.2.1 Testgebiet Kairo, Ägypten	5
1.5.2.2 Testgebiet Budapest, Ungarn	7
1.5.2.3 Testgebiet Aostatal, Nordwest Italien.....	8
1.5.2.4 Testgebiet Oberbayern	9
1.6 Themen, die nicht behandelt werden	10
1.7 Beabsichtigtes Publikum / Endnutzer	11
2. Literaturüberblick.....	12
3. Grundlagen der Radarfernerkundung.....	14
3.1 Geschichtlicher Rückblick	14
3.2 Das elektromagnetische Spektrum.....	15
3.3 Radaraufnahmeprinzip	16
3.4 Radarinterferometrie	17
3.5 Differentielle Radarinterferometrie.....	19
3.6 Persistent Scatterer Radarinterferometrie	21
4. Lösungsansatz: Abschätzung der PS aus topographischen Karten	23
4.1 Theorie des Lösungsansatzes	23
4.1.1 Abschätzung der PS	23
4.1.2 Maximaler Abstand der PS	24
4.1.3 Verteilung der PS im Untersuchungsgebiet	24
4.1.4 Validierung der PS-Abschätzung.....	26

4.2 Methode des Lösungsansatzes	27
4.2.1 Vorbereitung der topographischen Karten und <i>OpenStreetMap</i> Daten	27
4.2.1.1 Russische topographische Karten	27
4.2.1.2 Papier Karten – TK 25 Courmayeur	31
4.2.1.3 Digitale Rasterkarten – TK 25 von Bayern.....	32
4.2.1.4 Vektordaten	34
4.2.1.5 <i>OpenStreetMap</i> Daten.....	34
4.2.2 Das ArcGIS Modell zur Abschätzung der PS aus TKs und OSM Daten	38
4.2.2.1 Technische Umsetzung im ModelBuilder von ArcGIS	38
4.2.2.2 Veranschaulichung des Programmdurchlaufs anhand eines Beispiels	43
5. Beschreibung der Ergebnisse der PS-Abschätzung	47
6. Validierung der Ergebnisse	53
6.1 Validierungsmethode – „echte“ PS.....	53
6.2 Ergebnisse der Validierung	54
6.3 Einfluss des Kartenmaßstabs.....	60
7. Kosten- / Nutzenanalyse der Eingangsdaten.....	64
8. Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	68
8.1 Zusammenfassung.....	68
8.2 Diskussion.....	69
8.3 Ausblick	70
9. Literaturverzeichnis.....	72
Anhang	I
Anhang A: Ergebnisse der PS-Abschätzung für die restlichen Testgebiete	I
A1: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Kairo	I
A2: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Budapest	IV
A3: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Aostatal.....	VII
A4: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Oberbayern	XI
A4.1: Teilgebiet russische topographische Karte.....	XI
A4.2: Teilgebiet Bayern-Map plus.....	XV
Anhang B: Passpunkte Testgebiet Aostatal	XVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Master Thesis.....	2
Abbildung 2: Übersichtskarte der Testgebiete (ESRI 2011).....	5
Abbildung 3: Falschfarben Landsataufnahme vom Testgebiet Kairo.....	6
Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum (verändert nach GUPTA 2003:24).....	15
Abbildung 5: Schema Radarsystem (nach BARBIERI & LICHTENEGGER 2005:1.1).....	16
Abbildung 6: Schemaprinzip Radarinterferometrie (verändert nach BAMLER 2010).....	18
Abbildung 7: Differentielle Radarinterferometrie (verändert nach BAMLER 2010).....	20
Abbildung 8: Persistent Scatterer Radarinterferometrie (FERRETTI 2011).....	21
Abbildung 9: Rückstreuung des Radarsignals. (verändert nach ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2009:76, LILLESAND & KIEFER 2000:646).....	22
Abbildung 10: Modellstruktur zur PS-Abschätzung aus TK und OSM Daten.....	23
Abbildung 11: Erzeugen einer TWF Datei im OziExplorer.....	28
Abbildung 12: Bearbeitung der russischen topographischen Karten.....	30
Abbildung 13: Bearbeitungsschritte der russischen topographischen Karten.....	31
Abbildung 14: Auswählen der Gebäude aus TK von Bayern mit Farbmaske.....	33
Abbildung 15: Vorbereitung der digitalen topographischen Karte von Bayern.....	33
Abbildung 16: Buffer-Berechnung um die OSM Straßen.....	37
Abbildung 17: Funktion „Select“.....	39
Abbildung 18: Funktion „Point Distance“.....	40
Abbildung 19: Umsetzung der Flächenberechnung im ModelBuilder.....	41
Abbildung 20: Funktion „Summary Statistics“.....	41
Abbildung 21: Modell zur PS-Abschätzung aus TK und OSM Daten.....	42
Abbildung 22: Ausgangsdatensatz: Originale topographische Karte.....	43
Abbildung 23: Manuelle Vorbereitung: Extraktion möglicher PS-Objekte.....	44
Abbildung 24: Programmdurchlauf Schritt 1.....	44
Abbildung 25: Programmdurchlauf Schritt 2.....	45
Abbildung 26: Programmdurchlauf Schritt 3.....	45
Abbildung 27: Testgebiet Oberbayern.....	48
Abbildung 28: Auszug aus der Abstandstabelle für Testgebiet Oberbayern.....	49
Abbildung 29: Ergebnisse der PS-Abschätzung für das Testgebiet Oberbayern.....	50
Abbildung 30: Ergebnis der <i>Average Nearest Neighbor Distance</i> Methode.....	51
Abbildung 31: Validierung der abgeschätzten PS.....	53
Abbildung 32: Prozentanteil der echten PS, die mit Abschätzmethode erfasst werden.....	58
Abbildung 33: Wahrscheinlichkeit mit der abgeschätzter PS auch in Realität ein PS.....	59
Abbildung 34: Starnberger See (Testgebiet Oberbayern): ungenaue Geokodierung.....	62
Abbildung 35: Einfluss des Kartenmaßstabs auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist.....	63
Anhang-Abb. 1: <i>Nearest Neighbor Analysis</i> für das Testgebiet Kairo.....	II
Anhang-Abb. 2: PS-Abschätzung Testgebiet Kairo.....	III
Anhang-Abb. 3: <i>Nearest Neighbor Analysis</i> Testgebiet Budapest, russische TK.....	V
Anhang-Abb. 4: <i>Nearest Neighbor Analysis</i> Testgebiet Budapest vektorisierte TK.....	V

Anhang-Abb. 5: PS-Abschätzung Testgebiet Budapest.....	VI
Anhang-Abb. 6: <i>Nearest Neighbor Analysis</i> Testgebiet Aostatal, russische TK.....	VIII
Anhang-Abb. 7: <i>Nearest Neighbor Analysis</i> Testgebiet Aostatal, TK Courmayeur. . .	VIII
Anhang-Abb. 8: PS-Abschätzung Testgebiet Aostatal, russische TK.	IX
Anhang-Abb. 9: PS-Abschätzung Testgebiet Aostatal, TK Courmayeur.....	X
Anhang-Abb. 10: NNA Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet russ. TK, TK 25 Bayern..	XII
Anhang-Abb. 11: NNA Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet russ. TK, russ. TK.....	XII
Anhang-Abb. 12: PS-Abschätzung Oberbayern, Teilgebiet russ. TK, TK Bayern.	XIII
Anhang-Abb. 13: PS-Abschätzung Oberbayern, Teilgebiet russ. TK, russ.TK..	XIV
Anhang-Abb. 14: NNA Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus, TK 25 Bayern. . .	XVI
Anhang-Abb. 15: NNA Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus, Bay.-Map plus..	XVI
Anhang-Abb. 16: PS-Abschätzung Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus.....	XVII
Anhang-Abb. 17: Passpunkte der TK von Courmayeur.	XVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Satellitenmission, deren Daten in dieser Arbeit verwendet werden	14
Tabelle 2: Die sechs Grad breiten <i>Gauß Krüger</i> Zonen der Testgebiete.....	29
Tabelle 3: Die berücksichtigten Straßentypen der OSM Daten mit Straßenquerschnitt.	35
Tabelle 4: Die berücksichtigten Bahnlinientypen der OSM Daten mit Spurweiten	36
Tabelle 5: Aufnahmemodi und räumliche Auflösung der verwendeten Radardaten.....	55
Tabelle 6: Bewertung der Verwendbarkeit der verschiedenen Eingangsdatensätze.....	65
Tabelle 7: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Budapest.....	IV
Tabelle 8: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Aostatal	VII
Tabelle 9: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Oberbayern, russ. TK..	XI
Tabelle 10: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus	XV

Abkürzungsverzeichnis

ASI	Agenzia Spaziale Italiana: italienische Raumfahrtbehörde
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Corine	Coordination of Information on the Environment
CSA	Canadian Space Agency
cat	Datensatz der PS-Abschätzmethode aus Kombination von sp und msr
DGM	digitales Geländemodell
D-InSAR	Differentielle Radarinterferometrie
DLM	digitales Landschaftsmodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DS	Distributed Scatterer
DTK25	digitale topographische Karte von Bayern im Maßstab 1:25.000
EOV	Egyseges Orszagos Vetuleti = Nationale Einheitsprojektion (Ungarn)
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
GIF	Graphics Interchange Format
GIS	Geoinformationssystem
GRS	Geographic Reference System
InSAR	Radarinterferometrie
msr	PS-Datensatz der Detektionsmethode “Thresholding on the amplitude dispersion”
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NNA	Nearest Neighbor Analysis
OSM	OpenStreetMap

PPA	Point Pattern Analysis
PS	Persistent Scatterer
PS-InSAR	Persistent Scatterer Radarinterferometrie
RGB	Farbsystem rot, grün, blau
RADAR	RAdio Detection And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCR	Signal to clutter ratio
sp	PS-Datensatz der Detektionsmethode "Thresholding on the SCR"
TIFF	Tagged Image File Format
TK	topographische Karte
UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken, kurz: Sowjetunion
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System

Symbolverzeichnis

A	Fläche des Untersuchungsgebietes
α	Winkel zwischen absoluter und effektiver Basislinie
B_{\perp}	effektive Basislinie
c	Lichtgeschwindigkeit
$d_{gemittelt}$	arithmetisches Mittel zwischen allen Punktabständen (empirische Punkte)
d_{ij}	Abstand zwischen den Punkten i und j
ε	arithmetisches Mittel zwischen allen Punktabständen (Zufallspunkte)
θ	Blickwinkel des Radarsatelliten
H	Höhenwert eines „Fringes“
ϕ	Phase des Radarsignals

ϕ_1	Phase des Radarsignals des 1. Satelliten
ϕ_2	Phase des Radarsignals des 2. Satelliten
ϕ_{Def}	Deformationsanteil der Phase
ϕ_{int}	interferometrische Phase
$\phi_{Stör}$	Phasenanteile von Störeffekten
$\phi_{Streuung1}$	Rückstreuungseigenschaft des Radarsignals (1. Satellit)
$\phi_{Streuung2}$	Rückstreuungseigenschaft des Radarsignals (2. Satellit)
ϕ_{Topo}	topographischer Anteil der Phase
i	Punkt i
j	Punkt j
λ	Wellenlänge des Radarsignals
N	Anzahl der Punkte
Q	Quotient der gemittelten Nearest Neighbor Abstände von empirischem Punktemuster und Zufallsverteilung
ΔR	Betrag, um den die Entfernung vom 2. Satelliten zum Objekt am Erdboden größer ist als die Entfernung vom 1. Satelliten zum Objekt
ΔR_{def}	Deformationsbetrag der Erdoberfläche
R_S	„Slant-Range“ Entfernung
t	Zeit
x	x-Koordinate
y	y-Koordinate

1. Einführung

1.1 Motivation

Das Persistent Scatterer Radarinterferometrie-Verfahren (PS-InSAR¹) ist eine leistungsfähige Fernerkundungsmethode zur Erfassung und Überwachung von Deformationen der Erdoberfläche wie zum Beispiel Setzungen und Hangbewegungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich (FERRETTI et al. 1999, 2001). In der PS-InSAR Methode werden die Bewegungen am Erdboden an bestimmten Punkten – den Persistent Scatterers (PS) – gemessen. Als Persistent Scatterer dienen Objekte, die über lange Zeiträume hinweg konstante Rückstreuungseigenschaften (= hohe Kohärenz; LÖFFLER et al. 2005:233) aufweisen. Beispiele hierfür sind Gebäude, Strommasten, Bahngleise, etc.

Um aber sinnvolle und nutzbare Ergebnisse mit dieser Methode erzielen zu können, sind mindestens 15 bis 50 Radaraufnahmen notwendig (abhängig von der Landbedeckung des Untersuchungsgebiets; CROSETTO et al. 2010:2 FERRETTI et al. 2000:1). Diese große Anzahl der benötigten Radaraufnahmen ist ein bedeutender Kostenfaktor bei der kommerziellen Anwendung der PS-InSAR Methode. So liegen die Kosten für eine hochauflösende Radaraufnahme – wie sie z.B. für die Überwachung von Hangbewegungen notwendig sind – bei rund 7.000 € (ASTRIUM 2011:2).

Bei den bisherigen Forschungen zur Abschätzung von Persistent Scatterers wurden bereits aufgenommene Radardaten verwendet. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die für ein bestimmtes Testgebiet zu erwartende Anzahl an Persistent Scatterers vor einer Radaraufnahme mittels kostenfreier bzw. -günstiger topographischer Karten und *OpenStreetMap* (OSM) Daten abzuschätzen. Den Anwendern und potentiellen Nutzern der PS-InSAR Methode soll also ein objektives Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem vor der Bestellung der teuren Radaraufnahmen abgeschätzt werden kann, ob – und wie gut – die PS-InSAR Methode in einem bestimmten Gebiet angewendet werden kann. Damit soll auch die Akzeptanz dieser Fernerkundungsmethode bei den potentiellen Nutzern wie z.B. den geologischen Landes- und Bundesbehörden gefördert werden.

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR): Erzeugen einer großen synthetischen Antenne aus vielen Einzelaufnahmen, um eine hohe räumliche Auflösung zu erhalten (BARBIERI & LICHTENEGGER 2005:1.6f.).

1.2 Hypothese

Die grundlegende Hypothese dieser Arbeit ist, dass mit Hilfe (digitaler) topographischer Karten und *OpenStreetMap* Daten bereits vor der Durchführung bzw. Bestellung einer Radaraufnahme eine Abschätzung über die Anwendbarkeit der PS-InSAR Methode in einem bestimmten Untersuchungsgebiet getroffen werden kann.

1.3 Struktur der Master Thesis

In Abbildung 1 ist der Aufbau dieser Master Thesis graphisch dargestellt. Nach einer Einführung in das Thema – hier werden auch die Testgebiete kurz beschrieben – wird ein Überblick über wichtige Literatur zum Themengebiet gegeben. In Kapitel 3 werden wichtige Grundlagen zur Radarfernerkundung und insbesondere das PS-InSAR Verfahren erläutert. Kapitel 4 beschreibt den hier entwickelten Lösungsansatz zur Abschätzung der PS mit Hilfe topographischer Karten und OSM Daten. In diesem Kapitel werden zuerst die notwendigen Vorbereitungen der verwendeten TKs beschrieben und anschließend (basierend auf Beschreibung des PS-InSAR Verfahrens) die Theorie und Methodik zur PS-Abschätzung erläutert. Kapitel 5 beschreibt die Ergebnisse der PS-Abschätzung und in Kapitel 6 werden „echte“ PS zur Validierung der Ergebnisse verwendet. Kapitel 7 vergleicht die Verwendbarkeit der TK und OSM Daten zur PS-Abschätzung. Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung und Diskussion der Arbeit und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen.

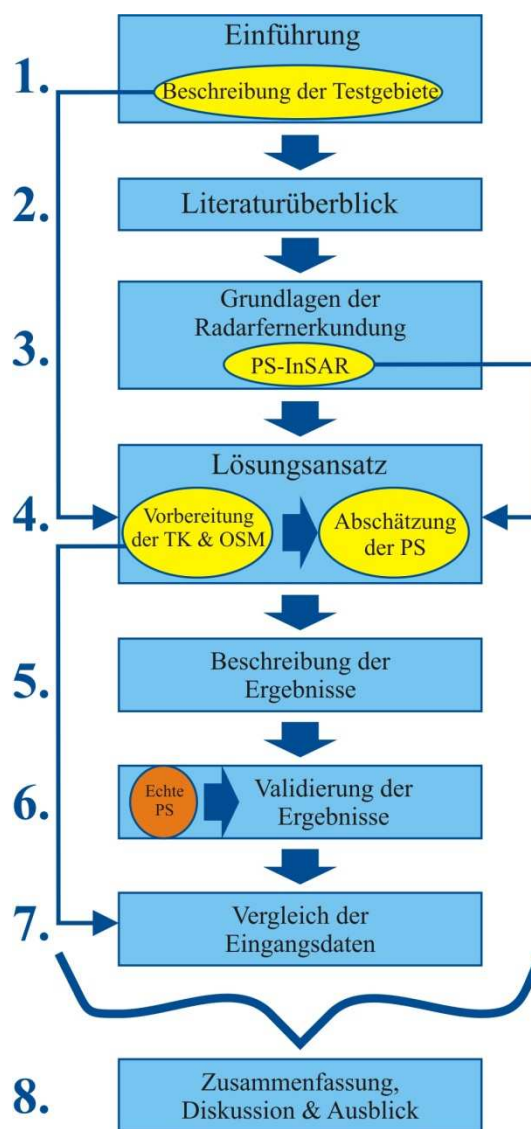


Abbildung 1: Struktur der Master Thesis. Links sind die entsprechenden Kapitelnummern angegeben.

1.4 Erwartete Ergebnisse

In dieser Arbeit sollen folgende Fragen durch den später beschriebenen Lösungsansatz beantwortet werden:

- Kann die zu erwartende Anzahl an Persistent Scatterers für ein bestimmtes Gebiet vor einer Radaraufnahme mit Hilfe topographischer Karten abgeschätzt werden?
- Wie gut ist die Übereinstimmung zwischen abgeschätzten Persistent Scatterers und echten PS (Ergebnisse von PS-InSAR Prozessierungen)? Diese Fragestellung kann in zwei Unterfragen untergliedert werden:
 - Wie viel Prozent der echten Persistent Scatterers werden von den abgeschätzten PS erfasst?
 - Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter Persistent Scatterer auch in der Realität ein PS ist?
- Können bei zusätzlicher Verwendung von *OpenStreetMap* Daten die Ergebnisse der obigen Fragestellungen verbessert werden?
- Welchen Einfluss hat der Maßstab der verwendeten topographischen Karten auf die Qualität der Persistent Scatterer Abschätzung?

1.5 Lösungsansatz

1.5.1 Theorie und Methoden

Persistent Scatterers, also „Streuer“, die über den gesamten Überwachungszeitraum hinweg konstante Rückstreuungseigenschaften aufweisen, sind vor allem auf künstliche Objekte wie z.B. Gebäude und Bahngleise beschränkt (BAMLER 2010:o.S., FERRETTI 2010:o.S., 2011:1). Deshalb wird zur Beantwortung der in Kapitel 1.4 gestellten Fragen der nachfolgend beschriebene Lösungsansatz gewählt. In einem Geoinformationssystem (GIS) werden aus einer digitalen topographischen Karte (TK) mögliche Persistent Scatterer, also z.B. Gebäude und Bahngleise, extrahiert. Dabei kann die topographische Karte bereits als digitaler Datensatz vorliegen oder muss im Vorfeld eingescannt und georeferenziert werden. Je nach Art der TK, die für ein Untersuchungsgebiet zur Verfügung steht, sind unterschiedliche Vorarbeiten notwendig. Auf diese wird im Kapitel 4.2.1 (S. 27) näher eingegangen. Im nächsten Schritt wird über das Untersuchungsgebiet ein Raster mit der räumlichen Auflösung des verwendeten Radarsensors (vgl. Tab. 5, S. 55)

gelegt und jene Rasterzellen selektiert, die einen möglichen Persistent Scatterer – also z.B. ein Gebäude – schneiden. Diese selektierten Rasterzellen sind mögliche Persistent Scatterer.

Ein weiteres Ergebnis des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens ist eine Berechnung des Abstands zwischen den möglichen Persistent Scatterers. Laut Auskunft von Experten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt stößt die PS-InSAR Methode ab einem Abstand von ca. 700 m (optimal, im Extremfall 1.000 m) zwischen zwei PS bei der Prozessierung der Radarbilder an ihre Grenzen (ADAM 2011).

Neben dem Abstand zwischen den PS spielt auch ihre Verteilung im Untersuchungsgebiet eine wichtige Rolle. So ist eine optimale Deformationsüberwachung nur bei einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der PS im Gebiet zu erreichen. Die Verteilung der zu erwartenden (= abgeschätzten) PS wird in dem hier entwickelten Verfahren mittels der *Average Nearest Neighbor* Methode (Überprüfung auf Clusterung) durchgeführt (KOCH 2011: Lektion 8).

Als „Entwicklungsumgebung“ des hier im Kurzen vorgestellten Verfahrens wurde der *ModelBuilder* von *ArcGIS*® (9.3) gewählt, da diese Software zur Verfügung stand. Prinzipiell kann dieses Verfahren in jedem GIS, das über eine mit dem *ModelBuilder* von *ArcGIS*® vergleichbare Werkzeugsammlung verfügt, umgesetzt werden.

Zur Ergebnisvalidierung des Verfahrens dienen Datensätze von echten Persistent Scatterers (Ergebnisse von PS-InSAR Prozessierungen). Diese wurden von verschiedenen Firmen und Institutionen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt. Die PS-InSAR Prozessierung der Testgebiete erfolgte dabei mit Daten unterschiedlicher Radarsensoren und mit verschiedenen Algorithmen. Insgesamt standen für die Arbeit Datensätze von vier Testgebieten zur Verfügung (Abb. 2). Eine Beschreibung der Testgebiete erfolgt im anschließenden Abschnitt. Für jedes Testgebiet sind unterschiedliche Arten von topographischen Karten mit unterschiedlichem Maßstab (von 1:10.000 bis 1:200.000) verfügbar. Die Verfügbarkeit von Karten unterschiedlichen Maßstabs für jedes Testgebiet ermöglicht die Bestimmung des Einflusses des Kartenmaßstabs auf die Qualität des hier entwickelten PS-Abschätzverfahrens.

Um zu überprüfen, ob bei zusätzlicher Verwendung von *OpenStreetMap* Daten die Qualität der PS-Abschätzung verbessert werden kann, wird diese Abschätzung für jedes

Testgebiet zunächst ohne und anschließend ein weiteres Mal mit OSM Daten durchgeführt.

1.5.2 Beschreibung der Testgebiete und der verwendeten Daten

In diesem Abschnitt werden die vier Testgebiete, für die Vergleichsdaten zur Verfügung stehen, näher beschrieben. Es handelt sich um die Stadt Kairo (Ägypten) und Umgebung, die Stadt Budapest (Ungarn), das Aostatal (Nordwest Italien) und einen Teil von Oberbayern (Abb. 2).

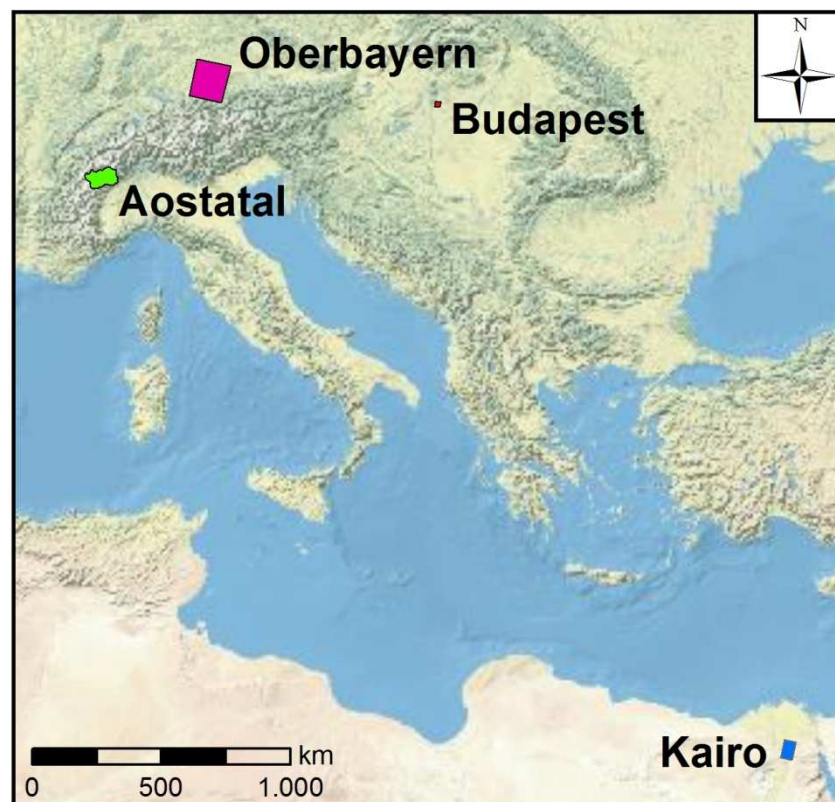


Abbildung 2: Übersichtskarte der Testgebiete: Kairo (Ägypten), Aostatal (Nordwest Italien), Budapest (Ungarn) und Oberbayern. Kartenhintergrund von ArcGIS Online (ESRI 2011).

1.5.2.1 Testgebiet Kairo, Ägypten

Das erste Testgebiet ist die Stadt Kairo mit Umgebung. Das Testgebiet bedeckt eine Fläche von ca. 50 km mal 40 km. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist besteht das Testgebiet aus drei Gebietseinheiten: der Stadt Kairo, dem zeitweise überfluteten Nildelta und den umgrenzenden Stein- und Felswüsten. Die Hauptstadt Ägyptens besteht überwiegend aus Flachdachbauten.

Für die Persistent Scatterer Abschätzung steht für dieses Testgebiet eine Generalstabskarte des sowjetischen Militärs² im Maßstab 1:200.000 zur Verfügung (Blattnr. 200k--h36-14, Downloadquelle: <http://en.poehali.org/maps?>; Anhang A1, S. I ff.). Die russischen topographischen Karten wurden zwischen 1950 und 1990 von der „Behörde für Geodäsie und Kartografie“ beim Ministerrat der UdSSR hergestellt (DAVIS 2007:o.S.). Es handelt sich um Karten mit einer transversalen Mercatorprojektion. Bezugssystem ist das System 1942 mit dem *Krassowski*-Ellipsoid und dem Datumspunkt *Pulkovo*. Die Karten verwenden *Gauß Krüger* Projektion mit sechs Grad breiten Meridianstreifen (PANITZKI 2010:o.S.). Die TK beinhaltet bebautes Gebiet, Straßen, Gewässer, Höhenlinien, Beschriftungen und ein Koordinatengitter (siehe auch Anhang A1, S. I ff.). Eine detailliertere Beschreibung der Legende – auch für die russischen topographischen Karten der anderen Testgebiete – ist in der TM 30-548 des UNITED STATES OF AMERICA WAR OFFICE (1958) zu finden. *OpenStreetMap* Daten sind für dieses Testgebiet nicht verfügbar.

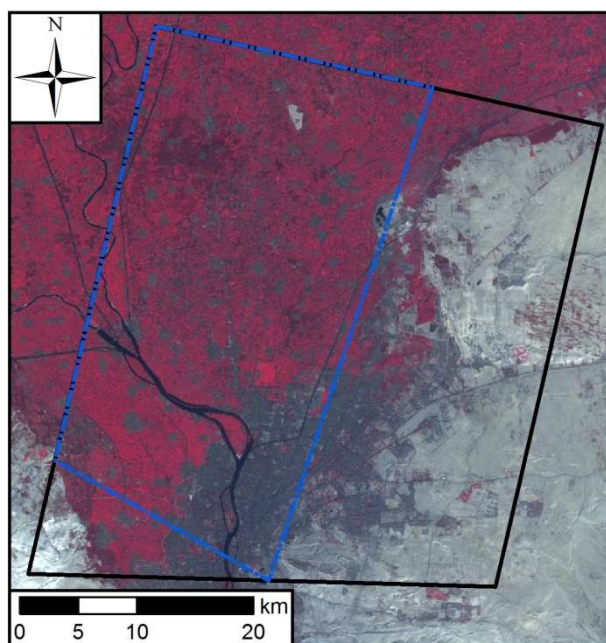


Abbildung 3: Falschfarben Landsataufnahme vom Testgebiet Kairo (19.12.2002). In der Kanalkombination 4/3/2 repräsentieren die roten Flächen Vegetation (hier das Nildelta), hellgrau Wüstengebiete und dunkelgrau Bebauung (im unteren Zentrum des Bildes liegt die Stadt Kairo). Dunkelblau ist der Nil. Das schwarze Parallelogramm ist das „ganze“ Testgebiet, das hellblaue Parallelogramm das Testgebiet „ohne Wüste“ (vgl. Anhang-Abb. 2, S. III). Downloadquelle: <http://glovis.usgs.gov>.

² In dieser Arbeit vereinfacht als russische topographische Karten bezeichnet.

Zur Validierung der Ergebnisse der PS-Abschätzung aus topographischen Karten stehen für das Testgebiet Kairo die Ergebnisse aus PS-InSAR Prozessierungen von 38 Radaraufnahmen des europäischen Satelliten ENVISAT zur Verfügung (vgl. auch Tab. 1 & 5)³. Die Radaraufnahmen bedecken den Zeitraum vom 20.11.2003 bis 29.10.2009. Genauer gesagt sind für dieses Testgebiet nicht die „fertigen“ PS-Punkte verfügbar, sondern die nach einer Qualitätsprüfung aus echten Radarbildern abgeschätzten PS-Punkte. Insgesamt sind die Ergebnisse dreier Abschätzmethoden vorhanden. (Diese werden in dieser Arbeit mit „sp“, „msr“ und „cat“ abgekürzt).

Der Datensatz „sp“ beinhaltet die Ergebnisse der Abschätzmethode „*Thresholding on the SCR*“. SCR steht für „*signal to clutter ratio*“ und bedeutet Verhältnis von Signal und unerwünschtem Radarecho (vgl. auch ESA⁴ 2011a:o.S.). Ein Pixel in einem Radarbild wird also als PS-Kandidat ausgewählt, wenn ein bestimmter Wert in diesem Verhältnis überschritten wird. Für eine detailliertere Beschreibung der „*Thresholding on the SCR*“ Methode sei auf KAMPES (2006:50f.) verwiesen.

Der zweite Datensatz von PS-Punkten („msr“) basiert auf der sogenannten „*Thresholding on the amplitude dispersion*“ Methode. Die Amplitude ist die Intensität des empfangenen Radarsignals. Je größer die Intensität des von einem Objekt am Erdboden zurückgestreuten Radarsignals ist, desto heller erscheint dieses im Radarbild. Vereinfacht gesagt werden bei dieser Abschätzmethode Pixel, die einen bestimmten Helligkeitswert überschreiten, als mögliche PS-Punkte ausgewählt. Auch hier sei für eine detaillierte Erklärung der Methode auf KAMPES (2006:51ff.) verwiesen.

Der dritte Datensatz an PS-Punkten („cat“) ist schließlich das Ergebnis der Kombination der beiden vorherigen Methoden („sp“ und „msr“).

1.5.2.2 Testgebiet Budapest, Ungarn

Das zweite Testgebiet befindet sich im Stadtkern der Hauptstadt Ungarns am linken Ufer der Donau (Abb. 2). Dieser Teil von Budapest zeigt eine dichte Bebauung mit mehrstöckigen Gebäuden. Für dieses Testgebiet stehen zwei verschiedene topographische Karten zur Verfügung: Erstens eine russischen TK (Maßstab 1:100.000, Blattnum-

³ Die Ergebnisse der PS-InSAR Prozessierung für das Testgebiet Kairo wurden dankenswerterweise von Herrn Dr. Michael Foumelis (Universität von Athen) zur Verfügung gestellt.

⁴ European Space Agency.

mer: 100k--134-015) und zweitens eine vektorisierte topographische Karte⁵ im Maßstab 1:10.000. Letztere liegen in der winkeltreuen Zylinder Projektion EOVI (*Egyseges Országos Vetületi* = Nationale Einheitsprojektion) vor, basierend auf dem GRS⁶ 1967 Ellipsoiden. Eine Zone dieser Projektion deckt ganz Ungarn ab. In ArcMap wird EOVI als „Hungarian 1972 *Egyseges Országos Vetületi*“ bezeichnet. Die *OpenStreetMap* Daten von diesem Gebiet (und den nachfolgend beschriebenen Testgebieten) wurden von <http://download.geofabrik.de/osm/> bezogen.

Um die PS-Abschätzungen mit topographischen Karten von verschiedenen Maßstäben miteinander vergleichen zu können, wird das Testgebiet auf den Bereich der vektorisierten TK beschränkt (Fläche ca. 1,6 km mal 0,8 km vgl. auch Anhang A2, S. IV ff.).

Für das Testgebiet Budapest stehen die PS-InSAR Prozessierungsergebnisse (PS-Punkte) von 43 Aufnahmen des deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X zur Verfügung (24.10.2008 – 16.04.2010)⁷. Die Radardaten wurden im sogenannten *StripMap Modus* aufgenommen (räumliche Auflösung 3,3 m, REINKE & WERNINGHAUS 2009:20).

1.5.2.3 Testgebiet Aostatal, Nordwest Italien

Das Testgebiet Aostatal liegt im Nordwesten Italiens. Es grenzt im Norden an die Schweiz und im Westen an Frankreich (Abb. 2). Das Aostatal ist ein West-Ost orientiertes Tal in den Grajischen Alpen. Das Gebiet weist große Reliefunterschiede auf. So liegt der Talboden im Testgebietsteil (Courmayeur & Umgebung, siehe Anhang A3, S. VII ff.) auf 1.000 bis 1.200 m ü. NN und die höchsten Berge auf rund 2.000 m ü. NN.

Auch für dieses Testgebiet steht eine russische topographische Karte zur Verfügung (Maßstab 1:50.000, Blattnr.: 050k--132-074-4). Des Weiteren wurde für dieses Gebiet eine Wanderkarte im Maßstab 1:25.000 gekauft (Blatt Monte Bianco Courmayeur, Blattnr.: 1, L'ESCURSIONISTA 2009). Die Kartenprojektion ist UTM⁸ (Zone 32 N, Datum WGS⁹ 1984). Um Blattverzug beim Einscannen zu vermeiden, wurde von der in Papierform vorliegenden Karte ein Ausschnitt um die Stadt Courmayeur ausgewählt (siehe Anhang-Abb. 8 & 9, S. IX f.).

