

# **Vulnerabilitätsabschätzung der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul mit Methoden der Fernerkundung**

Dissertation zur Erlangung des  
naturwissenschaftlichen Doktorgrades der  
Bayerischen Julius-Maximilians Universität Würzburg

vorgelegt von  
Hannes Taubenböck

aus  
München

Würzburg, 05.11.2007



**Eingereicht am:** 05.11.2007

1. **Gutachter:** Prof. Dr. Stefan Dech
2. **Gutachter:** Prof. Dr. Jochen Zschau

der Dissertation.

1. **Prüfer:** Dr. Michael Schmidt
2. **Prüfer:** Prof. Dr. Jürgen Rauh

der mündlichen Prüfung.

**Tag der mündlichen Prüfung:** 25.06.2008



The Earth was small, light blue, and so touchingly alone,  
our home that must be defended like a holy relic.

Cosmonaut Alexei Leonov



# Abstract

Urban areas are among the most dynamic regions on the planet. Specifically megacities show trends and dimensions of urbanization with hardly foreseeable regional or global consequences which have so far only been rudimentarily researched. The tremendous spatial concentration of people, financial value and infrastructure is the reason for the high vulnerability of urban areas. Especially in combination with natural hazards, risks emerging from rapid structural, socio-economic and ecological changes in the complex urban landscape increases dramatically.

*The central goal of the dissertation is therefore the analysis of the capabilities of remote sensing to assess risk and vulnerability in the case of the earthquake prone megacity Istanbul.*

Systematic analysis of the overall goal involves the development of a thematic, conceptual guideline. The concept leads to the concretization of abstract terms like 'risk', 'vulnerability' and 'hazard', resulting in a system of indicators which are capable of quantitative measurement. The indicators for the system 'urban area' enable a quantitative assessment of single aspects, but also add up to a holistic perspective of risks. By means of this concept the capabilities and limitations of remote sensing data and image processing methods to assess risk and vulnerability are identified.

On the basis of this guideline the initial focus is on automated extraction of spatial information from remote sensing data. An object-oriented, modular classification approach produces a land-cover classification from high resolution satellite data in complex urban areas. The modular framework enables fast and easy adjustments to apply the algorithm to different high resolution data as well as to different urban structures. The transfer of methodology has been tested on IKONOS data for the megacity Istanbul and for the earthquake prone coastal town of Padang, Indonesia, as well as for Quickbird data for the incipient megacity Hyderabad, India. The results show the highly-detailed and high-precision coverage of small-scale, heterogeneous objects for the manifold urban landscapes with accuracies higher than 80 %. In addition, medium resolution Landsat data sets are classified with high accuracy also using an object-oriented and modular classification approach for a complementary temporal and area-wide analysis. The derived results provide an up-to-date, area-wide and multiscale information basis, usable as a starting point to analyze vulnerability.

Based on this information, indicators of the conceptual guideline are extracted. The development of methods for an automated and interpreter-independent derivation of indicators relevant for assessing vulnerability and hazards is the focus. The physical perspective of vulnerability centers on an analysis of the building stock, classified by parameters like density, height, age, size, form and roof type. These parameters are indirectly used to derive the spatial population density distribution. Further location factors result from distances to main infrastructure, an open spaces analysis, or surface slope.

Eventually the assessment of vulnerability and risks combines the thematic guideline with the derived indicators. The standardization of the diverse indicators leads to a consistent index. This enables spatial and temporal comparability as well as the combining of the different information layers. This simulates the interaction of the various indicators and enables identification and localization of focal points in the disaster case. Beyond the capabilities of remote sensing an interdisciplinary method elevates the results to a synergistic value-added product. Instead of a quantitative assessment of the physical parameters of structures, civil engineering, using an area-wide classification of buildings, enables a probabilistic assessment of damage grades for various building types in case of an earthquake.

An earthquake scenario exemplifies the capabilities of the results to support decision-makers. Risk and vulnerability are quantified showing with spatial reference affected houses and affected people as well as location factors, such as accessibility. This makes possible specific preventive measures or crisis management during and after a disaster.

The résumé of the central goal of this dissertation concludes, that timeliness, high geometric resolution and thematic quality of the results from remote sensing data, fully achieve the requirements posed by the complex, heterogeneous and fast changing urban environment. The performance shows that the potential of remote sensing to assess risk and vulnerability centres on the direct derivation of physical parameters and the indirect derivation of demographic information.



# Kurzfassung

Urbane Räume zählen zu den dynamischsten Regionen dieser Erde. Besonders Megacities zeigen bereits heute Trends und Dimensionen der Urbanisierung, deren regionale und globale Folgen noch kaum vorhersehbar, und erst ansatzweise erforscht sind. Die enorme räumliche Konzentration von Menschen, Werten und Infrastruktur auf engem Raum ist für diese urbanen Räume die Grundlage einer hohen Verwundbarkeit (Vulnerabilität). Gerade im Kontext von Naturgefahren potenzieren sich die Risiken, die durch den schnellen strukturellen, sozioökonomischen und ökologischen Wandel entstehen.

*Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation ist daher die Analyse von Potentialen der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität am Beispiel der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul.*

Um die Zielstellung systematisch zu verfolgen, wird ein konzeptioneller, thematischer Leitfaden entwickelt. Dieser besteht aus einer Systematisierung der abstrakten Überbegriffe ‚Risiko‘, ‚Vulnerabilität‘ und ‚Gefährdung‘ in einem Indikatorensystem. Konkrete, messbare Indikatoren für das System ‚urbaner Raum‘ erlauben eine quantitative Abschätzung von Einzelaspekten, addieren sich aber auch zu einer ganzheitlichen Perspektive des Risikos. Basierend auf dieser holistischen Idee, erlaubt das Indikatorensystem Potentiale, aber auch Limitierungen der Fernerkundungsdaten und Bildverarbeitungsmethoden für die Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität zu identifizieren.

Anhand des Leitfadens werden zielgerichtet Methoden zur automatisierten Extraktion räumlicher Informationen aus Fernerkundungsdaten entwickelt. Ein objektorientierter, modularer Klassifikationsansatz ermöglicht eine Landbedeckungsklassifikation höchst aufgelöster Daten im urbanen Raum. Dieses modulare Rahmenwerk zielt auf eine einfache und schnelle Übertragbarkeit auf andere höchst auflösende Sensoren bzw. andere urbane Strukturen. Zur Anpassung der Methoden werden neben IKONOS Daten der Megacity Istanbul und der erdbeben- und tsunamigefährdeten Küstenstadt Padang in Indonesien, Quickbird Daten für die zukünftige Megacity Hyderabad in Indien getestet. Die Resultate zeigen die detaillierte und hochgenaue Erfassung kleinräumiger, heterogener urbaner Objekte mit Genauigkeiten von über 80 %. Auch mittel aufgelöste Landsat Daten werden mit einem objektorientierten modularen Rahmenwerk mit hohen Genauigkeiten klassifiziert, um komplementäre temporale und gesamtstädtische Analysen hinzuzufügen. Damit wird eine aktuelle, flächendeckende und

multiskalige Informationsbasis generiert, die als Ausgangsprodukt zur Analyse urbaner Vulnerabilität dient.

Basierend auf diesen Informationsebenen werden dem konzeptionellen Leitfaden folgend Indikatoren zur Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko extrahiert. Der Fokus ist dabei die Entwicklung von Methoden zur automatisierten, interpreterunabhängigen Ableitung vulnerabilitäts- und gefährdungsrelevanter Indikatoren. Die physische Analyse des kleinräumigen urbanen Raums konzentriert sich dabei auf die Typisierung des Gebäudebestandes mit Parametern wie Dichte, Höhe, Alter, Größe, Form sowie Dachtyp. Indirekt wird zudem mittels dieser Parameter die Bevölkerungsdichteverteilung abgeleitet. Weitere Standortfaktoren ergeben sich aus Lageparametern wie Distanzen zu Hauptverkehrsachsen, Freiflächenanalysen oder der Geländeoberfläche.

Schließlich führt die Vulnerabilitätsabschätzung den modellhaften, thematischen Leitfaden mit den abgeleiteten Indikatoren zusammen. Dazu erfolgt eine Normierung der unterschiedlichen abgeleiteten Indikatoren auf einen einheitlichen Vulnerabilitätsindex. Dieser zielt auf eine räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit und die Möglichkeit, die vielfältigen Informationsebenen zu kombinieren. Damit wird das Zusammenspiel verschiedenster Indikatoren simuliert und erlaubt daraus Identifizierung und Lokalisierung von Brennpunkten im Desasterfall. Über das fernerkundliche Potential hinaus, werden die Resultate in einer interdisziplinären Methode zu einem synergetischen Mehrwert erhoben. Statt einer quantitativen Abschätzung der physischen Gebäudeparameter, ermöglicht eine Methode des Bauingenieurwesens in Kombination mit der fernerkundlichen Gebäudetypisierung eine Abschätzung der wahrscheinlichen Schadensanfälligkeit von Gebäuden im Falle eines Erdbebens.

Exemplarisch wird das Potential der Resultate für Entscheidungsträger anhand eines Erdbebenszenarios aufgezeigt. Risiko und Vulnerabilität lassen sich dadurch räumlich sowohl nach betroffenen Häusern und betroffenen Menschen als auch nach räumlichen Standortfaktoren wie beispielsweise Zugänglichkeit quantifizieren. Dies ermöglicht gezielt präventiv zu agieren oder während und nach einem Desaster gezieltes Krisenmanagement zu betreiben.

Im Hinblick auf die zentrale Fragestellung dieser Dissertation lässt sich resümieren, dass die Aktualität sowie die geometrische und thematische Qualität der Resultate aus Fernerkundungsdaten, den Anforderungen des komplexen, kleinräumigen und dynamischen urbanen Raums gerecht werden. Die Resultate führen zu der Erkenntnis, dass das Potential der Fernerkundung zur Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko vor allem in der direkten Ableitung physischer Indikatoren sowie der indirekten Ableitung demographischer Parameter liegt.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben, recht herzlich bedanken.

Allen voran gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Stefan Dech für die Ermöglichung dieser Dissertation. Die engagierte Betreuung, die kompetenten Ratschläge, die konstruktive Kritik, aber auch das entgegengebrachte Vertrauen haben maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Jochen Zschau vom Geo-Forschungszentrum in Potsdam für die anregenden Diskussionen, für die Unterstützung innerhalb des Projekts sowie für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Diese Arbeit entstand am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in der Abteilung Umwelt und Sicherheit. Mein besonderer Dank gilt daher der Leitung der Abteilung Umwelt und Sicherheit (US), Herrn Dr. Harald Mehl, für die Bereitstellung der Infrastruktur und Ressourcen zur Erstellung dieser Arbeit. Explizit bedanken möchte ich mich beim Leiter des Teams ‚Topographie und urbane Analysen‘, Herrn Achim Roth, auf dessen hundertprozentige Unterstützung ich immer zählen konnte, und der mit seinem hohen wissenschaftlichen Sachverstand und großem Engagement erheblich zu dieser Dissertation beigetragen hat. Weiter möchte ich mich bei Herrn Martin Habermeyer für das Korrekturlesen, für all die spitzen, aber treffenden Kommentare, für die wissenschaftliche Zusammenarbeit und für die unzähligen unwissenschaftlichen Diskussionen bedanken. Ebenso gebührt Frau Ursula Marschalk und Dr. Thomas Esch ein großer Dank, die mit stoischer Ruhe tausende Bitten und Fragen ertragen haben. In diesem Kontext möchte ich mich beim gesamten Team, sowie der kompletten Abteilung DFD-US für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre bedanken.

Ein herzliches Dankeschön für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit möchte ich an Herrn Johannes Christian Münich sowie Herrn Prof. Dr. Lothar Stempniewski vom Lehrstuhl für Bauingenieurwesen der Universität Karlsruhe (CEDIM) richten. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Mustafa Erdik und Frau Prof. Dr. Eser Durukal vom Kandili Observatory der Bogazici Universität Istanbul für die gute Kooperation, die Bereitstellung von Daten und die spannenden Diskussionen.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Kerstin Mayr-Strotmann für die liebevolle seelische Unterstützung. Letztendlich möchte ich mich bei meinen Eltern Ingrid und Hans, sowie bei meiner Schwester Andrea für deren immerwährenden Rückhalt bedanken, ohne den mein Studium und diese Dissertation nicht möglich gewesen wären.



# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	VII
Kurzfassung .....	IX
Danksagung .....	XI
Inhaltsverzeichnis .....	XIII
Abbildungsverzeichnis .....	XVII
Tabellenverzeichnis .....	XX
Abkürzungsverzeichnis .....	XXI
<b>1. Kapitel – Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation .....	2
1.2. Stand der Forschung .....	3
1.3. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2. Kapitel – Grundlagen .....</b>	<b>9</b>
2.1. Urbane Räume und Naturgefahren .....	9
2.1.1. Untersuchungsgebiet Megacity Istanbul .....	11
2.1.2. Untersuchungsgebiete Hyderabad, Indien und Padang, Indonesien.....	16
2.2. Fernerkundung .....	16
2.2.1. Datengrundlagen.....	20
2.2.2. Vorprozessierung .....	25
2.3. Zusammenfassung .....	26
<b>3. Kapitel – Vulnerabilität .....</b>	<b>27</b>
3.1. Begriffliche Definition von ‚Vulnerabilität‘ .....	27
3.2. Vulnerabilität als konzeptionelle Idee .....	29
3.3. Vulnerabilität im konzeptionellen Rahmen von Risiko und Gefahr .....	32