⁵ Gekauft beim Institut für Geodäsie, Kartographie und Fernerkundung, Ungarn (<http://www.geoshop.hu>).

⁶ Geographic Reference System.

⁷ Die PS-Punkte von Budapest wurden dankenswerterweise von Herrn Dr. Michael Riedmann und Herrn Dr. Oliver Lang (ASTRIUM, Infoterra GEO Information Service) bereit gestellt.

⁸ Universal Transverse Mercator.

⁹ World Geodetic System.

Die PS-Punkte – zur Validierung der Ergebnisse für das Testgebiet Aostatal – wurden mit 102 bzw. 94 Aufnahmen des kanadischen Satelliten Radarsat-1 prozessiert¹⁰. Es stehen Datensätze von zwei Blickrichtungen¹¹ zur Verfügung (Ascending (17.03.2003 bis 17.12.2010) und Descending (14.04.2003 bis 21.12.2010); vgl. auch Tab. 1 & 5). Neben den „normalen“ PS-Punkten, stehen für dieses Gebiet auch sogenannte *distributed scatterers* (DS) zur Verfügung. Diese zeichnen sich durch eine im Vergleich zu „normalen“ PS niedrigere, aber über eine Fläche von mehreren Pixeln verteilte gleichmäßige Signalrückstreuung aus. Mit der sogenannten *SqueeSAR* Methode wird eine Erhöhung der Messpunkte (PS und DS) vor allem in Gebieten mit spärlicher oder niedriger Vegetation erreicht (FERRETTI, et al. 2011:1).

1.5.2.4 Testgebiet Oberbayern

Das Testgebiet Oberbayern bedeckt ein Gebiet von ca. 100 km mal 100 km und reicht von Augsburg im Nordwesten bis München im Osten und nach Süden bis in die Bayerischen Alpen (Abb. 2, S. 5 & Abb. 27, S. 48).

Für den Nordwesten dieses Testgebiets steht eine russische topographische Karte im Maßstab 1:200.000 zur Verfügung (Blattnr.: 200k--m32-35; vgl. auch Abb. 27, S. 48 & Anhang-Abb. 11, S. XII).

Die Digitale Topographische Karte 1:25.000 (DTK25) von Bayern (in dieser Arbeit als topographische Karte von Bayern bezeichnet) steht für das ganze Testgebiet zur Verfügung¹². Die Kartenprojektion ist *Gauß Krüger*, bezogen auf den *Bessel*-Ellipsoid (*Potsdam* Datum; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION 2011a:o.S.). Es handelt sich um Rasterdaten, die für jede Ebene eine bestimmte Farbkombination (RGB¹³-Werte) aufweisen, so dass diese Daten ohne aufwendige Vorarbeiten direkt in das später beschriebene Modell zur PS-Abschätzung einfließen können (siehe Kapitel 4.2.1.3, S. 32).

Für einen ca. 15 km mal 15 km großen Bereich im Südosten Münchens ist außerdem die sogenannte Bayern-Map plus verfügbar (gleiche Kartenprojektion wie die digitale TK 25, siehe oben). Es handelt sich hierbei um den Beispieldatensatz der von

¹⁰ Die Ergebnisse der PS-InSAR Prozessierung für das Testgebiet Aostatal wurden dankenswerterweise von Herrn Dr. Alessandro Ferretti (Tele-Rilevamento Europa - T.R.E) zur Verfügung gestellt.

¹¹ Ascending: Flugrichtung des Satelliten von Süden nach Norden; bei Descending umgekehrt.

¹² Bezug der Karte über die Technische Universität München.

¹³ Rot-Grün-Blau.

<http://www.vermessung.bayern.de> bezogen werden kann und glücklicherweise zum Großteil im Bereich des Testgebiets liegt. Die Bayern-Map plus ist eine Vektorkarte auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (ATKIS®¹⁴ Basis-DLM) und Auszügen aus der digitalen Flurkarte (Liegenschaftskarte; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION 2011b:o.S.). Die Ebenenstruktur des DLMs wird generalisiert und in neue Layer zusammengefasst. Der Maßstab der Bayern-Map plus ist 1:25.000 (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION 2008:3). Besonders interessant bei den Bayern-Map plus für die in dieser Arbeit entwickelte PS-Abschätzung aus topographischen Karten sind die als Vektordaten vorliegenden Hausumringe, die ursprünglich aus der digitalen Flurkarte stammen.

Die PS-Punkte zur Validierung für das Testgebiet Oberbayern wurden aus 86 Aufnahmen der europäischen Radarsatelliten ERS-1 und -2 prozessiert (vgl. Tab. 5, S. 55)¹⁵. Die Radardaten wurden von April 1992 bis August 2002 aufgenommen.

1.6 Themen, die nicht behandelt werden

Diese Master Thesis behandelt die Abschätzung von Persistent Scatterers vor der Durchführung bzw. Bestellung einer Radaraufnahme. Dabei werden als Grundlagendaten ausschließlich (digitale) topographische Karten und *OpenStreetMap* Daten verwendet. So werden hier z.B. keine Landbedeckungsdaten wie Corine (Coordination of Information on the Environment, EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2010:o.S.) und GlobCover (ESA 2011b:o.S.) oder frei verfügbare optische Fernerkundungsdaten wie Landsat (NASA¹⁶ 2011a:o.S.) und ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, NASA 2011b:o.S.) zur Abschätzung der Persistent Scatterers verwendet. Eine PS-Abschätzung mit Landbedeckungsdaten und optischen Fernerkundungsdaten wird in PLANK et al. (2011) behandelt.

Ein wichtiges Kriterium ist die kostenfreie bzw. kostengünstige Verfügbarkeit der Daten. So wird z.B. darauf verzichtet, großmaßstäbige Flurkarten (z.B. 1:5.000) zu verwenden, da diese Karten für große Testgebiete zu teuer sind und damit eine Vorabschätzung der Persistent Scatterers vor der Bestellung der Radaraufnahmen zu teuer und damit nicht mehr sinnvoll wäre.

¹⁴ Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem.

¹⁵ Die Ergebnisse der PS-InSAR Prozessierung für das Testgebiet Oberbayern wurden dankenswerterweise von Herrn Werner Liebhart (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR) bereitgestellt.

¹⁶ National Aeronautics and Space Administration: Raumfahrtbehörde der USA.

Wie bereits oben erwähnt wurden die echten Persistent Scatterer Daten von verschiedenen Firmen und Institutionen zur Verfügung gestellt (eine genaue Erläuterung der Datenquellen erfolgt in Kapitel 1.5.2, S. 5 ff.). Da all diese Bearbeiter Experten auf dem Gebiet der Persistent Scatterer Radarinterferometrie sind, kann davon ausgegangen werden, dass die zur Validierung verwendeten Daten eine gute Qualität aufweisen (innerhalb der technischen Grenzen; vgl. Kapitel 6.3, S. 61 f). Eigene PS-InSAR Prozessierungen können auf Grund von nicht verfügbaren Radardaten nicht durchgeführt werden.

1.7 Beabsichtigtes Publikum / Endnutzer

Diese Arbeit richtet sich sowohl an die Anwender der Radarinterferometrie und ihre (potentiellen) Kunden – diese Arbeit soll eine Möglichkeit aufzeigen, die Durchführbarkeit einer PS-InSAR Überwachung vor der Aufnahme bzw. Bestellung von Radaraufnahmen kostengünstig zu evaluieren –, als auch an den interessierten „Radar-Laien“. Für Letzteren wird in der Arbeit eine kurze Einführung in die Radarinterferometrie gegeben. Ein tieferer Einstieg in dieses Gebiet würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. An den entsprechenden Stellen wird auf Literaturquellen für eine detailliertere Behandlung der Radarinterferometrie verwiesen.

2. Literaturüberblick

Nachfolgende Literaturquellen sind „State of the Art“ des hier behandelten Themenbereichs. Es wird des Weiteren begründet, warum die Literaturquellen für diese Arbeit wichtig sind. Zuerst wird auf wichtige Literaturquellen zum Thema Radarfernerkundung eingegangen:

BAMLER, R. & P. HARTL (1998): Synthetic aperture radar interferometry. In: *Inverse Problems* 14, R1-R54.

BARBIERI, M. & J. LICHTENEGGER (2005): Introduction to SAR for Geology. In: FLETCHER, K. (Hrsg.): *Space radar applications in Geology. An introduction to imaging radar, and application examples of ERS SAR in Geology and Geomorphology*, ESA TM-17. Noordwijk: ESA Publications Division, 1-54.

GABRIEL, K., R. M. GOLDSTEIN & H. A. ZEBKER (1989): Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. In: *Journal of Geophysical Research* 94-B7, 9183-9191.

GUPTA, R. P. (2003)²: *Remote Sensing Geology*. Heidelberg: Springer-Verlag.

LILLESAND, T. M. & R. W. KIEFER (2000)⁴: *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, Chichester, etc.: John Wiley & Sons.

MASSONNET, D. & K. L. FEIGL (1995): Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. In: *Geophysical Research Letters* 22-12, 1537-1540.

Zur Einführung in das Thema der Radarfernerkundung bilden die Publikationen von BARBIERI & LICHTENEGGER (2005), GUPTA (2003) und LILLESAND & KIEFER (2000) eine wichtige Grundlage. In BAMLER & HARTL (1998) werden in einem detaillierten Review Paper die mathematischen Grundlagen zur bildgebenden Radarfernerkundung erläutert. GABRIEL et al. (1989) und MASSONNET & FEIGL (1995) sind wichtige Grundlagenpaper zur differentiellen Radarinterferometrie Methode.

Wichtige Literatur zum Thema Persistent Scatterer Radarinterferometrie Verfahren (PS-InSAR) bilden:

CROSETTO, M., O. MONSERRAT, R. IGLESIAS & B. CRIPPA (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 76-9, 1061-1069.

FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (1999): Permanent scatterers in SAR interferometry. Vortrag beim International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 28. Juni - 2. Juli 1999, 1-3.

FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39-1, 8-20.

FERRETTI, A., D. MASSONNET, A. MONTI-GUARNIERI, C. PRATI & F. ROCCA (2007): Guidelines for SAR Interferometry – Processing and Interpretation. – In: FLETCHER, K. (Hrsg.): InSAR Principles, ESA TM-19. Noordwijk: ESA Publications Division, 1-225.

KAMPES, B. M. (2006): Radar interferometry – Persistent Scatterer Technique. Dordrecht: Springer-Verlag.

In FERRETTI et al. (2007) sind wichtige Grundlagen, Tipps zur praktischen Anwendung und mathematische Grundlagen zur Radarinterferometrie (InSAR) zusammengestellt. FERRETTI et. al (1999) sind die Entwickler der PS-InSAR Methode. In FERRETTI et al. (2001) werden die Grundzüge dieser Methode und ihre Anwendungen aufgezeigt. KAMPES (2006) beschreibt die Entwicklung eines neuen Algorithmus zur PS-InSAR Prozessierung. Des Weiteren fassen CROSETTO et al. (2010) die PS-InSAR Methode in einem Review Paper zusammen und zeigen die Limitationen dieses Verfahrens auf.

Die bisherigen Forschungsarbeiten zur Abschätzung von Persistent Scatterers verwendeten bereits aufgenommene Radardaten. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die für ein bestimmtes Testgebiet zu erwartende Anzahl an Persistent Scatterers vor einer Radaraufnahme mittels kostenfreier bzw. -günstiger topographischer Karten und *OpenStreetMap* Daten abzuschätzen.

3. Grundlagen der Radarfernerkundung

3.1 Geschichtlicher Rückblick

Im Jahr 1978 wurde mit SEASAT der erste zivile Radarsatellit durch die NASA (National Aeronautics and Space Administration) in die Erdumlaufbahn gebracht (OLEARY et al. 1998:o.S.). Damit wurde auch das Zeitalter der satellitengestützten Radarinterferometrie, die die Erfassung und Messung von Deformationen auf der Erdoberfläche vom Weltraum aus ermöglicht, eingeläutet. Durch den Start der europäischen (ESA, European Space Agency) Satellitenmissionen ERS-1 und 2 (European Remote Sensing Satellite) 1991 bzw. 1995 und die Nachfolgemission ENVISAT im Jahr 2002 war eine sehr große Datenmenge verfügbar (ESA 2011c:o.S., d:o.S.). Dadurch wurden signifikante Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Radarinterferometrie erreicht. Die Persistent Scatterer Radarinterferometrie – die Deformationsmessungen im Millimeterbereich ermöglicht – ist die neueste Verbesserung auf diesem Gebiet (KAMPES 2006:5).

Heutzutage erreichen hochauflösende Radarsensoren wie der deutsche Radarsatellit TerraSAR-X (zusammen mit dem Schwestersatelliten TerraSAR-X-2: Mission TANDEM-X) und die italienische 4-Satelliten-Konstellation COSMO-SkyMed (Start des ersten Satelliten jeweils 2007) räumliche Auflösungen von ca. 1 m (REINKE & WERNINGHAUS 2009:5, ASI¹⁷ 2011:o.S.).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Radarsatelliten, deren Daten in dieser Arbeit verwendet werden.

Tabelle 1: Satellitenmission, deren Daten in dieser Arbeit verwendet werden

Satellit	Raumfahrtbehörde (Land)	Zeitraum	Wellenlängenbereich ¹⁸
ERS-1 & 2	ESA (Europa)	1991 – 2000 bzw. 1995 bis heute	C-Band
Radarsat-1	CSA ¹⁹ (Kanada)	1995 bis heute	C-Band
ENVISAT	ESA (Europa)	2002 bis heute	C-Band
TerraSAR-X	DLR ²⁰ (Deutschland)	2007 bis heute	X-Band

¹⁷ Agenzia Spaziale Italiana: italienische Raumfahrtbehörde.

¹⁸ Wellenlängenbereiche siehe Seite 15.

¹⁹ Canadian Space Agency (CSA): kanadische Raumfahrtsbehörde, CSA 2011.

²⁰ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

3.2 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum (Abb. 4) erstreckt sich von den hochenergetischen Gammastrahlen über die Röntgenstrahlung und Ultraviolett (UV) hin zum sichtbaren Anteil des Lichts, Infrarot und schließlich Mikro- und Radiowellen. Optische Fernerkundungssensoren nutzen den sichtbaren und infraroten Anteil des elektromagnetischen Spektrums, Radar arbeitet hingegen im Mikrowellenbereich (mm bis dm).

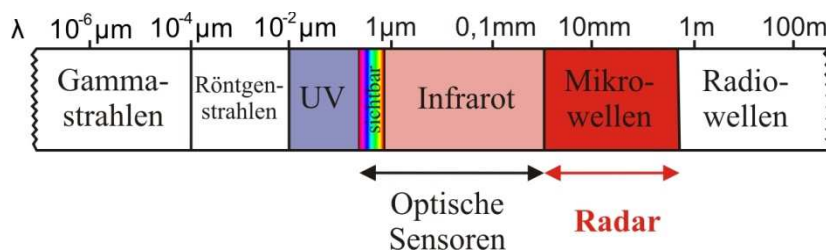


Abbildung 4: Das elektromagnetische Spektrum von $10^{-6} \mu\text{m}$ bis 100 m. Optische Sensoren nutzen den sichtbaren und den infraroten Anteil und Radarsensoren den Mikrowellenbereich (Wellenlänge $\lambda = \text{mm bis dm}$) (verändert nach GUPTA 2003:24, Abb. 2.3).

RADAR steht für Radio Detection And Ranging. Im Gegensatz zu optischen Sensoren empfängt der Radarsensor nicht passiv natürlich reflektierte bzw. emittierte Strahlung, sondern sendet aktiv ein künstlich generiertes Signal zum Erdboden und empfängt das zurückreflektierte Signal. Radar ist somit unabhängig vom Sonnenlicht und kann deshalb bei Tag und Nacht arbeiten. Ein weiterer Vorteil von Radarsensoren ist, dass die ausgesendeten Mikrowellen auf Grund ihrer großen Wellenlängen Wolken durchdringen können. Damit wird Radar zu einer (nahezu) wetterunabhängigen Fernerkundungsmethode (GUPTA 2003:5f.). „Nahezu“ deshalb, da große atmosphärische Veränderungen in der Zeit zwischen den beiden Radaraufnahmen zu Problemen bzw. Fehlinterpretationen von Ergebnissen der differentiellen Radarinterferometrie führen können (vgl. Kapitel 3.5, S. 19 f.).

Da die ursprüngliche Nutzung von Radar militärischer Natur war, wurden die militärischen Abkürzungen für die Frequenz- bzw. Wellenlängenbereiche bei der zivilen Nutzung übernommen. Im Bereich der satellitengestützten Radarfernerkundung finden das X-Band (Wellenlänge $\lambda = 2,7 - 5,2 \text{ cm}$), das C-Band ($\lambda = 5,2 - 7,1$) und das L-Band ($\lambda = 19,3 - 76,9 \text{ cm}$) die häufigste Anwendung (BARBIERI & LICHTENEGGER 2005:1.5). Radarsensoren mit einer kürzeren Wellenlänge (wie X- und C-Band) erreichen eine höhere Auflösung, aber längere Wellenlängen (wie das L-Band) sind in der Lage, Vege-

tation stärker zu durchdringen (BAMLER & HARTL 1998:48, BARBIERI & LICHTENEGGER 2005:4.3).

3.3 Radaraufnahmeprinzip

Wie Abbildung 5 zeigt, sendet der flugzeug- oder satellitengetragene Radarsensor sein Signal schräg nach unten, senkrecht zur Flugrichtung (*azimuth*). Die Blickrichtung des Radars wird als Range bezeichnet. Der Radarsensor misst die Zeit zwischen Aussenden und Empfang des Signals und damit die Entfernung zum Objekt am Boden, die sogenannte „Slant-Range“ Entfernung R_S (vgl. Gl. 1; geteilt durch zwei, da Hin- und Rückweg des Signals). Die Distanz von zwei Objekten am Erdboden ist in einem Radarbild von dem Unterschied der Ankunftszeiten des Radarsignals abhängig.

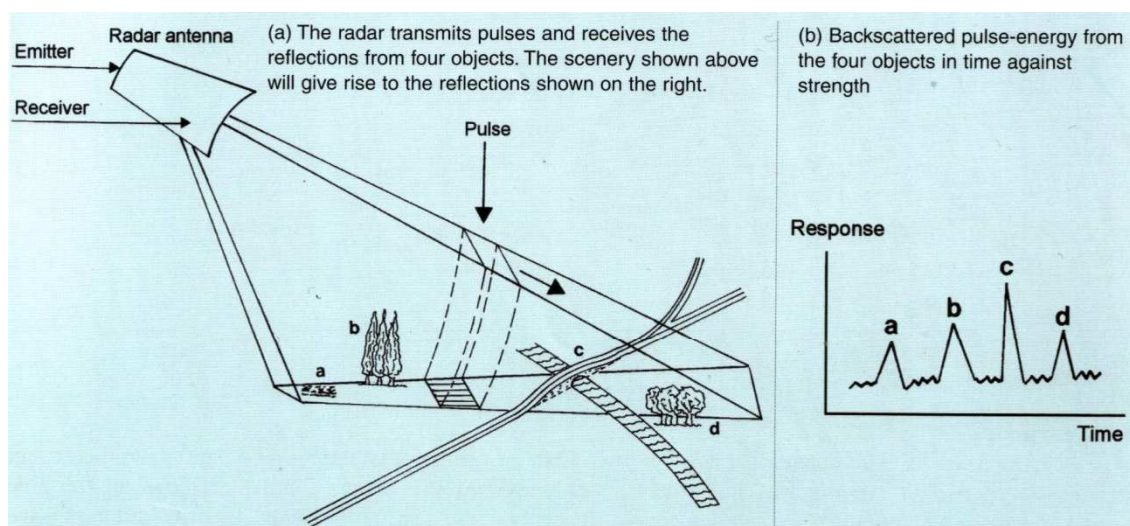


Abbildung 5: Schemaskizze eines bildgebenden Radarsystems (nach BARBIERI & LICHTENEGGER 2005:1.1, Abb. 1-1).

$$R_S = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Mit R_S = „Slant-Range“ Entfernung

c = Lichtgeschwindigkeit $\approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

t = Zeit zwischen Aussenden und Empfang des Radarsignals

Neben der Intensität des vom Erdboden zurückgestreuten Signals – diese wird als Helligkeitswert in einem Graustufenbild angezeigt – misst der Radarsensor auch die Phase der Radarwelle. Diese kann allerdings nur als Modulo²¹ 2π registriert werden.

Eine detaillierte und weiterführende Darstellung des Radaraufnahmeprinzips würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb sei hier auf drei informative Literaturquellen für die Einführung in die Radarfernerkundung (BARBIERI & LICHTENEGGER 2005, GUPTA 2003, LILLESAND & KIEFER 2000) und zum tieferen Einstieg in dieses Themengebiet auf BAMLER & HARTL (1998) und FRANCESCHETTI & LANARI (1999) verwiesen.

3.4 Radarinterferometrie

Mit der Methode der Radarinterferometrie (InSAR) können aus zwei von leicht unterschiedlichen Positionen aufgenommenen Radarbildern digitale Geländemodelle (DGM) erzeugt werden (FERRETTI et al 2007:A18ff., FRANCESCHETTI & LANARI 1999:11f.). Dabei muss beachtet werden, dass der Abstand zwischen den beiden Satellitenpositionen, die sogenannte effektive Basislinie (engl. baseline) B_{\perp} , maximal einen Kilometer betragen darf (KIRCHNER 2005:26). In der Radarinterferometrie verwendet man die Phase der monochromatischen Radarwelle der Wellenlänge λ . Die Phase ϕ ist dabei direkt proportional zum Laufweg des Signals (doppelte „Slant-Range“ Entfernung R_S : Hin- und Rückweg). Abbildung 6 zeigt das Prinzip der Radarinterferometrie. Auf Grund der leicht unterschiedlichen Aufnahmepositionen ist die Entfernung vom zweiten Satelliten zu einem bestimmten Objekt am Erdboden um ΔR größer als die Entfernung vom ersten Satelliten zu diesem Objekt. Dadurch empfängt der zweite Satellit auch ein leicht anderes Phasensignal von diesem Objekt als der erste Satellit (Gl. 2 und 3).

$$\phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} R_S + \phi_{Streuung1} \quad (2)$$

$$\phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_S + \Delta R) + \phi_{Streuung2} \quad (3)$$

Wie aus Abbildung 6 zu entnehmen ist, kann ΔR aus der effektiven Basislinie B_{\perp} und dem Winkel α berechnet werden (Gl. 4).

$$\Delta R = B_{\perp} \cdot \tan \alpha \quad (4)$$

²¹ Modulo 2π : Als ganzzahliges Vielfaches von π .

Wenn die Rückstreuungseigenschaften bei beiden Radaraufnahmen identisch sind ($\phi_{\text{Streuung1}} = \phi_{\text{Streuung2}}$), kann die interferometrische Phase ϕ_{int} aus der Differenz von ϕ_1 und ϕ_2 berechnet werden (Gl. 5; ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2009:306). Die Rückstreuungseigenschaften können sich durch große atmosphärische Veränderungen oder durch Veränderungen am Erdboden wie Pflanzenwachstum oder Bewegung durch Wind verändern (BAMLER & HARTL 1998:43). Die Zeit zwischen den beiden Radaraufnahmen sollte also möglichst kurz sein. Bei der deutschen Mission TanDEM-X wird dieses Problem gelöst, indem zwei parallel fliegende Satelliten die Erdoberfläche zeitgleich aufnehmen. Damit soll ein hochgenaues DGM der Erdoberfläche mit einer Auflösung von zwölf Metern und einer vertikalen Genauigkeit von besser als zwei Metern erzeugt werden (BARTUSCH et al. 2009:o.S.).

$$\phi_{\text{int}} = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (5)$$

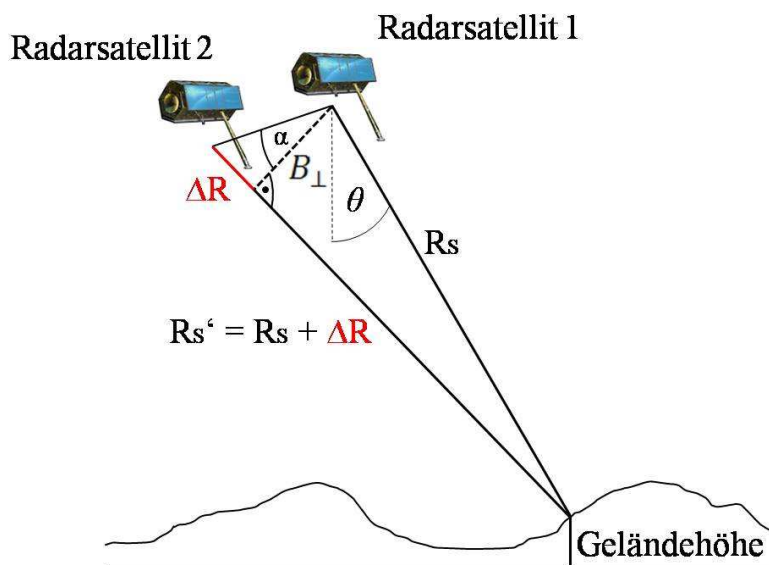


Abbildung 6: Schemaprincip der Radarinterferometrie. Vom Objekt am Erdboden werden zwei Radaraufnahmen aus zwei leicht unterschiedlichen Aufnahmepositionen gemacht (Radarsatellit 1 und 2). θ ist der Blickwinkel. Der Abstand vom zweiten Satelliten zum Objekt am Erdboden ist um den Betrag ΔR größer als der Abstand zwischen Objekt und erstem Satellit. ΔR ist von der effektiven Basislinie B_{\perp} zwischen den beiden Satellitenpositionen und dem Winkel α abhängig. Dadurch erhalten die Satelliten 1 und 2 leicht unterschiedliche Phasenwerte. Aus der Phasendifferenz beider Radaraufnahmen kann die Geländehöhe des Objekts am Erdboden berechnet werden (verändert nach BAMLER 2010:o.S.).

Das Ergebnis dieser Operation sind sogenannte „Fringes“, die die Topographie des Aufnahmegebiets wiedergeben. Ein „Fringe“ repräsentiert dabei einen Phasenzklus von 0 bis 2π . Mit der Methode des sogenannten „Phase Unwrappings“ können diese „Fringes“ in absolute Höhenwerte transformiert werden. Der Höhenwert H eines „Fringes“ kann mit Gleichung (6) abgeschätzt werden. Er ist von einer Konstanten und der effektiven Basislinie B_{\perp} abhängig. Die Konstante ist von der Umlaufbahnhöhe des Satelliten abhängig. Für den Satelliten ERS liegt der Wert bei 9300 (FERRETTI et al. 2007:A-20). Mit kurzen Basislinien können Störungen reduziert werden. Große Basislinien ermöglichen hingegen die Erzeugung eines detaillierteren DGMs.

$$H = \frac{\text{Konstante}}{B_{\perp}} \quad (6)$$

3.5 Differentielle Radarinterferometrie

Ziel der differentiellen Radarinterferometrie (D-InSAR) ist die Erfassung und Messung von Deformationen auf der Erdoberfläche wie Erdbeben, Hangbewegungen und Setzungen (z.B. durch Bergbau im Untergrund; GABRIEL et al. 1989, MASSONNET & FEIGL 1995). Es wird also die Deformation ermittelt, die in der Zeit zwischen den beiden Radaraufnahmen stattgefunden hat. Abbildung 7 stellt die schematische Anordnung dar. Gleichung (7) zeigt, dass die interferometrische Phase ϕ_{int} (= Phasendifferenz der beiden Radaraufnahmen) von der Topographie des Aufnahmegebiets (ϕ_{Topo}), Störeffekten ($\phi_{Stör}$) und der Deformation des Erdbodens (ϕ_{Def}) beeinflusst wird.

$$\phi_{int} = \phi_{Topo} + \phi_{Stör} + \phi_{Def} \quad (7)$$

Der topographische Anteil kann von der interferometrischen Phase mit Hilfe eines DGM des Aufnahmegebiets abgezogen werden. Dieses DGM kann z.B. aus zwei relativ kurz hintereinander aufgenommenen Radarbildern mittels der in 3.4 beschriebenen Methode InSAR generiert werden.

Störeffekte beinhalten unter anderem atmosphärische Variationen zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten, Höhenfehler im verwendeten DGM, Phasenfehler durch ungenaue Orbitpositionen und Rauschen im Signal.

Nach Abzug des topographischen Phasenanteils und der Berücksichtigung aller relevanten Störeinflüsse, kann der Phasenanteil, der die Deformation der Erdoberfläche ΔR_{def} repräsentiert, berechnet werden (Gl. 8; FERRETTI et al 2007:A-23).

$$\phi_{Def} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{def} \quad (8)$$

Vorteil von D-InSAR ist eine flächendeckende, kontinuierliche Deformationsmessung. Die Nachteile dieser Methode sind der atmosphärische Einfluss – dieser kann zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen – und die sogenannte temporäre Dekorrelation (FERRETTI et al. 2001:8, 2010:o.S.). Vegetationsflächen wie z.B. Wald, verändern ihre Rückstreuungseigenschaften innerhalb kurzer Zeit – z.B. durch Wind. Andere Veränderungen, die zu Dekorrelation führen sind Frost- und Tauzyklen und das Wachstum von Pflanzen in der Zeit zwischen den beiden Radaraufnahmen (BAMLER & HARTL 1998:43, DAITO et al. 2004:1-3, LU 2007:249-257).

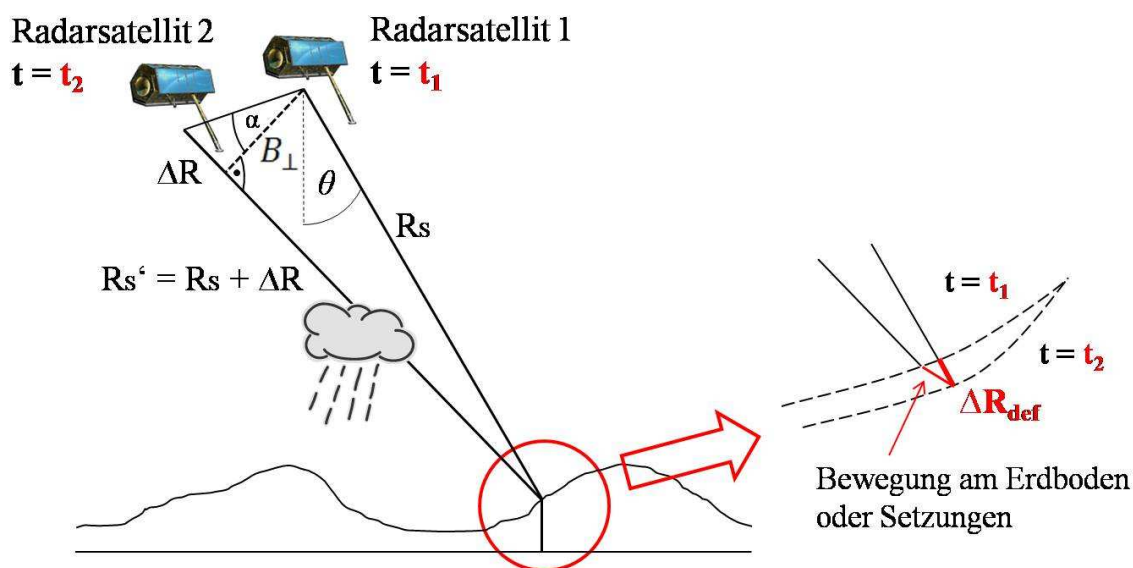


Abbildung 7: Schemaprinzip der differentiellen Radarinterferometrie. Durch zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten (t_1 und t_2) aufgenommene Radarbilder kann die Deformation ΔR_{def} , die im Zeitraum zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten am Erdboden aufgetreten ist, millimetergenau gemessen werden. Die Wolke bei der zweiten Radaraufnahme symbolisiert mögliche atmosphärische Veränderungen zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten. Dadurch können Fehlinterpretationen des Signals verursacht werden (verändert nach BAMLER 2010:o.S.).

3.6 Persistent Scatterer Radarinterferometrie

Auf Grund der oben aufgezeigten Nachteile der D-InSAR Methode wurde das sogenannte Persistent Scatterer Radarinterferometrie Verfahren (PS-InSAR) entwickelt (FERRETTI et al. 1999, 2000, 2001, KAMPES 2006). Hier verwendet man nun statt nur zwei Radarbilder, einen Stapel von mindestens 15 bis 50 Stück – besser jedoch noch mehr Radaraufnahmen (Abb. 8; CROSETTO et al. 2010:2, FERRETTI et al. 2000:1). Man misst die Deformation nun nicht mehr flächendeckend, sondern an bestimmten Punkten, die in allen Radarbildern stabile²² Rückstreuungseigenschaften aufweisen. Diese Punkte werden als Persistent Scatterer (PS) bezeichnet. Beispiele für mögliche PS sind künstliche Objekte wie Gebäude, die auf Grund ihrer Geometrie und Orientierung zum Satelliten die eingefallene Radarstrahlung wieder direkt zurück zum Satelliten senden (Abb. 9) und Metallobjekte wie Strommasten und Bahngleise (FERRETTI 2010:o.S., BAMLER 2010:o.S.).

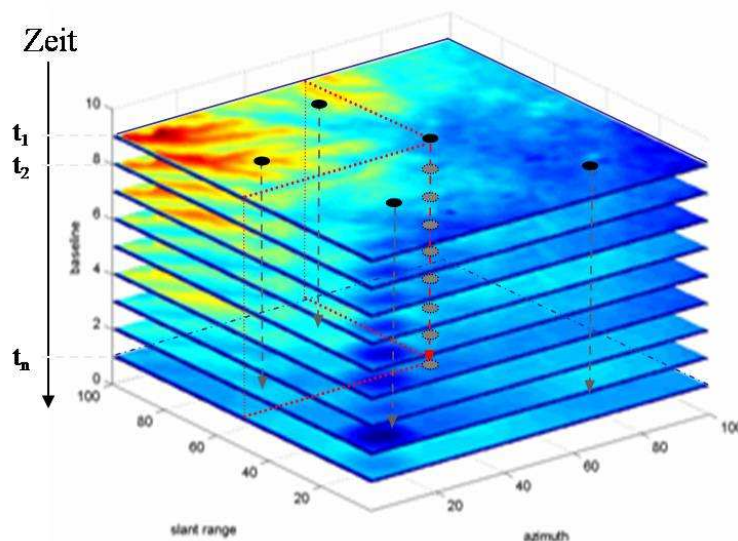


Abbildung 8: Bei der Persistent Scatterer Radarinterferometrie wird ein Stapel von mindestens 15 bis 50, optimal jedoch noch wesentlich mehr Radardaten verwendet (Zeitreihe). Die Deformation am Erdboden kann an bestimmten Punkten, den PS gemessen werden. Diese PS (schwarze und graue Punkte) weisen über den gesamten Aufnahmezeitraum stabile Rückstreuungseigenschaften auf (verändert nach FERRETTI 2010:o.S.).

Der Vorteil der PS-InSAR Methode ist, dass man durch die Prozessierung vieler Radardaten den Einfluss der Atmosphäre auf das Phasensignal abschätzen kann (SÖRGEL

²² „Stabil“ bezieht sich hier nur auf die Rückstreuungseigenschaften, nicht auf die Deformation!

2006:7). Des Weiteren ist man in der Lage, eine ganze Zeitreihe der Deformation von einem bestimmten Gebiet zu berechnen. Die PS-InSAR Methode erreicht eine Genauigkeit von ein bis drei Millimetern (COLESANTI et al. 2003a:1699). So kann die PS-InSAR Methode auch z.B. zur Überwachung von Hangbewegungen angewendet werden. Beispiele dieser Anwendungen sind in COLESANTI et al. (2003b), LAUKNES et al. (2010) und LEI et al. (2010) beschrieben. Durch die Verwendung von Archivdaten kann man auch rückblickend die Deformation analysieren. Auch das Problem der temporären Dekorrelation kann man umgehen – vorausgesetzt, dass man im Untersuchungsgebiet genügend solcher PS findet!

Genau hier setzt diese Arbeit an. Wie in der Einführung bereits erwähnt ist das Ziel dieser Arbeit die Abschätzung der zu erwartenden PS – bevor die teuren Radaraufnahmen von einem bestimmten Gebiet gemacht bzw. bestellt werden. Also eine Unterstützung bei der Abschätzung, ob die PS-InSAR Methode in einem bestimmten Gebiet angewendet werden kann.

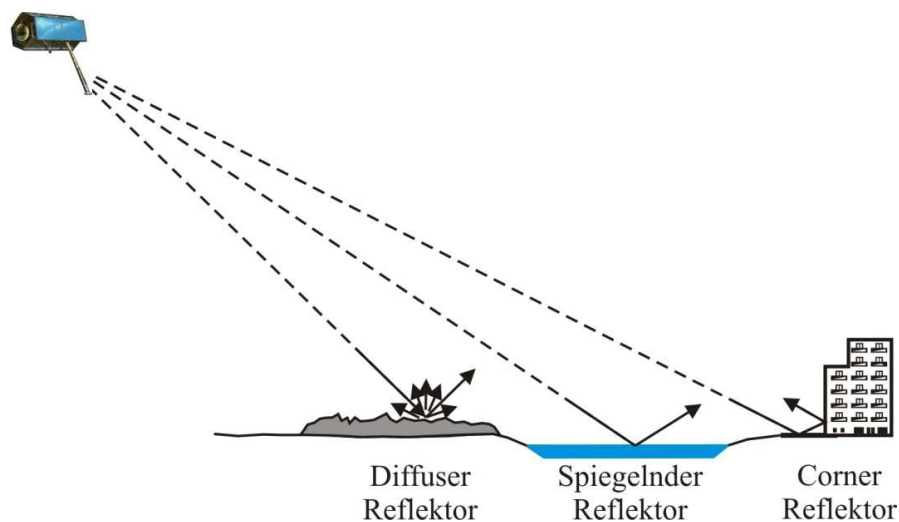


Abbildung 9: Je nach Rauigkeit der Erdoberfläche kommt es zu einer unterschiedlichen Rückstreuung des Radarsignals. Ein diffuser Reflektor reflektiert das Radarsignal in alle möglichen Richtungen. Bei einem spiegelnden (engl. *specular*) Reflektor wie zum Beispiel einer ruhigen Wasseroberfläche wird das Radarsignal vom Satelliten weg gestreut. Deshalb erscheinen solche Oberflächen sehr dunkel im Radarbild. Bei einem sogenannten Corner Reflektor wird das Radarsignal über eine doppelte Reflexion (*double bounce*) an Erdboden und Hauswand wieder direkt zurück zum Satelliten gesandt. Deshalb erscheinen solche Objekte sehr hell im Radarbild und sind damit ideale PS-Kandidaten (verändert nach ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2009:76, LILLESAND & KIEFER 2000:646, Abb. 8.22).

4. Lösungsansatz: Abschätzung der PS aus topographischen Karten

In diesem Kapitel wird der Lösungsansatz zur Abschätzung der Persistent Scatterers aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten – vor der Bestellung der Radardaten – dargestellt. Nach einem theoretischen Überblick wird auf die in dieser Arbeit entwickelten Methoden eingegangen.

4.1 Theorie des Lösungsansatzes

4.1.1 Abschätzung der PS

Die Persistent Scatterer Radarinterferometrie ist in der Lage, die Deformationen von bestimmten Objekten am Erdboden zu messen. Diese Objekte müssen über den kompletten Aufnahmezeitraum stabile Rückstreuungseigenschaften des vom Satelliten ausgesendeten Radarsignals aufweisen (Persistent Scatterer). Wie bereits bei Kapitel 3.6 (S. 21 f.) erwähnt, sind PS vor allem auf künstliche Objekte wie Gebäude und Bahngleise beschränkt. Abbildung 10 zeigt die Modellstruktur des entwickelten Lösungsansatzes zur Abschätzung dieser PS – vor einer Radaraufnahme des Untersuchungsgebiets. Aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten werden mögliche PS extrahiert. Anschließend wird – in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des verwendeten Radarsensors – die Anzahl der möglichen PS-Punkte für das Untersuchungsgebiet bestimmt.

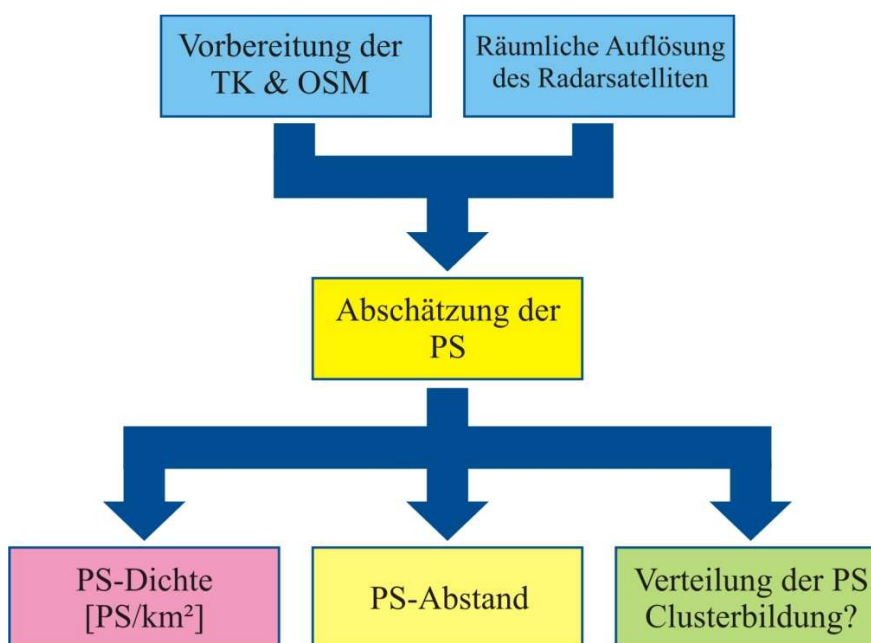


Abbildung 10: Modellstruktur des entwickelten Lösungsansatzes zur PS-Abschätzung aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten.

Aus der Anzahl der abgeschätzten PS und der Fläche des Testgebiets kann die PS-Dichte (PS pro km²) berechnet werden (Gl. 9).

$$PS_{Dichte} = \frac{\text{Anzahl der PS}}{\text{Fläche Testgebiet [km}^2\text{]}} \quad (9)$$

4.1.2 Maximaler Abstand der PS

Aus den abgeschätzten möglichen PS werden weitere Parameter für das Untersuchungsgebiet berechnet: Der erste Parameter ist der euklidische Abstand zwischen den abgeschätzten PS. Laut ADAM (2011) sollte der maximale Abstand von zwei PS weniger als 700 m betragen, um optimale PS-InSAR Prozessierungen durchführen zu können. Im Extremfall, z.B. in einem Gebiet mit wenigen PS kann auch eine Prozessierung mit ca. 1.000 m PS-Abstand erfolgen. Diese Werte dienen als „Faustformel“ und sind nicht als fixe Werte zu betrachten. Einen großen Einfluss auf den maximal möglichen PS-Abstand hat auch die Stärke des atmosphärischen Einflusses auf einen Radardatensatz. So kann bei einer großflächigen „stabilen Atmosphäre“ die 1.000 m Marke auch überschritten werden.

4.1.3 Verteilung der PS im Untersuchungsgebiet

Der nächste Parameter, der aus den abgeschätzten PS abgeleitet werden kann, ist die Verteilung der PS im Untersuchungsgebiet. Um die Deformationen des Erdbodens im ganzen Untersuchungsgebiet optimal erfassen zu können, ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Messpunkte, also der PS, notwendig. Das Gegenteil wäre eine Konzentration der PS auf wenige Stellen im Interessensgebiet. Mittels der Überprüfung auf Clusterbildung wird die Verteilung der abgeschätzten PS untersucht.

In dieser Arbeit wird die *Average Nearest Neighbor Distance* Methode zur Überprüfung auf Clusterbildung gewählt (ESRI 2009a:o.S.). Diese Methode gehört zu den *Point Pattern Analysis* Methoden (PPA) und wird auch als *Nearest Neighbor Analysis* (NNA) bezeichnet (CHEN & GETIS 1998:o.S., KOCH 2011: Lektion 8). Bei der PPA wird ein empirisches Punktmuster (also in dieser Arbeit die abgeschätzten PS-Punkte) mit einem theoretischen Punktmuster, einer Zufallsverteilung, statistisch verglichen. Für die Erstellung des theoretischen Punktmusters gilt das Zufallsprinzip. Dieses beruht auf den nachfolgenden zwei Voraussetzungen: erstens muss die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Punkt an einem bestimmten Ort im Untersuchungsgebiet befindet, für jeden Ort

gleich groß sein (sog. Gleichheitsbedingung) und zweitens gilt, dass diese Orte in einer voneinander unabhängigen, zufälligen Reihenfolge besetzt werden (Unabhängigkeitsbedingung). In der PPA wird nun geprüft, ob das empirische Punktmuster eine räumlich dichtere (konzentrierte) Anordnung aufweist als das theoretische Vergleichsmuster, dann liegt Clusterbildung vor (*clustered pattern*). Das Gegenteil wäre eine räumlich gleichmäßigere Verteilung der empirischen Punkte als die der Vergleichspunkte (*regular pattern* oder *dispersed pattern*; KOCH 2011: Lektion 8)

In der *Nearest Neighbor Analysis* (NNA) wird für jeden empirischen Punkt i mit den Koordinaten (x_i/y_i) der euklidische Abstand d_{ij} zum nächstgelegenen (*nearest neighbor*) Punkt j mit den Koordinaten (x_j/y_j) berechnet (Gl. 10) (VASILIEV 1996:22, ESRI 2009a:o.S.).

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (10)$$

Anschließend werden diese Abstände für alle Punktedistanzen arithmetisch gemittelt (N ist die Anzahl der Punkte; Gl. 11).

$$d_{gemittelt} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ij} \quad (11)$$

Auch für den Vergleichsdatensatz, die Zufallspunkte, wird der gemittelte Abstand ε berechnet (Gl. 12). Dabei gibt A die Fläche des Untersuchungsgebiets an.

$$\varepsilon = \frac{1}{2\sqrt{\frac{N}{A}}} \quad (12)$$

Durch die Bildung des Quotienten Q aus den Gleichungen (11) und (12) kann die Verteilung der empirischen Punkte (PS) mit der Zufallsverteilung verglichen werden (Gl. 13).

$$Q = \frac{d_{gemittelt}}{\varepsilon} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ij}}{\frac{1}{2\sqrt{\frac{N}{A}}}} = 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ij} \cdot \sqrt{\frac{N}{A}} \quad (13)$$

Bei einem Quotienten von $Q = 1$ sind die gemittelten Nearest Neighbor Abstände beider Verteilungen, die des empirischen Punktmusters und der Zufallsverteilung, gleich groß. Deshalb entspricht die empirische Verteilung in diesem Fall einer Zufallsverteilung. Quotientenwerte von $Q > 1$ deuten darauf hin, dass das empirische Punktmuster eine eher gleichmäßige Verteilung aufweist (*regular pattern*). Dagegen steht $Q < 1$ für eine stärkere Konzentration der empirischen Punkte als beim Zufallsmuster (*clustered pattern*). Ein $Q = 0$ steht für eine maximale Clusterbildung (alle Punkte sind an einem Ort konzentriert; KOCH 2011: Lektion 8).

Einen großen Einfluss auf Ergebnisse der NNA hat die Größe des Untersuchungsgebiets. Je nachdem welche Größe hier verwendet wird, kann ein und dieselbe empirische Punktverteilung völlig unterschiedliche Werte für den Quotienten Q , also unterschiedliche Ergebnisse bei der Untersuchung auf Clusterbildung ergeben (KOCH 2011: Lektion 8). Bei den Analysen in dieser Arbeit entspricht die Größe des Untersuchungsgebiets A immer der Fläche des Testgebiets.

4.1.4 Validierung der PS-Abschätzung

Nach der Berechnung aller oben genannten Parameter, werden die Ergebnisse der PS-Abschätzung durch Vergleich mit Ergebnissen echter PS-InSAR Prozessierungen evaluiert. Dabei wird erstens geprüft, wie viel Prozent der echten PS mit der PS-Abschätzung mit topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten übereinstimmen. Als zweites Validierungskriterium wird geprüft, wie viel Prozent der abgeschätzten PS auch in Wirklichkeit ein PS sind. Es muss hierbei bedacht werden, dass nicht jedes Gebäude auch gleichzeitig als PS dient. Je nach Blickwinkel und Blickrichtung (Überflugsrichtung) des Radarsatelliten und Geometrie des Gebäudes, kann dieses als PS dienen, oder nicht (Abb. 9, S. 22). Es wird die Hypothese aufgestellt, dass mit der Verwendung einer größer maßstäbigen Karte auch eine höhere Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse der PS-Abschätzung verbunden ist. Deshalb wird der Einfluss des Kartenmaßstabs auf die Validierungsergebnisse in Kapitel 6.3 (S. 60 ff.) näher untersucht.

4.2 Methode des Lösungsansatzes

4.2.1 Vorbereitung der topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten

Für die in dieser Arbeit entwickelte PS-Abschätzung stehen als Softwarepakete der OziExplorer, Corel PHOTO-PAINT (12) und ESRI ArcGIS (9.3) zur Verfügung. Grundsätzlich können die hier entwickelten Methoden auch mit anderen Softwarepaketen umgesetzt werden. Als Eingangsdatensatz für die später beschriebene PS-Abschätzung aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten wird ein Vektordatensatz (*Shapefile* oder *FeatureClass*) der möglichen PS benötigt. Aus der TK bzw. den OSM Daten werden folglich Gebäude, Bahntrassen und Straßen (mögliche PS sind hier Randsteine, Schallschutzwände, etc.) extrahiert. Je nach Art der topographischen Karte sind hierfür besondere Vorarbeiten notwendig. Diese und die Vorbearbeitung der *OpenStreetMap* Daten werden nachfolgend beschrieben.

4.2.1.1 *Russische topographische Karten*

A) Projektion

Die sowjetischen Generalstabskarten (in dieser Arbeit als russische topographische Karten bezeichnet) können kostenfrei von <http://en.poehali.org/maps?> bezogen werden. Es handelt sich um farbige Scans, die bereits georeferenziert sind. Beim Download erhält man zwei Dateien: die *.gif²³ Datei enthält die gescannte Karte, die *.map Datei enthält die Georeferenz- und Projektionsdaten.

Die später beschriebene PS-Abschätzung aus topographischen Karten wird in ArcGIS umgesetzt. Da aber die *.map Datei (und damit die Beschreibung der Georeferenzierung und Projektion der Karte) in ArcGIS nicht geöffnet werden kann, bedarf es zuvor einer Überführung der *.map Datei in ein World File. Diese Überführung wird im Programm OziExplorer durchgeführt. In diesem Programm kann unter Optionen mit dem Befehl „Schreibe TFW Datei“ eine World File für eine Tiff²⁴ Rasterdatei erzeugt werden (Abb. 11). Damit dieser Befehl im OziExplorer verfügbar wird, bedarf es eines kleinen „Tricks“: Im Programmpfad des OziExplorers (z.B.: „C:\OziExplorer\...“) muss eine leere *.dat Datei mit dem Namen „TFW.DAT“ erzeugt werden (TSERKEZIS 2007:o.S.).

²³ Graphics Interchange Format.

²⁴ Tagged Image File Format.

Das so erzeugte World File besteht aus sechs Zeilen. In der ersten Zeile wird die Breite eines Pixels in Meter angegeben. Die zweite und dritte Zeile sind Rotationswerte, welche bei nicht entzerrten Karten wichtig sind. Die vierte Zeile gibt die Höhe eines Pixels in Metern an. In der fünften Zeile wird der Rechtswert der Pixelmitte des Pixels in der oberen linken Kartenecke angegeben und in der sechsten Zeile der dazugehörige Hochwert (FABISCH 2009:o.S.).

Damit die russische topographische Karte nun in ArcMap geöffnet werden kann, muss die *.gif Datei der Karte zuvor in z.B. Corel PHOTO-PAINT in eine *.tif Datei umgewandelt werden. (Alternativ kann die mit dem OziExplorer erzeugte TFW in eine GFW Datei umgeändert werden. Dann kann die *.gif Datei in ArcMap geöffnet werden).

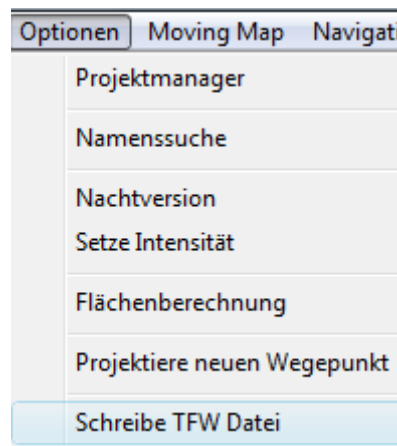


Abbildung 11: Erzeugen einer TFW Datei im OziExplorer.

Vor dem Öffnen der Karten in ArcGIS sollte in den Layer Properties das entsprechende Koordinatensystem eingestellt werden. Wie bereits in Kapitel 1.5.2.1 (S. 5 ff.) erwähnt, liegen die russischen topographischen Karten in *Gauß Krüger* Projektion (sechs Grad breite Meridianstreifen) mit dem Datumspunkt *Pulkovo* von 1942 vor (PANITZKI 2010:o.S.). In ArcGIS entspricht das dem *Pulkovo_GK_Zone_XX*. Anhand der Koordinatenangaben auf den Kartenblättern und zusätzlicher Überprüfung auf der Homepage der EPSG Geodetic Parameter Registry (<http://www.epsg-registry.org/>) können für die Testgebiete die entsprechenden sechs Grad breiten *Gauß Krüger* Zonen abgeleitet werden (Tab. 2).

Tabelle 2: Die sechs Grad breiten *Gauß Krüger* Zonen der Testgebiete

Testgebiet	<i>Gauß Krüger Zone (Pulkovo 1942)</i>
Kairo	6 Nord
Budapest	4 Nord
Aostatal	2 Nord
Oberbayern	2 Nord

Da in der hier verwendeten Version von ArcGIS (9.3) die für die Testgebiete Aostatal und Oberbayern notwendige Projektion „Pulkovo_1942_GK_Zone_2N“ standardmäßig nicht vorhanden war, wurde diese manuell aus der bereits vorhandenen Projektion „Pulkovo_1942_GK_Zone_2“ durch Reduzieren des False_Eastings von ursprünglich 2.500.000 (für Zone 2) auf 500.000 (für Zone 2N) erzeugt.

B) Extraktion der möglichen PS

Die russischen topographischen Karten sind farbige Scans von Papierkarten, die bereits georeferenziert wurden (siehe oben). Bei diesem Scanvorgang wird jedem Pixel ein bestimmter Farbwert zugewiesen. Dies geschieht, da es sich um gedruckte Papierkarten handelt, nicht einheitlich für jede Legendenklasse. So erhalten beispielsweise Pixel, die Bebauung repräsentieren unterschiedliche Rot- und Gelb-Werte.

Des Weiteren weisen Bebauung (mögliche PS) und Höhenlinien sowie Straßen, Industriebebauung, Koordinatengitter und Beschriftung jeweils die gleichen Farbwerte (rot bzw. schwarz) auf (Abb. 13). Es ist also nicht möglich, die einzelnen Legendenklassen anhand ihrer Farbwerte automatisch zu selektieren. Folglich müssen „störende“ Objekte wie Beschriftung, Koordinatengitter, Höhenlinien, Terrassen, etc. vor der Vektorisierung der Rasterdaten manuell entfernt werden. Diese manuelle Entfernung wird im Programm Corel PHOTO-PAINT mittels der Funktion „Radierer“ ausgeführt.

Anschließend werden die in Corel bearbeiteten Karten in ArcMap geöffnet. Bei den *Layer Properties* werden unter „*Symbology*“ „*Unique Values*“ ausgewählt (die russischen topographischen Karten liegen als Colormap klassifizierte Raster vor; 256 Farbwerte). Da sich die möglichen PS auf Gebäude, Straßen und Bahntrassen beschränken,

diese weisen rötliche und schwarze Farbtöne auf, werden alle anderen Farbtöne – wie grün (Vegetation) und blau (Wasser) mit „Remove“ entfernt (Abb. 12).

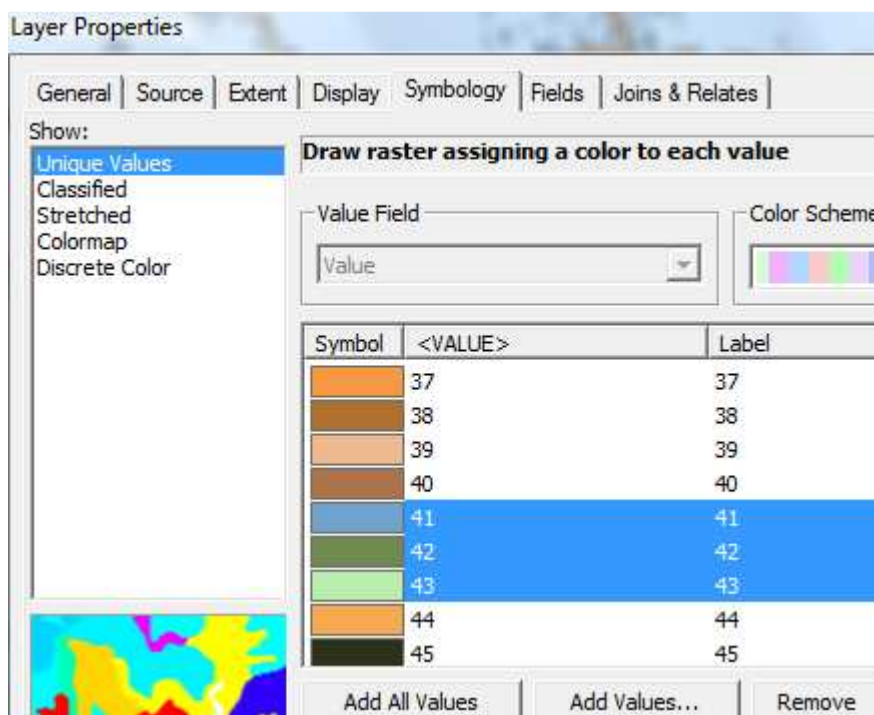


Abbildung 12: Entfernen der nicht rötlichen oder schwarzen Farbwerte mit „Remove“ (hier blau und grün) in den Layer Properties (ArcMap).

Nun wird in der Attributtabelle der Karte ein neues Feld angelegt (Name „Class“; Type: „Short Integer“). Alle im obigen Schritt mit „Remove“ entfernten Farbwerte (z.B. blaue und grüne Farbwerte) erhalten in Spalte „Class“ den Wert „3“ (die Klassifizierung erfolgt im Editiermodus). Die rötlichen Werte bekommen den Wert „1“ und die schwarzen Werte den Wert „2“ zugewiesen.

Mit der Funktion „*Raster to Polygon*“ werden die Rasterdaten vektorisiert. Die Vektorisierung erfolgt dabei nach dem Feld „Class“. Die Funktion *simplify Polygons* wird aktiviert. Dadurch werden benachbarte Pixel, die die gleichen Werte in der Spalte „Class“ aufweisen, in ein gemeinsames Polygon überführt.

Dem oben erzeugten *Shapefile* (Polygon) muss noch das entsprechende Koordinatensystem der Ausgangskarte zugewiesen werden. Dies geschieht durch: „Export Data (use coordinate system of data frame)“. Anschließend wird das neu generierte Shapefile bei Bedarf auf den Bereich des Testgebiets zugeschnitten und nach dem Feld „*Gridcode*“ symbolisiert („1“: rot, „2“: schwarz, „3“: wird nicht symbolisiert). Das erzeugte Shape-

file kann nun als Eingangsdatensatz für das später beschriebene Modell zur Abschätzung der PS aus topographischen Karten verwendet werden.

Abbildung 13 zeigt die Zwischen- und Endergebnisse der oben beschriebenen manuellen Bearbeitung und anschließender Vektorisierung.

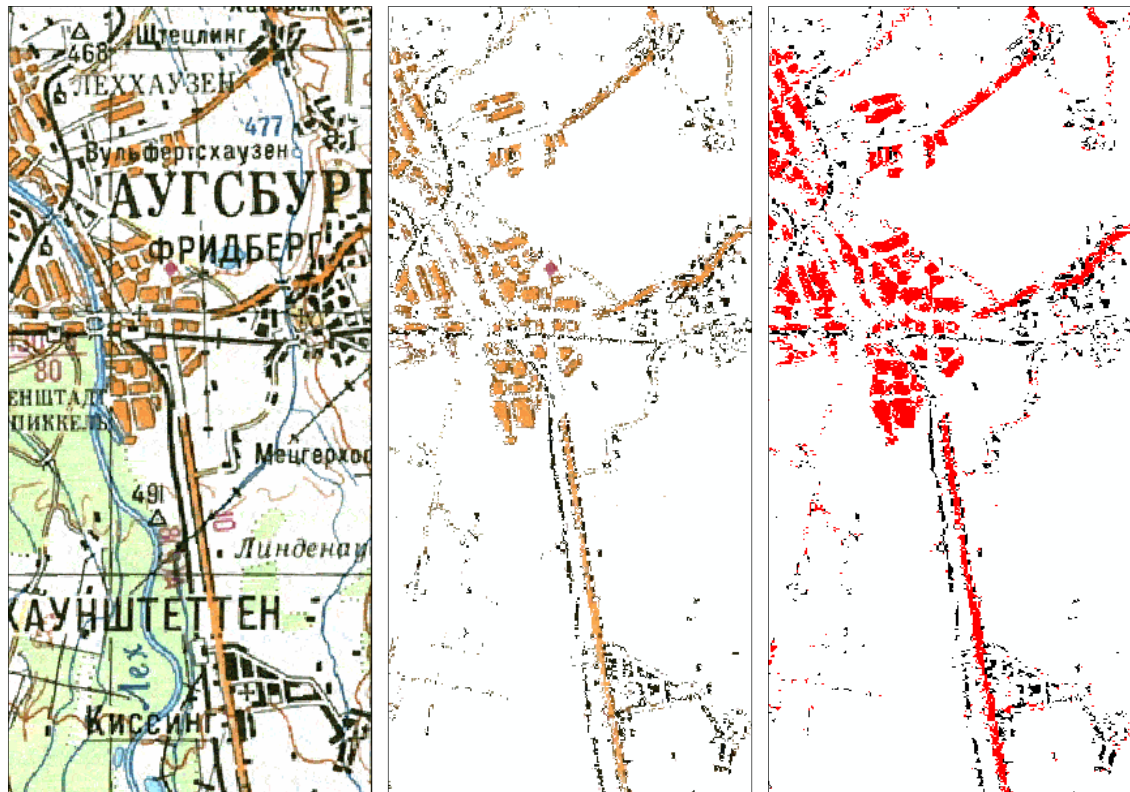


Abbildung 13: Manuelles Bearbeiten der russischen topographischen Karten. Links: Originalkarte (Ausschnitt aus Testgebiet Oberbayern, Stadt Augsburg). Mitte: alle „störenden“ Objekte wie Beschriftung und Höhenlinien sowie alle nicht rötlichen und schwarzen Farbwerte entfernt. Rechts: vektorisierter Datensatz.

4.2.1.2 *Papier Karten – TK 25 Courmayeur*

Für ein Teilgebiet im Nordwesten des Aostatals wurde eine GPS²⁵-fähige topographische Karte in Papierform erworben (vgl. Kapitel 1.5.2.3, S. 8 f.). Von dieser Karte wird ein Ausschnitt um die Stadt Courmayeur eingescannt. Um Blattverzug beim Einscannen zu vermeiden, wird ein knickfreier Bereich gewählt. Der eingescannte Kartenausschnitt wird anschließend mit Hilfe von sechs Passpunkten in ArcMap georeferenziert (Anhang-Abb. 17, S. XVIII). Als Passpunkte dienen dabei die Kreuzungspunkte des aufgedruckten Koordinatensystems der Karte (UTM Zone 32 N, WGS 1984).

²⁵ Global Positioning System.

Anschließend werden alle Gebäude (mögliche PS) im Bereich der eingescannten Karte digitalisiert. Das somit erzeugte Shapefile dient als Eingangsdatensatz für die später beschriebene Abschätzung der PS aus topographischen Karten.

Mit dem manuellen Digitalisieren der Gebäude lässt sich eine größere Genauigkeit als bei der oben beschriebenen halbautomatischen Vektorisierung der russischen TKs erreichen (vgl. Kapitel 4.2.1.1, S. 27 ff.). Jedoch ist das Digitalisieren auch mit einem deutlich größeren Arbeitsaufwand verbunden. Da die russischen TK auch in sehr großen Gebieten wie den Testgebieten Kairo und Oberbayern verwendet werden, wird für die Vorbereitung dieses Kartentyps die oben beschriebene halbautomatische Vektorisierung angewendet.

Für das vergleichsweise kleine Testgebiet Aostatal werden die Gebäude digitalisiert, um die höhere Genauigkeit der TK (Maßstab 1:25.000) bestmöglich zu erhalten (die russischen TK haben je nach Testgebiet einen Maßstab von 1:50.000, 1:100.000 oder 1:200.000 und haben somit von vornherein eine niedrigere Genauigkeit).

4.2.1.3 Digitale Rasterkarten – TK 25 von Bayern

Für das Testgebiet Oberbayern steht die digitale topographische Karte von Bayern im Maßstab 1:25.000 zur Verfügung (vgl. Kapitel 1.5.2.4, S. 9 f.). Die als TIFF Rasterdaten vorliegenden TKs haben als „echte“ digitale Daten den großen Vorteil, dass jede Legendenklasse durch eine bestimmte RGB Farbkombination klassifiziert ist. Zum Beispiel haben Gebäude die RGB Werte 102/102/102 (grau).

Um nun die möglichen PS, also die Gebäude, aus den Rasterdaten zu extrahieren, werden die Daten in Corel PHOTO-PAINT geladen. Unter dem Menübefehl „Maske“ wird „Farbmaske“ ausgewählt und dort mit der „Pipette“ der Farbwert der Gebäude (RGB: 102/102/102) ausgewählt (Abb. 14). Anschließend wird die „Maske“ (hier: die Gebäude) in eine neue Datei gespeichert (TIFF). Um die Projektion der Originalkarte zu übernehmen, wird die Original-TFW Datei auf den gleichen Namen wie das neu erzeugte TIFF umbenannt.

Nun wird das in Corel PHOTO-PAINT erzeugte TIFF in ArcMap geladen und mit „Raster to Polygons“ vektorisiert (*simplify Polygons* wird aktiviert). Da bei diesem Vorgang die ursprüngliche Projektion der Rasterdaten nicht automatisch den erzeugten

Vektordaten mitgegeben wird, müssen Letztere exportiert (unter Verwendung der Projektion des *Data Frames*) und wieder neu in ArcMap geladen werden.

Der letzte Schritt, bevor die Daten als Eingangsdaten im Modell zur Abschätzung der PS verwendet werden können, ist die Zusammenführung der Daten der einzelnen Kartenblätter mit dem Tool „*Union*“. Auf Grund der Größe des Testgebiets Oberbayern (ca. 100 km mal 100 km) werden für dieses Gebiet 64 Kartenblätter der digitalen topographischen Karte von Bayern verwendet. Abbildung 15 zeigt die Zwischen- und Endergebnisse der oben beschriebenen Vorbereitung der digitalen TK von Bayern.

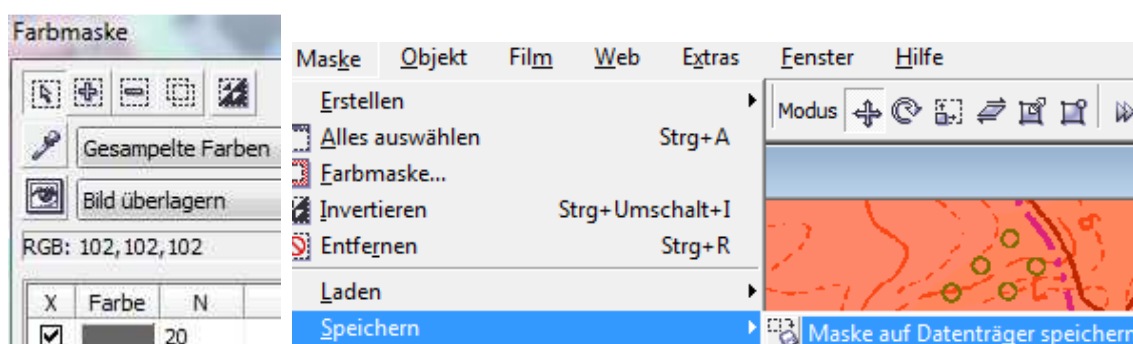


Abbildung 14: Auswählen der Gebäude aus der digitalen TK von Bayern mit dem Befehl Farbmaste (Corel PHOTO-PAINT).