3.4. Urbane Vulnerabilität und Fernerkundung .....	35
3.5. Zusammenfassung .....	36
<b>4. Kapitel – Klassifikation von Fernerkundungsdaten urbaner Räume .....</b>	<b>37</b>
4.1. Klassifikation geometrisch höchst aufgelöster Satellitendaten urbaner Räume .....	38
4.1.1. Segmentierung .....	39
4.1.2. Objektorientierter Klassifikationsansatz .....	43
4.1.3. Ergebnis und Genauigkeitsabschätzung .....	48
4.1.4. Transfer .....	50
4.2. Klassifikation geometrisch gering aufgelöster Satellitendaten urbaner Räume .....	54
4.2.1. Genauigkeitsabschätzung .....	57
4.3. Bewertung .....	58
4.4. Zusammenfassung .....	60
<b>5. Kapitel – Analyse des urbanen Raumes basierend auf Fernerkundungsdaten .....</b>	<b>61</b>
5.1. Gebäudedichteanalyse .....	61
5.1.1. Zweistufiger Ansatz zur pixelbasierten Errechnung von Gebäudedichten .....	62
5.1.2. Segmentierungsansatz zur automatisierten Ableitung von Dichtegrenzen .....	64
5.1.3. Savitzky-Golay Ansatz mit Kurvendiskussion zur automatisierten Generierung von Grenzen zwischen Dichtezonen .....	66
5.1.3.1. Savitzky-Golay Filter .....	67
5.1.3.2. Kurvendiskussion zur objektiven Berechnung von Grenzen zwischen unterschiedlichen Dichtezonen .....	69
5.1.4. Klassifikation der homogenen Zonen und Genauigkeitsabschätzung ..	70
5.1.5. Bewertung der zwei methodischen Ansätze .....	71
5.2. Gebäudehöhenanalyse .....	72
5.2.1. Mathematische Grundlagen .....	72
5.2.2. Algorithmus zur automatisierten Berechnung von Gebäudehöhen in hoch verdichtetem urbanem Gebiet .....	74
5.2.3. Genauigkeitsabschätzung, Fehlerquellen und Limitierungen .....	77
5.3. Analyse von Dach- bzw. Haustypen .....	79
5.4. Ableitung von Landnutzungsklassen .....	81
5.5. Die geographische Lage als räumlicher Standortfaktor .....	82
5.6. Urbanisationsraten aus einer temporalen Änderungsdetektion .....	85
5.7. Demographische Indikatoren .....	89
5.7.1. Top-down Methode zur lokalen Distribution von Bevölkerungsdaten ...	91

5.7.2.	Bottom-up Methode zur Extrapolation punktueller Bevölkerungsdaten.	94
5.7.3.	Ergebnis und Genauigkeitsabschätzung .....	95
5.8.	Zusammenfassung und Bewertung .....	98
<b>6.</b>	<b>Kapitel – Abschätzung von Vulnerabilität .....</b>	<b>101</b>
6.1.	Vulnerabilität und der Beitrag der Fernerkundung .....	102
6.1.1.	Ableitung von Vulnerabilitätsindizes .....	104
6.1.2.	Indizierung der Indikatoren .....	105
6.1.3.	Kombination der Indikatoren .....	106
6.2.	Interdisziplinärer Ansatz mit Fernerkundung und Bauingenieurwesen .....	109
6.2.1.	Einteilung der Gebäudeklassen .....	110
6.2.2.	Die Abschätzung der Gebäudevulnerabilität .....	111
6.3.	Ergebnisse .....	114
6.4.	Szenario .....	117
6.5.	Zusammenfassung und Bewertung .....	118
<b>7.</b>	<b>Kapitel – Fazit und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
7.1.	Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung im Bereich Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzung .....	121
7.2.	Zukünftiger Forschungsbedarf .....	125
<b>8.</b>	<b>Anhang A: Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang B: Internetverzeichnis .....</b>	<b>139</b>
<b>10.</b>	<b>Anhang C: Daten .....</b>	<b>141</b>
<b>11.</b>	<b>Anhang D: Resultate der Übertragung entwickelter Methoden .....</b>	<b>145</b>
	Eidesstattliche Erklärung .....	154
	Curriculum Vitae .....	155





# Abbildungsverzeichnis

## Kapitel 1 – Einführung

Abb. 1-1:	Strukturelle Probleme in Kombination mit Naturgefahren der Megacity Istanbul	2
-----------	------------------------------------------------------------------------------	---

## Kapitel 2 – Grundlagen

Abb. 2-1:	Prognostizierte Megacities im Jahr 2015	10
Abb. 2-2:	Topographische Karte der Türkei	12
Abb. 2-3:	Das Stadtgebiet Istanbul	12
Abb. 2-4:	Bevölkerungsentwicklung in Istanbul	13
Abb. 2-5:	Erdbebenentwicklung im 20. Jahrhundert entlang der Nordanatolischen Verwerfungslinie	14
Abb. 2-6:	Räumliche Verteilung von Intensitäten eines Magnitude 7.5 Erdbebenszenarios	15
Abb. 2-7:	Das elektromagnetische Spektrum	17
Abb. 2-8:	Charakteristische Reflektionskurven von Objekten	18
Abb. 2-9:	IKONOS Daten vom 19.04.2004, Stadtteil Zeytinburnu, Istanbul, Türkei	22
Abb. 2-10:	Quickbird Daten vom 25.02.2005, Hyderabad, Indien	22
Abb. 2-11:	Ausschnitt der IKONOS-Szene von Zeytinburnu in voller Auflösung	22
Abb. 2-12:	Landsat ETM+ Aufnahme der Megacity Istanbul aus dem Jahr 2000	23
Abb. 2-12:	Digitales Geländemodell Istanbul	24
Abb. 2-13:	Rohdaten und atmosphärisch korrigiertes Bild des IKONOS Sensors	25

## Kapitel 3 – Vulnerabilität

Abb. 3-1:	3D-Merkmalraum zur Bestimmung von Vulnerabilität	31
Abb. 3-2:	Risiko als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität innerhalb des Disaster Management Zyklus	33

## Kapitel 4 – Klassifikation von Fernerkundungsdaten urbaner Räume

Abb. 4-1:	Chronologischer und systematischer Rahmen der objektorientierten Klassifikationsmethode	40
Abb. 4-2:	Segmentierungsoptimierung	41

Abb. 4-3:	Optimierter Segmentierungslevel mit typischen Formmerkmalen verschiedener Objekte	42
Abb. 4-4:	Klassifikationsmodul	43
Abb. 4-5:	Levelbasierter chronologischer top-down Klassifikationsansatz	44
Abb. 4-6:	Klassifikationsprinzip basierend auf Fuzzy Logic	46
Abb. 4-7:	Landbedeckungsklassifikation des Stadtteils Üsküdar	49
Abb. 4-8:	Transfer der Klassifikationsmethode auf den Stadtteil Zeytinburnu	51
Abb. 4-9:	Transfer der objektorientierten Klassifikationsmethode auf Quickbird Daten in Hyderabad	53
Abb. 4-10:	Hierarchischer, objektorientierter, fuzzy-logic basierter Klassifikationsbaum	55
Abb. 4-11:	Klassifikation von Landsat Daten für die Megacity Istanbul	57
Abb. 4-12:	Vergleich zur urbanen Klassifikation der MURBANDY-Studie	59

## **Kapitel 5 – Analyse des urbanen Raumes basierend auf Fernerkundungsdaten**

Abb. 5-1:	Variationen von errechneten Dichtewerten resultierend aus dem Moving-Window Ansatz innerhalb einer visuell homogenen Dichtezonen	63
Abb. 5-2:	Dreidimensionale Darstellung des Dichtefilters für Gebäudedichten für lokale Nachbarschaften und wellenförmige Übergänge durch Median-Filterung	64
Abb. 5-3:	Generierung von Grenzen mittels objektorientierter Segmentierung mit einer Vielzahl von Grenzen in Übergangsbereichen bedingt durch hohe Dichtewertdifferenzen	65
Abb. 5-4:	Grenzoptimierung zwischen homogenen Dichtezonen durch eine top-down Klassifikationsmethode	66
Abb. 5-5:	Gebäudedichte dargestellt als dreidimensionale Welle und der daraus resultierende Graph einer Beispielszeile	67
Abb. 5-6:	Wendepunkte als Differenzierungsmöglichkeit zwischen homogenen Dichtezonen	69
Abb. 5-7:	Klassifikationsergebnisse der Gebäudedichtezonen beider entwickelter Methoden	70
Abb. 5-8:	Mathematische Grundlagen zur Extrahierung von Gebäudehöhen aus Schattenlängen	73
Abb. 5-9:	Interpolationsansatz zur direkten Ableitung von Gebäudehöhenklassen	75
Abb. 5-10:	Statistische Errechnung der Gebäudehöhe	76
Abb. 5-11:	Statistische Extrapolation von direkt errechneten Gebäudehöhen	77
Abb. 5-12:	Gebäudehöhenklassen aus Schattenlänge	78
Abb. 5-13:	Levelbasierter Ansatz zur Klassifikation von Dachtypen	80
Abb. 5-14:	Typisierung von Gebäuden nach Dachfarbe und Gebäudegröße	81
Abb. 5-15:	Landnutzungsklassifikation	82
Abb. 5-16:	Räumliche Indikatoren einer urbanen Landschaft	84
Abb. 5-17:	Änderungsdetektion versiegelter Areale in Istanbul mit Landsat Daten	86
Abb. 5-18:	Temporale Entwicklung von Versieglungsraten und Urbanisationsraten in Istanbul	87
Abb. 5-19:	Absolute Urbanisationsraten zwischen 1975 und 1987	87
Abb. 5-20:	Absolute Urbanisationsraten zwischen 1987 und 2000	88
Abb. 5-21:	Schematischer Überblick zur indirekten Ableitung von Bevölkerungsdaten	90
Abb. 5-22:	Ermittlung der Gebäudefläche für homogene physische Strukturtypen	91
Abb. 5-23:	Tag- und Nachtbevölkerung in Üsküdar errechnet mittels der top-down Methode	96

**Kapitel 6 – Abschätzung von Vulnerabilität**

Abb. 6-1:	Parametrisierung von Vulnerabilitätsindikatoren für eine einheitliche Skalierung	105
Abb. 6-2:	Vulnerabilitätsabschätzung für vier Beispielsstandorte in Üsküdar	106
Abb. 6-3:	Antwortspektrum	112
Abb. 6-4:	Verschneidung der Kapazitätskurven für aus Fernerkundung ermittelten Gebäudetypen mit dem Antwortspektrum	113
Abb. 6-5:	Fragilitätskurven für den Gebäudetyp: höher 7 Stockwerke, Flachdach, vor 1980 gebaut [h-f-1]	114
Abb. 6-6:	Informationsebenen zur räumlichen Abschätzung von Vulnerabilität	116
Abb. 6-7:	Teilgebiet in Zeytinburnu zur exemplarischen Szenarioentwicklung	117

**Anhang C - Daten**

Abb. C-1:	IKONOS Daten vom 20.12.2003, Stadtviertel Üsküdar, Istanbul	141
Abb. C-2:	Räumliche Referenzierung der mittels Fragebogen erhobenen Bevölkerungsdaten in Üsküdar, Istanbul	142
Abb. C-3:	Räumliche Referenzierung der mittels Fragebogen erhobenen Bevölkerungsdaten in Zeytinburnu, Istanbul	142
Abb. C-4:	Fragebogen zur Ermittlung demographischer, sozialer und ökonomischer Daten der Bevölkerung	143

**Anhang D – Resultate der Übertragung entwickelter Methoden**

Abb. D-1:	Übertragung der objektorientierten Klassifikationsmethode auf IKONOS Daten für Padang in Indonesien	146
Abb. D-2:	Übertragung der Gebäudedichteklassifikation auf Zeytinburnu, Istanbul und das Zentrum Hyderabads	147
Abb. D-3:	Gebäudehöhenklassifikation in Üsküdar, Istanbul	148
Abb. D-4:	Dachtypenklassifikation für den Stadtteil Zeytinburnu	149
Abb. D-5:	Dachtypenklassifikation für den Stadtteil Üsküdar	149
Abb. D-6:	Landbedeckungsklassifikationen Istanbuls aus Landsat Daten der Jahre 1987 und 1975	150
Abb. D-7:	Änderungsdetektion und Urbanisationsraten in Hyderabad seit 1975	151
Abb. D-8:	Änderungsdetektion und Urbanisationsraten in Padang seit 1989	152
Abb. D-9:	Finale Fragilitätskurven für aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Gebäudetypen	153

# Tabellenverzeichnis

## Kapitel 2 – Grundlagen

Tab. 2-1:	Technischen Details der Sensoren und Datengrundlagen	21
-----------	------------------------------------------------------	----

## Kapitel 3 – Vulnerabilität

Tab. 3-1:	Konzept von Risiko, Vulnerabilität und Gefährdung	34
-----------	---------------------------------------------------	----

## Kapitel 4 – Klassifikation von Fernerkundungsdaten urbaner Räume

Tab. 4-1:	Genauigkeitsabschätzung der urbanen Klassifikation im Stadtteil Üsküdar, Istanbul	50
Tab. 4-2:	Genauigkeitsabschätzung der Übertragung der urbanen Klassifikationsmethode nach Zeytinburnu, Istanbul mit IKONOS Daten	52
Tab. 4-3:	Genauigkeitsabschätzung der Übertragung der Klassifikationsmethode auf Hyderabad, Indien	54
Tab. 4-4:	Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen	58

## Kapitel 5 – Analyse des urbanen Raumes basierend auf Fernerkundungsdaten

Tab. 5-1:	Parameter zur Klassifizierung der Gebäudedichtezonen	70
Tab. 5-2:	Genauigkeitsanalyse für die urbanen Dichtezonen und Gegenüberstellung der Methoden	71
Tab. 5-3:	Genauigkeitsanalyse der kleinräumigen Bevölkerungsverteilung mittels Methoden der Fernerkundung	97
Tab. 5-4:	Übersicht über Genauigkeit der abgeleiteten Parameter im Bezug auf die Referenzdatensätze	98

## Kapitel 6 – Abschätzung von Vulnerabilität

Tab. 6-1:	Das Potential der Fernerkundung und GIS zur Abschätzung von Risiko, Vulnerabilität und Gefährdung	103
Tab. 6-2:	Kombination der parametrisierten Vulnerabilitätsindizes von vier Beispielsstandorten	108
Tab. 6-3:	Gebäudehöhenklassen	110
Tab. 6-4:	Probabilistische Abschätzung des Konstruktionstyps über den Dachtyp	111
Tab. 6-5:	Informationsübersicht für ein Erdbebenszenario in einem Beispielsgebiet	117
Tab. 6-5:	Informationsübersicht zur Lage des Beispielsgebietes	118

## Anhang D

Tab. D-1:	Genauigkeitsabschätzung der urbanen Klassifikation Padang, Indonesien	145
Tab. D-2:	Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen in Hyderabad	153
Tab. D-3:	Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen in Padang	153

# Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ARES	Airborne Reflective Emissive Spectrometer
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATC	Applied Technology Council
ATCOR	Atmospheric Correction (Software Product)
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DGM	Digitales Gelände Modell
DKKV	Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V.
DRI	Disaster Risk Index
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GITEWS	Deutsch-Indonesisches Tsunami Frühwarnsystem (Projekt)
GDP	Gross domestic product (Bruttoinlandsprodukt)
HAZUS	Hazards United States (Software Tool)
HPI	Human Poverty Index
HyMap	Hyperspectral Mapper
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
ISDR	International Strategy for Disaster Reduction
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KSM	Kapazitätsspektrummethode
LIDAR	Light Detection And Ranging
MOLAND	Monitoring Land Use / Cover Dynamics (Projekt)
MODTRAN	MODERate resolution atmospheric TRANsmission
MSS	Multispektral Scanner
MURBANDY	Monitoring Urban Dynamics (Projekt)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NRSA	National Remote Sensing Agency of India
RET	Reserve Energy Technique
SAR	Synthetic Aperture Radar
SPCA	Selective Principal Components Analysis
SPOT	System Probatoire d'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TM	Thematic Mapper
UN	United Nations
UNDP	United Nations Development Programme
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator



# Kapitel 1

## Einführung

Innerhalb von fünfzig Jahren ist die Istanbuler Bevölkerung von einer Million auf zehn Millionen angewachsen. Die Stadt hat jetzt entlegene, seltsame Viertel, in denen ich nie war, ja, deren Namen in der Zeitung gelesen, mir kaum etwas sagen (PAMUK, 2007).