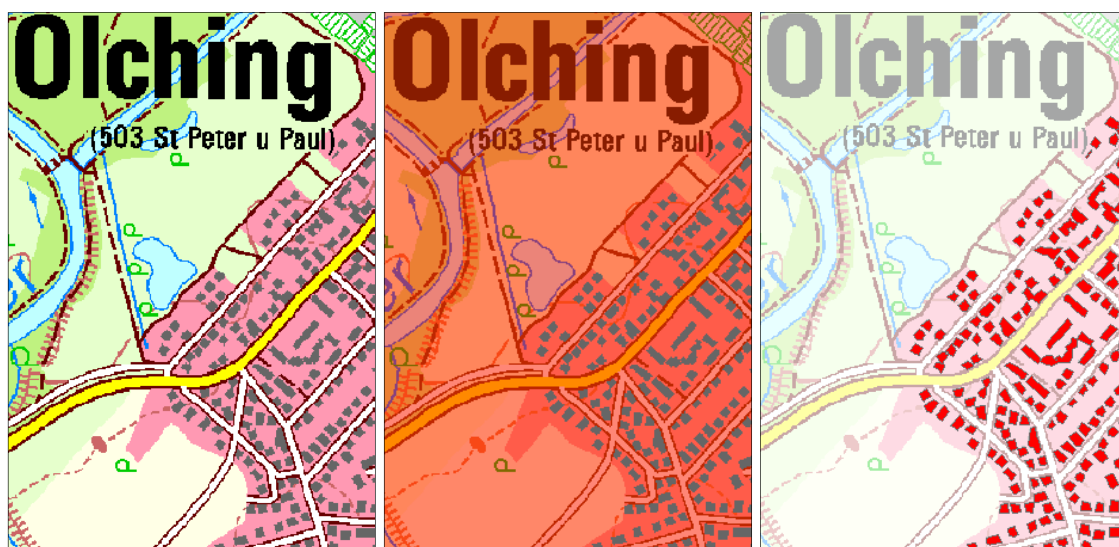


Abbildung 15: Vorbereitung der digitalen topographischen Karte von Bayern. Links: Originalkarte (Ausschnitt aus Testgebiet Oberbayern, Olching, westlich von München). Mitte: Selektion aller Gebäude mit Farbmaste in Corel PHOTO-PAINT. Rechts: vektorisierte Gebäude (rot) über transparenter TK.

4.2.1.4 *Vektordaten*

Die Datensätze Bayern-Map Plus (Testgebiet Oberbayern) und die vektorisierte TK von Budapest können direkt ohne große Vorarbeiten in das unten beschriebene Modell zur Abschätzung der PS einfließen.

A) Vektorisierte topographische Karte Budapest

Die vektorisierte TK von Budapest (Maßstab 1:10.000) hat die EOVI Projektion (*Egyeszes Országos Vetületi* = Nationale Einheitsprojektion). Diese wird in ArcGIS als „Hungarian 1972 *Egyeszes Országos Vetületi*“ bezeichnet (siehe Kapitel 1.5.2.2, S. 7 f.). Um die Layer des Datensatzes identifizieren zu können, wurde die ungarische Datenbeschreibung mit Hilfe des Google-Übersetzer-Tools (<http://translate.google.de/>) ins Deutsche übersetzt.

Als mögliche PS dienen Gebäude und Säulen/Monumente. Letztere sind als Point-Feature im Datensatz vorhanden. Um diese Punkte wird ein Kreispolygon von 1 m Durchmesser erzeugt („*Buffer*“). Anschließend werden die erzeugten Säulen/Monument Polygone zusammen mit allen Polygon-Layern, die Gebäude repräsentieren (Kirchen, öffentliche Gebäude, andere Gebäude, etc.), mit „*Union*“ in ein gemeinsames Polygon vereint. Dieses *Shapefile* enthält nun alle möglichen PS-Objekte des Testgebiets und kann als Eingangsdatensatz in dem Modell zur PS-Abschätzung verwendet werden.

B) Bayern-Map plus

Die Daten der Bayern-Map Plus liegen als Vektordaten vor (siehe Kapitel 1.5.2.4, S. 9 f.). Interessant für die hier entwickelte PS-Abschätzung aus TKs sind die Layer „Hausumringe“. Diese stammen aus der amtlichen digitalen Flurkarte von Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION 2008:3, 20). Die beiden Layer „Hauptgebäude“ und „Nebengebäude“ werden mit „*Union*“ in ein gemeinsames *Shapefile* zusammengeführt, das direkt ohne weitere Vorarbeiten bei der PS-Abschätzung verwendet werden kann.

4.2.1.5 *OpenStreetMap Daten*

Zusätzlich zu den Gebäuden, die aus den oben erwähnten TKs extrahiert werden, werden *OpenStreetMap* Daten verwendet. Diese werden als *Shapefile* (Koordinatensystem WGS 1984) von <http://download.geofabrik.de/osm> heruntergeladen. Aus den OSM Da-

ten werden die Datensätze Straßen und Bahntrassen ausgewählt, da diese als mögliche PS dienen können (vgl. Kapitel 3.6, S. 21 f.). Die erwähnten OSM Datensätze werden in ArcMap geladen und auf das jeweilige Testgebiet mit „Clip“ zugeschnitten. Nachfolgend wird beschrieben, welche Straßen- bzw. Bahnlinientypen bei der anschließenden PS-Abschätzung verwendet werden und wie diese vor der Abschätzung bearbeitet werden.

A) Straßen

Auf OPENSTREETMAP WIKI (2008:o.S.) sind alle Straßentypen der OSM Daten aufgelistet. Da mögliche PS auf Randsteine (Rechter Winkel) und Schallschutzmauern begrenzt sind, werden für die PS-Abschätzung nur große befestigte Straßen berücksichtigt (Tabelle 3). Da die Straßen in den OSM Daten als Polylinien vorliegen, müssen diesen, je nach Straßentyp, die entsprechenden Querschnitte (Breiten) zugewiesen werden. Die Straßenquerschnitte werden anhand der Angaben von WIKIPEDIA (2011a:o.S.) gewählt.

Tabelle 3: Die berücksichtigten Straßentypen der OSM Daten mit Straßenquerschnitt

OSM Straßentyp	Querschnitt [m] (bei 2 x: je Fahrtrichtung)
<i>Motorway</i> (Autobahn ²⁶) (link ²⁷ : 7,5 m)	2 x 11,5
<i>Trunk</i> (2 spurige Bundesstraße)	2 x 7,50
<i>Primary</i> (Bundesstraße)	7,50
<i>Secondary</i> (Staats-, Landesstraße)	6,50
<i>Tertiary</i> (Kreisstraße)	5,50
<i>Unclassified</i> (Gemeindeverbindungsstraßen)	5,50
<i>Residential</i> (Straßen Innerorts)	5,50
<i>Service</i> (zu einzelnen Häusern)	2,75 (als einspurige Straße gehandhabt)

B) Bahntrassen

OPENSTREETMAP WIKI (2011:o.S.) listet alle OSM Bahnlinientypen auf. Folgende Klassen werden bei der nachfolgenden PS-Abschätzung nicht berücksichtigt: „*abandoned*“ (ehemalige Strecke ohne Schienen), „*subway*“ (U-Bahn: da diese größtenteils unterirdisch verlaufen und somit nicht als PS dienen können), „*construction*“ (im

²⁶ In den OSM Daten sind mehrspurige Straßen je Spur als extra Polylinie ausgewiesen.

²⁷ Auffahrt / Abfahrt, bei allen Straßentypen bis auf „*unclassified*“, „*service*“ und „*residential*“.

Bau) und „*funicular*“ (Standseilbahn). Die Tabelle 4 zeigt alle berücksichtigten Bahnlinienklassen mitsamt ihrer Spurweiten (gemessen zwischen den Schieneninnenkanten; WIKIPEDIA 2011b:o.S., c:o.S.).

Tabelle 4: Die berücksichtigten Bahnlinientypen der OSM Daten mit Spurweiten

OSM Bahnlinientyp	Beschreibung	Spurweite [m]
rail	Eisenbahn	1,435
tram	Straßenbahn	1
light_rail	Stadtbahn (über und unterirdisch)	1
disused	nicht mehr in Benutzung, Schienen noch vorhanden	1,435
preserved	Museumsbahn, Standardbreite angenommen	1,435
narrow_gauge	Schmalspurbahn	1
miniature	noch schmaler als Schmalspurbahn	0,381 ²⁸

Die obigen Tabellen 3 und 4 werden jeweils in eine Exceltabelle eingegeben. Dabei muss beachtet werden, dass die OSM Daten die Mitte der Straßen bzw. Bahntrassen angeben. Da der später durchzuführende „*Buffer*“ auf beiden Seiten der Polylinie erstellt wird, müssen in die Exceltabelle jeweils die halbierten Werte der Straßenquerschnitte bzw. Spurweiten eingegeben werden. Anschließend werden die Exceltabellen in ArcMap geladen und mittels „*Join*²⁹“ den entsprechenden Straßen bzw. Bahnlinientypen zugewiesen. Da die Funktion „Keep only matching records“ verwendet wird, bleiben nur die in den Tabellen 3 bzw. 4 angegebenen Straßen- bzw. Bahnlinientypen erhalten. Alle Typen, die nicht berücksichtigt werden sollen, werden somit automatisch ausgeschlossen.

Mittels eines „*Buffer*“ – basierend auf dem durch den „*Join*“ neue erzeugten Feld „*halbe_Strassenbreite*“ (bzw. „*halbe_Spurweite*“) – werden den einzelnen Typen die jeweiligen Straßenquerschnitte bzw. Spurweiten zugewiesen. Vor der Ausführung des „*Buffer*“ muss das „gejointe“ *Shapefile* zuerst exportiert und wieder neu geladen werden, um die veränderte Attributtabelle als Datei zu speichern (Abb. 16).

²⁸ Schätzung: nur Vergleichsdaten von England gefunden.

²⁹ Verknüpfung von zwei oder mehreren Attributtabellen.

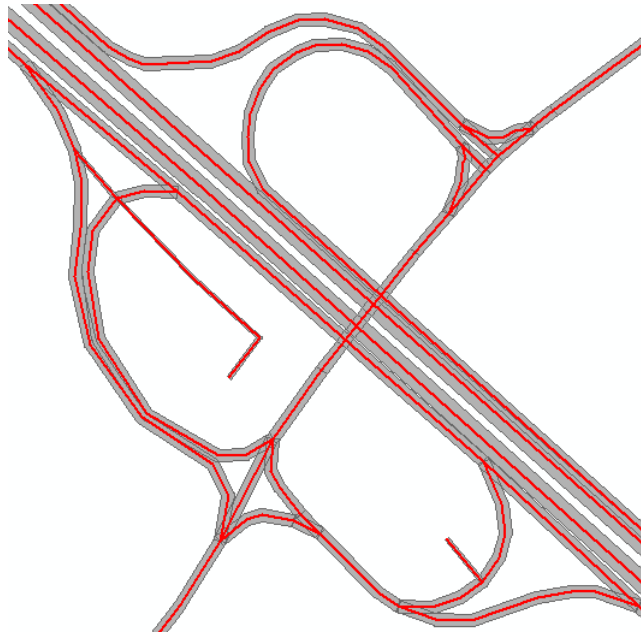


Abbildung 16: *Buffer*-Berechnung (grau) um die OSM Straßen (rote Linie) in Abhängigkeit vom Straßenquerschnitt. Ausschnitt aus Testgebiet Oberbayern, Autobahn A8, Auffahrt Nr. 78 (Fürstfeldbruck).

Anschließend werden die aus den oben beschriebenen topographischen Karten extrahierten Gebäude und mit den *Buffer*-Polygonen der OSM Straßen und Bahntrassen mittels „*Union*“ in ein *Shapefile* (Polygon) vereint. Dieses wird als Grundlage für die spätere PS-Abschätzung (mit OSM Daten) verwendet.

4.2.2 Das ArcGIS Modell zur Abschätzung der PS aus TKs und OSM Daten

In diesem Kapitel wird das Modell zur Abschätzung von PS aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten beschrieben. Zuerst erfolgt die Beschreibung der technischen Umsetzung im *ModelBuilder* von ArcGIS. In Abbildung 21 ist das Modell graphisch dargestellt. Anschließend werden die einzelnen Zwischenergebnisse für einen Beispielmolldurchlauf erläutert.

4.2.2.1 Technische Umsetzung im ModelBuilder von ArcGIS

Die, wie in Kapitel 4.2.1 (S. 27 ff.) beschrieben, aus den TKs und OSM extrahierten möglichen PS (z.B. Gebäude) dienen als Eingangsdaten für das Modell.

Mit „*Create Random Raster*“ wird ein mit Zufallszahlen belegtes Raster erstellt. Der „*Extent*“ (Ausdehnung) des Rasters entspricht dem „*Extent*“ des aus der topographischen Karte (und OSM Daten) erzeugten Polygons der möglichen PS (Kapitel 4.2.1, S. 27 ff.). Als Zellengröße („*Cellsize*“) des Rasters wird die räumliche Auflösung des verwendeten Radarsensors eingegeben (Tabelle 5, S. 55). Anschließend wird jeder Zellenwert des Rasters mit dem Wert 1.000.000 multipliziert („*Times*“) und mit „*Int*“ in eine ganze Zahl (*Integer*) umgewandelt. Die beiden letzten Schritte und das Zufallsraster (und nicht „*Constant Raster*³⁰“) sind notwendig, um im darauffolgenden Schritt („*Raster to Polygon*“; mit „*Field = Value*“) ein Polygon zu erhalten, bei dem jedes Einzelpolygon genau einer Zelle des Rasters mit der räumlichen Auflösung des Radarsensors entspricht. Mit „*Constant Raster*“ würde man ein einziges Polygon erhalten, da der Wert jeder Rasterzelle identisch wäre. Die oben erwähnten Befehle „*Int*“ und „*Times*“ sind notwendig, da das Tool „*Raster to Polygon*“ nur mit ganzzahligen Zellenwerten ausgeführt werden kann. Das oben erzeugte Polygon des Rasters (Zellgröße = räumliche Auflösung des Radarsensors) wird im Folgenden als „Rasterzellenpolygon“ bezeichnet.

Im nächsten Schritt wird aus dem in der Vorarbeit (Kapitel 4.2.1, S. 27 ff.) aus der topographischen Karte und OSM Daten erzeugten *Shapefile* die Klasse der möglichen PS (z.B. Gebäude) gewählt („*Select*“). Mit „*Intersect*“ (verschneiden) werden dann die möglichen PS mit dem Rasterzellenpolygon verschnitten. Das Tabellenfeld „*ID_1*“ gibt an, in welcher Zelle des Rasterzellenpolygons sich mindestens ein möglicher PS (also z.B. Gebäude(teil)) befindet. Dann wird basierend auf dem Tabellenfeld „*ID_1*“ ein

³⁰ Alle Rasterzellen erhalten den gleichen Wert.

„*Spatial Join*³¹“ – mit dem Rasterzellenpolygon als „*Target Feature*“ (Ziel) und dem Ergebnis des vorherigen Schritts („*Intersect*“) als „*Join Feature*“ – ausgeführt, um ein Polygon zu erhalten, bei dem jene Rasterzellen (Einzelpolygone) markiert sind, die mögliche PS enthalten. Ein anschließendes „*Select*“ mit der Bedingung „ID_1“ > 0 extrahiert alle Zellen des Rasterzellenpolygons mit möglichen PS (Abb. 17).

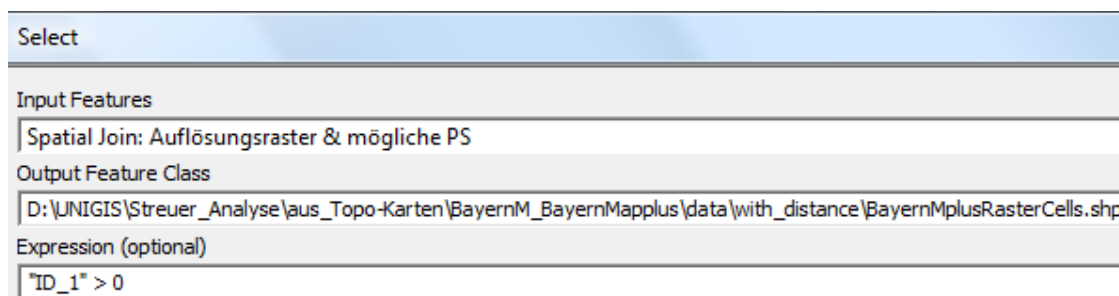


Abbildung 17: Mit der Funktion „*Select*“ werden alle Einzelpolygone des Rasterzellenpolygons markiert, die die Bedingung „ID_1“ > 0 erfüllen. Screenshot aus dem Modell zur Abschätzung der PS.

Anschließend werden mit der Funktion „*Feature to Point*“ die zuvor selektierten Einzelpolygone des Rasterzellenpolygons, also die Einzelpolygone mit möglichen PS, in Punkte (*Point Feature*) umgewandelt. Die Punkte werden genau im Zentrum der quadratischen Polygone erzeugt. Ausgehend von diesem *Point Feature* werden die nachfolgend beschriebenen Prozessschritte ausgeführt.

Die Funktion „*Euclidean Distance*“ (zu finden unter *Spatial Analyst* → *Distance*) berechnet ein Raster, das für jeden Pixel des Rasters (innerhalb des Untersuchungsgebiets) den euklidischen Abstand zum nächstgelegenen Punkt (also zur nächstgelegenen Rasterzelle mit möglichem PS) angibt. Damit diese Abstandsberechnung vom Zentrum der Rasterzellen (und damit unabhängig von deren Größe) durchgeführt werden kann, mussten die Rasterzellen zuvor in Punkte umgerechnet werden. Mit dem Ergebnis des euklidischen Abstandsrasters erhält man einen Überblick über die Entfernungen zwischen den möglichen PS (Rasterzellen). Durch die Festlegung eines bzw. mehrerer Schwellenwerte kann sofort optisch die Machbarkeit einer PS Prozessierung abgeschätzt werden. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 (S. 23) erläutert, sollten im Optimalfall 700 m Abstand zwischen zwei benachbarten PS nicht überschritten werden, da sonst Schwierigkeiten bei der PS-Prozessierung auftreten können. Im Extremfall ist aber auch ein Abstand von 1.000 m möglich. Bei diesen beiden Werten handelt es sich wie im

³¹ Räumliche Verknüpfung.

obigen Kapitel erwähnt um „Faustwerte“ und nicht um fixe Begrenzungen. Anhand der oben gemachten Angaben wird das „*Euclidean Distance*“ Raster in die folgenden drei Abstandsbereiche klassifiziert: 0 – 700 m; 700 – 1.000 m und über 1.000 m (Abb. 26).

Die zweite Berechnung „*Point distance*“ (*Analysis Tools* → *Proximity*) berechnet den euklidischen Abstand zwischen jedem einzelnen möglichen PS (markierte Rasterzelle) und schreibt die Werte in eine *.dbf Tabelle (DBase Format). Für das Tool „*Point distance*“ dienen die oben erzeugten Punkte der markierten Rasterzellen sowohl als Eingangsdaten („*Input Features*“) als auch als „*Near Features*“³², da der Abstand zwischen jedem einzelnen Punkt (PS) berechnet werden soll (Abb. 18).

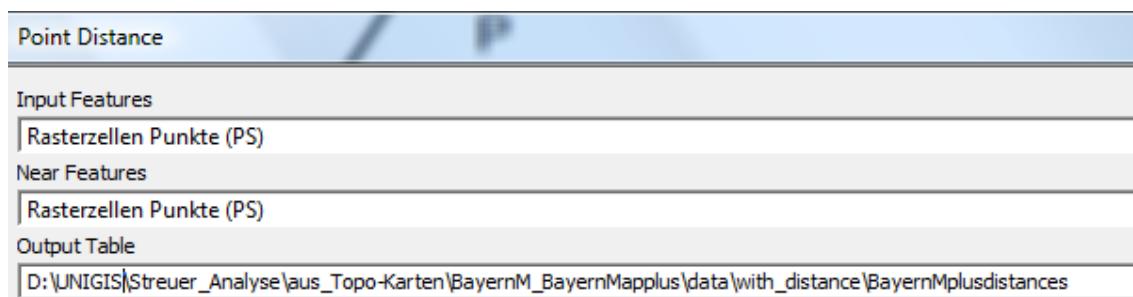


Abbildung 18: Die Funktion „*Point Distance*“ berechnet den Abstand zwischen jedem PS. Die zuvor erzeugten Punkte der markierten Rasterzellen (PS) dienen sowohl als „*Input Features*“ als auch als sogenannte „*Near Features*“.

Die dritte Berechnung mit den Punkten der markierten Rasterzellen (PS) ist das „*Average Nearest Neighbor*“ Tool (siehe Kapitel 4.1.3, S. 24 ff.). Dieses Tool überprüft die PS auf Clusterbildung. Mit den hiermit erzielten Ergebnissen sind quantitative Aussagen über die Verteilung der möglichen PS im Untersuchungsgebiet möglich. Die rein qualitative Auswertung über die alleinige visuelle Betrachtung der PS in einer Karte kann somit durch quantitative Werte zusätzlich unterstützt werden (Abb. 30).

Nach dem „*Spatial Join*“ wird, in einem anderen Pfad als „*Select*“, ein neues Feld mit der Funktion „*Add Field*“ (Name: „Area“; Typ: „*double*“) hinzugefügt und mit „*Calculate Field*“ berechnet. In diesem Feld wird die Fläche jeder Rasterzelle in Quadratkilometern (km²) berechnet. Gleichung (14) zeigt die Berechnung für einen Radarsensor mit einer räumlichen Auflösung von 30 m mal 30 m (z.B. ENVISAT).

³² Punkt, zu dem der Abstand berechnet werden soll.

$$Fläche [km^2] = \frac{30\text{ m} \cdot 30\text{ m}}{1.000.000} \quad (14)$$

Im *ModelBuilder* wird diese Berechnung, wie in Abbildung 19 gezeigt, umgesetzt.

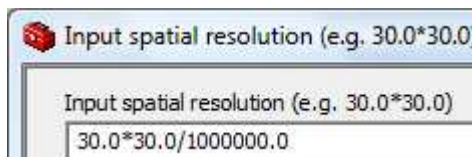


Abbildung 19: Umsetzung der Flächenberechnung im *ModelBuilder*. Hier gilt die angelsächsische Schreibweise mit „Punkt (, .“) statt Komma („ ,“) als Dezimaltrennzeichen.

Mit der Funktion „*Summary Statistics*“ wird die Summe aller Einzelflächen (von Gl. 14) berechnet und in eine *.dbf Tabelle geschrieben (Abb. 20). Somit erhält man die Gesamtfläche des Testgebiets in km².

Summary Statistics	
Input Table	
AreaField calculated	
Output Table	
D:\UNIGIS\Streuer_Analyse\aus_Topo-Karten\BayernM_BayernMapplus\data\with_distance\BayernMplusarea	
Statistics Field(s)	
Area	SUM

Abbildung 20: Die Funktion „*Summary Statistics*“. Zur Berechnung der Gesamtfläche des Testgebiets werden die Flächen der Einzelpolygone (Gl. 14) aufsummiert.

Mit der Gesamtfläche des Testgebiets und der Anzahl der PS (markierte Rasterzellen) kann die PS-Dichte (PS pro km²) berechnet werden (Gl. 9, S. 24).

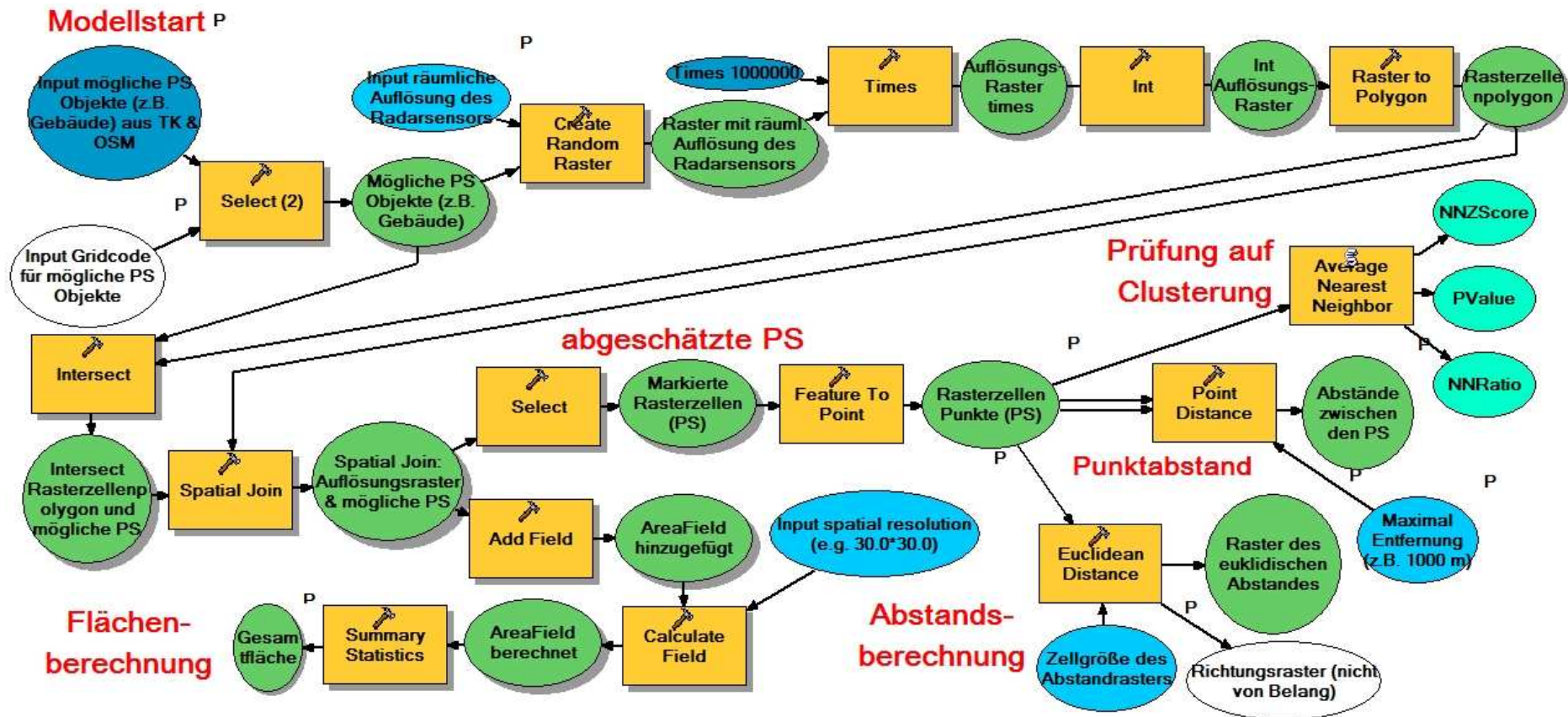


Abbildung 21: Modell zur PS-Abschätzung aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten, erstellt im *ModelBuilder* von ArcGIS. Die dunkelblauen Ellipsen sind Eingangsdaten, die hellblauen Ellipsen repräsentieren Variablen. In den gelben Rechtecken laufen die Berechnungen ab und die grünen Ellipsen stellen die Ergebnisse der Letzteren dar. Die cyan-farbenen Ellipsen sind die Ergebnisse der *Average Nearest Neighbor* Methode. Modellstart ist links oben (Input der möglichen PS-Objekte wie Gebäude). Ergebnisse des Modells sind die abgeschätzten PS, die Berechnung des Abstands zwischen den PS, die Überprüfung auf Clusterbildung der PS und die Berechnung der Gesamtfläche des Testgebiets.

4.2.2.2 Veranschaulichung des Programmdurchlaufs anhand eines Beispiels

In diesem Kapitel wird ein Beispiel-Programmdurchlauf der PS-Abschätzung aus topographischen Karten und OSM Daten mit Zwischenschritten und Ergebnissen für einen Ausschnitt des Testgebiets Aostatal dargestellt.

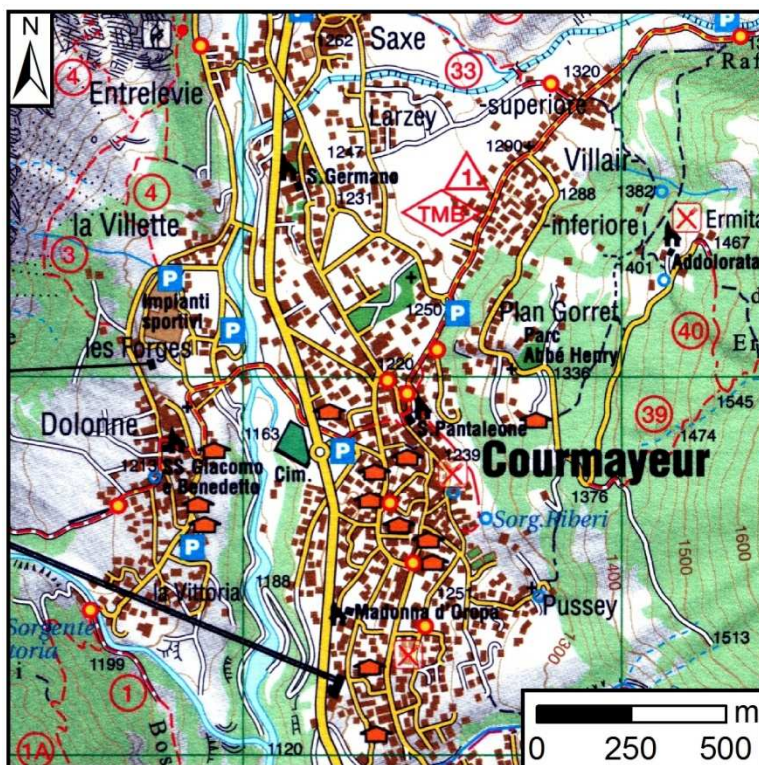


Abbildung 22 zeigt die originale topographische Karte von Courmayeur Blatt 1 (1:25.000). Der hier gezeigte Ausschnitt des Testgebiets Aostatal zeigt die Stadt Courmayeur. Die hellgrünen Bereiche repräsentieren Wald und weiße Flächen Wiesen. Interessant für die spätere PS-Abschätzung sind die braun gefärbten Gebäudeflächen.

Abbildung 22: Ausgangsdatensatz: Originale topographische Karte.

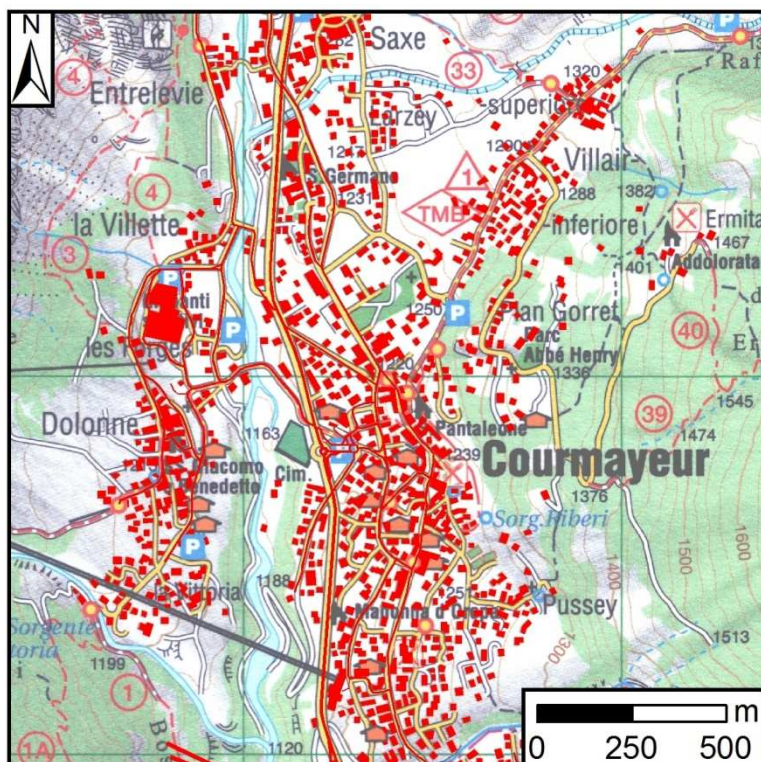


Abbildung 23: Manuelle Vorbereitung: Extraktion möglicher PS-Objekte.

In der Abbildung 23 ist das Ergebnis der Vorbereitung der topographischen Karte und der *OpenStreetMap* Daten dargestellt (vgl. 4.2.1). Die rotmarkierten Flächen stellen mögliche PS-Objekte wie Gebäude und Straßen (aus OSM Daten) dar. Diese werden aus der TK und den OSM Daten extrahiert und in ein neues *Shapefile* geschrieben.

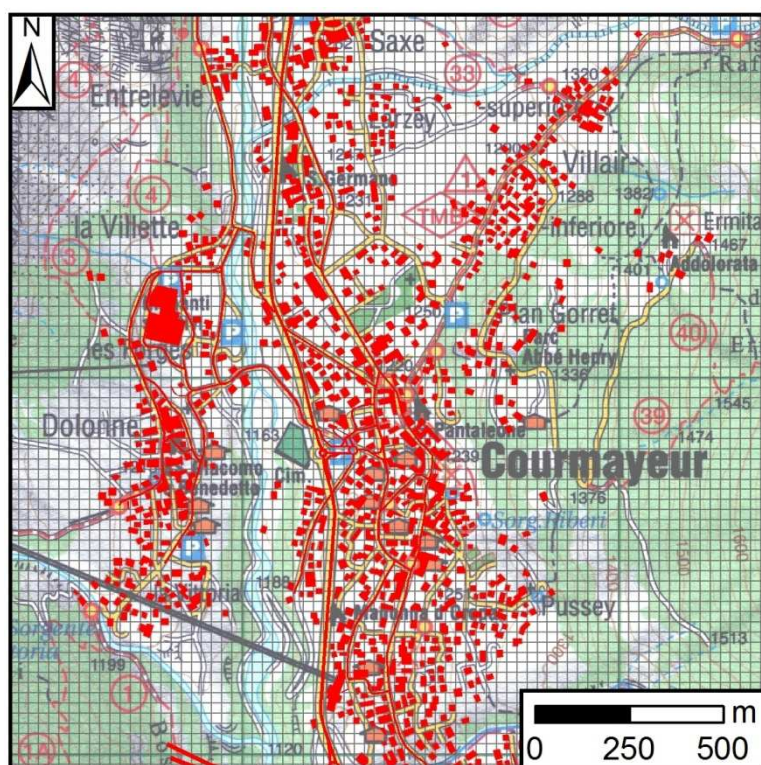


Abbildung 24: Programmdurchlauf Schritt 1: Raster (graues Gitter) mit räumlicher Auflösung des Radarsensors wird über Testgebiet gelegt.

Die Abbildung 24 zeigt den ersten Schritt des Programmdurchlaufs zur Abschätzung der PS. Über das gesamte Testgebiet wird ein Raster gelegt. Die Zellgröße dieses Rasters entspricht der räumlichen Auflösung des verwendeten Radarsensors. In diesem Beispiel werden Daten des kanadischen Satelliten Radarsat-1 verwendet. Die räumliche Auflösung beträgt deshalb 27 m (Tab. 5, S. 55).

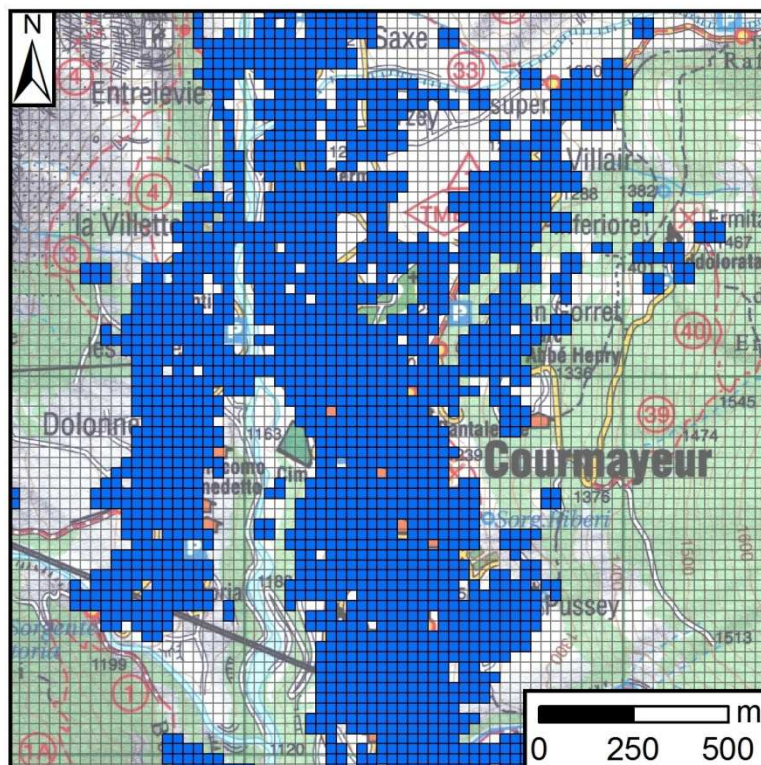


Abbildung 25: Schritt 2: die blaumarkierten Rasterzellen repräsentieren Zellen, die ein mögliches PS-Objekt schneiden.

In der Abbildung 25 ist der zweite Schritt des Programmdurchlaufs dargestellt. Die dunkelblau markierten Rasterzellen zeigen jene Rasterzellen, die ein mögliches PS-Objekt wie ein Gebäude oder eine Straße schneiden. Diese markierten Rasterzellen sind ein erstes Ergebnis des Modells: sie zeigen die abgeschätzten PS. Das heißt, in diesen Rasterzellen können PS erwartet werden.

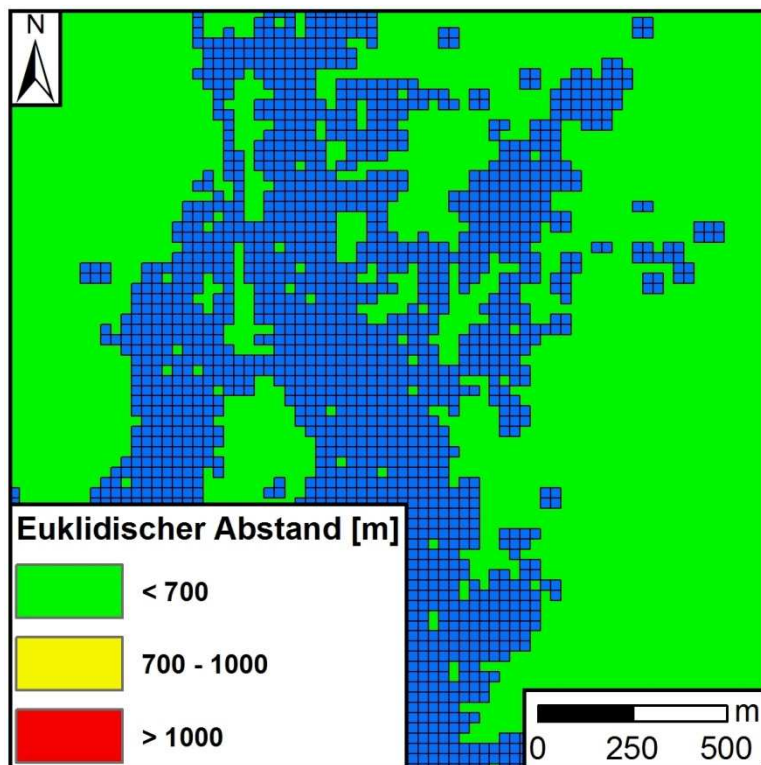


Abbildung 26: 3. Schritt: Berechnung des euklidischen Abstands.

Ein weiteres Ergebnis der PS-Abschätzung wird in Abbildung 26 gezeigt: der euklidische Abstand. Farblich markiert wird für jeden Pixel des Abstandrasters die Entfernung zum nächsten abgeschätzten PS dargestellt. So werden Pixel, die weniger als 700 m von einem PS entfernt sind, grün markiert. (Abstand 700 – 1000 m gelb; über 1000 m rot). Vergleiche auch 4.1.2 (S. 24).

Auf Grund des kleinen Bereichs des Kartenausschnitts sind hier keine Abstände größer als 700 m dargestellt. An dieser Stelle sei auf Abbildung 29 (S. 50) verwiesen.

In einem weiteren Schritt wird die *Nearest Neighbor Analysis* (NNA) mit dem ArcGIS Tool *Average Nearest Neighbor Distance* durchgeführt (Abb. 30; vgl. Kapitel 4.1.3, S. 24 ff.). Die NNA gibt Aussagen über die Art der Verteilung der abgeschätzten PS im Untersuchungsgebiet. Also, ob diese gleichmäßig über das ganze Testgebiet verteilt sind, oder ob die PS an bestimmten Orten konzentriert sind (Cluster).

5. Beschreibung der Ergebnisse der PS-Abschätzung

Die in Kapitel 4.2 (S. 27 ff.) beschriebene Methode zur Abschätzung der PS aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten wird für alle Testgebiete und vorhandenen TKs durchgeführt. Dabei werden für jede mögliche Kombination aus Testgebiet und vorhandener TK zwei Programmdurchläufe ausgeführt: beim ersten Mal werden die möglichen PS nur aus den topographischen Karten extrahiert und beim zweiten Mal werden zusätzlich OSM Daten verwendet. In der in Kapitel 6 (S. 53 ff.) beschriebenen Validierung der Ergebnisse wird untersucht, ob durch die zusätzliche Verwendung der OSM Daten die Ergebnisse verbessert werden können.

Beispielhaft für alle Testgebiete und möglichen Kombinationen mit vorhandenen topographischen Karten, werden hier die Ergebnisse des Testgebiets Oberbayern (ganzes Aufnahmegebiet) beschrieben. Die Ergebnisse der anderen Test- und Teilstestgebiete (Kairo, Budapest, Aostatal, Oberbayern Teil russische TK und Oberbayern Teil Bayern-Map plus) mit allen vorhandenen TKs sind im Anhang A (S. I ff.) dargestellt und beschrieben.

Die Abbildung 27 zeigt das Testgebiet Oberbayern mit verwendeter topographischer Karte von Bayern und den für die Validierung herangezogenen echten PS (s. Kapitel 6, S. 53 ff.). Man erkennt, dass sich die (echten) PS vor allem auf die dichten Siedlungsgebiete wie Augsburg im Nordwesten und München im Nordosten konzentrieren. Als PS-freie Flächen sind deutlich die beiden Seen Ammersee und Starnberger See (südwestlich von München) sichtbar, da es auf Wasserflächen keine PS gibt.

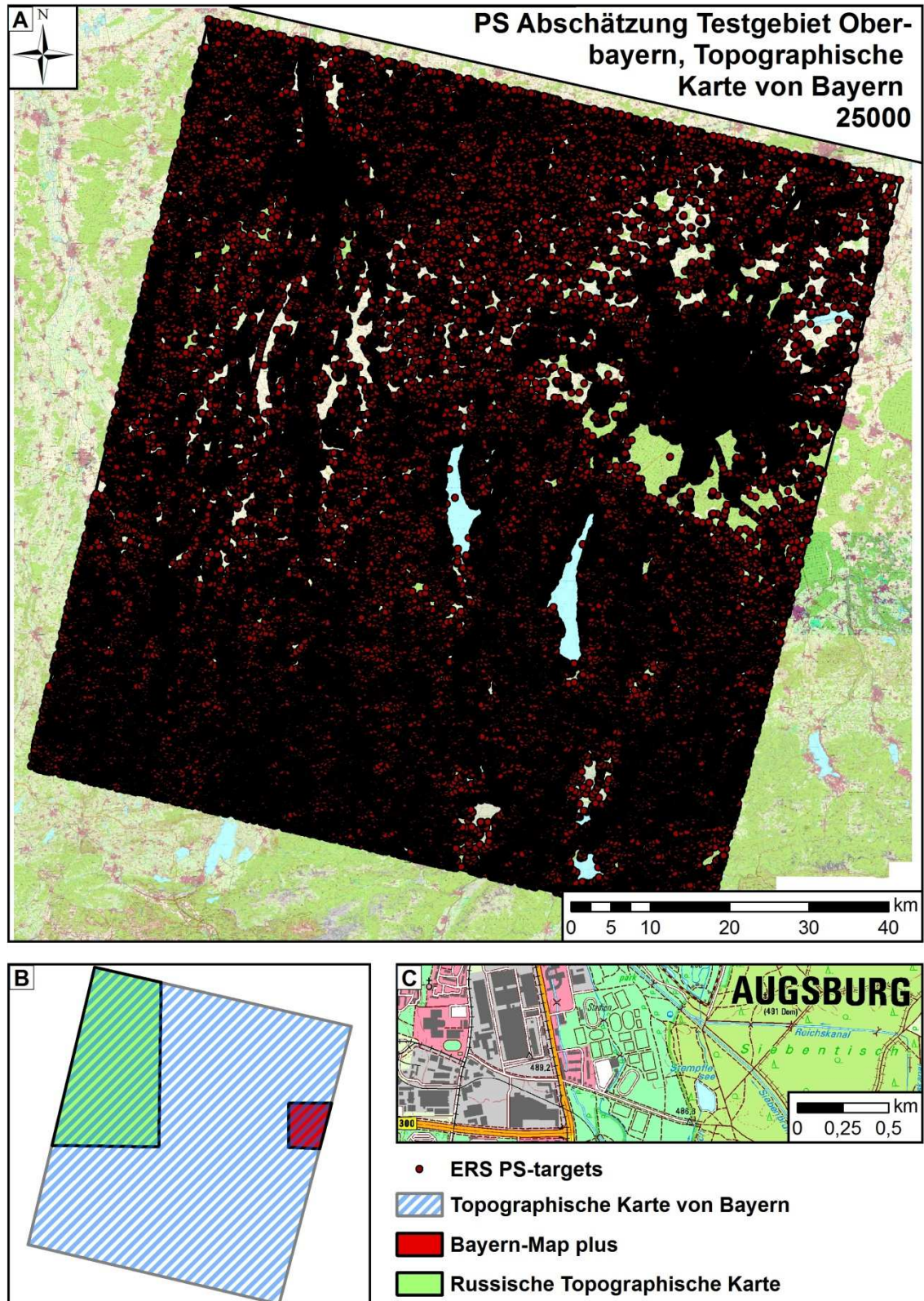


Abbildung 27: Testgebiet Oberbayern. Karte A: TK 25 von Bayern mit echten PS-Punkten (rote Punkte). Diese werden zur Validierung der PS-Abschätzung (Kapitel 6, S. 53 ff.) herangezogen. Die Karte B zeigt die Teilstestgebiete Bayern-Map plus und russische TK (vgl. Anhang A 4, S. XI ff.). Karte C zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der TK von Bayern bei Augsburg.

In Abbildung 29 sind die Ergebnisse der PS-Abschätzung dargestellt. Die linke Abbildung (Karte D) zeigt die PS-Abschätzung bei alleiniger Berücksichtigung der topographischen Karte von Bayern (nur Gebäude). Bei der rechten Abbildung (Karte E) werden zusätzlich noch die unter Kapitel 4.2.1.5 (S. 34) beschriebenen Straßen und Bahntrassen der *OpenStreetMap* Daten zur Extraktion der möglichen PS-Objekte herangezogen.

Bei alleiniger Verwendung der TK beschränken sich die abgeschätzten PS auf Siedlungsflächen (Städte und Dörfer). Deshalb treten mehr und größere Flächen auf, die den optimalen (gelb) oder sogar maximalen euklidischen Abstand (rot) zum nächstgelegenen PS überschreiten. In diesen Bereichen trifft die PS-InSAR Prozessierung an ihre Grenzen (vgl. Kapitel 4.2.1, S. 24). Die PS-Dichte wird nach Gleichung 9 (S. 24) berechnet (Gl. 9a).

$$PS_{Dichte} = \frac{\text{Anzahl der PS}}{\text{Fläche Testgebiet [km}^2\text{]}} = \frac{931503 \text{ PS}}{8602,05 \text{ km}^2} \approx 108 \frac{\text{PS}}{\text{km}^2} \quad (9a)$$

Bei zusätzlicher Verwendung der OSM Daten steigt die abgeschätzte PS-Dichte um ca. 62 % an (Gl. 9b), da nun auch Straßen und Bahntrassen berücksichtigt werden. Dadurch nehmen auch die Anzahl und die Größe der Einzelflächen der Bereiche, die den optimalen (oder sogar maximalen) PS-Abstand überschreiten, deutlich ab. Diese Bereiche sind nun überwiegend auf große Wasserflächen wie den Ammersee oder den Starnberger See (südwestlich von München) begrenzt.

$$PS_{Dichte} = \frac{\text{Anzahl der PS}}{\text{Fläche Testgebiet [km}^2\text{]}} = \frac{1512535 \text{ PS}}{8602,05 \text{ km}^2} \approx 176 \frac{\text{PS}}{\text{km}^2} \quad (9b)$$

Als zusätzliche, quantitative Ergänzung zur visuellen Interpretation des PS-Abstandes mit Hilfe des euklidischen Abstandrasters, wird eine Tabelle, die für jeden abgeschätzten PS den Abstand zu allen anderen PS angibt, erzeugt (Abb. 28).

OID	INPUT FID	NEAR FID	DISTANCE
0	235220	238258	849,588136
1	235220	238144	827,586853
2	235220	237597	678,82251
3	235220	237596	657,951366
4	235220	237595	512,640225
5	235220	237436	657,951366

Abbildung 28: Auszug aus der Abstandstabelle für Testgebiet Oberbayern. Die Tabelle gibt für jeden abgeschätzten PS (INPUT_FID) den Abstand zu allen anderen abgeschätzten PS (NEAR_FID) an.

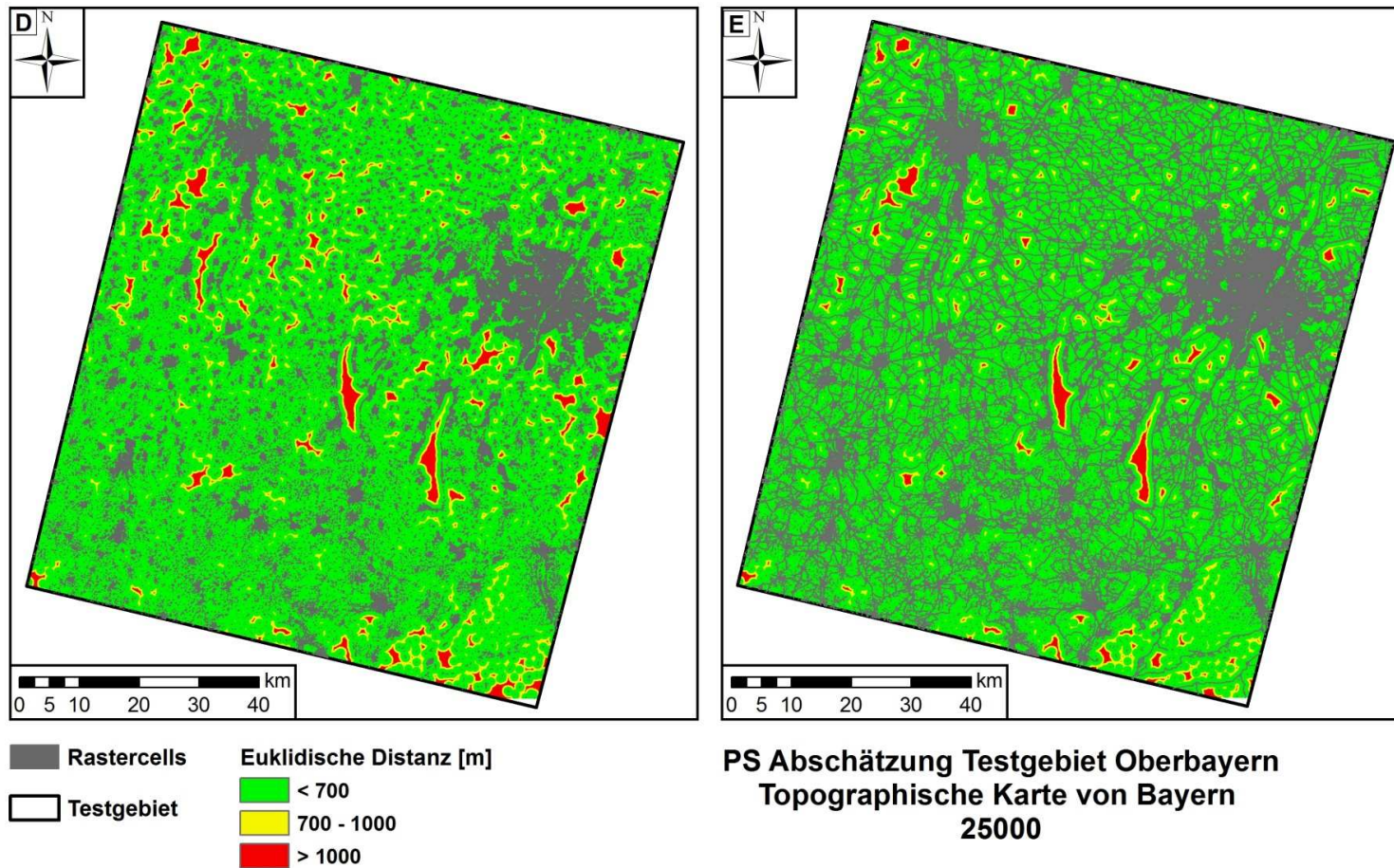


Abbildung 29: Ergebnisse der PS-Abschätzung für das Testgebiet Oberbayern. Karte D (links) zeigt die Ergebnisse bei alleiniger Berücksichtigung der topographischen Karte (nur Gebäude). Bei Karte E (rechts) werden zusätzlich OSM Daten berücksichtigt. Die grauen Bereiche sind die abgeschätzten PS (Rastercells). Die Städte Augsburg (NW) und München (NO) treten deutlich hervor. Farblich markiert ist der Abstand zum nächsten PS. Vor allem Ammersee und Starnberger See (SW von München) sind gut zu erkennen (rot; da im Wasser keine PS).

Das letzte Ergebnis der PS-Abschätzung aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten ist eine quantitative Analyse der Verteilung der abgeschätzten PS im Testgebiet. Diese ist als Zusatz zur reinen visuellen Analyse der Ergebniskarten gedacht. Es wird das *Average Nearest Neighbor Distance* Tool von ArcGIS verwendet. Das Ergebnis der NNA für das ganze Testgebiet Oberbayern deutet auf eine Clusterbildung der abgeschätzten PS hin (Abb. 30). Der obige Teil der Abbildung zeigt das Ergebnis der NNA bei alleiniger Berücksichtigung der topographischen Karte. Hier liegt das Verhältnis zwischen beobachteter (*observed*) zur erwarteter (*expected*) durchschnittlicher Distanz bei 0,64. Dieses Verhältnis entspricht dem Wert Q (vgl. Gl. 13, S. 25).

Der untere Teil der Abbildung 30 stellt das Ergebnis bei zusätzlicher Berücksichtigung der *OpenStreetMap* Daten dar. Der Wert für Q beträgt nun 0,8.

Wie in Kapitel 4.1.3 (S. 24 ff.) beschrieben, besteht bei $Q = 0$ eine maximale Clusterbildung und bei $Q = 1$ eine Zufallsverteilung. Mit einem Q von 0,8 ist die Clusterung für Fall 2 (inkl. OSM) folglich nicht so hoch wie bei Fall 1 (nur TK). Ursache hierfür ist, dass in Fall 1 nur Gebäude als mögliche PS-Objekte berücksichtigt werden und somit eine deutlichere Konzentration der abgeschätzten PS zustande kommt, als bei zusätzlicher Berücksichtigung der OSM Daten (Straßen und Bahntrassen).

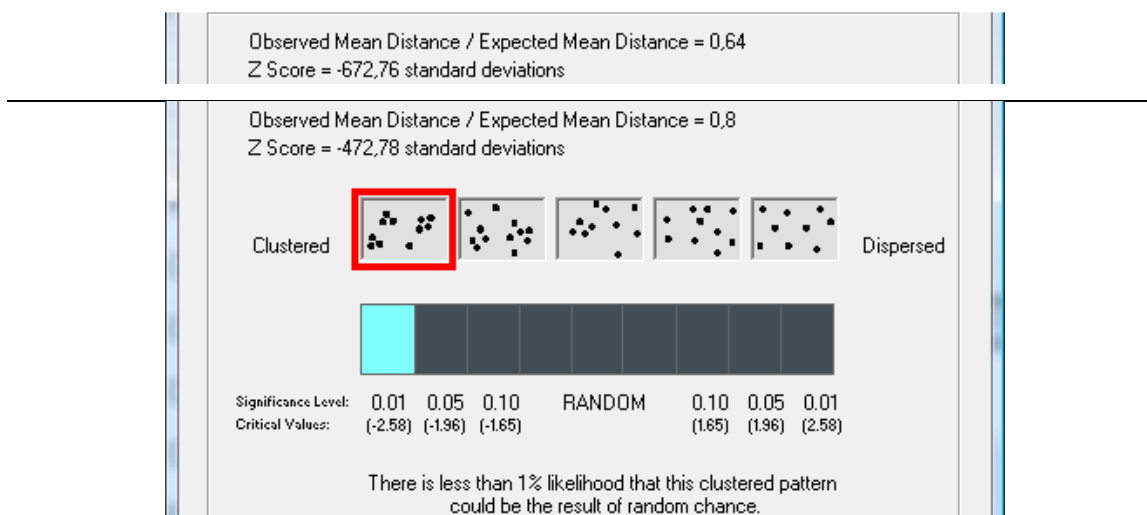


Abbildung 30: Ergebnis der *Average Nearest Neighbor Distance* Methode für das Testgebiet Oberbayern. Ausgangsdatensatz: topographische Karte von Bayern (1:25.000). Oben: alleinige Verwendung von TK. Unten: mit zusätzlicher Verwendung von OSM Daten. Die Analyse zeigt für beide Fälle eine sehr starke Clusterbildung an (Der Symbolteil ist für beide Fälle identisch).

Der Vollständigkeit halber sei noch auf den *Z Score* hingewiesen. Er wird in Standardabweichungen gemessen und erlaubt Aussagen über die statistische Signifikanz der Prüfung auf Clusterung. Der *Z Score* gibt an, ob die Null-Hypothese (= PS liegen als Zufallsverteilung vor) zurückgewiesen werden soll oder nicht. Der sogenannte *p-value* gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Null-Hypothese fälschlicherweise zurückgewiesen wird. Über die Standardnormalverteilung sind *Z Score* und *p-value* miteinander verbunden. Für alle Testgebiete und verwendeten topographischen Karten ist der *p-value* gleich „0“.

Sehr hohe Beträge für den *Z Score*, wie sie für alle hier durchgeführten Analysen auftreten, weisen zusammen mit dem *p-value* von „0“ darauf hin, dass die Wahrscheinlichkeit sehr niedrig ist, dass die empirischen Punktmuster (also die Verteilung der abgeschätzten PS) einer theoretischen Zufallsverteilung entsprechen (ESRI 2009b:o.S.).

Bei dem hier entwickelten Verfahren zur Abschätzung der PS aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten soll die NNA lediglich zur Unterstützung der visuellen Interpretation der PS-Verteilung im Untersuchungsgebiet genutzt werden. Zudem handelt es sich bei den abgeschätzten PS um Punktdaten ohne Attributwerte. Hier wird also keine „aufwendige“ geostatistische Analyse durchgeführt. Die Werte von *Z Score* und *p-value* sind folglich für die PS-Abschätzung nicht relevant.

6. Validierung der Ergebnisse

6.1 Validierungsmethode – „echte“ PS

Zur Validierung der in Kapitel 5 (S. 47 ff.) beschriebenen Ergebnisse der Abschätzung von PS aus topographischen Karten und OSM Daten werden „echte“ PS verwendet. Die echten PS sind Ergebnisse von Persistent Scatterer Radarinterferometrie Prozessierungen von Radardaten (vgl. Kapitel 3.6, S. 21 f.). Diese wurden von verschiedenen Institutionen wie dem DLR zur Verfügung gestellt (siehe auch Kapitel 1.5.2, S. 5 ff.).

Bei der Validierung wird überprüft, wie gut die abgeschätzten PS und die echten PS übereinstimmen. Abbildung 31 zeigt für den gleichen Kartenausschnitt wie der in Kapitel 4.2.2.2 (S. 43 ff.) beschriebene Beispielprogrammdurchlauf die abgeschätzten PS überlagert von den echten PS. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse von Radarsat-1 Daten (vgl. Tabelle 5, S. 55).

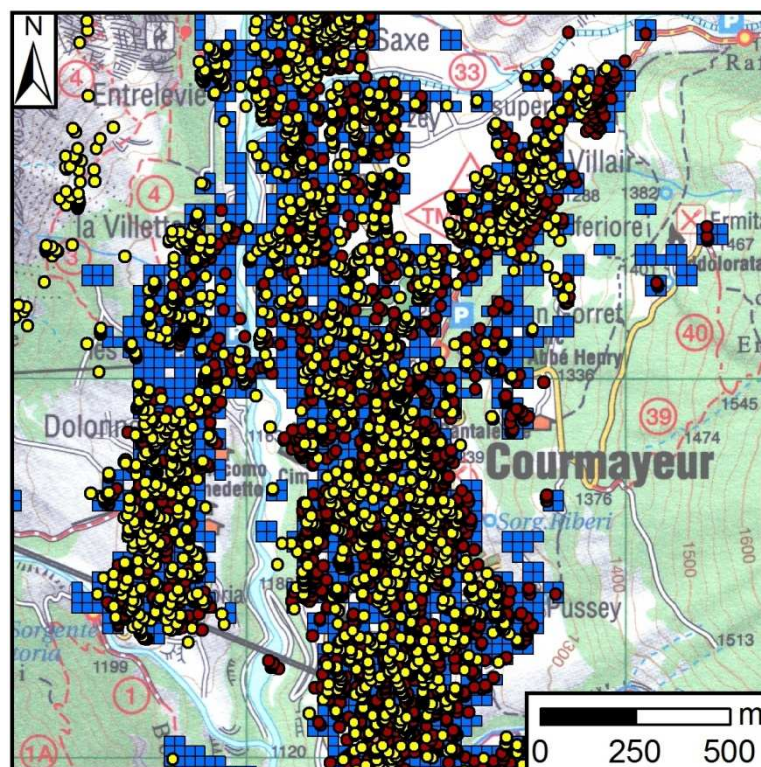


Abbildung 31: Validierung der abgeschätzten PS (blaue Quadrate) mit echten PS (gelbe Punkte: Ascending Orbit; rote Punkte: Descending Orbit). Gleicher Kartenausschnitt wie Beispielprogrammdurchlauf in Kapitel 4.2.2.2 (S. 43 ff.).

Bei der Validierung der PS-Abschätzung mit echten PS werden folgende Fragen beantwortet:

1. Wie viel Prozent der echten Persistent Scatterers werden von den abgeschätzten PS erfasst? Also, wie viel Prozent der echten PS liegen im Bereich der blauen Quadrate (vgl. Abbildung 31)?
2. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter Persistent Scatterer auch in der Realität ein PS ist? Also, wie groß ist der Prozentanteil von abgeschätzten PS, die mindestens einen echten PS beinhalten?

Mit den obigen Fragen werden zwei verschiedene Zielrichtungen verfolgt. Mit der ersten Frage wird die sogenannte „Trefferquote“ ermittelt, wie groß also der Prozentanteil der echten PS ist, die von der Abschätzung erfasst werden. Es wird folglich eine Art „Güte“ ermittelt, wie groß der Anteil der angenommenen möglichen PS-Objekte wie Gebäude, Straßen (hier Schallschutzwände, Randsteine, etc.) und Bahnlinien an den echten PS ist.

Die zweite Frage ist nicht als eigentliche Validierung gedacht, sondern soll einen Hinweis darauf geben, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein abgeschätzter PS auch in Wirklichkeit ein PS ist. Die Angabe dieser Wahrscheinlichkeit ist wichtig, wenn die Methode zur PS-Abschätzung für ein Testgebiet angewendet wird, für das der Nutzer noch über keine Radardaten verfügt. Die Wahrscheinlichkeit ist vor allem vom Maßstab der TK abhängig. Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 6.3 (S. 60 ff.) näher eingegangen.

6.2 Ergebnisse der Validierung

Bei der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Abschätzung der PS aus topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten wurde für jedes Testgebiet die entsprechende räumliche Auflösung der zur Validierung verfügbaren echten PS verwendet. Die Tabelle 5 (S. 55) zeigt die verwendeten Satelliten, Aufnahmemodi und räumlichen Auflösungen der Radardaten, die bei der PS-InSAR Prozessierung für die jeweiligen Testgebiete verwendet wurden.

Tabelle 5: Aufnahmemodi und räumliche Auflösung der verwendeten Radardaten

Testgebiet	Radarsatellit	Aufnahme- modus ³³	Durchschnittliche räumliche Auflösung am Erdboden [m]
Kairo	ENVISAT	Image (IM)	30
Budapest	TerraSAR-X	StripMap (SM)	3,3
Aostatal	RADARSAT-1	Standard (S 3)	27
Oberbayern	ERS-1 & 2	-	30

Abbildung 32 (S. 58) zeigt für alle Testgebiete das Ergebnis der ersten Validierungsfrage – „Wie viel Prozent der echten PS werden von der Abschätzmethode erfasst?“. Wie in Kapitel 5 (S. 47 ff.) beschrieben, wird die PS-Abschätzung für jedes Testgebiet und vorhandene topographische Karte einmal ohne und einmal mit zusätzlicher Berücksichtigung von *OpenStreetMap* Daten durchgeführt. Für Kairo sind keine OSM Daten vorhanden. Gemeinsam für alle Testgebiete ist, dass bei zusätzlicher Berücksichtigung der OSM Daten der Anteil der mit der Abschätzmethode erfassten PS leicht höher ist als ohne deren Berücksichtigung. Ursache hierfür ist, dass bei Verwendung der OSM Daten mehr PS bei der Abschätzung erzeugt werden als ohne OSM (da noch zusätzlich zu den Gebäuden auch Straßen und Bahntrassen als mögliche PS-Objekte berücksichtigt werden).

Für das Testgebiet Aostatal weisen alle Datensätze (Kombinationen aus: Ascending / Descending; TK 25 von Courmayeur / russische TK; nur PS / DS & PS) mit 73 bis 90 % sehr hohe Werte auf. Dies kann durch die großen Maßstäbe (1:25.000 und 1:50.000) der zur Abschätzung verwendeten topographischen Karten begründet werden. Beim Testgebiet Budapest sind die „Trefferquoten“ etwas niedriger als beim Testgebiet Aostatal.

Im Testgebiet Kairo unterscheiden sich die Werte für das „gesamte“ Testgebiet (Trefferquote: 32 – 34 %) deutlich von den Ergebnissen bei Ausschluss der Wüstenregionen (54 – 56 %). Die Stein- und Felswüsten im „gesamten“ Testgebiet Kairo weisen sehr gute Rückstreuungseigenschaften auf (hohe Kohärenz über lange Zeiträume). Deshalb finden sich hier viele PS (vgl. Kapitel 3.6, S 21 f.). Da die Wüstenregionen aber in der

³³ Nähere Informationen zu den einzelnen Aufnahmemodi der Satelliten sind in ESA (2011c:o.S., d:o.S.) und REINKE & WERNINGHAUS (2009:19f.) zu finden.

für das Testgebiet verfügbaren russischen topographischen Karte nicht als extra Klasse ausgeschieden sind, konnten diese als mögliche PS-Objekte nicht bei der PS-Abschätzung berücksichtigt werden (vgl. Anhang A 1, S. I ff.). Dadurch werden die echten PS der Stein- und Felswüste nicht erfasst und ergeben somit eine niedrige Trefferquote für das „gesamte“ Testgebiet Kairo.