Im Jahre 2000 lebten 2,9 Milliarden Menschen in Städten und man erwartet einen Anstieg auf 5 Milliarden bis 2030. 1950 waren 30 % der Weltbevölkerung in urbanen Räumen ansässig, seit 2007 sind es zum ersten Mal mehr als die Hälfte und 2030 prognostizierte 61 % (UN, 2003). Es wird erwartet, dass fast die komplette Zunahme der Weltbevölkerung bis 2030 von urbanen Räumen der Entwicklungsländer absorbiert wird (UN, 2001). Diese gewaltige Dimension des urbanen Wachstums macht die Urbanisierung zu einer der zentralen Herausforderungen der Menschheit und ist ein elementarer Teil des globalen Wandels.

Urbanisierung ist per se allerdings noch kein Problem. Es wird erst dann zum Problem, wenn es nicht gelingt, die bauliche Entwicklung zu steuern, die notwendigen öffentlichen Infrastrukturen (Strom, Trinkwasser, Abfallentsorgung, Schulen, Krankenhäuser, usw.) zu finanzieren und die sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Metropolisierung in einem verträglichen Rahmen zu halten (KEINER & SCHMID, 2003). Die explosive Dynamik und das dramatische Ausmaß der Urbanisierung überfordern aber oftmals nachhaltige Entwicklungsstrategien in urbanen Räumen. Nicht zuletzt verhindert fehlendes räumliches Wissen über Zuwachs konkrete Maßnahmen und bedingt ausuferndes, ungeplantes und damit unkontrolliertes Flächenwachstum. Vor allem Megacities zeigen Trends und Dimensionen der Urbanisierung, deren regionale und globale Folgen noch kaum vorhersehbar sind, und erst ansatzweise erforscht sind (HEINRICHS & KABISCH, 2006). Die enorme räumliche Konzentration von Menschen, Werten und Infrastruktur auf engem Raum ist für diese urbanen Räume die Grundlage einer hohen Verwundbarkeit (Vulnerabilität).

Die Dynamik der flächenhaften Entwicklungen beschert Stadtverwaltungen oftmals eine veraltete bzw. eine nicht vorhandene Datengrundlage, um überhaupt über Entwicklungen, Trends und Dimensionen des urbanen Wachstums informiert zu sein. Vor diesem Hintergrund stellt

die satellitengestützte Erdbeobachtung ein essentielles, flächendeckendes und vor allem aktuelles Instrumentarium zur Gewinnung von Informationen in urbanen Räumen dar. Moderne Sensorsysteme sind in der Lage, weltweit flächendeckend und vergleichsweise kostengünstig, raumbezogene Informationen in kurzen Zeitintervallen und mit hohem räumlichen Detaillierungsgrad zu erheben (DECH, 1997).

Diese Datenquelle ist ein entscheidender Baustein zum Aufbau einer umfangreichen und aktuellen Informationsbasis, und für nachhaltige Planungsprozesse und -entscheidungen im Stadtmanagement essentiell. Gerade im Kontext von Naturgefahren potenzieren sich die entstehenden strukturellen Gefahren der städtischen Lebensräume. So liegt ein Großteil heutiger Megacities im Einzugsbereich von Naturgefahren, wie Erdbeben, Überflutungen, Vulkanausbrüchen, Hangrutschungen, Stürmen oder Flächenbränden (MITCHELL, 1999). Das Problem allerdings, Erdbeben mit genügend Vorlaufzeit zu prognostizieren, ist noch ungelöst ist. Deshalb ist die Abschätzung von Vulnerabilität im Vorfeld prognostizierter Katastrophen das zentrale Element, um besonders gefährdete Gebiete zu lokalisieren und gezielt Gegenmaßnahmen zur Minimierung des Risikos durchführen zu können (ZSCHAU ET AL., 2002).

Diese Arbeit ist im Schnittpunkt der Themenfelder Fernerkundung, urbane Räume und Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen angesiedelt. Schon dieser Hintergrund zeigt einen Paradigmenwechsel innerhalb der Wissenschaft von isolierter Forschung einzelner Disziplinen hin zu interdisziplinärer und ganzheitlicher Problembetrachtung.

## 1.1. Motivation

Am 17. August 1999 kam es in den Provinzen Kocaeli und Sarkarya 120 km südöstlich von der Megacity Istanbul in der Türkei zu einem Erdbeben der Magnitude 7.4 auf der Richterskala. Über 18000 Tote, 49000 Verletzte, 16400 zerstörte Gebäude und 600000 Menschen ohne Obdach zeigen das Ausmaß der Katastrophe (ERDIK, 2001). Trotz der räumlichen Distanz waren auch Gebäude und Verkehrsinfrastrukturen Istanbuls in hohem Maße betroffen. Vor dem Hintergrund einer 35-70% Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens größer Magnitude 7 für die nächsten 30 Jahre an der Nordanatolischen Verwerfungslinie, die etwa 15 km südlich von Istanbul durch die Marmara See verläuft (PARSONS, 2004), zeigt sich das Gefahrenpotential der Megacity.



a) hohe Gebäudedichte

b) Besiedlung ungeeigneter Lagen

c) Erdbebenschäden, Istanbul 1999

Abb.1-1: Strukturelle Probleme in Kombination mit Naturgefahren der Megacity Istanbul

Abbildung 1-1 zeigt chronologisch konkrete strukturelle Probleme und schließlich Resultate der Urbanisierung in Istanbul. Der immense Bevölkerungsdruck bedingt das ausufernde Flä



chenwachstum und mündet zum einen in ein unüberschaubares Häusermeer (Abb. 1-1a) und zum anderen in die unkontrollierte Besiedlung hoch gefährdeter ungeeigneter Hanglagen (Abb. 1-1b). Das Risiko für die Bewohner spiegeln die Erdbebenschäden in Istanbul im Jahre 1999 drastisch wider (Abb. 1-1c).

Nicht nur das Beispiel Istanbul, sondern die weltweit dramatisch voranschreitende Urbanisierung in exponierten Risikogebieten für Naturgefahren zeigt die im Zuge dynamischer Veränderungen wachsende Vulnerabilität und damit das wachsende Risiko urbaner Räume. Als Beispiele seien hier verheerenden Auswirkungen in urbanen Räumen in jüngster Vergangenheit aufgeführt. Dazu zählen die Erdbeben in Mexiko City, 1985, in Los Angeles, USA 1994, in Kobe, Japan 1995, die Hangrutschung in Manila, Philippinen 2000 oder der Hurrikan Katrina in New Orleans, USA 2005.

Dies bedingt die Verwendung neuer Datenquellen und die Entwicklung neuer Methoden zur Bereitstellung einer aktuellen Informationsbasis in einer sich immer dynamischer verändernden Welt. Die Schaffung einer aktuellen Informationsbasis ist die zentrale Grundlage, um Fragen nach dem ‚wo‘, und dem ‚wie viel‘, zu beantworten und bereits im Vorfeld einer Katastrophe Gefahrenherde zu lokalisieren. Gerade Fernerkundung stellt diesbezüglich eine flächendeckende und aktuelle Alternative zu konventionellen Datenerhebungsmethoden dar. Mittels satellitengestützter Erdbeobachtung lassen sich stadtbezogene Informationen mit hoher räumlicher und zeitlicher Abdeckung ableiten und zur Detektion und Überwachung urbaner Entwicklung entscheidend beitragen.

Die Datenbasis in eine objektive Interpretation und Bewertung der Information zu transformieren, ist der zentrale Baustein, um nachhaltige Steuerung und Planung zu ermöglichen. Die Abschätzung der Vulnerabilität im Bezug auf eine Naturgefahr ist ein Beispiel solch einer Transformation. Diese Informationen schulen nicht nur das öffentliche Bewusstsein, sondern dienen Entscheidungsträgern dazu, gezielt präventive Maßnahmen zu implementieren. Nicht zuletzt dient diese räumliche Informationsbasis auch im Katastrophenfall als Grundlage für schnelle und substantielle Entscheidungen, Strategieentwicklung und Koordination von Hilfsmaßnahmen.

(...) vulnerability assessment is diagnostic. It identifies who is at risk, from what and in what location. It tends towards the next stage which concerns protective planning and embraces both preparedness and mitigation measures (DAVIS, 1994).

## 1.2. Stand der Forschung

Die vorliegende Arbeit befindet sich im Schnittpunkt der Themenfelder Fernerkundung, urbane Räume sowie Risiko- und Vulnerabilität. Die wissenschaftliche Literatur behandelt die separaten Themenfelder, interdisziplinäre Studien sind dagegen nur spärlich vorhanden. So versucht der folgende Abschnitt den Stand der Forschung jedes Themengebietes aufzuzeigen, und dabei erste interdisziplinäre Studien zu rekapitulieren.

Die Erfassung und Zustandsüberwachung von Siedlungsgebieten hat sich bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts mittels Luftbildauswertungen etabliert (HENDERSON & XIA, 1998). Jedoch weisen DONNAY ET AL. (2001) darauf hin, dass sich mit dem Aufkommen erster ziviler Erdbeobachtungssatelliten in den 1970er Jahren der Fokus der urbanen Fernerkundung auf

satellitengestützte Sensoren verlagert. Der Trend begründet sich vor allem in der großen räumlichen Abdeckung, der Aktualität und Kosteneffizienz.

Multispektralsysteme wie Landsat (USGS, 2007) seit 1972, SPOT (SPOT IMAGE, 2007) seit 1986, IRS (NRSA, 2007) seit 1988 oder ASTER (JPL, 2007) seit 1999 ermöglichen mit Bodenaufösungen von 2,5 bis 120 Metern mit hoher räumlicher Abdeckung die Analyse großräumiger urbaner Strukturen und temporalen Änderungen. So zeigen Studien das Potential temporalen urbaner Änderungsanalysen beispielsweise auf der Basis von Landsat Zeitreihen (MASEK ET AL., 2000; KWARTENG & CHAVEZ, 1998). Resultate sind die Detektion von Änderungen versiegelter Flächen, von Grünflächen (PHINN, 2002) oder die Korrelation von Bebauungsgrad und Bevölkerungsdichte (LO, 2001).

Die neueste Generation kommerzieller optischer Satellitensysteme ermöglicht seit etwa 1999 mit den Sensoren SPOT 5 (SPOT IMAGE, 2007), IKONOS (SPACE IMAGING, 2007), Quickbird (GEOEYE, 2007), Worldview I (DIGITAL GLOBE, 2007) und ab voraussichtlich 2008 WorldView II (DIGITAL GLOBE, 2007) die geometrisch hochgenaue Abbildung der Erdoberfläche, und läutet für den kleinräumigen heterogenen urbanen Raum eine neue Ära ein. Mit einer geometrischen Auflösung von aktuell bis zu 61cm, und mit WorldView I und II schließlich 50cm, erschließen diese Plattformen ein umfangreiches Anwendungsspektrum für den urbanen Raum (DONNAY ET AL., 2001).

Ansätze zur automatisierten Analyse digitaler Erdbeobachtungsdaten setzen traditionell auf pixelbasierten statistischen Klassifikationsmethoden auf (BAUER & STEINNOCHER, 2001). Mit dem Anstieg der geometrischen Auflösung steigt aber auch die interne Variabilität der spektralen Information eines Objektes. Eine effektive Extrahierung städtischer Informationen braucht daher eine komplexere Strategie als traditionelle pixelbasierte Klassifikationsansätze (MAKTAV & ERBEK, 2005; VAN DER SANDE 2003). Unter dieser Prämisse rücken objektorientierte Klassifikationsansätze zunehmend in den Vordergrund (BLASCHKE ET AL., 2000; HOFMANN, 2001). Im Vergleich zur isolierten spektralen Analyse singulärer Pixel ermöglicht der objektorientierte Ansatz, durch die Gruppierung spektral ähnlicher und benachbarter Pixel zu aussagekräftigen Segmenten (MEINEL & NEUBERT, 2004; SCHIEWE, 2002), eine Erweiterung der Funktionalität zur Klassifikation. Im Idealfall repräsentieren diese Segmente reale urbane Objekte und bieten daher zur Klassifikation nicht nur spektrale, sondern zusätzlich formbezogene, nachbarschafts- und kontextbezogene Charakteristika (BAATZ & SCHÄPE, 2000; BENZ ET AL., 2004; ESCH, 2006). Basierend auf Klassifikationsprodukten ergeben sich Analysepotentiale des urbanen Raumes.

Die Analyse urbaner Räume hat eine lange Historie, beginnend mit deskriptiven Stadtmodellen als Möglichkeit, Städte zu charakterisieren (BURGESS, 1923; HOYT 1939; HARRIS & ULLMANN, 1945). HOFMEISTER (2004) rekapituliert die vielfältigen Ansätze zur Beschreibung des urbanen Raumes. Entscheidend zur Beschreibung urbaner Struktur sind so genannte „spatial metrics“ (ANAS ET AL., 1998). Mittels Indizes werden Strukturen und Muster des urbanen Raumes quantifiziert (BARNESLEY & BARR, 1997; PARKER ET AL., 2001). Die Charakterisierung der urbanen Morphologie ist dabei von Quantität und relativer Lage dreier physischer Merkmale definiert: Gebäude, Freiflächen und Verkehrsinfrastruktur (MOUDON, 1997). Dabei spielen der Betrachtungsmaßstab und die zeitliche Entwicklung eine entscheidende Rolle. Bis heute haben allerdings nur wenige Ansätze die Datengrundlagen, neuen Methoden und Resultate der Fernerkundung für die mathematische Analyse des urbanen Raumes integriert (HEROLD ET AL., 2003). BATTY & HOWES (2001) heben in diesem Zusammenhang das

Potential der Fernerkundung mit seinem „unique view“ auf räumliche und temporale Zusammenhänge hervor.

Fernerkundliche Studien zur Ableitung stadtstruktureller Merkmale zielen auf die räumliche Anordnung der Landbedeckung (HEROLD, 2002a), auf Vegetationsanteile und Bruchstückgrößen der Vegetation (SMALL, 2003; SMALL, 2007), oder schließen über die Landbedeckung auf die Landnutzung (MESEV ET AL., 2000). Eine Korrelation physischer Strukturen von Städten mit sozioökonomischen Parametern der Bevölkerung (HOFFMEYER-ZLOYTNIK, 2000; WLODDARZEK, 2005) ermöglicht der Fernerkundung, indirekte Ableitungen durchzuführen. Fernerkundliche Studien stellen dafür einen linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Häuser und der Bevölkerungsverteilung her (BAUDOT, 2000; BJORGO, 2000).

Heutige Megacities, also Städte mit, je nach Definition, mehr als 5, 8 oder 10 Millionen Einwohnern (KRAAS, 2007), rücken im urbanen Forschungsfeld durch ihren globalen Stellenwert immer mehr in den Fokus (HEINRICHS & KABISCH, 2006; MÜNCHNER RÜCK 2005). Die enorme Dimension und Dynamik der Megacities bedingt neue Datenquellen und Strategien für nachhaltige Entwicklungen (KELLY 1995; KÖTTER, 2004). Gerade im Hinblick auf Naturgefahren sind Megacities durch die enorme Konzentration von Menschen, die Infrastruktur und Wirtschaftskraft besonders anfällig (HORLICK-JONES, 1995; PARKER, 1995; UITTO, 1998). Im Bezug darauf beschreibt MITCHELL (1999) urbane Katastrophen in direkter Abhängigkeit von ihrer Vulnerabilität, und zugleich als Funktion von ständigem sozioökonomischem und physischem Wechsel der urbanen Landschaft.

Im konkreten Fall der Megacity Istanbul zeigen Studien stadtstrukturelle Merkmale und Veränderungen (CIRACI & KUNDAK, 2000; DÖKMECI & BERKÖZ, 1994), wie beispielsweise die unkontrollierte Flächenexpansion (MARTIN & FROSCHAUER, 1998), sowie die Überwachung des Großraumes, unter anderem mit mittel aufgelösten Fernerkundungsdaten (MAKTAV & ERBEK, 2005; RADBERGER 2001). Innerhalb des MOLAND/MURBANDY Projektes stehen die Detektion raumzeitlicher Veränderungen mit Fernerkundungsdaten, das Verstehen urbaner Dynamik und die daraus resultierende Zukunftsperspektiven für den urbanen Raum Istanbul im Vordergrund (ALTAN ET AL., 2001). Die Erfassung der Dynamik und Veränderung Istanbuls ist vor dem Hintergrund der enormen Erdbebengefahr (ERDIK, 2002; PARSONS, 2004) von zentraler Bedeutung.

Im Bereich Naturgefahren trat in der Forschung ein Paradigmenwechsel von der Quantifizierung und Analyse der Naturgefahr (LEWIS, 1999) hin zur Identifizierung und Abschätzung von Vulnerabilität ein. Vulnerabilität beinhaltet multidimensionale Perspektiven und bedient dadurch ein weit angelegtes Forschungsfeld. Zum einen beziehen sich Studien zu Vulnerabilität auf konkrete Naturgefahren (GREEN, 2004; IPCC, 2001; RASHED & WEEKS, 2003a) zum anderen werden Teilaspekte der Vulnerabilität, wie die physische Gefährdung (AYDINOGLU & ERDIK, 2002; CORREIRA ET AL., 1987; GULKAN & SOZEN, 1999) oder sozioökonomische Komponenten (CANNON ET AL., 2003; CUTTER ET AL., 2003; BOHLE, 2001) thematisiert. Aus inhaltlicher Perspektive mit geographischem Bezug wird ganzheitlich auf abgeschlossene Systeme, wie beispielsweise Städte (DAVIDSON, 1997; PELLING, 2003; QUANRANTELLI, 1991) basierend auf Indikatorensystemen (ZENEK, 2002) fokussiert. In jüngster Zeit systematisieren Studien die verschiedenen Perspektiven (FÜSSEL, 2005) und zielen auf ein multidisziplinäres und ganzheitliches Konzept zur Vereinheitlichung von Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzung (ALWANG ET AL., 2001; BIRKMANN 2006; CARDONA, 2004; UN/ISDR, 2004). So verlinkt BLAIKIE ET AL. (1994) Vulnerabilität generell mit 3 allgemeinen Aspekten: Grundursachen, Belastung und unsichere

Bedingungen des Systems. Die Notwendigkeit, Vulnerabilitätsindikatoren mittels einheitlicher Skalierung relativ zu einander vergleichbar zu machen, führt zu multiskaligen Indexansätzen (PEDUZZI, 2006; PELLING, 2006; UNDP, 2004).

Ein erster Ansatz, Fernerkundung in die Abschätzung von Vulnerabilität zu integrieren, ist mit mittel aufgelösten Landsat Daten durchgeführt (RASHED, 2003b). Auf operationeller Basis im Post-Katastrophenfall zeigen VOIGT ET AL. (2007) den Nutzen multiskaliger Satellitendaten als aktuelle Informationsbasis zur Unterstützung von Entscheidungsträgern.

### 1.3. Zielsetzung und Aufbau

Der Blick auf den bisherigen Stand der Forschung hat gezeigt, dass die verschiedenen für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen Themenfelder ihre spezifischen Fragestellungen überwiegend isoliert betrachten. Diese Dissertation versucht in diesem thematischen Schnittfeld den interdisziplinären Rahmen synergetisch zu vereinen.

*Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist daher die Analyse von Potentialen der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko bzw. Vulnerabilität in urbanen Räumen im Falle eines Erdbebens.*

Im Hinblick auf die explosiven Urbanisierungstendenzen und die sich strukturell dynamisch verändernden städtischen Lebensräume, ist die Etablierung eines fernerkundungsbasierten Sektors von großem Interesse. Eine operationelle Bereitstellung aktueller und planungsrelevanter Geoinformation ist für das Krisen- und Risikomanagement essentiell. Die Nutzung neuester Erdbeobachtungsdaten und die entsprechende Entwicklung neuer automatisierter Verfahren zu deren Analyse sind dafür Voraussetzung. Im Vergleich zu bisherigen, überwiegend regionalen Studien, fokussiert diese Arbeit auf die Notwendigkeit, komplexe, kleinräumige Objekte und Strukturen urbaner Räume geometrisch hoch detailliert zu erfassen und zu analysieren.

Den zielgebenden übergeordneten Leitfaden stellt dafür die Konzeptualisierung von Risiko- und Vulnerabilität mittels eines Indikatorensystems dar. Anhand dieses Leitfadens steht die dementsprechend zielgerichtete Entwicklung automatisierter Verfahren zur Ableitung von Indikatoren aus Fernerkundungsdaten im Fokus. Der methodisch orientierte Teil zielt auf ein praxisrelevantes Produkt zur Unterstützung von Entscheidungen im Vorfeld von zu erwartenden Naturkatastrophen.

Rekapitulierend stehen mit Blick auf den urbanen Raum folgende übergeordnete Fragen im Mittelpunkt dieser Arbeit:

- Wie lässt sich die Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko konzeptualisieren?
- Welche fernerkundlichen Datensätze ermöglichen die Ableitung von Vulnerabilitätsindikatoren?
- Mit welchen Methoden und mit welcher Güte lassen sich entsprechende Informationen automatisiert extrahieren?
- Wo sind die Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung im Bereich Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzungen?

- Welches Produkt bietet der Praxis, respektive den Entscheidungsträgern, einen entscheidenden Mehrwert an Information?

Zur Beantwortung der zentralen, übergeordneten Fragestellungen dieser Arbeit werden Grundlagen, Konzepte, Methoden, Resultate und Bewertungen in folgendem strukturellem Aufbau umgesetzt. Dabei werden die übergeordneten Fragestellungen auch im Detail näher beleuchtet:

**Kapitel 2** thematisiert zum einen urbane Räume und Naturgefahren. Der Fokus liegt dabei auf den strukturellen Gefahren, die von zu dynamischer, unkontrollierter Urbanisierung ausgehen. Im Zusammenspiel mit Naturgefahren, wie beispielsweise einem Erdbeben, potenziert sich die Vulnerabilität dieses Raumes und damit das Risiko für die Bevölkerung. Speziell wird das Hauptuntersuchungsgebiet, die Megacity Istanbul in der Türkei vorgestellt. Des Weiteren werden die urbanen Räume Hyderabad, Indien, eine Megacity von morgen, sowie Padang in Indonesien, eine dynamisch wachsende Submillionenstadt vorgestellt. Deren urbanmorphologische Unterschiede zu Istanbul sind für eine Übertragung im Zuge dieser Arbeit entwickelter Methoden interessant.

Zum anderen wird das Prinzip der optischen Fernerkundung als Grundlage kurz rekapituliert. Zudem werden die Datengrundlagen, respektive höchst und mittel aufgelöste optische Satellitendaten, ein digitales Höhenmodell aus Radardaten, sowie Referenzdatensätze aus Stadtverwaltungen, Geländebegehungen sowie anderen Studien vorgestellt. Schließlich stellt die Vorprozessierung der Datensätze die Ausgangsbasis für die fernerkundlichen Analysen im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

**Kapitel 3** erarbeitet mit dem konzeptionellen Rahmen den ersten Schwerpunkt und zugleich thematischen Leitfaden dieser Arbeit. Aus der Literatur wird die Definition des vielschichtigen Begriffs „Vulnerabilität“ abgeleitet. Im Folgenden wird Vulnerabilität als konzeptionelle Idee begriffen und erörtert und in das Gesamtkonzept von Risiko, Vulnerabilität und Gefahr implementiert. Speziell für das Untersuchungsgebiet „urbaner Raum“ wird ein ganzheitliches Indikatorensystem entwickelt, um anhand dieses Leitfadens Potentiale aber auch Limitierungen der Fernerkundung ableiten zu können.

Ein zweiter, stärker methodisch geprägter Schwerpunkt dieser Dissertation beginnt mit **Kapitel 4**. Dieses präsentiert Methoden zur objektorientierten Klassifikation höchst und mittel aufgelöster optischer Fernerkundungsdaten, mit den Sensoren IKONOS, Quickbird und Landsat. Der modulare Ansatz ist in die Software eCognition (DEFINIENS, 2007) implementiert und zielt auf hohe Genauigkeiten der automatisierten Methode sowie einfache semi-automatische Übertragbarkeit auf andere Datensätze und andere urbane Räume. Die Klassifikationsergebnisse stellen die hoch detaillierte Informationsbasis zur Erfassung der kleinräumigen Landbedeckung im komplexen urbanen Raum und dienen als Grundlage zur Ableitung urbaner Indikatoren zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität.

**Kapitel 5** entwickelt Methoden zur Analyse des urbanen Raumes aus Fernerkundungsdaten. Basierend auf den Klassifikationsresultaten aus Kapitel 4 wird der urbane Raum mittels Standortfaktoren wie Gebäudeparameter, Freiflächenanalysen, temporalen Analysen sowie demographischen Parametern charakterisiert und quantifiziert. Mittels Geoinformationssystemen werden räumliche Distanzparameter zur Verkehrsinfrastruktur oder die Analyse der Geländeoberflächen aus einem digitalen Höhenmodell zur Strukturierung des Raumes errechnet.

Die abgeleiteten Parameter beziehen sich direkt auf Indikatoren aus dem konzeptionellen Leitfaden zur Risiko- und Vulnerabilitätsanalyse in Kapitel 3.

**Kapitel 6** schließlich führt den thematischen Leitfaden aus Kapitel 3 mit den methodisch dominierten Schwerpunkten aus den Kapiteln 4 und 5 zusammen. Zu diesem Zweck werden die erzeugten Informationsebenen aus Fernerkundungsdaten in das Risiko- und Vulnerabilitätskonzept implementiert. Dadurch kristallisiert sich das Leistungsvermögen der Fernerkundung für das ganzheitliche Konzept heraus. Des Weiteren wird eine Methode zur Kombination der unterschiedlichen Indikatoren präsentiert, die diese auf eine einheitliche Skala (Vulnerabilitätsindex) normiert. Das Ergebnis ist eine relative raumzeitliche Vulnerabilitätsabschätzung aus Fernerkundungsdaten im urbanen Raum.

Zudem wird eine Methode zur interdisziplinären Nutzung der Forschungszweige Fernerkundung und Bauingenieurwesen präsentiert. Durch eine synergetische Methode wird die Gebäudevulnerabilität bzw. Stabilität flächendeckend errechnet bzw. abgeschätzt. Zusammenfassend münden alle Ergebnisse in ein exemplarisches Szenario. Darin zeigt sich das Potential präsentierter Methoden zur substantiellen Unterstützung von Vulnerabilitäts- und Krisenmanagement bei Entscheidungsprozessen mit hoch genauen quantitativen und räumlich verlinkten Informationen.

**Kapitel 7** fasst die Ergebnisse zusammen und bewertet das Potential sowie die Limitierungen der Fernerkundung im Hinblick auf Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzungen im urbanen Raum. Aus diesen Erkenntnissen leitet sich schließlich im Ausblick der zukünftige Forschungsbedarf ab.

# Kapitel 2

## Grundlagen

Das folgende Kapitel legt die Einbettung in den thematischen Kontext dar und erläutert die Untersuchungsgebiete. Im inhaltlichen Mittelpunkt dieser Arbeit stehen urbane Räume im Hinblick auf ihre Vulnerabilität im Falle einer Naturkatastrophe. Den geographischen Fokus bildet die erdbebengefährdete Megacity Istanbul in der Türkei. Zur Prüfung auf Übertragbarkeit der fernerkundlichen Ansätze werden zwei weitere urbane Räume thematisiert: Eine Megacity von Morgen, die 6 Millionenmetropole Hyderabad in Indien, deren explosives Wachstum Stadtplanung und Versorgung vor eine große Herausforderung stellen. Und schließlich wird eine ebenso explosiv wachsende Sub-Millionenstadt mit Padang in Indonesien vorgestellt, die eine hohe Erbeben- und Tsunamigefährdung aufweist.

Zusätzlich werden die Grundlagen der Erdbeobachtung und das Prinzip der Fernerkundung, die für diese Arbeit von Bedeutung sind, erläutert. Im Anschluss werden die verschiedenen Datengrundlagen vorgestellt. In diesem Kontext wird die Vorprozessierung der Daten erläutert, die die Ausgangsbasis für die entwickelten Techniken dieser Arbeit stellen.