Um den Einfluss der Wüsten zu eliminieren, wird für Kairo ein zweites Testgebiet erstellt, das die Wüstenregionen ausschließt (vgl. Abb. 3). In diesem Teilstestgebiet beschränken sich die echten PS vor allem auf Gebäude und Straßen. Deshalb wird hier eine deutlich höhere Trefferquote bei der PS-Abschätzung erreicht. Auf Grund des kleinen Maßstabs der russischen topographischen Karte (1:200.000) liegt der Wert der Trefferquote aber deutlich unter den Ergebnissen des Testgebiets Aostatal (siehe oben).

Für das Testgebiet Oberbayern sind zwei Gruppen zu erkennen: Für das Teilgebiet der Bayern-Map plus (Abb. 27) werden sowohl für die Bayern-Map plus als auch für die topographische Karte von Bayern (1:25.000) sehr hohe Trefferquoten erreicht (76 bis 89 %). Ursache hierfür ist die dichte Bebauung in diesem Teilgebiet (Anhang-Abb. 16, S. XVII). Die echten PS beschränken sich hier überwiegend auf bebauten Gebiet und damit stimmen die abgeschätzten PS sehr gut mit den echten PS überein.

Für das „gesamte“ Testgebiet Oberbayern ist die Trefferquote mit 32 bis 52 % deutlich niedriger als im Teilgebiet der Bayern-Map plus. Vor allem im südlichen Bereich des „gesamten“ Testgebiets dienen als „echte“ PS auch zum Beispiel einzelne Felsen, die eine optimale Orientierung aufweisen. Diese einzelnen Felsen sind in der topographischen Karte nicht gesondert ausgeschieden und können deshalb nicht bei der PS-Abschätzung als mögliche PS-Objekte extrahiert werden.

In Abbildung 33 (S. 59) sind die Ergebnisse der zweiten Validierungsfrage graphisch dargestellt. Grundsätzlich muss bei der zweiten Validierungsfrage bedacht werden, dass nicht jedes Gebäude und nicht jede Schallschutzwand einer Straße (etc.) auch in der Realität ein PS ist. Je nach Orientierung, Geometrie und Baumaterial des Gebäudes und je nach Überflugsrichtung (Ascending / Descending) und Blickwinkel (steil / flach) des Radarsatelliten kann ein Gebäude als PS dienen oder nicht (vgl. Abb. 9, S. 22). Diese stark vom Einzelfall abhängigen Faktoren können in der hier entwickelten PS-Abschätzung aus topographischen Karten und OSM Daten nicht berücksichtigt werden.

Deshalb wird hier die Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der ein abgeschätzter PS auch in Wirklichkeit ein PS ist.

Diese Wahrscheinlichkeit liegt zwischen fünf (Testgebiet Kairo) und 51 Prozent (Testgebiet Aostatal). Allgemein zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit bei zusätzlicher Berücksichtigung der OSM Daten um bis zu sieben Prozent niedriger ist als ohne OSM Daten (Ausnahme: russische TK im Testgebiet Oberbayern: hier sind beide Werte – ohne und mit OSM etwa gleich hoch). Ursache hierfür ist, dass bei alleiniger Berücksichtigung der topographischen Karte – ohne OSM Daten – weniger PS abgeschätzt werden. Damit sinkt auch die Zahl der „überschätzten“ PS.

Zusammengefasst hat die zusätzliche Verwendung von OSM Daten zur PS-Abschätzung den Vorteil, dass mehr potentielle PS-Objekte bei der Abschätzung berücksichtigt werden. Gleichzeitig bewirkt dieses „Mehr“ an möglichen PS-Objekten aber auch eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist.

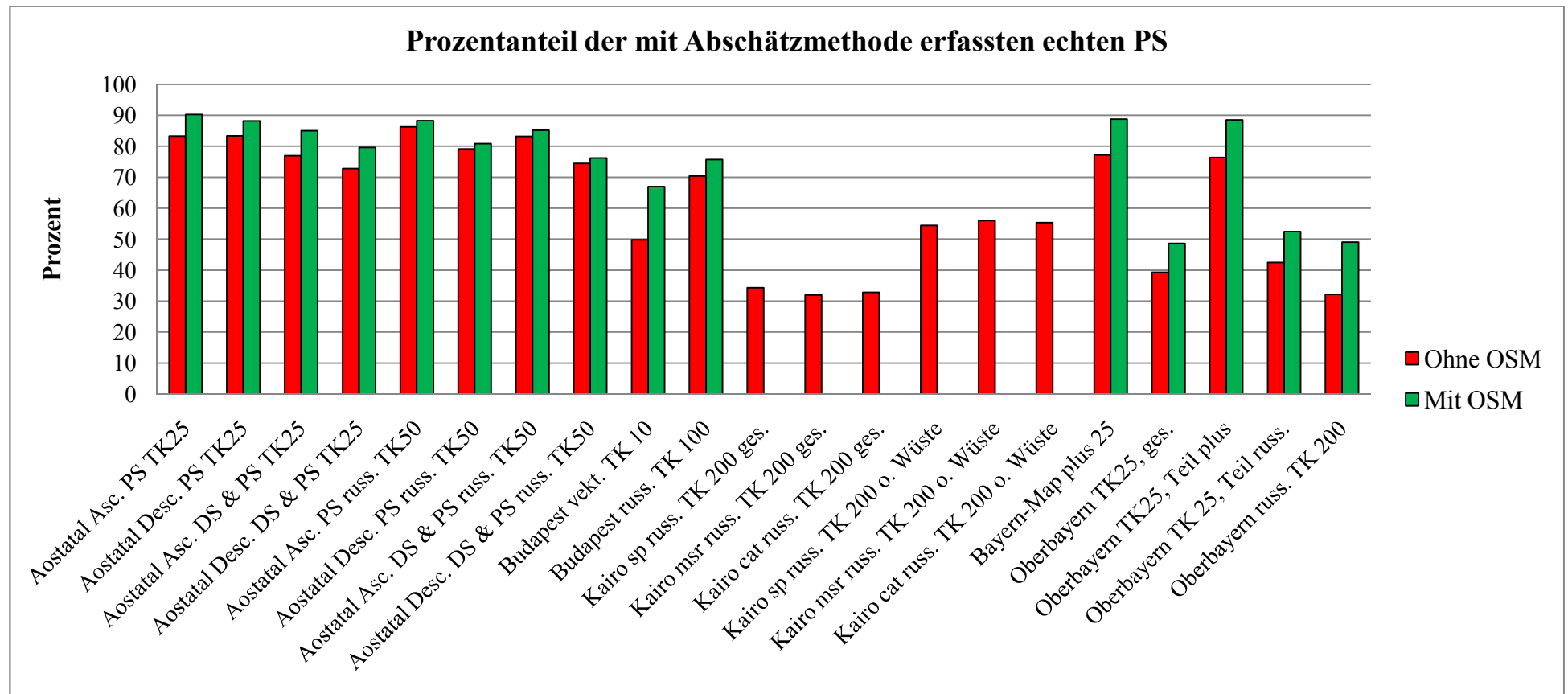


Abbildung 32: Prozentanteil der echten PS, die mit Abschätzmethode erfasst werden. Ergebnisse ohne (rot) und mit (grün) zusätzlicher Berücksichtigung von *OpenStreetMap* Daten (im Testgebiet Kairo nicht vorhanden). Von links nach rechts: Testgebiet Aostatal (Asc. = Ascending, Desc. = Descending Orbit; DS = distributed scatterers – vgl. Kapitel 1.5.2.3, S. 9; TK25: TK von Courmayeur; russ. TK: russische TK), Testgebiet Budapest (vekt. TK = vektorisierte TK), Kairo (sp, msr und cat vgl. 1.5.2.3, S. 8 f.; ges. = gesamtes Testgebiet; o. Wüste = Teilstestgebiet ohne Wüste), Oberbayern (ges. = gesamtes Testgebiet; Teil russ. = Teilstestgebiet der russischen TK; Teil plus = Teilgebiet der Bayern-Map plus).

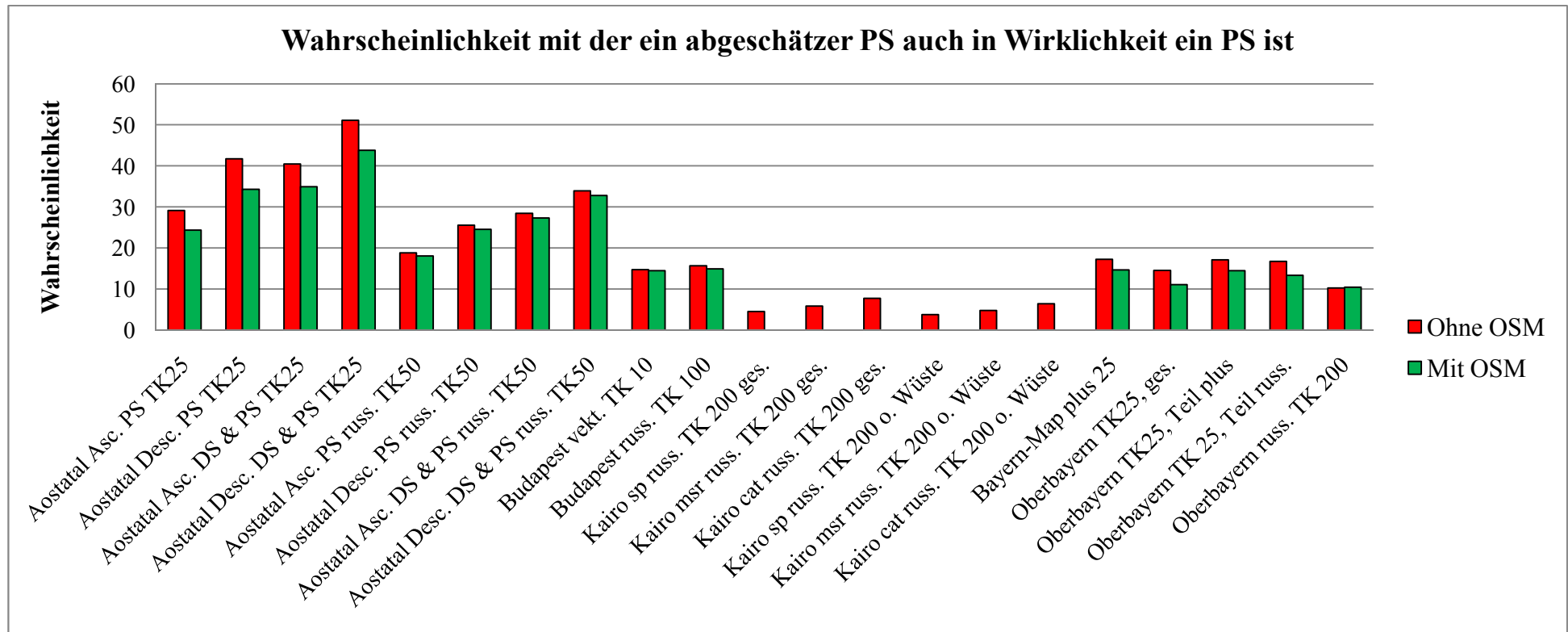


Abbildung 33: Wahrscheinlichkeit mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist. Ergebnisse ohne (rot) und mit (grün) zusätzlicher Berücksichtigung von *OpenStreetMap* Daten (im Testgebiet Kairo nicht vorhanden). Von links nach rechts: Testgebiet Aostatal (Asc. = Ascending, Desc. = Descending Orbit; DS = distributed scatterers – Kapitel 1.5.2.3, S. 9 TK25: TK von Courmayeur; russ. TK: russische TK), Testgebiet Budapest (vekt. TK = vektorisierte TK), Kairo (sp, msr und cat vgl. 1.5.2.3, S. 8 f.; ges. = gesamtes Testgebiet; o. Wüste = Teiltestgebiet ohne Wüste), Oberbayern (ges. = gesamtes Testgebiet; Teil russ. = Teiltestgebiet der russischen TK; Teil plus = Teilgebiet der Bayern-Map plus).

6.3 Einfluss des Kartenmaßstabs

Aus Abbildung 33 kann bereits die Annahme getroffen werden, dass die Ergebnisse der zweiten Validierungsfrage – „Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist?“ – vom Maßstab der verwendeten topographischen Karte abhängig ist. Der Einfluss des Kartenmaßstabs wird in diesem Kapitel untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist es, dem Nutzer der PS-Abschätzungsmethode für jeden Kartenmaßstab einen Wert für die oben angesprochene „Wahrscheinlichkeit“ zur Verfügung zu stellen, damit auch in einem neuen Testgebiet abgeschätzt werden kann, wie viel Prozent der abgeschätzten PS sich als reale PS erweisen werden.

Für jeden Kartenmaßstab wird der Mittelwert der Wahrscheinlichkeitswerte gebildet. In Abbildung 35 (S. 63) ist dieser zusammen mit dem Minimal- und Maximalwert für „alleinige Berücksichtigung der TK – ohne OSM“ und „mit zusätzlicher Berücksichtigung der OSM Daten“ dargestellt. Der generelle Trend zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist, mit zunehmendem Maßstab steigt. Besonders deutlich tritt dieser Zusammenhang hervor, wenn man zwei Karten mit unterschiedlichem Maßstab für ein und dasselbe Testgebiet vergleicht (z.B. Aostatal: TK 25 und russische TK 50; Abb. 33).

Eine Ausnahme bildet hier der Wert für den Maßstab 1:10.000 (vektorierte TK Testgebiet Budapest). Ursache hierfür ist die besondere Beschaffenheit des Testgebiets Budapest. Ein Blick auf die Karte des Gebiets zeigt, dass das gesamte Testgebiet aus dichter Bebauung besteht (Anhang-Abb. 5, S. VI). Deshalb ergibt die PS-Abschätzung hier eine sehr hohe Anzahl an möglichen PS. Dies wiederum bewirkt eine starke „Überschätzung“ der PS-Anzahl, die sich in einem niedrigen Wahrscheinlichkeitswert widerspiegelt. Auf Grund der kleinen Fläche des Testgebiets – ein größerer Datensatz war für diese Arbeit nicht verfügbar – und vor allem wegen seiner schon genannten dichten Bebauung stellt dieses Testgebiet eine Ausnahme dar. Für größere Testgebiete mit einer variablen Landbedeckung (also nicht ausschließlich Bebauung), kann grundsätzlich bei einem höheren Kartenmaßstab auch ein höherer Wahrscheinlichkeitswert erwartet werden. Die jeweiligen Werte (Mittel-, Minimal- und Maximalwert) für „ohne OSM“ und „mit OSM“ zeigen sehr ähnliche Verläufe. Tendenziell liegen die Werte von „mit OSM“ leicht unter denen von „ohne OSM“. Wie schon in Kapitel 6.2 (S. 54 ff.) beschrieben, werden bei zusätzlicher Berücksichtigung der OSM Daten mehr potentielle

PS-Objekte bei der PS-Abschätzung berücksichtigt. Dies führt wiederum zu einer stärkeren Überschätzung im Vergleich zu „ohne OSM“ (→ niedrigere Wahrscheinlichkeitswerte).

Die größte Streuung der Wahrscheinlichkeitswerte ist für den Maßstab 1:25.000 festzustellen. Karten dieses Maßstabs werden in den Testgebieten Oberbayern und Aostatal verwendet. In Abbildung 33 ist deutlich zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeitswerte für das Testgebiet Aostatal im Schnitt doppelt so groß sind wie im Testgebiet Oberbayern. Da angenommen werden kann, dass die (Lage-) Genauigkeit der im Testgebiet Oberbayern verwendeten Kartengrundlagen (v.a. TK von Bayern und Bayern-Map plus) die (Lage-) Genauigkeit der eingescannten und georeferenzierten Karte des Aostatals (vgl. Kapitel 4.2.1.2, S. 31) deutlich übertrifft, ist die Ursache für die niedrigen Wahrscheinlichkeitswerte im Testgebiet Oberbayern in einem anderen Grund zu suchen.

Vergleicht man die echten PS dieses Testgebiets mit der topographischen Karte von Bayern, erkennt man, dass die echten PS einen (unregelmäßigen) Versatz aufweisen. Abbildung 34 zeigt ein Beispiel: auf der Westseite des Sees befinden sich die echten PS fälschlicherweise „im Wasser“ (dort gibt es in der Realität keine PS). Auf der Ostseite des Sees liegen die PS dagegen zu weit im Osten (außerhalb bebauten Gebiets im Wald). Die zur Validierung verwendeten echten PS des Testgebietes Oberbayerns weisen also eine „fehlerhafte“ (bzw. nicht ausreichend genaue) Geokodierung auf. Für die Geokodierung dieser PS wurden digitale SRTM³⁴ Geländemodelle verwendet³⁵. Diese haben – je nach Region – eine räumliche Auflösung von ein (nicht überall verfügbar) bzw. drei Winkelsekunden. Eine Winkelsekunde entspricht einer Auflösung von 30 m am Äquator (drei Winkelsekunden entsprechen 90 m). Auf der geographischen Breite des Testgebiets Oberbayern sind das folglich ca. 20 bzw. 60 m. Diese relativ „grobe“ Auflösung des Geländemodells führt zu einer „ungenauen“ Geokodierung.

Durch diese „ungenau“ Geokodierung der echten PS wird das Ergebnis der Validierung der PS-Abschätzmethode verfälscht. Die Werte für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in Wirklichkeit ein PS ist, werden damit zu niedrig eingeschätzt. In Wahrheit dürften die Wahrscheinlichkeitswerte deutlich höher liegen.

³⁴ Shuttle Radar Topography Mission (NASA 2009:o.S.).

³⁵ Die ERS Daten wurden vom DLR prozessiert; Auskunft über zur Geokodierung verwendete Geländemodelle von Martin HUBER (2009:o.S.).

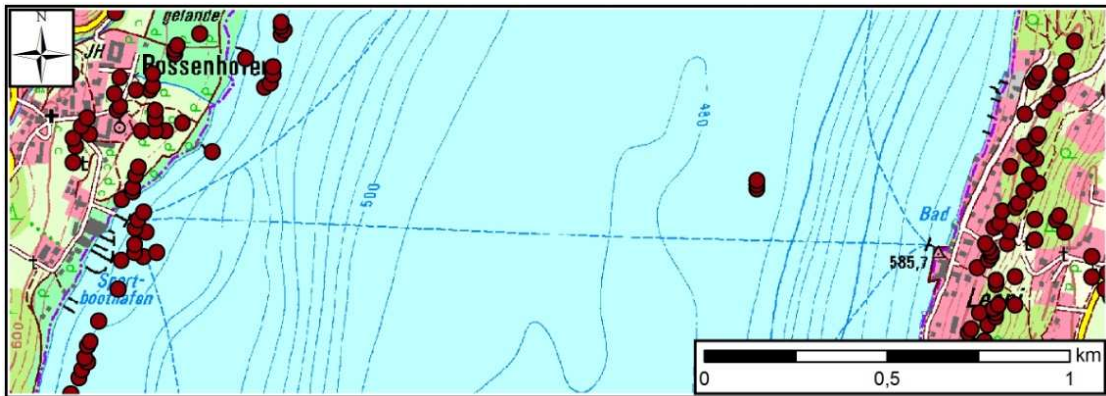


Abbildung 34: Starnberger See (Testgebiet Oberbayern). Die echten PS (rote Punkte) zeigen einen deutlichen Versatz im Vergleich zur TK von Bayern. So befinden sich die PS am Westufer zu weit im See (im Wasser gibt es keine PS), während die PS im Osten außerhalb des bebauten Gebiets liegen. Ursache ist die ungenaue Geokodierung der PS auf Grund von zu niedrig auflösenden Geländemodellen.

Generell gilt, dass mit der Persistent Scatterer Radarinterferometrie bei der Messung von Bewegungen (Deformationen) von Objekten relativ zu einem Referenzpunkt eine Genauigkeit im Millimeterbereich erreicht werden kann. Die absolute Positionierung (Geokodierung) der PS ist dagegen nur im Meterbereich möglich. Dies trifft vor allem bei Verwendung von Daten der relativ „alten“ ERS Satelliten (Start 1991 bzw. 1995, vgl. Tab. 1) zu. Mit moderneren Sensoren wie z.B. TerraSAR-X sind absolute Positionierungen im Zentimeterbereich möglich (EINER et al. 2011:661ff.).

Einen starken Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit bei der Geokodierung von PS hat die Qualität und Genauigkeit des verwendeten Geländemodells. Mit der bereits in Kapitel 3.1 (S. 14) angesprochenen Mission TanDEM-X wird zurzeit an der Erstellung eines globales DGMs mit einer Auflösung von zwölf Metern und einer vertikalen Genauigkeit von besser als zwei Meter gearbeitet (BARTUSCH et al. 2009:o.S.).

In Abbildung 33 ist für das Testgebiet Aostatal beim Descending Orbit eine höhere Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist, zu erkennen als beim Ascending Orbit. Diese Tatsache ist natürlich nicht allgemein gültig. Für diesen Einzelfall konnten mit der Blickrichtung des Descending Orbits mehr echte PS erzielt werden, womit auch der Wert für die Wahrscheinlichkeit ansteigt. Auch die höhere Wahrscheinlichkeit von DS (SqueeSAR, FERRETTI et al. 2011:1; vgl. 1.5.2.3, S. 9) & PS kann auf die größere Anzahl von echten PS (bzw. DS) zurückgeführt werden.

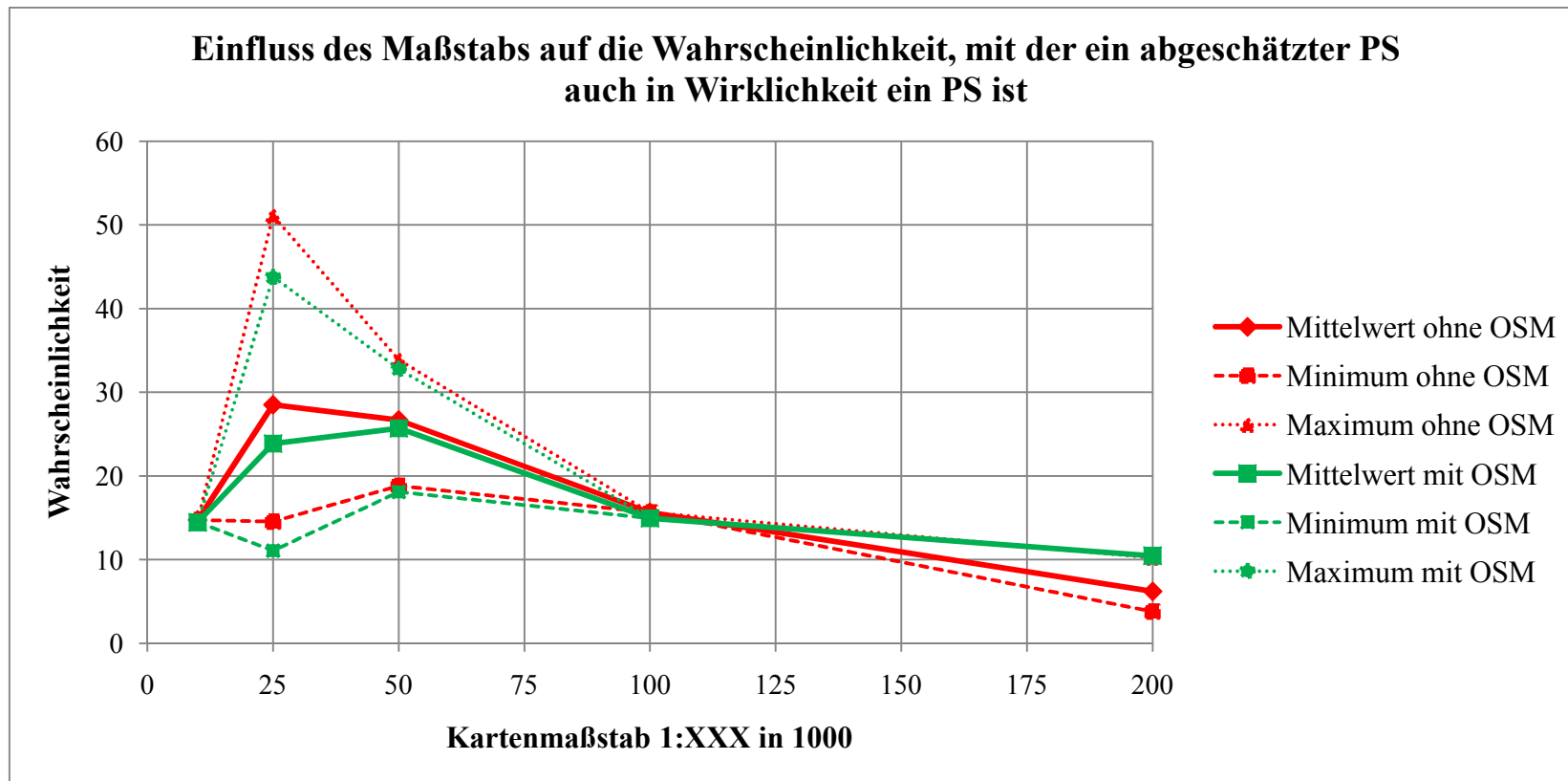


Abbildung 35: Einfluss des Kartenmaßstabs (angegeben in 1:XXX, in 1000er; z.B. „25“ = 1:25.000) auf die Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist. Man erkennt deutlich einen Anstieg der Wahrscheinlichkeit mit zunehmendem Maßstab (die vektorisierte TK von Budapest (1:10.000) stellt einen Ausreißer dar – siehe Beschreibung im Text). Die roten Linien zeigen die Ergebnisse ohne, und die grünen Linien die Ergebnisse mit zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten. Die dicke Linie repräsentiert jeweils den Mittelwert für die Wahrscheinlichkeitswerte der verschiedenen Testgebiete. Die strichlierte Linie gibt jeweils den Minimalwert und die punktierte Linie jeweils den Maximalwert an. Beim Maßstab 1:10.000 und 1:100.000 (Testgebiet Budapest) haben Mittelwert und Extrema den gleichen Wert, da hier nur ein Messwert existiert.

7. Kosten- / Nutzenanalyse der Eingangsdaten

In diesem Kapitel werden die verschiedenen topographischen Karten und die OSM Daten hinsichtlich der Verwendbarkeit für das hier entwickelte Verfahren zur PS-Abschätzung bewertet. Folgende Kriterien werden bei der Bewertung berücksichtigt: Verfügbarkeit der Daten, Kosten der Daten, Maßstab, mögliche Fehlerquellen und Aufwand für die Vorbereitung der Daten (Kapitel 4.2.1, S. 27 ff.). In Tabelle 6 sind die Ergebnisse dieser Bewertung für alle verwendeten Datensätze zusammengefasst.

Die russischen topographischen Karten sind je nach Region in unterschiedlichen Maßstäben verfügbar. Grundsätzlich sollte der größte verfügbare Maßstab für die PS-Abschätzung verwendet werden, da damit die höchste Genauigkeit erzielt werden kann. Wie schon in Kapitel 4.2.1.2 (S. 32 f.) beschrieben, ist der Aufwand der dort angewandten Vektorisierungsmethode bei großen Untersuchungsgebieten geringer als beim Digitalisieren (wie z.B. im Testgebiet Aostatal bei der TK 25 von Courmayeur angewandt).

Allgemein gilt, dass für die kostenfreien (russische TKs) bzw. kostengünstigen (z.B. Karten in Papierform) Datensätze erheblich mehr Aufwand bei der Vorbereitung der Daten getroffen werden muss (manueller Aufwand bedeutet höhere Arbeitskosten), als bei den teureren Datensätzen. Vektordaten wie die Bayern-Map plus oder die vektorisierte topographische Karte des Testgebiets Budapest haben den großen Vorteil, dass sie direkt (mit nur minimaler Vorarbeit – vereinen der relevanten Layer) in das Modell zur Abschätzung der PS eingesetzt werden können. Der große Nachteil dieser Datensätze sind jedoch ihre hohen Anschaffungskosten. Datensätze wie die digitale topographische Karte von Bayern (Rasterformat) sind hier ein guter Kompromiss, da nur ein geringer Aufwand bei der Datenvorbereitung betrieben werden muss und die Anschaffungskosten im Vergleich zu Vektordaten relativ niedrig sind.

Das größte Entwicklungspotential wird hier bei den *OpenStreetMap* Daten gesehen. Wenn deren Datendichte immer mehr ansteigt, also auch „normale“ Wohngebäude (nicht wie bis jetzt überwiegend nur Verwaltungsgebäude, Sehenswürdigkeiten, etc.) in den Datensatz mit aufgenommen werden, kann die PS-Abschätzung in Zukunft rein auf den OSM Daten basieren. Da die OSM Daten von der Community immer aktuell gehalten werden, würde ein kostenfreier Datensatz zur Verfügung stehen, der keinen großen Aufwand bei der Datenvorbereitung verlangt.

Tabelle 6: Bewertung der Verwendbarkeit der verschiedenen Eingangsdatensätze für die PS-Abschätzung

Kartentyp / Datensatz	Verfügbarkeit	Kosten ³⁶	Maßstab	Mögliche Fehlerquellen	Aufwand bei der Vorbereitung der Daten	Verwendbarkeit für Abschätzmethode
Russische topographische Karten	Weltweit (aber nicht überall in verwendbarem Maßstab)	Kostenfrei auf http://en.poejali.org/maps? beziehbar	Verwendbar in den Maßstäben 1:200.000, 1:100.000, 1:50.000 und größer ³⁷	Blattverzug beim Einscannen und ungenaue Georeferenzierung (vom Nutzer nicht beeinflussbar). Ungenaue Vektorisierung (bzw. Digitalisierung; vom Nutzer beeinflussbar)	Da die Karten in Form eines (farbigen) Scans vorliegen, sind aufwendige (manuelle) Bildbearbeitungsschritte notwendig (vgl. Kapitel 4.2.1.1, S. 27 ff.)	Auf Grund des hohen Aufwands bei der Vorbereitung nur bedingt verwendbar
Karten in Papierform (TK 25 Courmayeur)	(GPS-fähige) TKs in Papierform nahezu weltweit verfügbar	Gering (z.B. für die hier verwendete TK 13 €)	Hier: 1:25.000	Blattverzug beim Einscannen, ungenaue Georeferenzierung und Digitalisierung (bzw. Vektorisierung; vom Nutzer beeinflussbar)	Der manuelle Aufwand des Digitalisieren ist vor allem bei großen Flächen sehr hoch (vgl. Kapitel 4.2.1.2, S. 31 f.)	Auf Grund des hohen Aufwands bei der Vorbereitung nur bedingt verwendbar

³⁶ Die hier angegebenen Preise sind ohne Arbeitsplatzlizenzen und für kleine Flächen gültig (z.B. Bayern: < 500 km²). Bei größeren Flächen werden entsprechende Rabatte gewährt.

³⁷ Von einzelnen Gebieten sind Karten in noch größerem Maßstab verfügbar (v.a. große Städte).

Abschätzung von Persistent Scatterers mit digitalen topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten

Digitale topographische Karte von Bayern (Raster, DTK 25)	In Bayern (ähnliche Daten z.B.: restliches Deutschland, Teile der EU Staaten und USA)	1,- € pro km ² (ganz Bayern: 11.000,- €) (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION, 2011c:o.S.)	Hier: 1:25.000	„Übliche“ Fehlerquellen bei der Vermessung; nicht vom Nutzer beeinflussbar	Geringer Aufwand; von der Größe des Untersuchungsgebiets abhängig (vgl. Kapitel 4.2.1.3, S. 32 f.)	sehr gut verwendbar
Bayern-Map plus	Bayern	5,50 € pro km ² (ganz Bayern: 60.500,- €) (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION, 2011c:o.S.)	1:25.000	„Übliche“ Fehlerquellen bei der Vermessung; nicht vom Nutzer beeinflussbar	Vektordaten: können direkt in Modell verwendet werden; minimaler Aufwand (vgl. Kapitel 4.2.1.4, S. 34)	Praktisch sehr gut verwendbar (geringer Aufwand bei Vorbereitung), aber zu teuer im Vergleich zur digitalen Rasterkarte DTK 25 von Bayern
Vektorisierte topographische Karte Budapest	Ungarn	2000 HUF pro km ² (entspricht ca. 6,70 €/km ²) ³⁸ (GEOSHOP.HU 2011:o.S.)	1:10.000	„Übliche“ Fehlerquellen bei der Vermessung; nicht vom Nutzer beeinflussbar	Vektordaten: können direkt in Modell verwendet werden; minimaler Aufwand (vgl. Kapitel 4.2.1.4, S. 34)	Praktisch sehr gut verwendbar (geringer Aufwand bei Vorbereitung), aber zu teuer im Vergleich zu z.B. DTK 25 von Bayern

³⁸ HUF: Ungarische Forint: Wechselkurs am 21. Oktober 2011: 1 HUF = 0,0034 €.

<p>OpenStreetMap Daten</p>	<p>Weltweit, aber in sehr unterschiedlicher Datendichte; werden von Community immer aktuell gehalten</p>	<p>Kostenfrei auf z.B. http://download.geofabrik.de/osm beziehbar</p>	<p>-</p>	<p>Die Lagegenauigkeit variiert je nach Bearbeiter bzw. Datenquelle; z.B. stimmt die Lage teilweise nicht mit topographischen Karten überein; Auch sind nicht alle Straßen und Bahntrassen erfasst. Unterirdisch verlaufende Straßen und Bahntrassen, die nicht als solche gekennzeichnet sind – also nicht vorab ausgeschlossen werden können –, führen zu einer „Überschätzung“ der PS-Dichte.</p>	<p>Vektordaten: können direkt in Modell verwendet werden; geringer Aufwand (vgl. Kapitel 4.2.1.5, S. 34)</p>	<p>Sehr gut verwendbar; aber Genauigkeit und Datendichte variiert stark nach Region</p>
---------------------------------------	--	--	----------	--	--	---

8. Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden nach einer Beschreibung der Testgebiete (Kapitel 1.5.2, S. 5 ff.) die Grundlagen der Radarfernerkundung (Kapitel 3, S. 14 ff.) und insbesondere der Persistent Scatterer Radarinterferometrie (PS-InSAR; Kapitel 3.6, S. 21 f.) erläutert. Basierend auf diesen Grundlagen wurden die Theorie (Kapitel 4.1, S. 23 ff.) und die praktische Umsetzung (Kapitel 4.2, S. 27 ff.) des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur Abschätzung von Persistent Scatterers (PS) mit Hilfe topographischer Karten und *OpenStreetMap* Daten – vor einer erfolgten Radaraufnahme des Untersuchungsgebiets – dargestellt.