### 2.1. Urbane Räume und Naturgefahren

„The third millennium will be urban“ (DONNAY ET AL., 2001)

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt bereits in Städten, und die Tendenz ist weiter steigend. Nach Prognosen der Vereinten Nationen (UN, 2003) werden sich mehr als 90 % künftigen Bevölkerungswachstums in urbanen Räumen konzentrieren. Vor allem in Megacities birgt die gewaltige Dimension quantitativen Wachstums, die hohe Konzentration von Menschen, die Infrastruktur und Wirtschaftskraft, aber auch die Gleichzeitigkeit, Komplexität und Überlagerung verschiedenster Prozesse ein unabschätzbares Risiko.

Der Begriff ‚Megacity‘ bezeichnet im Allgemeinen die größte Kategorie urbaner Agglomerationen, wobei in der Literatur verschiedene Definitionen verwendet werden. In quantitativer

Hinsicht definieren sich Megacities als Ballungsräume mit mehr als 10 Millionen Einwohner (UN, 2003; MERTINS, 1992). Gegenwärtig gibt es danach 22 Megacities, wobei sich 18 in Entwicklungsländern befinden (MÜNCHNER RÜCK, 2005). Andere Autoren definieren Megacities schon ab 5 Millionen (BRONGER, 1996) bzw. 8 Millionen (CHEN ET AL., 1994; FUCHS, 1994) Einwohnern. Qualitativ zeichnen sich Megacities durch eine hohe Bevölkerungskonzentration und -dichte, durch eine hohe Dichte an Industrie sowie an sozialer-, technischer- und Verkehrsinfrastruktur, durch extreme, größtenteils unkontrollierte Flächenexpansion, durch hohe Verkehrsbelastung, durch teils gravierende infrastrukturelle Defizite, durch ökologische Überlastungserscheinungen, durch die Konzentration von Kapital und Macht, durch die Dynamik raumzeitlicher Veränderungen und durch das Nebeneinander sozioökonomischer Disparitäten aus (KÖTTER, 2004; KRAAS, 2003). Die Überdimensionalität bedingt eine hohe Dynamik aller demographischen, sozialen, politischen, wirtschaftlichen und ökologischen Prozesse, welche Steuerung, Strategieentwicklung und Planung erschweren. Dadurch bietet diese Überdimensionalität von Megacities einerseits enorme Chancen im überregionalen und globalen Kontext, andererseits bereitet sie auch ein erhöhtes Gefahrenpotential. Zu den stadtstrukturellen Gefahren dieser Ballungsräume kommt hinzu, dass viele in Gebieten erhöhter Naturgefahren liegen.

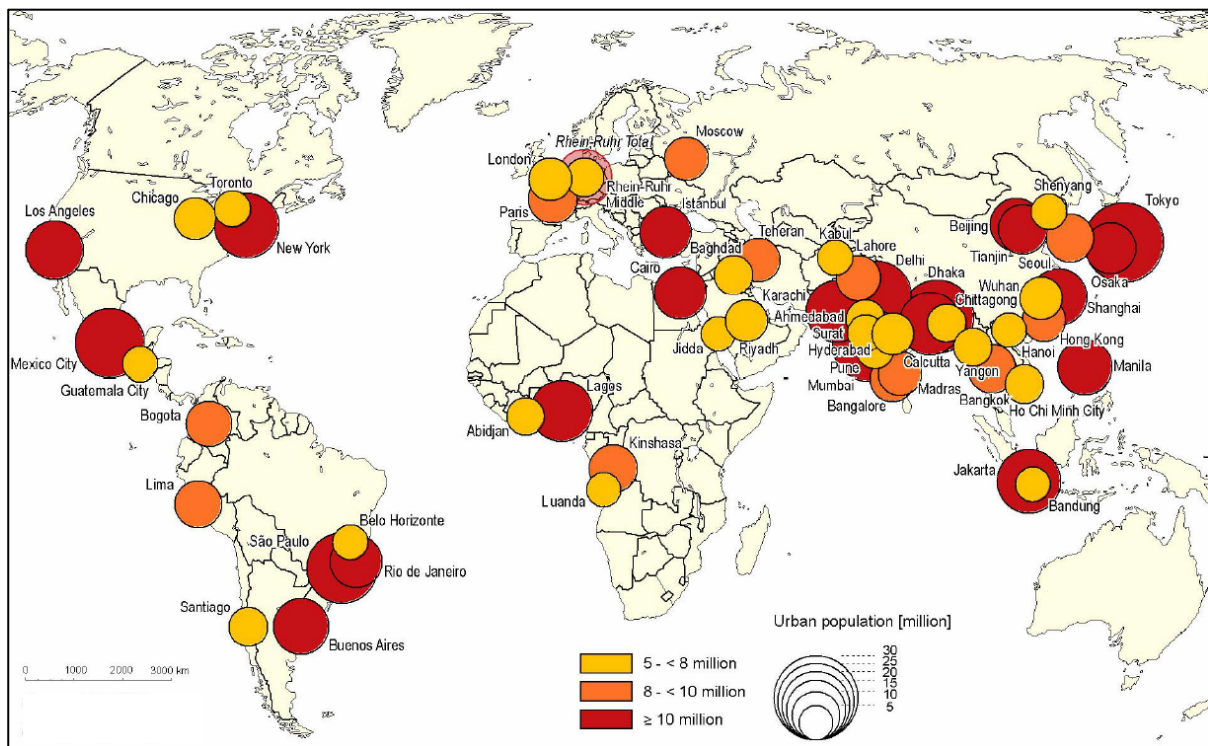


Abb. 2-1: Prognostizierte Megacities im Jahre 2015 (nach UN, 2003)

Naturgefahren definieren sich als die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses innerhalb einer bestimmten zeitlichen Periode an einem bestimmten Ort einzutreten. Dabei stellen sie ein Phänomen einer bestimmten Intensität dar, das eine zerstörende Wirkung auf seine Umwelt besitzt (UNESCO, 1973). Neben der Erdbebengefahr (z. B. Istanbul, Jarkarta, Los Angeles, Mexiko City, Tokio) gefährden insbesondere Hangrutschungen (z. B. Caracas, Hong Kong, Rio de Janeiro), Überschwemmungen (z. B. Dhaka, Mumbai, Seoul), Tsunamis (Jarkarta,



Tokio, Mumbai), tropische Stürme (Manila, Taipeh, Shanghai) oder Vulkanausbrüche (Mexico City) die Megacityregionen (MITCHELL, 1999). Abbildung 2-1 zeigt die weltweite räumliche Verteilung prognostizierte Megacities für das Jahr 2015. Die meisten Megacities liegen dabei in Entwicklungsländern, wobei der Schwerpunkt in Asien liegt.

Weniger im Fokus stehen dagegen ‚kleinere‘ Städte, deren Wachstumsraten aber so hoch sind, dass sie nicht nur in absehbarer Zeit zu Millionenstädten oder sogar Megacities werden, sondern sich durch ihre ungeheure Dynamik weitgehend einer Planung oder Steuerung entziehen. Diese Sub-Megacities oder auch Submillionenstädte werden von HALL & PFEIFFER (2000) als ‚Cities of hypergrowth‘ bezeichnet, deren Merkmale – neben der Wachstumsdynamik – aus der Abhängigkeit der Wirtschaft vom informellen Sektor, weit verbreiteter Armut, spontaner und illegaler Besiedlung, Umwelt- und Gesundheitsproblemen sowie der Unfähigkeit der Behörden Wachstum zu begrenzen oder zu lenken, bestehen.

### **2.1.1. Untersuchungsgebiet Megacity Istanbul**

Nur wenige Städte können auf eine ähnlich lange und bewegte Geschichte wie Istanbul zurückblicken. Als griechische Kolonie 660 v. Chr. gegründet, hieß die Metropole bis 1930 Konstantinopel. Der strategisch günstigen geographischen Lage an der Meerenge, die gleichzeitig die Schlüsselstellung der Landverbindung zwischen Europa und Asien sowie des Seewegs von der Ägäis ins Schwarze Meer ist, verdankt die Stadt ihren Aufstieg zu einer Handelsmetropole. Unter römischer Herrschaft stieg die Stadt auf Grund der wachsenden Bedeutung der Osthälfte des Reiches 330 n. Chr. zur Hauptstadt auf. Im Mittelalter gilt Konstantinopel als einzige Weltstadt Europas. Im Vergleich zur heutigen Definition von Megacities reicht alleine eine große Bevölkerungszahl dabei nicht zur Bezeichnung „Weltstadt“ aus, sondern beruht auf einer überragenden globalen Bedeutung im politischen, wirtschaftlichen und/oder kulturellen Sinne (HALL, 1966). Auch nach der osmanischen Eroberung 1453 blieb Konstantinopel Hauptstadt und verlor diesen Status erst 1923 an Ankara. Istanbul jedoch behielt seine kulturelle und wirtschaftliche Bedeutung. Die wirtschaftliche Bedeutung heute zeigt sich darin, dass 21,3 % des Bruttoinlandsproduktes der Türkei in Istanbul erwirtschaftet werden (TURKSTAT, 2007).

Die Provinz Istanbul liegt im äußersten Nordwesten der Türkei, im sogenannten Marmaragebiet (Abb. 2-2). Die Stadt Istanbul liegt etwa bei 42° nördlicher Breite und 28,5° östlicher Länge zu beiden Seiten des Bosphorus. Die südliche Grenze markiert die Marmara See, die nördliche Grenze besteht aus Wäldern bzw. dem Schwarzen Meer. Das Stadtgebiet gliedert sich nach geographischen Gesichtspunkten in drei Bereiche:

- das historische, auf der europäischen Seite südlich des Goldenen Horn gelegene Stadtzentrum sowie die neueren Gebiete westlich davon;
- das nördlich des Goldenen Horns gelegene ebenso europäisch geprägte Zentrum;
- das auf der anderen Seite des Bosphorus liegende asiatische Stadtgebiet mit seinen großflächig entstandenen und entstehenden Stadtteilen Richtung Osten.

Nach administrativen Einheiten gliedert sich das Stadtgebiet, das eine Ausdehnung von etwa 80 km in Ost-West Richtung erreicht und etwa 40 km in Nord-Süd Erstreckung in 32 Stadtviertel. Abbildung 2-3 zeigt die urbanisierte Fläche (KEMPER, 2002) und damit seine Ausdehnung sowie die zwei Testgebiete, die im Zentrum dieser Arbeit stehen, Üsküdar und Zeytinburnu. Mit dieser Auswahl stehen sich zwei Stadtteile mit heterogenen physischen Strukturen und unterschiedlichem Gefährdungsgrad für die Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzung dieser Arbeit gegenüber.

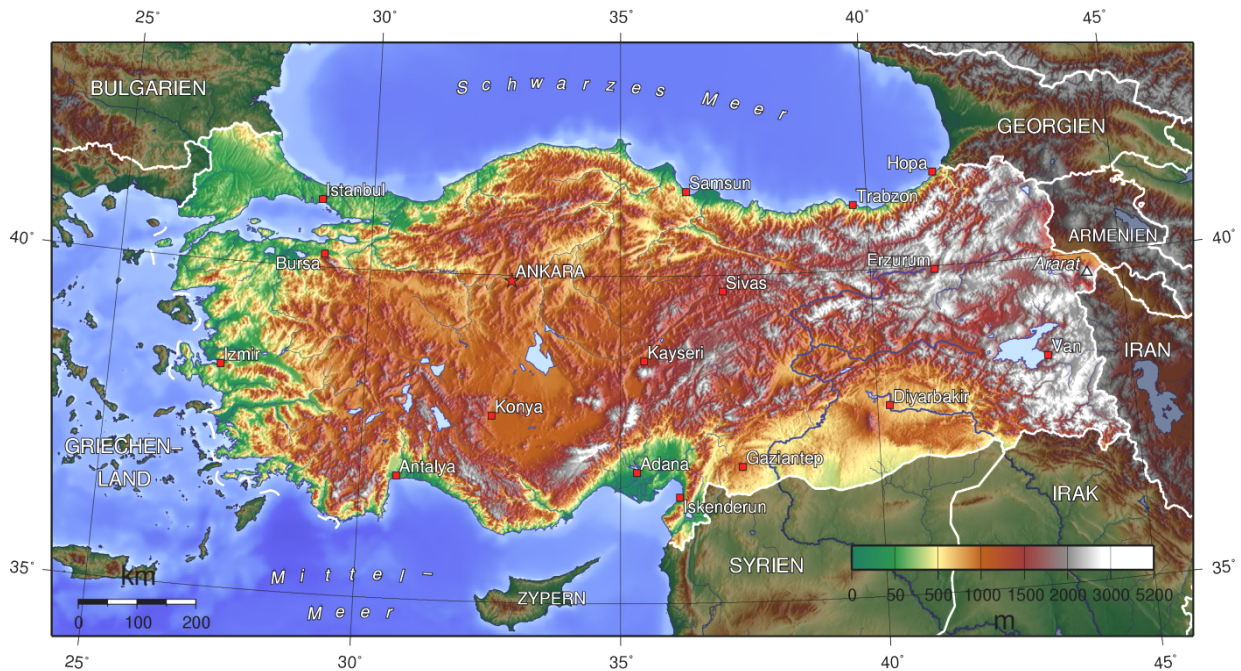


Abb. 2-2: Topographische Karte der Türkei

Üsküdar ist ein zentrales Stadtviertel auf asiatischer Seite, das direkt am Bosphorus liegt (Abb. 2-3). Das Stadtviertel ist auf Grund seiner Lage ein Verkehrsknotenpunkt. Die weitläufige Wohnstadt ist auf sehr hügeligem Gelände erbaut mit Höhendifferenzen bis zu 300 m. Die Stadtstruktur weist einen historischen Kern auf, aber auch viele in den letzten 20 Jahren neu entstandene Wohnviertel mit sehr stark differierenden Bebauungsdichten.

Außerhalb der historischen Stadtmauer auf europäischer

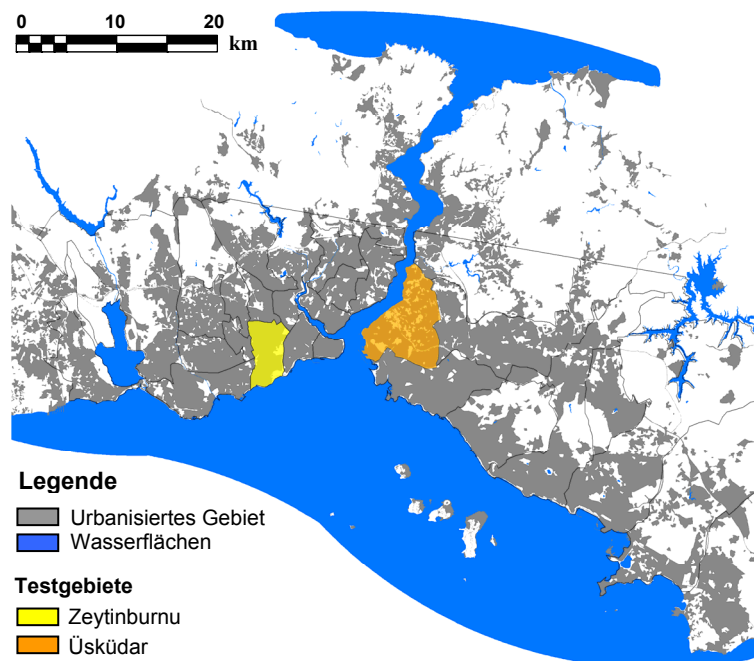


Abb. 2-3: Das Stadtgebiet Istanbul

Seite liegt Zeytinburnu, ein Bezirk, der durch Migration seit 1950 stark gewachsen ist. Die Siedlungen entstanden aus illegal erbauten, einfachsten Häusern und wandelten sich allmählich in städtische Siedlungen minderer Qualität mit fünf- bis sechsstöckigen Wohnblocks, einer hohen Bevölkerungsdichte und unzureichender Infrastruktur. Das Stadtviertel weist sehr heterogene Strukturen von großflächigen Industrieanlagen über Kleinbetriebe bis zu reinen Wohngebieten unterschiedlicher Qualität auf. Die Bausubstanz des überwiegenden Teils der Gebäudestrukturen weist Stahlbeton- oder Mauerwerksbauten auf, die oftmals nicht ingenieurmäßig geplant und auf Grund schlechter Baumaterialien und fehlender Vorschriften geringe Stabilität im Bezug auf externe Einwirkungen haben.

Offiziell hat die Stadt Istanbul heute 10,1 Millionen Einwohner (MMI, 2006), die Agglomeration 11,9 Millionen, wobei Schätzungen von aktuell etwa 14 Millionen Menschen im Stadtgebiet ausgehen. Diese Diskrepanz an offiziellen Zahlen, die der Realität hinterher hinken, zeigt bereits die Schwierigkeiten einer nachhaltigen Stadtplanung. Mit durchschnittlich mehr als 6500 Einwohner pro km<sup>2</sup>, und bis zu 37000 Einwohner pro km<sup>2</sup> im historisch, zentral gelegenen Viertel Fatih, einer Immigrationsrate von schätzungsweise 400000 Menschen pro Jahr ist alleine die Erfassung unkontrollierter flächenhafter Expansion sowie die Detektion von Änderungen nicht zu schaffen, geschweige denn ein nachhaltiges Stadtmanagement durchführbar. Das ausufernde Wachstum der Stadt vollzieht sich in erster Linie linear auf einer Ost-West Achse (ERDIK, 2004) und gefährdet große Waldflächen, die umliegenden ländlichen Gebiete sowie große Wasserreservoirs. Illegale Rodungen, Besiedlung von Hangflächen oder Bebauung von schlechter Bodensubstanz sind Kennzeichen einer unaufhaltsamen und unkontrollierbaren Welle der Urbanisierung. Die in den 1950er Jahren einsetzende starke Migrationswelle bzw. Landflucht überforderte die Stadtplanung und resultiert in einer komplexen und unkontrollierten Stadtstruktur (CIRACI & KUNDAK, 2000). Die Hauptgründe für die Landflucht in der Türkei sind die gleichen wie in wirtschaftlich vergleichbaren Ländern, nämlich mangelnde Arbeits- und Verdienstmöglichkeiten in den ländlichen Gebieten (WOLF, 1990).

Die Immigranten finden ihre neue Heimat häufig in einer für die Türkei typischen Klasse von Siedlungen, den „Gecekondus“ (wörtl. übersetzt: „über Nacht gelandet“) (RADBERGER, 2001). Gecekondus entstehen auf Grund und Boden, der sich nicht im Eigentum der Bauherren befindet sowie ohne gültige Baugenehmigung. Als Rechtfertigung berufen sich die

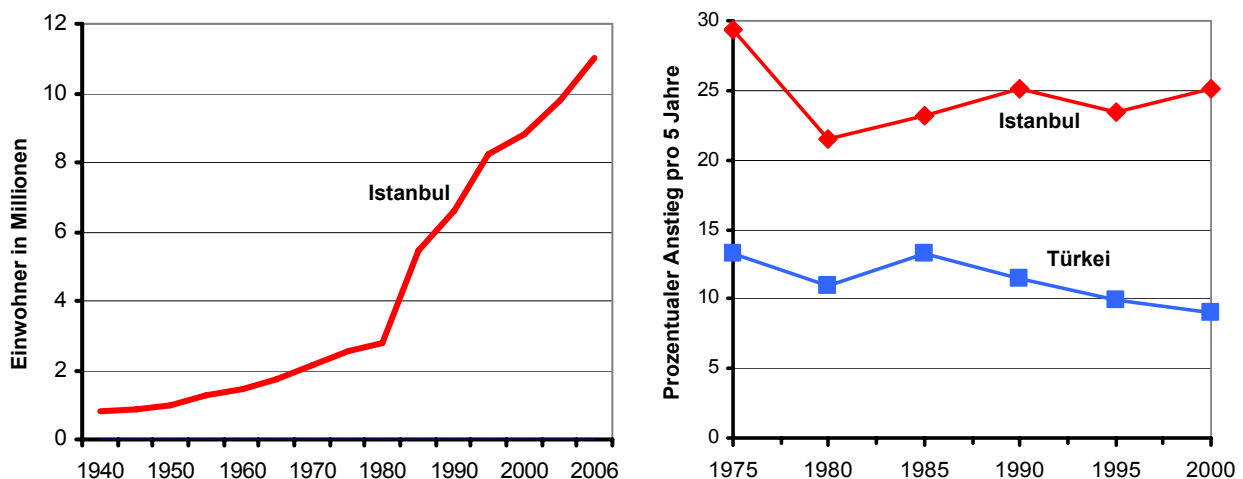


Abbildung 2-4: Bevölkerungsentwicklung in Istanbul (Quelle: TURKSTAT, Statistikamt Türkei, 2007)

Besitzer auf altes osmanisches Recht, wonach ein Haus, das provisorisch errichtet wurde, nicht abgerissen werden darf (BAYHAN, 1993). Zudem ermöglicht die Menge an Immigranten politischen Druck auszuüben, wodurch bisher fast alle Gecekonduis nachträglich legalisiert wurden (SCHAFFER, 1993).

Abbildung 2-4 zeigt graphisch die Bevölkerungsexplosion in Istanbul seit 1940. Die steile Wachstumskurve zeigt eine Verfünffachung der Bevölkerung seit den 70er Jahren. Der prozentuale Bevölkerungszuwachs pro fünf Jahre zeigt die enorme Dynamik der Megacity Istanbul im Vergleich zum Land Türkei. Letzteres weist bereits, bei zwar abnehmender Tendenz, eine enorm hohe Rate von 10-12 % auf, Istanbuls Zuwachsraten dagegen mit um die 25 % verdeutlichen die explosive Urbanisation. Die unaufhörliche Migration in die Stadt Istanbul zeigt die Schnelligkeit und Dimension des Wachstums und damit die Probleme, mit denen nachhaltige Stadtplanung konfrontiert ist.

Dieser Dynamik versucht die Stadtplanung durch Konzepte der Dezentralisierung, polyzentrischer Strukturentwicklung und Restrukturierung beizukommen, um seine Metropolfunktion effektiv nutzen zu können (BAYAN-LEVENT, 2003). Die Dimension und Schnelligkeit von Wachstum und Veränderung der urbanen Landschaft bedeutet ständig veraltete Informationsquellen, ineffektive Steuerungsmechanismen der Planung und damit unstrukturierte, unkontrollierte und auswuchernde, risikofördernde Urbanisierung.

Neben diesen strukturellen und soziodemographischen Problemen bedingt die Lage Istanbuls nahe der Nordanatolischen Verwerfungslinie eine erhebliche Erdbebengefährdung. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens größer Magnitude 7 an der Nordanatoli-

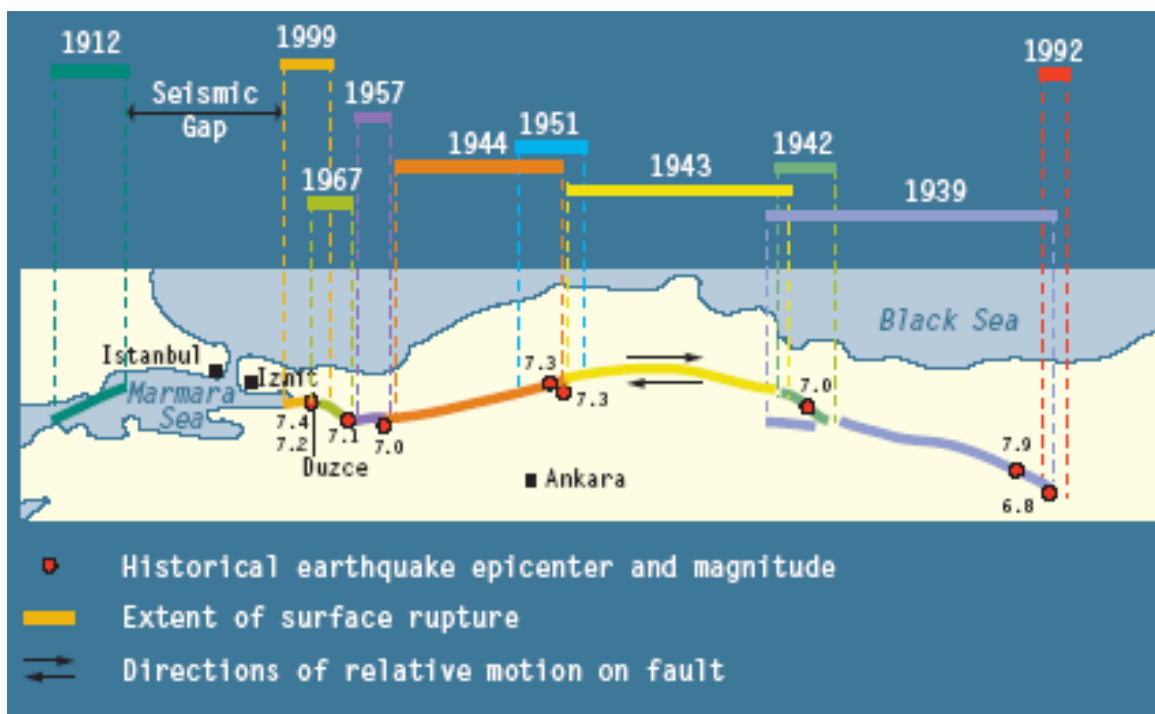


Abb. 2-5: Erdbebenentwicklung im 20. Jahrhundert entlang der Nordanatolischen Verwerfungslinie (ERDIK, 2001)

schen Verwerfungslinie, die etwa 15 km südlich von Istanbul durch die Marmara See verläuft, beträgt innerhalb der nächsten 30 Jahre etwa 35-70 % (PARSONS, 2004). Abbildung 2-5 zeigt zudem die räumliche Verteilung der Epizentren und deren Magnituden in der Türkei im 20. Jahrhundert. Dabei zeigt sich die Tendenz einer westwärts Wanderung von Erdbeben entlang der Verwerfung, die im Izmit Beben von 1999, ca. 150 Kilometer östlich von Istanbul mit einer Magnitude von 7,4 auf der Richterskala (ERDIK, 2001) letztmals aktiv war. Somit verbleibt als letzter Teilbereich der Verwerfungslinie das Gebiet um Istanbul und der Marmara See, das noch keinen Bruch erlitten hat. Vor diesem Hintergrund sind die unkontrollierte Urbanisierung und die damit verbundenen strukturellen Probleme, ein erheblicher Risikofaktor für die Bevölkerung Istanbul.

ERDIK (2002) zeigt die räumliche Verteilung der Intensität eines Magnitude 7.5 Erdbeben im Istanbul-Raum. Die Intensität beschreibt dabei die durchschnittlichen Auswirkungen auf die Gebäudestrukturen. Dies wird unter Verwendung des jeweiligen Bodentyps, der jeweiligen Distanz zur Verwerfung und einer oberflächlichen Einschätzung des lageabhängigen Gebäudetyps realisiert. Abbildung 2-6 stellt einen generalisierenden räumlichen Überblick dieses Beispielszenarios sowie den Verlauf der Verwerfungslinie in der Marmarasee dar. Dabei kristallisiert sich der Stadtteil Zeytinburnu mit einer höheren Gefährdung im Vergleich zum zweiten Testgebiet Üsküdar heraus. ERDIK (2002) schätzt die Gebäudeschäden basierend auf einem 500 x 500 Meter Raster räumlich ab.

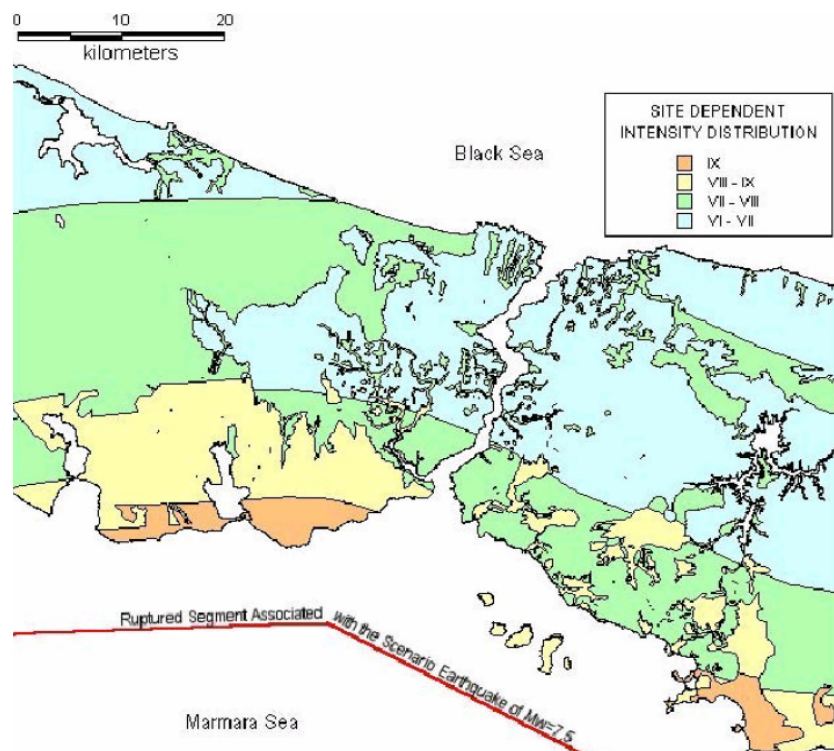


Abb. 2-6: Räumliche Verteilung von Intensitäten eines Magnitude 7.5 Erdbebenszenarios

Die hohe Erbebengefährdung im Zusammenspiel mit den stadtstrukturellen Problemen, u. a. durch explosives Flächenwachstum macht die Megacity Istanbul zu einem enormen Risikogebiet. Ziel dieser Arbeit ist es nun die Potentiale zur Erkennung und Analyse von Vulnerabilität und Risiko mittels Fernerkundung aufzuzeigen.