Neben der Abschätzung der PS und der damit bestimmbaren PS-Dichte eines Untersuchungsgebiets (Kapitel 4.1.1, S. 23) sind die Berechnung des PS-Abstands (bei Überschreitung eines gewissen Maximalabstandes stößt die PS-InSAR Prozessierung an ihre Grenzen; Kapitel 4.1.2, S. 24) und die Analyse der Verteilung der abgeschätzten PS mit der *Nearest Neighbor Analysis* (Kapitel 4.1.3, S. 24 ff.) wichtige Ergebnisse des hier entwickelten Verfahrens.

Um die Praxistauglichkeit dieses Verfahrens zu testen, wurde es in vier Testgebieten (mit z.T. mehreren Teilgebieten) mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen durchgeführt (Kapitel 5, S. 47 ff.; Anhang A, S. I ff.). Die PS-Abschätzung erfolgte dabei für jedes Testgebiet und dort verfügbare topographische Karte einmal ohne und einmal mit zusätzlicher Verwendung von *OpenStreetMap* Daten.

Anschließend wurden die Ergebnisse der PS-Abschätzung mit Hilfe echter PS-Datensätze validiert (Kapitel 6, S. 53 ff.). Hierbei wurde für alle Testgebiete und verfügbaren topographischen Karten (jeweils einmal ohne und einmal mit zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten) folgende Fragen untersucht:

- Wie viel Prozent der echten Persistent Scatterers werden von den abgeschätzten PS erfasst? („Trefferquote“)
- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgeschätzter Persistent Scatterer auch in der Realität ein PS ist?

Dabei zeigte sich, dass bei zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten eine leicht höhere „Trefferquote“ erreicht, also ein höherer Prozentanteil der echten PS durch die abgeschätzten PS erfasst wird. Umgekehrt verhält es sich bei der Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist (Kapitel 6.2, S. 54 ff.).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten außerdem deutlich, dass diese Wahrscheinlichkeit vom Maßstab der verwendeten topographischen Karte abhängig ist (Kapitel 6.3, S. 60 ff.). Durch die hier ermittelten Wahrscheinlichkeiten ist es möglich, bei neuen Untersuchungsgebieten – also Gebiete für die dem Nutzer noch keine Radardaten zur Verfügung stehen – bei der PS-Abschätzung die Wahrscheinlichkeit anzugeben, mit der ein abgeschätzter PS auch Wirklichkeit ein PS ist.

In Kapitel 7 (S. 64 ff.) wurde eine Kosten- / Nutzenanalyse der verwendeten topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten durchgeführt. Kostenfreie und kostengünstige Datensätze haben den Nachteil, dass hier ein deutlicher Mehraufwand bei der Datenvorbereitung (Kapitel 4.2.1, S. 27 ff.) getroffen werden muss. Deutlich genauere Daten wie die Bayern-Map Plus (Vektordaten) sind dagegen sofort in dem hier entwickelten Verfahren zur PS-Abschätzung einsetzbar, jedoch auch sehr teuer. Einen guten Kompromiss zwischen notwendigem Aufwand bei der Vorbereitung der Daten und den Anschaffungskosten bilden digitale Rasterdaten wie die digitale TK von Bayern.

8.2 Diskussion

Das hier entwickelte Verfahren zur Abschätzung von Persistent Scatterers – vor einer erfolgten Radaraufnahme – ist als eine Vorabevaluierung der Einsatzmöglichkeit des Persistent Scatterer Radarinterferometrie Verfahrens gedacht. Es soll als Hilfestellung vor der Bestellung der Radaraufnahmen dienen. Wie das Wort „Abschätzung“ bereits verdeutlicht, können hier „nur“ Hinweise auf mögliche Persistent Scatterers – mit der Angabe der Wahrscheinlichkeit, mit der ein abgeschätzter PS auch in der Realität ein PS ist – gegeben werden.

Die notwendige Berechnungszeit hängt stark von der Größe des Testgebiets und der räumlichen Auflösung des Radarsensors ab. So dauerte ein Modelldurchlauf zwischen

wenige Minuten (z.B. Testgebiet Aostatal) bis über 20 Stunden (Testgebiet Oberbayern)³⁹.

Die Auswahl der Testgebiete war an die Lokalitäten der verfügbaren Datensätze echter PS-Punkte gebunden. Demzufolge war auch die Auswahl der verfügbaren topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten eingeschränkt (Dies betrifft vor allem das Testgebiet Kairo).

Nichtsdestotrotz konnten für die restlichen drei Testgebiete je zwei bzw. drei verschiedene Arten von topographischen Karten mit verschiedenen Maßstäben bezogen bzw. erworben werden. Damit war es möglich, die hier entwickelte Methode zur Abschätzung der PS für verschiedene Datensätze zu testen und die Ergebnisse – vor allem in Abhängigkeit des Kartenmaßstabs – miteinander zu vergleichen.

Je nach Kartentyp müssen verschiedene Vorbereitungen der Daten vor der PS-Abschätzung ausgeführt werden (Kapitel 4.2.1, S. 27 ff.). Der Aufwand unterscheidet sich dabei je nach Kartentyp. Praxistauglich ist das hier entwickelte Verfahren selbstverständlich nur, wenn der Aufwand bei der Datenvorbereitung möglichst gering ist. Um eine Durchführung der PS-Abschätzung mit möglichst vielen Datensätzen zu ermöglichen, wurden alle für die Testgebiete verfügbaren topographischen Karten (und *OpenStreetMap* Daten) verwendet – trotz des teilweise sehr hohen Aufwandes bei der Vorbereitung.

8.3 Ausblick

Wie im Kapitel 7 (S. 64ff.) bereits erwähnt, wird bei den *OpenStreetMap* Daten in Zukunft eine immer höhere Datendichte erwartet. Der Erfassungsgrad der Straßen und Bahntrassen aber auch von Gebäuden wird sich immer weiter erhöhen. Wenn der Erfassungsgrad – v.a. der Gebäude – das Niveau von topographischen Karten erreicht, kann die PS-Abschätzung rein auf Grundlage von OSM Daten durchgeführt werden. Da es sich bei den OSM Daten um Vektordaten handelt und sie zudem frei verfügbar sind, würde somit ein kostenloser Datensatz mit sehr niedrigem Aufwand bei der Vorbereitung zur Verfügung stehen.

³⁹ Für diese Arbeit wurde ein Notebook mit folgenden Spezifikationen verwendet: Core2 Duo 2,00 GHz und 2 GB RAM.

Als mögliche Erweiterung wäre der Aufbau eines Web Processing Service denkbar, auf dem die hier entwickelte PS-Abschätzung online berechnet werden könnte. Dieser Web Processing Service könnte mit einer Datenbank, die eine Sammlung von frei verfügbaren topographischen Karten enthält und Verbindung zu einer *OpenStreetMap* Datenbank aufweist, verbunden werden.

9. Literaturverzeichnis

- ADAM, N. (2011): Wide Area Persistent Scatterer Interferometry: Algorithms and Examples. Vortrag beim FRINGE 2011 Workshop „Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry“ (2011-09-22 8:40 Uhr) Frascati, Italien: ESA ESRIN.
- ALBERTZ, J. & M. WIGGENHAGEN (2009)⁵: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Heidelberg: Wichmann.
- ASI (2011): COSMO-SkyMed.
<<http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-10-14)
- ASTRIUM (2011): Astrium GEO-Information Services. TerraSAR-X Services International Price List. <http://www.spotimage.com/automne_modules_files/standard/public/p336_68116df1869d05d444c116aa25ce198eitd-0508-cd-0001-tsx_international_pricelist_en_issue_03.pdf> (Stand: August 2011) (Zugriff: 2011-10-25)
- BAMLER, R. & P. HARTL (1998): Synthetic aperture radar interferometry. In: Inverse Problems 14, R1-R54.
- BAMLER, R. (2010): SAR Interferometry. Repeat-Pass and Differential InSAR (D-InSAR). Vortrag im Kurs „SAR Principles and Applications“, Carl Cranz Gesellschaft, Wessling, 15-19.11.2010 (unveröffentlicht).
- BARBIERI, M. & J. LICHTENEGGER (2005): Introduction to SAR for Geology.
In: FLETCHER, K. (Hrsg.): Space radar applications in Geology. An introduction to imaging radar, and application examples of ERS SAR in Geology and Geomorphology, ESA TM-17. Noordwijk: ESA Publications Division, 1-54.
- BARTUSCH, M., I. HAJNSEK, J. JANOTH, Ch. MARSCHNER, D. MILLER, A. MOREIRA, N. SPARWASSER, & M. ZINK (2009): TanDEM-X. Die Erde in drei Dimensionen. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2008): Datenbeschreibung Bayern-Map plus. <<http://www.vermessung.bayern.de/file/pdf/1511/Datenbeschreibung%20Bayern-Map%20plus.pdf>> (Stand: Dezember 2008) (Zugriff: 2011-05-03)
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2011a): Digitale Topographische Karte 1:25.000 - DTK25. <http://www.vermessung.bayern.de/geobasis_lvg/dtk/DTK25.html> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-04-10)
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2011b): Bayern-Map plus. http://www.vermessung.bayern.de/geobasis_lvg/BayernMapplus.html (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-10-10)

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2011c): Preisliste – Produkte und Dienste. <http://www.vermessung.bayern.de/file/pdf/1269/Preisliste_aktuell.pdf#page=3&view=Fit> (Stand: 2011-07-01) (Zugriff: 2011-10-21)
- CHEN, M. D. & A. GETIS (1998): Point Pattern Analysis. <<http://www.nku.edu/~longa/geomed/ppa/doc/html/ppa.html>> (Stand: 1998-05-12) (Zugriff: 2011-08-22)
- COLESANTI, C., A. FERRETTI, F. NOVALI, C. PRATI & F. ROCCA (2003a): SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41-7, 1685-1701.
- COLESANTI, C., A. FERRETTI, C. PRATI & F. ROCCA (2003b): Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. In: Engineering Geology 68, 3-14.
- CROSETTO, M., O. MONSERRAT, R. IGLESIAS & B. CRIPPA (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 76-9, 1061-1069.
- CSA (2011): Radarsat-1. <<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/>> (Stand: 2011-02-18) (Zugriff: 2011-08-13)
- DAITO, K., A. FERRETTI, S. KUZUOKA, F. NOVALI, P. PANZERI & F. ROCCA (2004): L-band PS analysis: JERS-1 results and TerraSAR-L predictions. Vortrag beim FRINGE 2003 Workshop, ESA/ESRIN Frascati, Italien, 1. – 5.12.2003. In: LACOSTE, H. (Hrsg.): ESA SP-550. CD-ROM. Noordwijk: ESA Publications Division.
- DAVIS, J. (2007): Soviet Military Topographic Mapping. <<http://sovietmaps.com/history>> (Stand: Februar 2007) (Zugriff: 2011-06-20)
- EINER, M., Ch. MINET, P. STEIGENBERGER, X. CONG & T. FRITZ (2011): Imaging Geodesy – Toward Centimeter Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49-2, 661-671.
- ESA (2011a): RADAR and SAR Glossary. <<http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.htm>> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-05-07)
- ESA (2011b): Ionia GlobCover. <<http://ionia1.esrin.esa.int/>> (Stand: 2011-02-17) (Zugriff: 2011-05-20)
- ESA (2011c): ERS. <<http://earth.esa.int/ers>> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-10-13)
- ESA (2011d): ENVISAT. <<http://envisat.esa.int/earth/www/area/index.cfm?fareaid=6>> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-10-13)

- ESRI (2009a): ArcGIS Desktop Help: How Average Nearest Neighbor Distance (Spatial Statistics) works. <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Average%20Nearest%20Neighbor%20Distance%20%28Spatial%20Statistics%29%20works>> (Stand: 2009-01-28) (Zugriff: 2011-08-29)
- ESRI (2009b): ArcGIS Desktop 9.3 Help. What is a Z score What is a p-value. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=What_is_a_Z_score_What_is_a_p-value> (Stand: 2009-04-24) (Zugriff: 2011-08-29)
- ESRI (2011): ArcGIS Online: Map Services 2011. <<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisonline/index.html>> (Stand: 2011) (Zugriff: 2011-09-02)
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2010): Corine Land Cover 2006. <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster>> (Stand: Februar 2010) (Zugriff: 2011-06-12)
- FABISCH, M. (2009): Wahlpflichtfach GIS – Übung IV. <<http://cpemartinfabisch.blogspot.com/>> (Stand: 2009-07-07) (Zugriff: 2011-05-04)
- FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (1999): Permanent scatterers in SAR interferometry. Vortrag beim International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 28. Juni - 2. Juli 1999, 1-3.
- FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (2000): Analysis of Permanent Scatterers in SAR Interferometry. Vortrag beim Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, 24. – 28.07.2000. In: IGARSS 2000. IEEE 2000 International 2, 761-763.
- FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39-1, 8-20.
- FERRETTI, A., D. MASSONNET, A. MONTI-GUARNIERI, C. PRATI & F. ROCCA (2007): Guidelines for SAR Interferometry – Processing and Interpretation. – In: FLETCHER, K. (Hrsg.): InSAR Principles, ESA TM-19. Noordwijk: ESA Publications Division, 1-225.
- FERRETTI (2010): Differential SAR Interferometry: concept, applications and challenges in surface deformation monitoring. Vortrag im Kurs „SAR Principles and Applications“, Carl Cranz Gesellschaft, Wessling, 15-19.11.2010 (unveröffentlicht).
- FERRETTI, A., A. FUMAGALLI, F. NOVALI, C. PRATI, F. ROCCA & A. RUCCI (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 99, 1-11.
- FRANCESCHETTI, G. & R. LANARI (1999): Synthetic aperture radar processing. Boca Raton: CRC Press.

- GABRIEL, K., R. M. GOLDSTEIN & H. A. ZEBKER (1989): Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. In: *Journal of Geophysical Research* 94-B7, 9183-9191.
- GEOSHOP.HU (2011): Prices. Topographical Maps (vectorised).
<<http://www.geoshop.hu/index.php?module=StaticPage&pageid=43>>
(Stand: 2011-09-08) (Zugriff: 2011-10-21)
- GUPTA, R. P. (2003)²: *Remote Sensing Geology*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- HUBER, M. (2009): Zur Geokodierung verwendete Geländemodelle des DLR. Schriftliche Mitteilung (2009-06-30).
- KAMPES, B. M. (2006): *Radar interferometry – Persistent Scatterer Technique*. Dordrecht: Springer-Verlag.
- KIRCHNER, M. (2005): Analyse flächenhafter Senkungserscheinungen in sedimentären Gebieten mit den neuen Techniken der Radarfernerkundung. In: *Forschungsbericht DLR, 2005-01*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- KOCH, A. (2011): Modul Geostatistik. Lektion 8: Point Pattern Analysis. Universitätslehrgang „Geographical Information Science & Systems“. Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS), Universität Salzburg (unveröffentlicht).
- LAUKNES, T. R., S. A. PIYUSH, J. F. DEHLS, H. A. ZEBKER, I. H. C. HENDERSON & Y. LARSEN (2010): Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. In: *Remote Sensing of Environment* 114-9, 2097-2109.
- LEI, L., Y. ZHOU, J. Li & R. BÜRGMANN (2010): Monitoring slow moving landslides in the Berkeley Hills with TerraSAR-X data. Vortrag beim Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, 25. – 30.07.2010. In: *IGARSS 2010. IEEE 2000 International*, 230-232.
- L'ESCURSIONISTA (Hrsg.) (2009): Blatt 1. Monte Bianco – Courmayeur. 1:25.000. Rimini: L'Escursionista.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (2000)⁴: *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, Chichester, etc.: John Wiley & Sons.
- LÖFFLER, E., U. HONECKER & E. STABEL (2005): *Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten*. Berlin: Borntraeger.

- Lu, Z. (2007): InSAR Imaging of Volcanic Deformation over Cloud-prone Areas – Aleutian Islands. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 245-257. <http://www.asprs.org/publications/pers/2007journal/march/2007_mar_245-257.pdf> (Stand: März 2007) (Zugriff: 2009-04-04)
- MASSONNET, D. & K. L. FEIGL (1995): Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. In: Geophysical Research Letters 22-12, 1537-1540.
- NASA (2009): Shuttle Radar Topography Mission. <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> (Stand: 2009-06-17) (Zugriff: 2011-10-16)
- NASA (2011a): Landsat 7. <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. (Stand: 2011-03-23) (Zugriff: 2011-04-22)
- NASA (2011b): ASTER. <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>> (Stand: 2011-05-19) (Zugriff: 2011-06-04)
- OLEARY, E., A. RICHARDSON, B. CHAPMAN & A. WONG (1998): SEASAT 1978. JPL NASA. <<http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/seasat.html>> (Stand: 1998-02-10) (Zugriff: 2011-10-13)
- OPENSTREETMAP WIKI (2008): OpenStreetMap Wiki. Road types. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/User:Gyrbo/Road_types> (Stand: 2008-02-18) (Zugriff: 2011-10-04)
- OPENSTREETMAP WIKI (2011): OpenStreetMap Wiki. Railway. <<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:railway>> (Stand: 2011-04-22) (Zugriff: 2011-10-04)
- PANITZKI, M. (2010): Koordinatensysteme in topographischen Karten. <<http://www.gs-enduro.de/html/navigation/karte.htm#2.2.1.2.>> (Stand: 2010) (Zugriff: 2011-06-20)
- PLANK, S., J. SINGER & K. THURO (2011): Estimation of the Persistent Scatterer density using optical remote sensing data and land cover data. Präsentation beim FRINGE 2011 Workshop, ESA/ESRIN Frascati, Italien, 19. – 23.09.2011. In: LACOSTE, H. (Hrsg.): ESA SP-697. CD-ROM. Noordwijk: ESA Publications Division (in Druck).
- REINKE N. & R. WERNINGHAUS (Hrsg.) (2009): TerraSAR-X. Das deutsche Radar-Auge im All. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- SÖRGEL, U. (2006): Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover 263, 295-302.
- TSERKEZIS, J. (2007): Ozi map tfw. <<http://sci.tech-archive.net/Archive/sci.geo.satellite-nav/2007-06/msg00029.html>> (Stand: 2007-06-02) (Zugriff: 2011-05-04)

UNITED STATES OF AMERICA WAR OFFICE (1958): Soviet topographic map symbols. Department of the army technical manual, TM 30-548. Washington: U.S. Government printing office.

VASILIEV, I. R. (1996): Visualization and Spatial Autocorrelation. In: ARLINGHAUS, S. L. (Hrsg.): Practical Handbook of Spatial Statistics. Boca Raton: CRC Press. 17-30.

WIKIPEDIA (2011a): Richtlinie für die Anlage von Straßen - Querschnitt. <http://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_f%C3%BCr_die_Anlage_von_Stra%C3%9Fen_%E2%80%93_Querschnitt> (Stand: 2011-04-26) (Zugriff: 2011-10-04)

WIKIPEDIA (2011b): Normalspur. <<http://de.wikipedia.org/wiki/Normalspur>> (Stand: 2011-09-28) (Zugriff: 2011-10-04)

WIKIPEDIA (2011c): Liste der Spurweiten. <http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Spurweiten> (Stand: 2011-09-14) (Zugriff: 2011-10-04)

Anhang

Anhang A: Ergebnisse der PS-Abschätzung für die restlichen Testgebiete

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der PS-Abschätzung für die restlichen, nicht in Kapitel 5 (S. 47 ff.) dargestellten Testgebiete beschrieben.

A1: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Kairo

Anhang-Abbildung 2 (Karte A) zeigt die russische topographische Karte (1:200.000) für das Testgebiet Kairo und das Teilgebiet ohne Wüstenbereiche (= „ohne Wüste“) mit den zur Validierung der PS-Abschätzung verwendeten echten PS (Datensatz cat; vgl. Kapitel 1.5.2.1, S. 5 f.; räumliche Auflösung 30 m, vgl. Tab. 5, S. 55). Wie bereits im vorher genannten Kapitel beschrieben, sind für das Testgebiet Kairo keine *OpenStreetMap* Daten verfügbar. Deshalb wird die PS-Abschätzung hier nur auf Basis der russischen TK durchgeführt (Karte B, Anhang-Abb. 2). Man erkennt, dass sich die abgeschätzten PS vor allem auf das Stadtgebiet von Kairo und größere Straßen beschränken. Im Nildelta (nordwestlicher Bereich des Testgebiets, vgl. auch Abb. 3, S. 6) sind weitere abgeschätzte PS im Bereich kleinerer Siedlungen zu finden. Auf Grund des kleinen Kartenmaßstabs der hier verwendeten russischen TK (1:200.000) werden die großen Straßen wie Autobahnen stark vergrößert (zu breit) in der Karte dargestellt. Dies führt zu einer Überschätzung der PS in diesen Bereichen, da die Straßen in der Realität wesentlich schmaler sind.

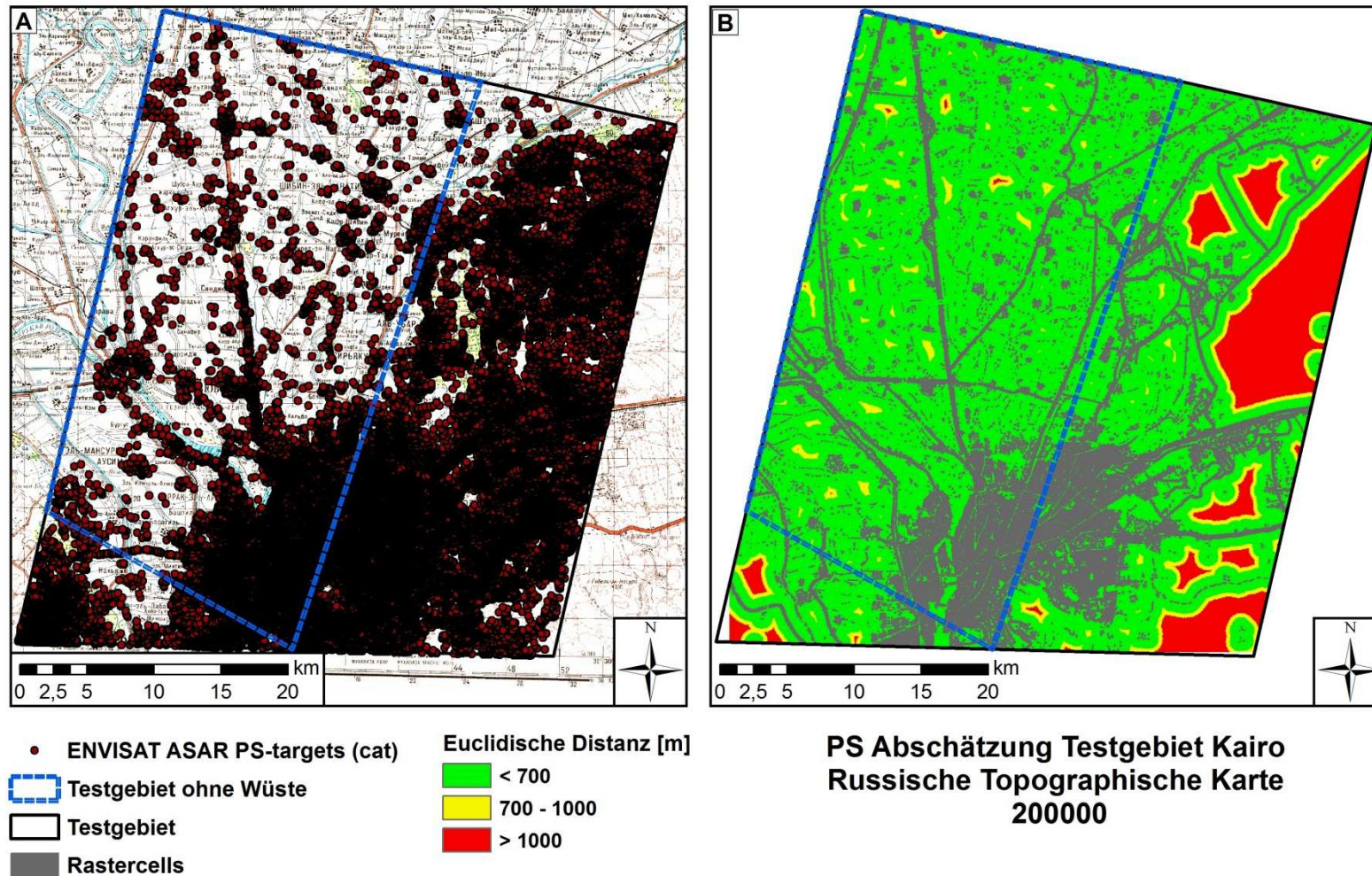
Ein visueller Vergleich von abgeschätzten PS (Karte B, Anhang-Abb. 2) und echten PS (Karte A) zeigt eine starke Diskrepanz im Bereich der Wüstenregionen des Testgebiets (vgl. hierzu auch Abb. 3, S. 6). Die Stein- und Felswüsten des Testgebiets Kairo weisen sehr gute Rückstreuungseigenschaften (hohe Kohärenz über lange Zeiträume) auf. Deshalb finden sich hier viele PS. Da aber aus den hier vorliegenden russischen TK die Wüstenbereiche nicht extrahiert werden konnten (keine gesonderte Klassifizierung in der Legende), zeigt das Ergebnis der PS-Abschätzung hier eine starke Unterschätzung der PS. Deshalb wurde hier die PS-Abschätzung nochmals gesondert für ein Teilgebiet ohne Wüstenbereiche (= „ohne Wüste“) durchgeführt. Abbildung 32 (S. 58) zeigt, dass in diesem Teilgebiet eine wesentlich höhere „Trefferquote“ bei der Abschätzung erreicht wird als bei Berücksichtigung des gesamten Testgebiets.

Für das gesamte Testgebiet ergibt sich eine abgeschätzte PS-Dichte von ca. 189 PS/km², für das Teiltestgebiet „ohne Wüste“ eine nahezu identische Dichte von 183 PS/km².

Anhang-Abbildung 1 zeigt das Ergebnis für die Überprüfung der Verteilung der abgeschätzten PS im Untersuchungsgebiet. Wie auch bereits visuell aus der Karte B (Anhang-Abb. 2) erkennbar ist, zeigen die abgeschätzten PS mit einem Wert für $Q < 1$ eine deutliche Clusterung (v.a. im Stadtgebiet von Kairo). Für beide Testgebiete (gesamtes Testgebiet und Teilgebiet „ohne Wüste“) ist der Wert für Q nahezu identisch.



Anhang-Abb. 1: *Nearest Neighbor Analysis* für das Testgebiet Kairo. Oben: für gesamtes Testgebiet; Unten: Teilgebiet „ohne Wüste“ (vgl. auch Anhang-Abb. 2).



Anhang-Abb. 2: Testgebiet Kairo: Karte A (links): russische topographische Karte (1:200.000) mit echten PS-Punkten. Das Teiltestgebiet „ohne Wüste“ ist blau markiert. Karte B (rechts): Ergebnis der PS-Abschätzung. Die grauen Bereiche sind die abgeschätzten PS (= Rastercells), sie konzentrieren sich v.a. auf die Stadt Kairo und die größeren Straßen.

A2: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Budapest

Anhang-Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der PS-Abschätzung für das Testgebiet Budapest. Die PS-Abschätzung (räumliche Auflösung 3,3 m, vgl. Tab. 5, S. 55) erfolgt hier für zwei Datensätze an topographischen Karten: erstens eine russische topographische Karte (1:100.000; Karten A bis D) und zweitens eine vektorisierte TK (1:10.000; Karten E bis H) (vgl. auch Kapitel 1.5.2.2, S. 7). Für beide Datensätze an TKs wird die PS-Abschätzung je einmal nur mit der TK (Karten C und G) und ein weiteres Mal mit zusätzlicher Berücksichtigung von *OpenStreetMap* Daten (Karten D und H) durchgeführt. Generell werden bei zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten höhere abgeschätzte PS-Dichten erreicht als bei „ohne OSM“, da mit der Verwendung von OSM Daten mehr potentielle PS zur Verfügung stehen (Tab. 7). Auf Grund des 10-mal größeren Maßstabs zeigt die vektorisierte TK eine deutlich höhere Detailgenauigkeit als die russische TK. Durch die stärkere Generalisierung der russischen TK werden hier mehr PS abgeschätzt als bei der vektorisierten TK. Damit ergibt sich auch für die russische TK eine höhere Dichte an abgeschätzten PS (Tab. 7).

Tabelle 7: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Budapest

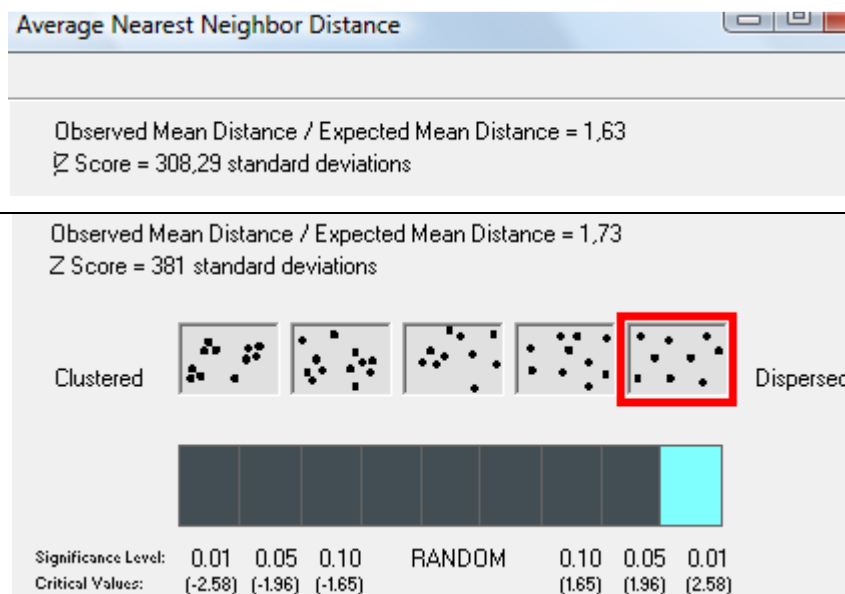
Verwendete topographische Karte (ohne/mit OSM)	Abgeschätzte PS-Dichte (PS/km ²)
Russische TK (1:100.000) ohne OSM	61090
Russische TK (1:100.000) mit OSM	69020
Vektorisierte TK (1:10.000) ohne OSM	49209
Vektorisierte TK (1:10.000) mit OSM	65270

Die *Nearest Neighbor Analysis* zeigt für beide Datensätze an topographischen Karten einen Wert von $Q > 1$ (Anhang-Abb. 3 & 4). Die abgeschätzten PS sind also eher räumlich gleichmäßig verteilt (*dispersed*). Da das gesamte Testgebiet dichte Bebauung aufweist, sind die abgeschätzten PS gleichmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Auf Grund der größeren Anzahl an abgeschätzten PS bei Verwendung der russischen TK (vgl. oben), ist der Wert für Q bei dieser TK auch etwas größer als bei Verwendung der vektorisierten TK.

Für beide Datensätze an TKs gilt, dass mit zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten der Wert für Q ansteigt, also die abgeschätzten PS eher eine räumlich gleichmä-

Abschätzung von Persistent Scatterers mit digitalen topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten

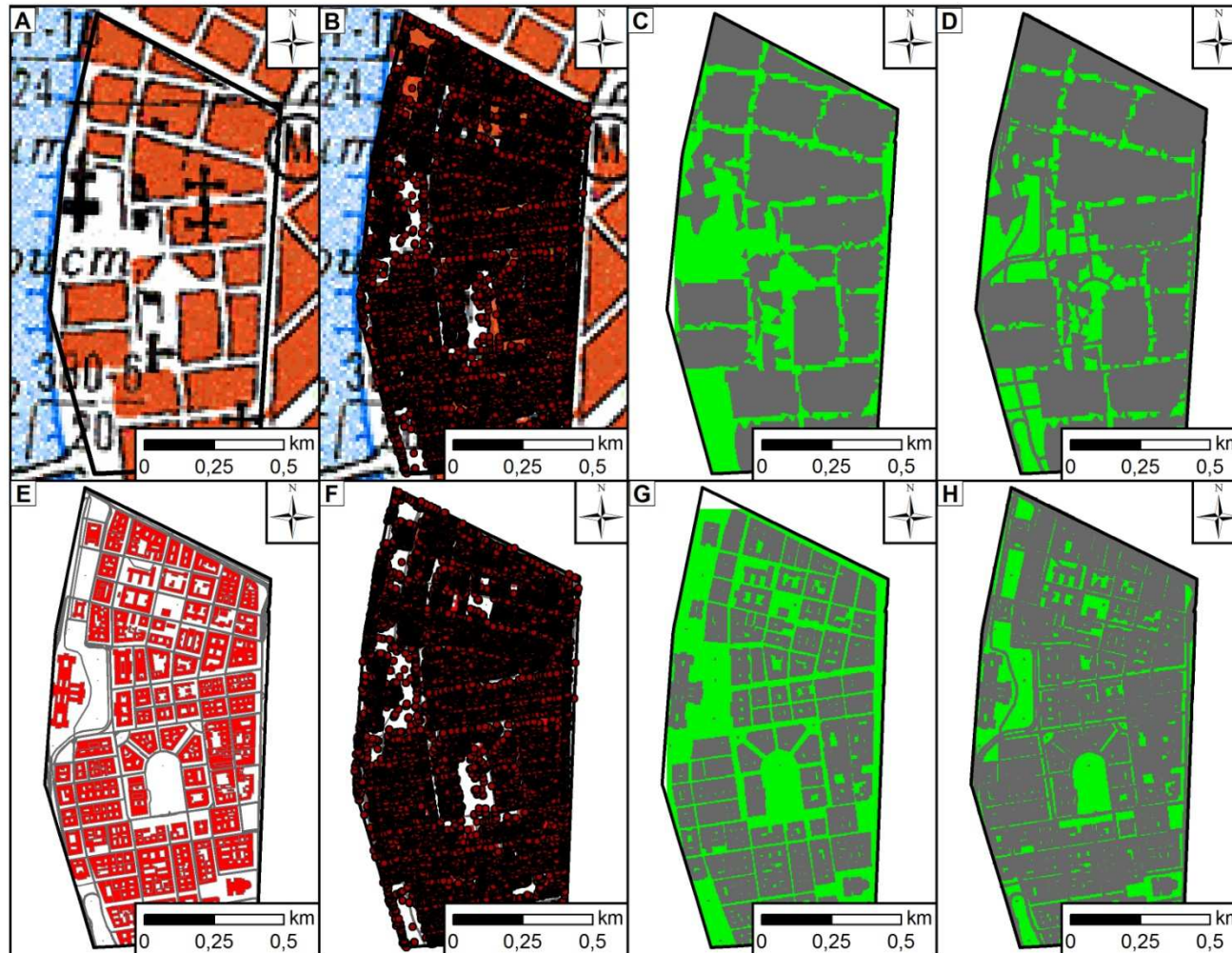
ßige Verteilung aufweisen. Da mit den OSM Daten mehr potentielle PS-Objekte zur Verfügung stehen, wird ihre Verteilung im Untersuchungsgebiet auch gleichmäßiger.