### 2.1.2. Untersuchungsgebiete Hyderabad, Indien und Padang, Indonesien

Der geographische Fokus dieser Dissertation liegt auf der Megacity Istanbul, allerdings ist ein wichtiger Teilaspekt die Übertragung entwickelter Methoden und Ansätze auf andere geographische Räume und deren differente Strukturen und Problemstellungen. Wie im Abschnitt 2.1. diskutiert, unterliegen auch Sub-Megacities sowie Submillionenstädte einer ungeheuren Dynamik, deren strukturelle Veränderungen Auswirkungen auf das Risiko urbanisierter Gebiete haben. Unter dieser Prämisse stehen zwei weitere urbane Räume im Fokus dieser Dissertation, die diese Kategorien abdecken.

Hyderabad in Indien ist mit seinen 5,8 Millionen Einwohnern und einer jährlichen Wachstumsrate von 2,42 % eine Megacity von morgen. Die Hauptstadt des Bundesstaates Andhra Pradesh in Zentralindien liegt am Fluss Musi auf dem Dekkan Plateau. Genauso wie Istanbul ist Hyderabad eine multifunktionelle Metropole die neben einem historischen, organisch gewachsenen Zentrum, als Technologie und Softwarezentrum auch moderne Urbanisationsformen besitzt. Andererseits zeichnet sich Hyderabad durch eine extreme Verdichtung, andere Dach- und Baustrukturen sowie unterschiedliche strukturelle Stadtmorphologien im Vergleich zu Istanbul aus. Dadurch ist ein Test auf Übertragbarkeit entwickelter Methoden zur Ableitung stadtstruktureller Parameter aus Fernerkundungsdaten von Interesse.

Padang ist eine Hafenstadt an der Westküste der Insel Sumatra in Indonesien und mit seinen 800 000 Einwohner eine Submillionenstadt. Die Hauptstadt der Provinz Sumatera Barat übertrifft mit seiner jährlichen Bevölkerungswachstumsrate von 3,1 % (CUMORAH PROJECT INTERNATIONAL LDS DATABASE, 2006) bei weitem den Landesdurchschnitt Indonesiens von 1,25 %. Seine unmittelbare Nähe zur tektonischen Nahtstelle zwischen indisch-australischer und eurasischer Platte resultiert in einer hohen Erdbebengefahr, sowie einer hohen Sekundärgefahr, einem Tsunami. Im Vergleich zu Istanbul und Hyderabad erweist sich die urbane Morphologie Padangs als heterogener bei geringeren Bebauungsdichten. Mit der Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität in Indonesien beziehungsweise Padang beschäftigen sich die Projekte GITEWS (Deutsch-Indonesisches Tsunami Frühwarnsystem) (<http://www.gitews.de/>) und Last-Mile (Numerisches Last-Mile Tsunami Frühwarn- und Evakuierungsinformationssystem) ([www.last-mile-evacuation.de](http://www.last-mile-evacuation.de)) im Detail.

Im Zuge dieser Arbeit werden diese beiden, vom Ausgangsgebiet Istanbul, strukturell sehr unterschiedlichen urbane Räume genutzt, um das Potential zur Übertragung entwickelter Methoden zu testen.

## 2.2. Fernerkundung

„Fernerkundung im umfassenden Sinne ist die Aufnahme oder Messung von Objekten, ohne mit diesen in körperlichen Kontakt zu treten, und die Auswertung dabei gewonnener Daten oder Bilder zur Gewinnung quantitativer und qualitativer Informationen über deren Vorkommen, Zustand oder Zustandsänderung und ggf. deren natürliche oder soziale Beziehungen zueinander“ (HILDEBRANDT, 1996). Das System Fernerkundung besteht grundsätzlich aus drei Hauptkomponenten: 1) Elektromagnetischen Strahlungsvorgängen als Informa-

tionsträger, also ein Austausch von Energien; 2) Empfang, Registrierung und Speicherung dieser Strahlung; 3) Bearbeitung und sachbezogene Auswertung empfangener Signale.

Elektromagnetische Strahlung ist eine Energieabgabe von Materiekörpern. Nach der Wellentheorie transportiert sie elektrische und magnetische Energie in Wellenform mit einer Geschwindigkeit von  $c = 299\,792\text{ km/s}$ , d. h. mit Lichtgeschwindigkeit (HILDEBRANDT, 1996). Es treten Wellen unterschiedlicher Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $\nu$  auf, deren Zusammenhang sich wie folgt definiert:

$$(2-1) \quad c = \lambda \times \nu$$

Neben der Wellentheorie beschreibt auch die Planck'sche Quantentheorie die physikalische Natur der elektromagnetischen Strahlung. Diese Theorie nimmt an, dass Strahlungsenergie in Form von Quanten (Photonen) abgegeben und aufgenommen wird. Die Energie  $E$  eines Photons wird definiert durch die Frequenz der jeweiligen Strahlungsart und der Planck'schen Konstanten  $h$ :

$$(2-2) \quad E = h \times \nu; \quad h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Die Energie eines Photons hängt also von der Wellenlänge bzw. der Frequenz der Strahlung ab. Sie ist größer bei kurzwelliger, hochfrequenter und kleiner bei langwelliger, niederfrequenter Strahlung. Die Gesamtheit der elektromagnetischen Strahlung wird durch das elektromagnetische Spektrum beschrieben (Abb. 2-7). De facto werden für die optische Fernerkundung der Erdoberfläche elektromagnetische Wellen der Länge  $\lambda = 0,3\text{-}14\ \mu\text{m}$  genutzt. Dabei unterscheidet man sichtbares (=visuelles) Licht, das reflektierte Infrarot und das thermale Infrarot.

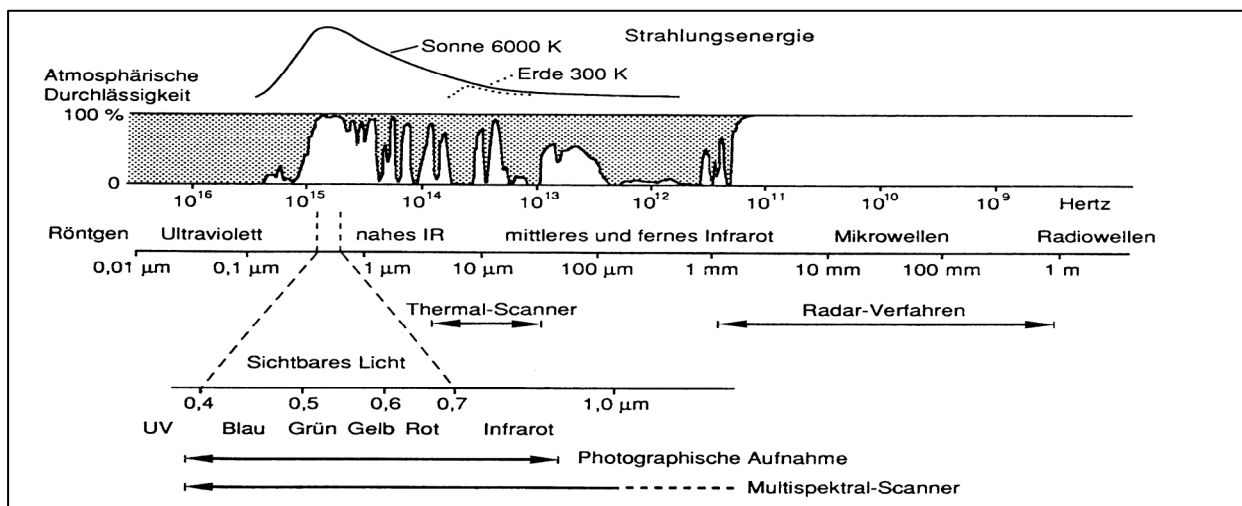


Abb. 2-7: Das elektromagnetische Spektrum (Quelle: ALBERTZ, 1991)

Die fernerkundliche Informationsgewinnung basiert auf der Messung der am Sensor ankommenden elektromagnetischen Strahlung. Je nach Sensorsystem werden dabei reflektierte und emittierte Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen pro Flächeneinheit und Raumwinkel aufgezeichnet und in digitalen Bilddaten ausgegeben. Dabei verwenden passi-

ve Aufnahmesensoren reflektierte oder emittierte Strahlung solaren oder terrestrischen Ursprungs, während aktive Sensoren mittels eigener Strahlungsquelle künstliche elektromagnetische Strahlung aussenden und deren Rückstreuung empfangen (MATHER, 2004). Dabei sind die Aufnahmesysteme der Sensoren so ausgelegt, dass sie ausschließlich in Zonen des Spektrums aufzeichnen, in denen es nicht zu atmosphärischen Absorptions- und Reflektionsprozessen kommt, sogenannte ‚Atmosphärische Fenster‘.

Die auf die Erdoberfläche einfallende Globalstrahlung wird von den Objekten jeweils zum Teil aufgenommen (absorbiert), zurückgestrahlt (reflektiert) und durchgelassen (transmittiert) (HILDEBRANDT, 1996). Die Fernerkundung macht sich zu Nutze, dass unterschiedliche Objekte auf Grund unterschiedlicher physikalischer und chemischer Eigenschaften, ein unterschiedliches Reflektionsverhalten aufweisen. Somit weist jedes Material bzw. jeder Oberflächentyp über das gesamte Spektrum gesehen einen charakteristischen Verlauf der Reflektionen auf – die so genannte spektrale Signatur (Abb. 2-8). Viele Objekte reflektieren ähnlich oder in bestimmten Spektralbereichen gleich. So zeigen sich beispielsweise in Abbildung 2-8 signifikant unterschiedliche spektrale Signaturen für Wiese und Wasser, während die spektralen Signaturen für Sandboden und einem Ziegeldach sehr ähnliche Verläufe haben.

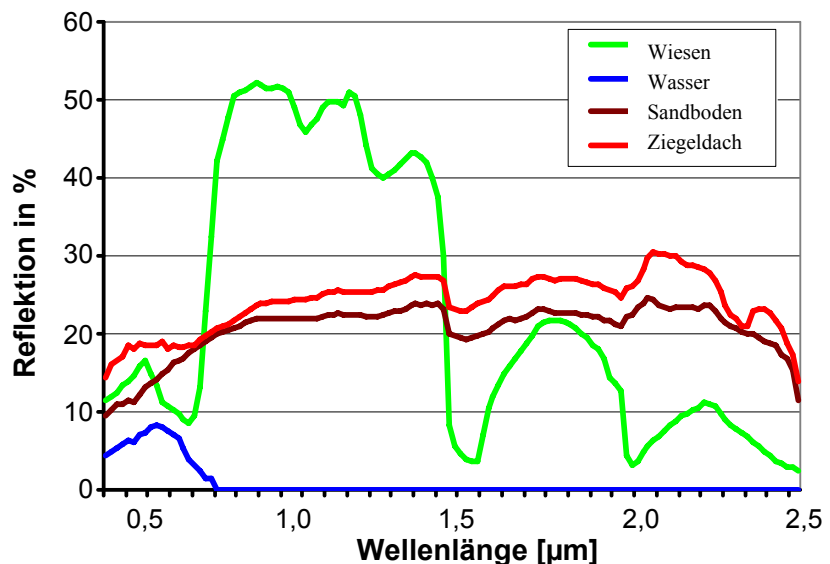


Abb. 2-8: Charakteristische Reflektionskurven von Objekten

Spektrale Ratios zwischen verschiedenen Wellenlängen betonen unterschiedliche Kurvenverläufe und werden oft als Klassifikationsparameter eingesetzt. Eine Vielzahl an Ratios wird in der Literatur diskutiert, wie beispielsweise der RVI (Ratio-Vegetationsindex) oder der OSAVI (Optimised Soil-Adjusted Vegetation Index) (PERRY & LAUTENSCHLAGER, 1984). Für die spätere Klassifikation steht der „Normalised Difference Vegetation Index“ (NDVI) im Mittelpunkt (2-3). Dieser macht sich die Tatsache zu Nutze, dass lebende Pflanzenbestände im nahen Infrarot mehr und im Roten fast durchweg weniger reflektieren als unbelebte Oberflächen.

$$(2-3) \quad NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{MATHER, 2004}).$$

Die Ratio betont den Anstieg der Vegetationskurve im Bereich des Nahen Infrarots (0.8 – 1.1 µm) (Red Edge) und erlaubt dadurch Unterscheidungen von Vegetation, Boden, versiegelter Fläche und Wasser. Gerade in kleinräumigen urbanen Landschaften unterstützt diese spektrale Ratio die Ableitung einer Versiegelungsmaske, wobei externe Faktoren wie Be-



leuchtungsverhältnisse, Schatten, atmosphärische Einflüsse oder Effekte der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktionen (BRDF), also das Reflektionsverhalten von Oberflächen eines Materials unter verschiedenen Einfallswinkeln, Probleme bei automatischen Klassifikationsverfahren aufwerfen.

Numerische Klassifikationsverfahren verfolgen das Ziel, die Bildelemente mittels ihrer Grauwerte in homogene spektrale Signaturen zu gruppieren und so als thematische Klassen quantitativ auszuweisen und/oder ihr Vorkommen in thematischen Klassen darzustellen (HILDEBRANDT, 1996). Die Auswerteverfahren machen sich dabei die unterschiedlichen spektralen Signaturen zu Nutze. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwischen unüberwachten und überwachten Klassifikationsmethoden. Unüberwachte Verfahren errechnen basierend auf ähnlichen spektralen Wertekombinationen  $n$  Klassen im  $n$ -dimensionalen Merkmalsraum, deren thematische Bedeutung nach der Klassifikation zu ermitteln ist. Überwachte Verfahren dagegen klassifizieren die Bildelemente nach zuvor definierten Musterklassen. Mittels repräsentativer Trainingsgebiete wird die statistische Lage und Beschaffenheit der entsprechenden Klasse im mehrdimensionalen Merkmalsraum mittels eines spektralen Distanz- oder Ähnlichkeitsmaßes berechnet (SCHOWENGERDT, 1997). Zu den etablierten Methoden der überwachten Klassifikation zählen der Maximum Likelihood Klassifikator, das Nearest Neighbour Verfahren, der Minimum Distance- und der Quader- oder Boxklassifikator.