Anhang-Abb. 3: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Budapest mit russischer TK (1:100.000). Oben: Ergebnis ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM; Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 4: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Budapest mit vektorisierter topographischer Karte (1:10.000). Oben: Ergebnis ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM; Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 5: PS-Abschätzung Testgebiet Budapest. Oben: russische TK (1:100.000): Original Karte (Karte A), mit echten PS (B), abgeschätzte PS (grau) ohne OSM (C), PS Abschätzung mit OSM (D). Unten: vektorisierte TK (1:10.000): Originalkarte (E), mit echten PS (F), abgeschätzte PS (grau) ohne OSM (G), mit OSM (H).

A3: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Aostatal

In den Anhang-Abbildungen 8 und 9 sind die Ergebnisse der PS-Abschätzung für das Testgebiet Aostatal dargestellt. Die PS-Abschätzung (räumliche Auflösung 27 m, vgl. Tab. 5, S. 55) erfolgt erstens mit einer russischen topographischen Karte (1:50.000; Anhang-Abb. 8) und zweitens mit der topographischen Karte von Courmayeur (1:25.000; Anhang-Abb. 9). Karte A zeigt jeweils die originale TK mit den echten PS. In diesem Fall liegen zur Validierung der PS-Abschätzung echte PS von zwei Blickrichtungen vor (vgl. Kapitel 1.5.2.3, S. 8 f.). In Karte B wird jeweils das Ergebnis der PS-Abschätzung bei alleiniger Verwendung der jeweiligen TK dargestellt und Karte C zeigt jeweils die PS-Abschätzung bei zusätzlicher Verwendung von OSM Daten.

Wie der Tabelle 8 zu entnehmen ist, wird bei Verwendung der russischen TK jeweils eine höhere Dichte an abgeschätzten PS erzielt als bei der TK von Courmayeur. Ursache hierfür ist die stärkere Generalisierung der russischen TK und der damit einhergehenden größeren Anzahl an potentiellen PS-Objekten.

Wie bereits beim Testgebiet Budapest erwähnt (vgl. A2, S. IV), wird bei zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten jeweils eine höhere PS-Dichte erreicht, da die Anzahl an möglichen PS-Objekten zunimmt.

Tabelle 8: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Aostatal

Verwendete topographische Karte (ohne/mit OSM)	Abgeschätzte PS-Dichte (PS/km ²)
Russische TK (1:50.000) ohne OSM	292
Russische TK (1:50.000) mit OSM	312
TK von Courmayeur (1:25.000) ohne OSM	182
TK von Courmayeur (1:25.000) mit OSM	239

Die Anhang-Abbildungen 6 und 7 zeigen die Ergebnisse der *Nearest Neighbor Analysis*. Der Wert für Q liegt für alle vier Fälle unter 1. Wie auch schon visuell aus den Anhang-Abbildungen 8 und 9 zu entnehmen ist, zeigen die abgeschätzten PS eine deutliche Clusterung im Stadtbereich von Courmayeur.

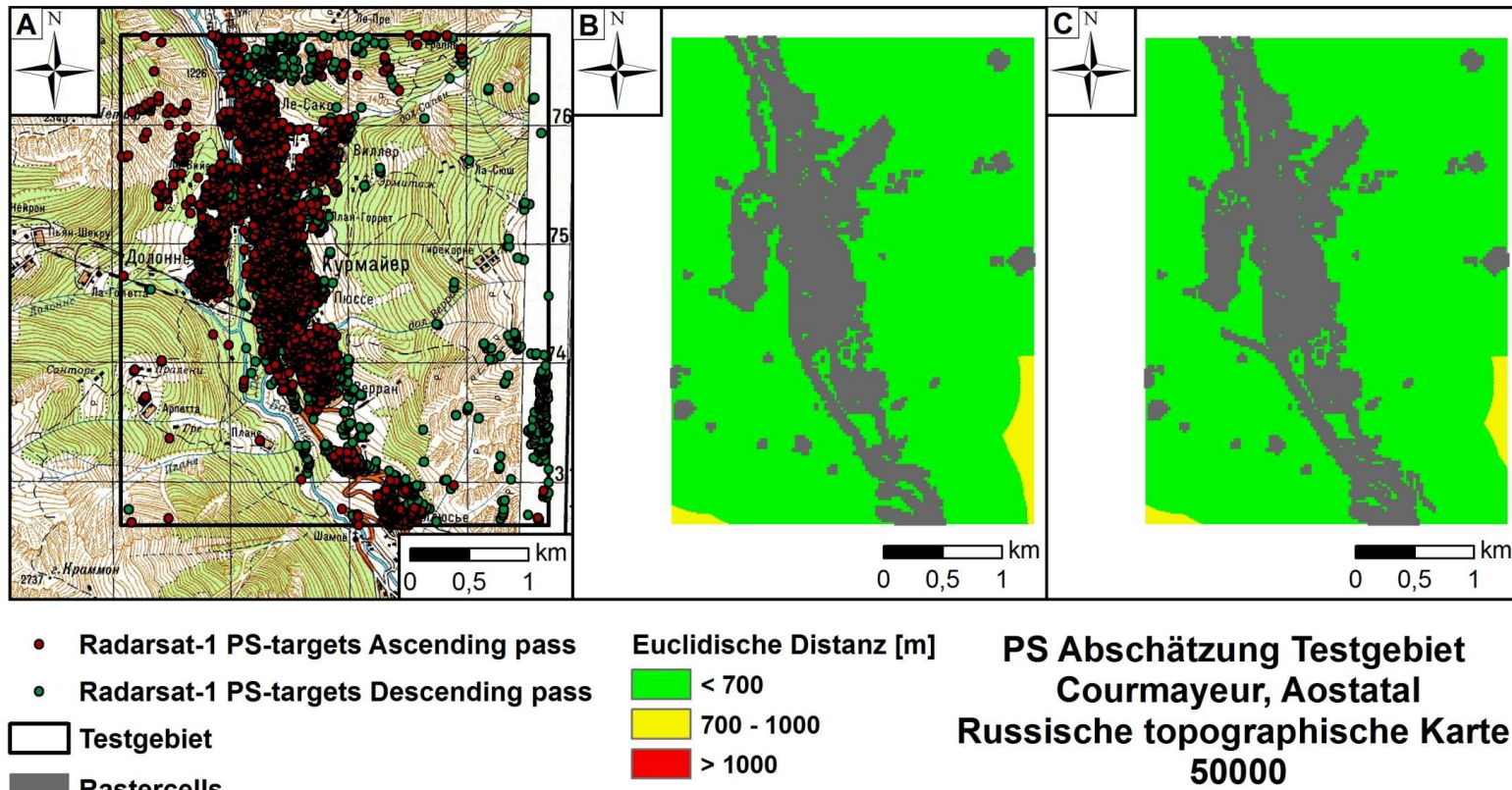
Abschätzung von Persistent Scatterers mit digitalen topographischen Karten und *OpenStreetMap* Daten



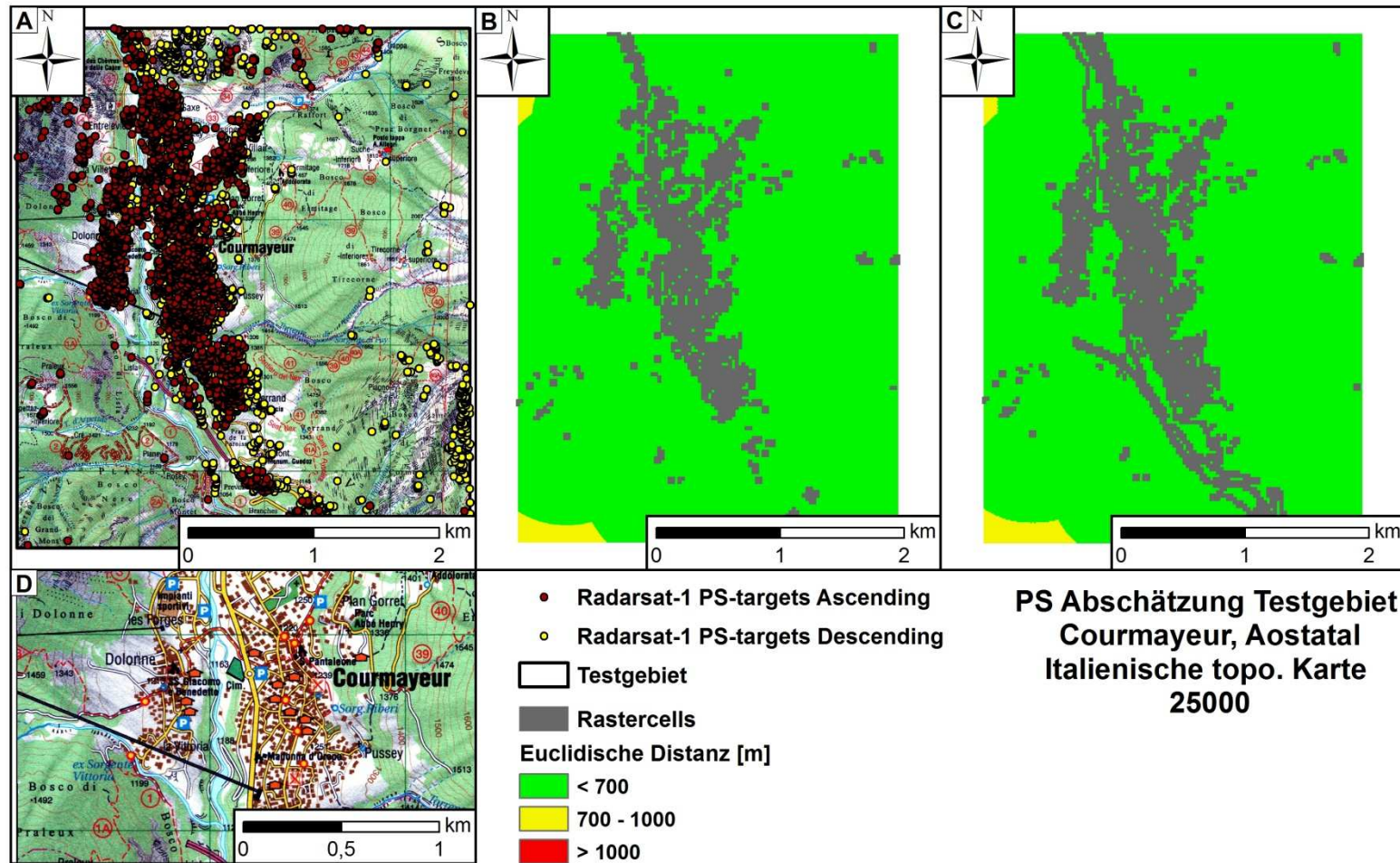
Anhang-Abb. 6: *Nearest Neighbor Analysis* des Testgebiets Aostatal mit russischer topographischer Karte (1:50.000). Oben: Ergebnis ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM; Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 7: *Nearest Neighbor Analysis* des Testgebiets Aostatal mit TK 25 Courmayeur. Oben: Ergebnis ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM; Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 8: Ergebnisse der PS-Abschätzung im Testgebiet Aostatal für die russische TK (1:50.000). Originalkarte mit echten PS (rote Punkte: Ascending, grüne Punkte: Descending) (Karte A), abgeschätzte PS (= Rastercells, grau) ohne Berücksichtigung von OSM (B), PS-Abschätzung mit OSM (C).



Anhang-Abb. 9: Ergebnisse der PS-Abschätzung im Testgebiet Aostatal für die TK von Courmayeur (1:25.000). Originalkarte mit echten PS (rote Punkte: Ascending, gelbe Punkte: Descending) (Karte A; Vergrößerter Ausschnitt: Karte D), abgeschätzte PS (= Rastercells, grau) ohne Berücksichtigung von OSM (B), PS-Abschätzung mit OSM (C).

A4: Ergebnis PS-Abschätzung Testgebiet Oberbayern

A4.1: Teilgebiet russische topographische Karte

Die Anhang-Abbildungen 12 und 13 zeigen die Ergebnisse der PS-Abschätzung für das Teilgebiet der russischen TK im Testgebiet Oberbayern (vgl. auch Abb. 27, S. 48; Tab. 5, S. 55). Die PS-Abschätzung wird für die hier verfügbaren topographischen Karten durchgeführt: erstens die digitale topographische Karte von Bayern (1:25.000; Anhang-Abb. 12) und zweitens für die russische TK (1:200.000; Anhang-Abb. 13). Karte A der Anhang-Abbildung 12 bzw. 13 zeigt jeweils die originale TK mit den zur Validierung verwendeten echten PS. In Karte B ist jeweils die PS-Abschätzung ohne OSM und in Karte C mit zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten dargestellt.

Tabelle 9 zeigt die abgeschätzten PS-Dichten für die jeweiligen topographischen Karten ohne und mit OSM Daten. Die stärkere Generalisierung der russischen TK auf Grund ihres im Vergleich zur TK 25 Bayern kleineren Maßstabs führt zu einer höheren Anzahl an möglichen PS-Objekten und einer damit einhergehenden höheren Dichte an abgeschätzten PS.

Wie auch bereits in den zuvor beschriebenen Testgebieten (vgl. A1, A2 & A3) gezeigt, wird bei zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten eine höhere PS-Dichte erreicht als bei alleiniger Verwendung der TKs.

Tabelle 9: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet russische TK

Verwendete topographische Karte (ohne/mit OSM)	Abgeschätzte PS-Dichte (PS/km²)
TK von Bayern (1:25.000) ohne OSM	119
TK von Bayern (1:25.000) mit OSM	185
Russische TK (1:200.000) ohne OSM	148
Russische TK (1:200.000) mit OSM	221

Einen Schwerpunkt der abgeschätzten PS bildet die Stadt Augsburg. Die visuell aus den PS-Abschätzungen der Anhang-Abbildungen 12 und 13 entnehmbare Clusterung der abgeschätzten PS wird durch einen Wert von $Q < 1$ in der *Nearest Neighbor Analysis* bestätigt (Anhang-Abb. 10 & 11). Da sich bei alleiniger Berücksichtigung der topographischen Karten die potentiellen PS-Objekte stärker auf bebautes Gebiet konzentrieren,

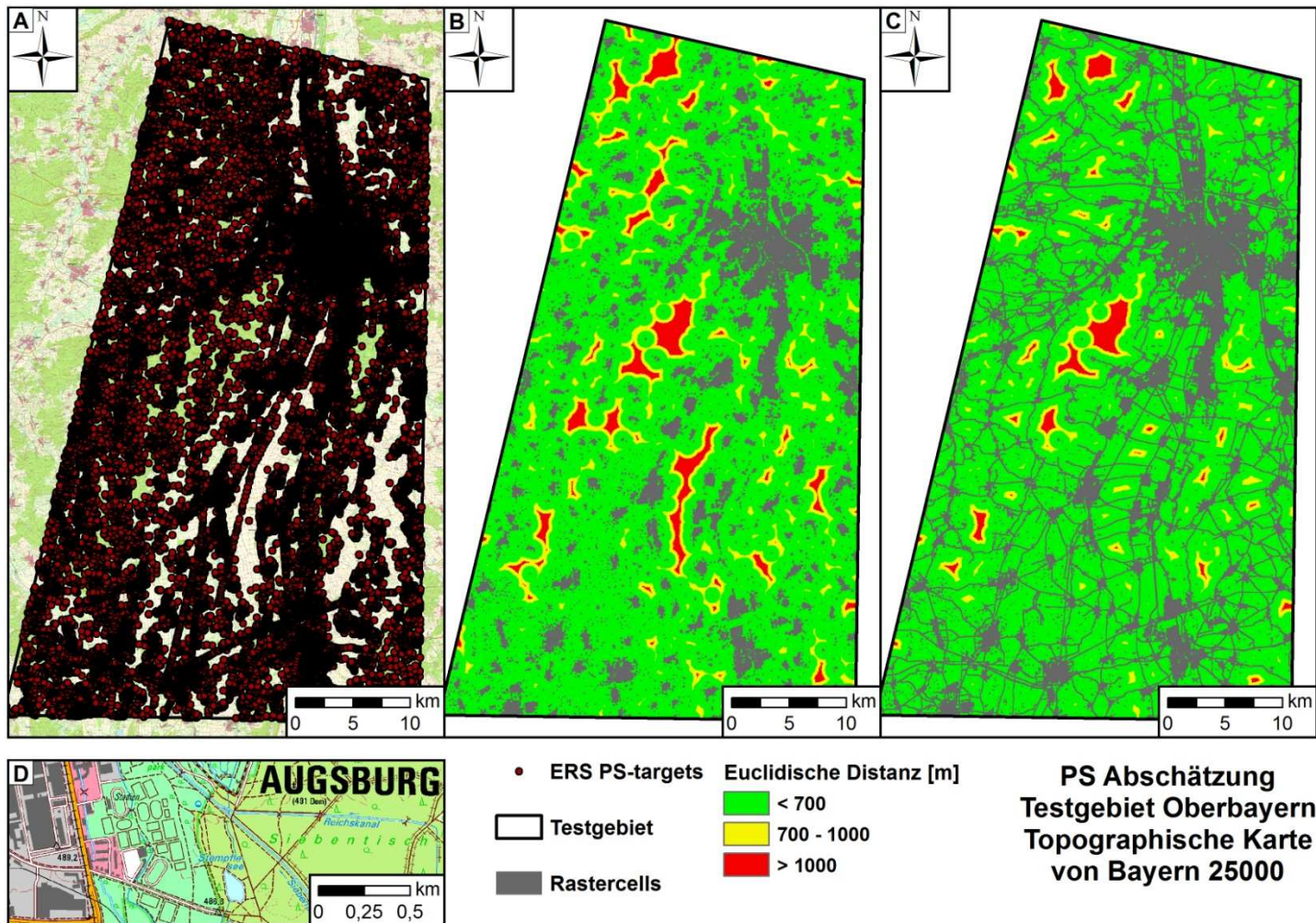
ergibt sich hierfür ein stärkere Clusterbildung (kleinere Werte für Q als bei Verwendung von OSM Daten).



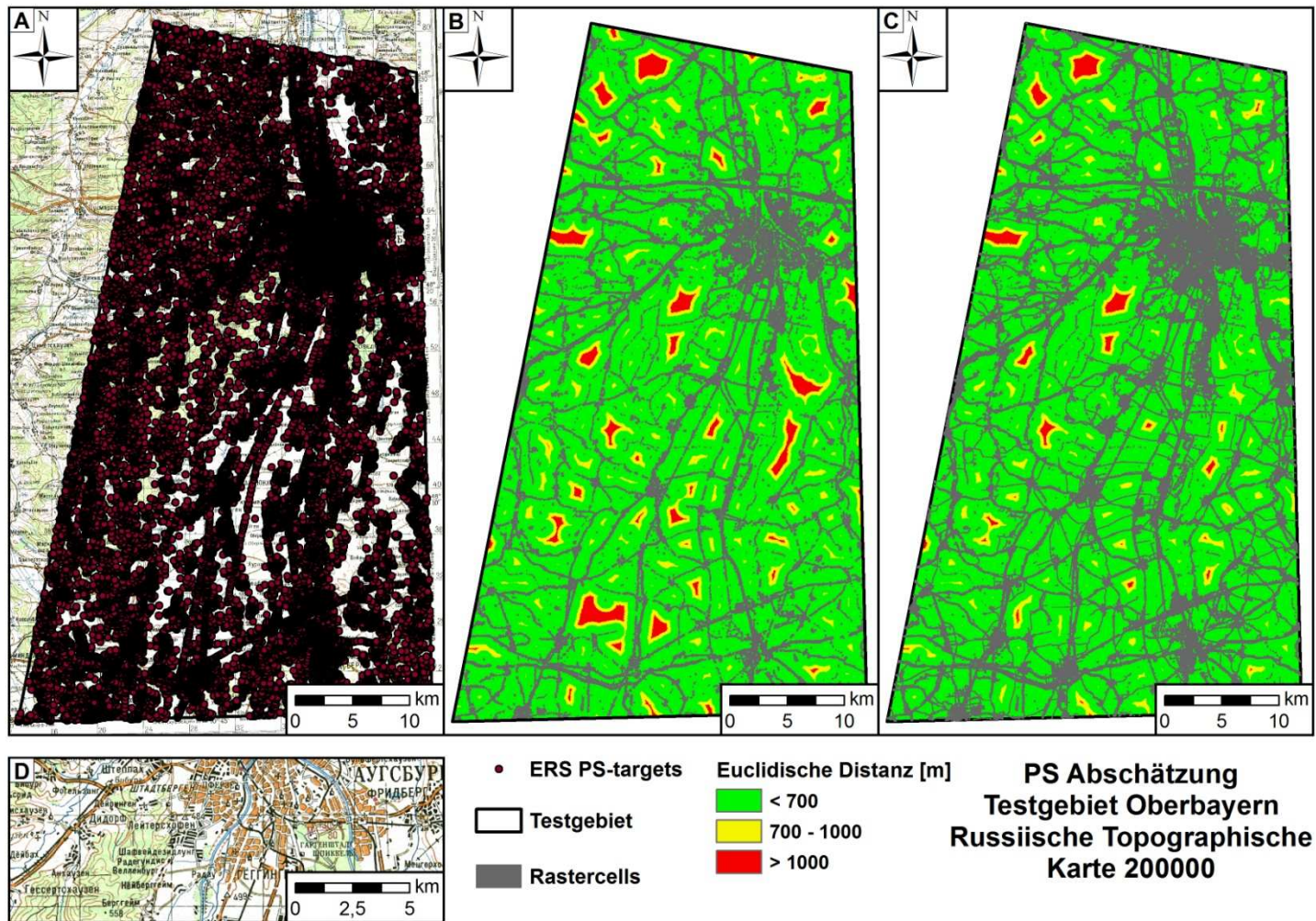
Anhang-Abb. 10: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet der russischen TK (TK 25 von Bayern). Oben: ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten. Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 11: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet der russischen TK 1:200.000). Oben: ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten. Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 12: PS-Abschätzung Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet russische TK. Originale topographische Karte von Bayern (1:25.000) mit echten PS (Karte A, vergrößerter Ausschnitt: Karte D), abgeschätzte PS (= Rastercells, grau) ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten (B), PS-Abschätzung mit OSM Daten (C).



Anhang-Abb. 13: PS-Abschätzung Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet russische TK. Originale russische topographische Karte (1:200.000) mit echten PS (Karte A, vergrößerter Ausschnitt: Karte D), abgeschätzte PS (= Rastercells, grau) ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten (B), PS-Abschätzung mit OSM Daten (C).

A4.2: Teilgebiet Bayern-Map plus

Für das Teilgebiet Bayern-Map plus im Testgebiet Oberbayern sind die Ergebnisse der PS-Abschätzung in Anhang-Abbildung 16 dargestellt. Für dieses Teilgebiet stehen die digitale topographische Karte von Bayern (1:25.000) und die Bayern-Map plus zur Verfügung (vgl. Kapitel 1.5.2.4, S. 9 und Abb. 27, S. 48). Die Karten A und D (Anhang-Abb. 16) zeigen jeweils die originalen Datensätze zusammen mit den echten PS. In den Karten B & C und E & F ist das jeweilige Ergebnis der PS-Abschätzung ohne bzw. mit zusätzlicher Berücksichtigung von *OpenStreetMap* Daten dargestellt.

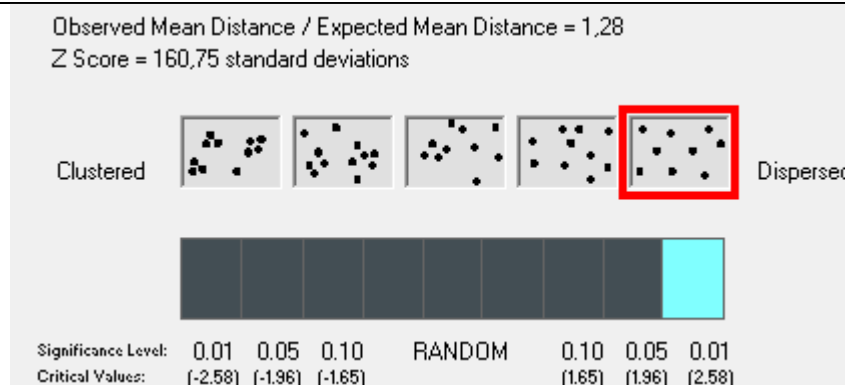
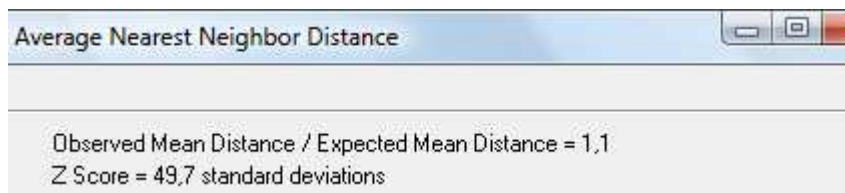
Die abgeschätzten PS-Dichten der jeweiligen Datensätze sind in Tabelle 10 aufgeführt. Auf Grund des gleichgroßen Maßstabes in beiden Datensätzen zeigen die abgeschätzten PS-Dichten für ohne bzw. mit OSM jeweils nahezu identische Werte.

Tabelle 10: PS-Dichten für die verwendeten TKs im Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus

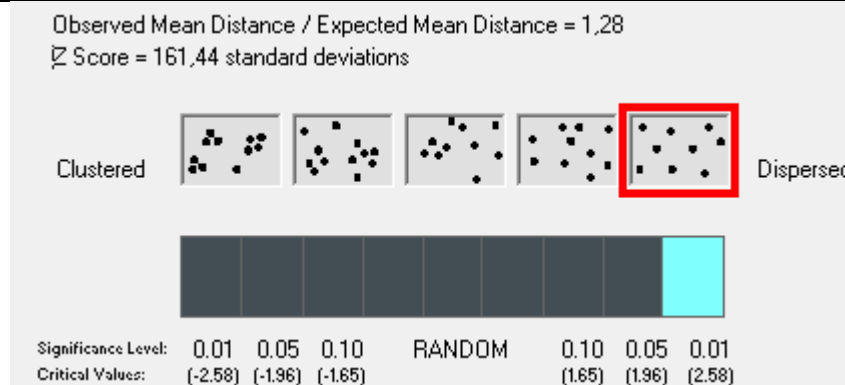
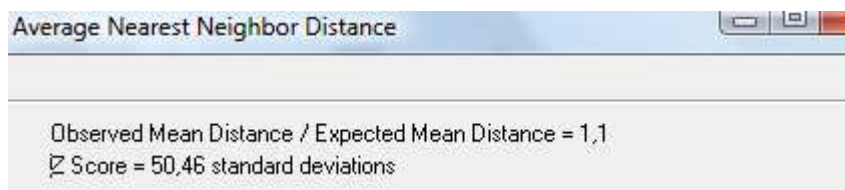
Verwendete topographische Karte (ohne/mit OSM)	Abgeschätzte PS-Dichte (PS/km ²)
TK von Bayern (1:25.000) ohne OSM	337
TK von Bayern (1:25.000) mit OSM	462
Bayern-Map plus (1:25.000) ohne OSM	337
Bayern-Map plus (1:25.000) mit OSM	458

Die Werte für die *Nearest Neighbor Analysis* zeigen für beide TKs jeweils für ohne OSM und mit zusätzlicher Berücksichtigung von OSM Daten identische Werte (Anhang-Abb. 14 & 15). Als Ergebnis der NNA wird *dispersed*, also räumlich gleichmäßig verteilt, angegeben. Die Werte von Q liegen aber nahe bei 1 und zeigen damit an, dass die Verteilungen der abgeschätzten PS nahe an dem Bereich einer Zufallsverteilung ($Q = 1$) liegen. Auch ein Blick auf die Karten in Anhang-Abbildung 16 zeigt eher eine Konzentration (Clusterbildung) der abgeschätzten PS als eine räumlich gleichmäßige Anordnung im Untersuchungsgebiet. Wie auch im Testgebiet Budapest (Kapitel A2, S. IV) ergeben sich bei zusätzlicher Verwendung von *OpenStreetMap* Daten höhere Werte für Q . Ursache hierfür ist wiederum die größere Anzahl an möglichen PS-Objekten und damit die stärkere Verteilung der abgeschätzten PS im Testgebiet.

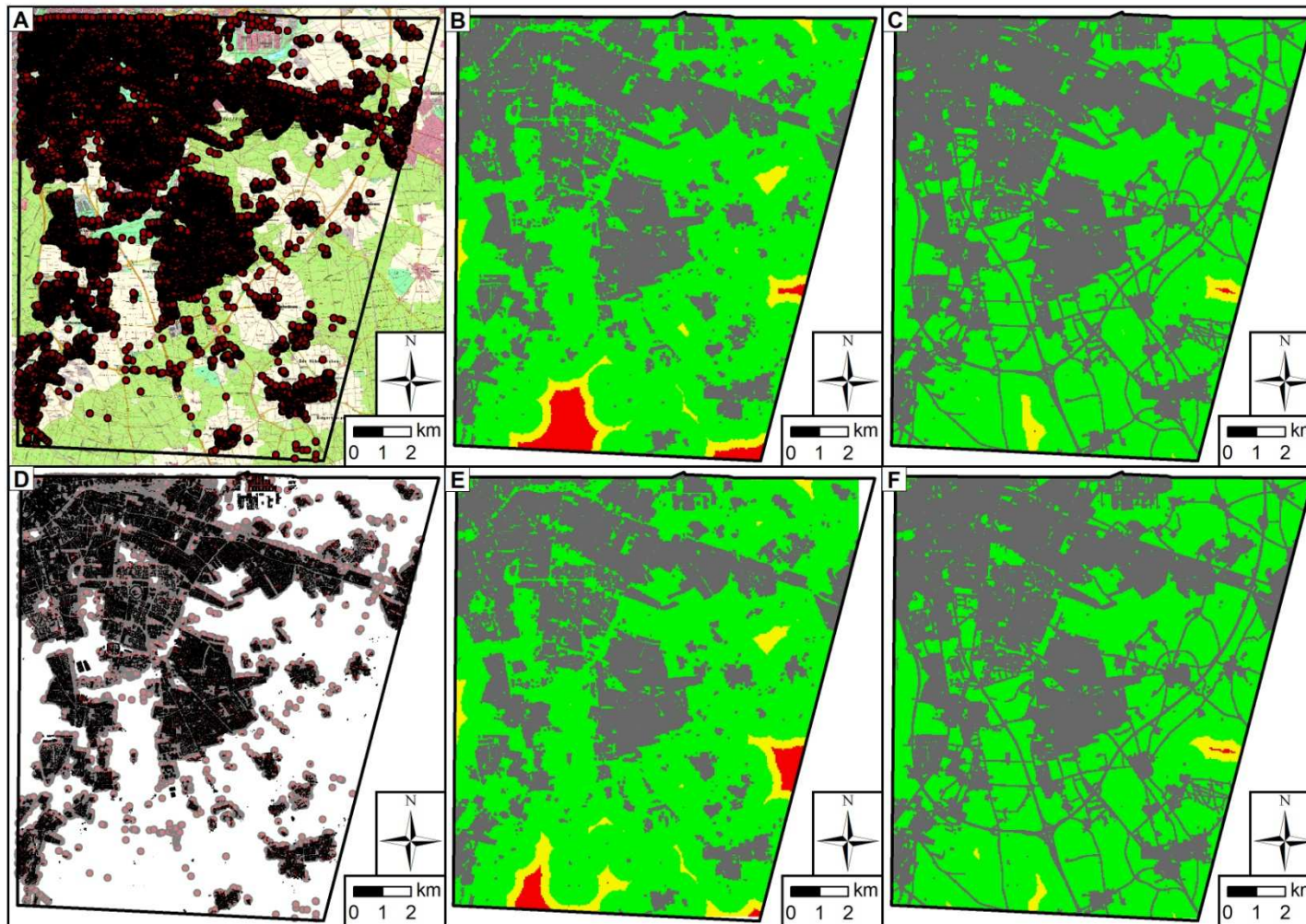
Abschätzung von Persistent Scatterers mit digitalen topographischen Karten und
OpenStreetMap Daten



Anhang-Abb. 14: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus (TK 25 von Bayern). Oben: ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten. Unten: mit OSM.



Anhang-Abb. 15: *Nearest Neighbor Analysis* Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus (Verwendung der Bayern-Map plus). Oben: ohne zusätzliche Berücksichtigung von OSM Daten. Unten: mit OSM Daten.



Anhang-Abb. 16: Ergebnisse der PS-Abschätzung für das Testgebiet Oberbayern, Teilgebiet Bayern-Map plus. Oben: Originale TK 25 von Bayern mit echten PS (Karte A), abgeschätzte PS (grau) ohne OSM Daten (B), PS-Abschätzung mit OSM (C). Unten: Bayern-Map plus mit echten PS (transparent; D), abgeschätzte PS (grau) (E), mit OSM Daten (F).

Anhang B: Passpunkte Testgebiet Aostatal

Anhang-Abbildung 17 zeigt die Passpunkte, die beim Georeferenzieren der topographischen Karte von Courmayeur verwendet wurden (vgl. auch Kapitel 4.2.1.2, S. 31).

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual
1	1862,479747	-987,468102	342000,000000	5074000,000000	0,59979
2	3747,456044	-989,507656	343000,000000	5074000,000000	0,69201
3	1855,406008	-2874,301731	342000,000000	5073000,000000	0,48610
4	5636,494982	-990,009254	344000,000000	5074000,000000	0,42481
5	1846,351316	-6649,238082	342000,000000	5071000,000000	0,17467
6	5620,535047	-6652,796831	344000,000000	5071000,000000	0,12028

III

Auto Adjust Transformation: 1st Order Polynomial (A) Total RMS Error: 0,46554

Anhang-Abb. 17: Die verwendeten Passpunkte beim Georeferenzieren der topographischen Karte von Courmayeur (vgl. Kapitel 4.2.1.2, S. 31).