Der technische Ansatz automatisierter Klassifizierung fernerkundlicher Datensätze mittels pixelbasierter Auswertung, d. h. isolierte Auswertung jeder Auflösungszelle erreicht bei neuen höchst aufgelösten Satellitendaten schnell seine Grenzen. So setzen sich selbst bei hoher geometrischer Auslösung kleinflächige Objekte aus mehreren Pixeln mit identischen (Spektral-)Eigenschaften zusammen. Gleichzeitig wird die inhärente Variabilität im Reflektionsverhalten der einzelnen Raumeinheiten bis ins Detail abgebildet, woraus auf lokaler Ebene eine gesteigerte spektrale und strukturelle Heterogenität entsteht (ESCH, 2006).

Aus diesem Grund sind mit der Verfügbarkeit höchst aufgelöster Satellitendaten objektorientierte Verfahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, da sie die Möglichkeit bieten, die räumliche Komposition, Form, sowie die Nachbarschaft mit einzubeziehen. Dabei werden spektral homogene, benachbarte Pixel zu Segmenten zusammengefasst und bilden eine Raumeinheit, die nicht nur spektral, sondern auch form-, struktur-, kontext- und hierarchiebezogene Attribute zur Beschreibung thematischer Klassen ermöglicht. Diese Erweiterung der Klassifikationsfunktionalität gegenüber pixelbasierten Verfahren stellt die grundlegende Ausgangsbasis für die Analyse räumlicher und inhaltlicher Zusammenhänge im komplexen urbanen Raum für diese Arbeit dar.

Ein weiterer Parameter zur Unterstützung von Klassifikationsverfahren ist die Textur. Dabei stützt man sich nicht nur auf Intensität der Grauwerte (Ton), sondern in hohem Maße auf die räumliche Strukturierung der Grauwerte (STEINNOCHER, 1997). „At a simple level, texture can be thought of as the variability in tone within a neighbourhood, or the pattern of spatial relationships among the grey levels of neighbouring pixels, and is usually described in terms such as ‘rough’ or ‘smooth’ (MATHER, 2004). Die meisten Ansätze zur Quantifizierung von Textur resultieren aus der Berechnung räumlicher Verteilungen von Grauwerten im Bildsegment mittels statistischer Modelle. Dazu zählen statistische Parameter erster Ordnung,

wie Varianz oder Mittelwert oder statistische Parameter zweiter Ordnung unter Verwendung von Grauwert-Abhängigkeits-Matrizen.

Eine ausführliche Einführung in die theoretischen Grundlagen der Fernerkundung bieten ALBERTZ (1991), DECH (2005), HILDEBRANDT (1996), LILLESAND & KIEFER (2000), MATHER (2004), RICHARDS & JIA (1999) sowie SCHOWENGERDT (1997).

### 2.2.1. Datengrundlagen

Eine Satellitenaufnahme baut sich aus einer rechtwinkligen Matrix identischer räumlicher Einheiten auf, den sogenannten Picture Elements (Pixeln). Diese bilden den Betrag der elektromagnetischen Strahlung, die für eine bestimmte Raumeinheit am Boden in einem proportionalen Messwert abgebildet wird (MATHER, 2004). Diese Messwerte in Satellitendaten charakterisieren sich durch ihre geometrische, spektrale, radiometrische und temporale Auflösung. Die geometrische Auflösung definiert sich durch die Pixelgröße der Aufnahme und hat damit erheblichen Anteil am Potential eines Sensors, Objekte der Erdoberfläche räumlich voneinander abgrenzen zu können. Die Anzahl, Bandbreite und Positionierung der Aufnahmekanäle bestimmt die spektrale Auflösung, und damit das Potential, objektspezifische Reflektionscharakteristiken ableiten zu können. Die Sensitivität des Sensors, empfangene Energieunterschiede differenzieren zu können, bestimmt seine radiometrische Auflösung. Die temporale Auflösung schließlich beschreibt das Zeitintervall, innerhalb dessen ein Ort der Erdoberfläche von demselben System erneut aufgenommen werden kann.

Urbane Räume zeichnen sich durch kleinräumige Änderungen unterschiedlichster Objekte und Objektflächen der Erdoberfläche aus. Vor diesem Hintergrund stellen die zentrale Datengrundlage für diese Arbeit geometrisch höchst aufgelöste optische Satellitendaten des IKONOS sowie des Quickbird Sensors dar. Auffallend sind dabei deren technische Ähnlichkeiten (vgl. Tab. 2-1). Die hohe geometrische Auflösung erlaubt die Erfassung von kleinräumigen, heterogenen urbanen Strukturen, allerdings mit der Einschränkung, dass durch die geringe Schwadbreite nur Ausschnitte von Megacities von 11,3 – 16,3 km<sup>2</sup> pro Szene abgebildet werden können. Die Repetitionsrate von wenigen Tagen macht die beiden Satelliten im Krisenfall als aktuelle Informationsbasis interessant. Die Serie geometrisch mittel auflösender Landsat Satelliten ergänzt die höchst auflösenden Analysemöglichkeiten von IKONOS und Quickbird. Als geometrisch mittel aufgelöst werden im Rahmen dieser Arbeit Pixelgrößen verstanden, die eine räumliche Abgrenzung von Einzelobjekten, wie beispielsweise Gebäude, nicht mehr ermöglichen, aber dennoch eine grundsätzliche Differenzierung zwischen versiegelten und nicht-versiegelten Arealen zulassen. Landsat Daten ermöglichen mit einer Schwadbreite von 185 km die komplette Erfassung der Flächenausmaße der Megacities, allerdings mit einer geringeren geometrischen Auflösung von 28,5 Meter, womit die kleinräumigen Details urbaner Strukturen nicht wiedergespiegelt werden können. Auf Grund der langen kontinuierlichen Laufzeit des Landsat Programms seit 1972 ergibt sich eine lange Zeitspanne für raumzeitliche Änderungsanalysen zur Überwachung, Quantifizierung und Analyse urbaner Entwicklung, wobei Landsat 7 seit 2003 auf Grund technischer Probleme nur noch eingeschränkt nutzbar ist. Im Folgenden sind die technischen Details der verwendeten Sensoren in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Details	IKONOS	Quickbird	Landsat 7 +ETM
<b>Start</b>	24. September 1999	18. Oktober 2001	15. April 1999, Landsat Programm seit 1972
<b>Repetitionsrate</b>	1,5 Tage	1 - 3,5 Tage	16 Tage
<b>Schwadbreite</b>	11,3 km	16,5 km	185 km
<b>Radiometrische Auflösung</b>	11 bit	11 bit	8 bit
<b>Geometrische Auflösung</b>	Pan: 1 m MS: 4 m	Pan: 61 cm MS: 2,44 m	Pan: 15 m MS: 30 m Thermal: 120 m
<b>Spektrale Auflösung</b>	Pan: 450 – 900 nm Blau: 455 – 516 nm Grün: 506 – 595 nm Rot: 632 – 698 nm NIR: 757 – 853 nm	Pan: 450 – 900 nm Blau: 450 – 520 nm Grün: 520 – 600 nm Rot: 630 – 690 nm NIR: 760 – 900 nm	Pan: 520 – 900 nm Blau: 450 – 520 nm Grün: 520 – 600 nm Rot: 630 – 690 nm NIR: 760 – 900 nm SWIR I: 1550–1750 nm SWIR II: 2080–2350 nm TIR: 10400 – 12500 nm

Tab. 2-1: Technische Details der Sensoren und Datengrundlagen

Zur temporalen Analyse des Großraumes Istanbul werden im Zuge dieser Arbeit auch Landsat Daten von den hier nicht aufgeführten Vorgänger-Sensoren, dem Thematic Mapper (TM) mit 7 spektralen Kanälen und 30 Metern geometrischer Auflösung und dem Multispektral Sensor (MSS) mit 4 spektralen Kanälen und 80 Metern geometrischer Auflösung, verwendet.

Die folgenden Abbildungen stellen visuell die beiden höchst aufgelösten Datenquellen gegenüber. Dabei zeigt sich, dass die hohe geometrische Auflösung eine Grundvoraussetzung ist, um detaillierte Informationen in solch kleinräumigen heterogenen Gebieten wie urbanen Räumen ableiten zu können. Die Gegenüberstellung zweier urbaner Räume verschiedener Kulturgebiete zeigt zudem wie unterschiedliche physische Strukturen von Städten ausgeprägt sein können (Abb. 2-9 und Abb. 2-10). In Anhang C bzw. D finden sich zudem die IKONOS Daten des zweiten Fokusgebietes dieser Arbeit, das Stadtviertel Üsküdar (Abb. C-1), sowie die IKONOS Daten von Padang in Indonesien (Abb. D-1).

Der Stadtteil Zeytinburnu in Istanbul weist eine sehr heterogene, von vielen strukturellen Übergängen geprägte urbane Landschaft auf. Dabei fallen vor allem Unterschiede in Gebäudedichten, in Dachformen und Dachmaterialien, und in offensichtlich differenten Nutzungstypen auf. Das Zentrum Hyderabads dagegen weist eine sehr homogene Stadtstruktur auf, die sich in sehr hoher Bebauungsdichte mit wenigen Freiflächen, ähnlichen Dachformen und Dachmaterialien und visuell schwer differenzierbaren Nutzungstypen zeigt. Zusätzlich zeigt Abbildung 2-11 mittels eines Ausschnittes der IKONOS-Szene von Zeytinburnu das Potential der Daten in voller Auflösung. Dabei wird von West nach Ost eine physische Veränderung der Stadtstruktur offensichtlich: Der räumliche Wechsel zeigt den Übergang von einem Wohngebiet, charakterisiert durch kleinere, mehrstöckige Gebäude, zu einem Gewerbegebiet, das durch großflächige Bauten mit Flachdächern charakterisiert ist.



Abb. 2-9: IKONOS Daten vom 19.04.2004, Stadtteil Zeytinburnu, Istanbul, Türkei



Abb. 2-10: Quickbird Daten vom 25.02.2005, Hyderabad, Indien



Abb. 2-11: Ausschnitt der IKONOS-Szene von Zeytinburnu in voller Auflösung

Die zweite Datengrundlage stellt die Serie der Landsat Satelliten dar. Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, limitiert die geometrische Auflösung des Sensors das Potential hoch genaue urbane Strukturanalysen durchzuführen. Die Stärken des Sensors liegen dafür vielmehr in seiner zeitlichen Auflösung sowie seiner hohen räumlichen Aufnahmebreite. Die Möglichkeiten Änderungen in ihrer Dimension bis ins Jahr 1972 zurück zu verfolgen und dabei mit einer Aufnahme die großflächigen Ausdehnungen von Megacities erfassen zu können, stellen ein enormes Potential für temporale urbane Analysen dar. Abbildung 2-11 zeigt eine Landsat ETM+ Szene der Marmara Region aus dem Jahr 2000 und gibt einen Überblick über die gewaltige Ausdehnung des Ballungsraumes Istanbul.

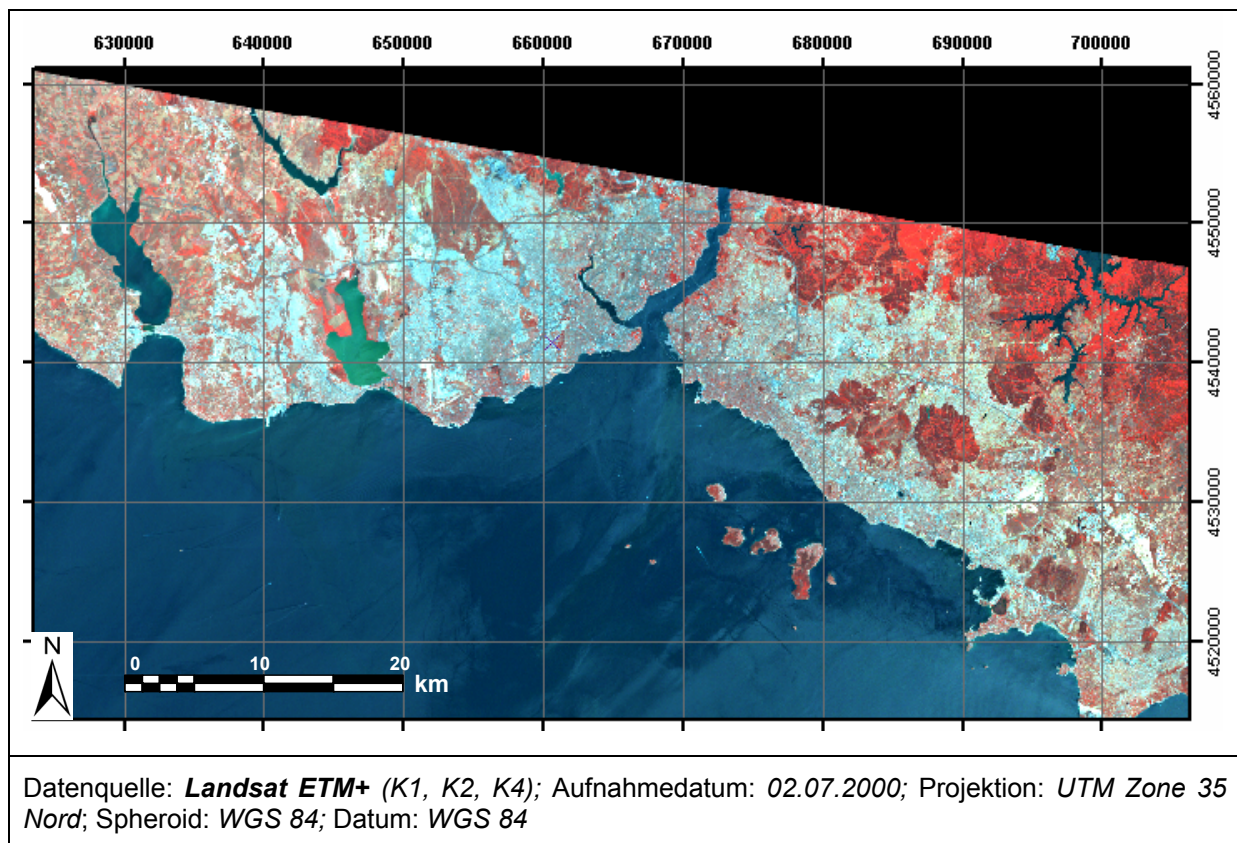


Abb. 2-12: Landsat ETM+ Aufnahme der Megacity Istanbul aus dem Jahr 2000

Einen essentiellen Datensatz stellt das Digitale Höhenmodell (DGM) dar. Dieses basiert auf den Daten der „Shuttle Radar Topography Mission“ (SRTM) aus dem Jahr 2000, bei der mittels synthetischer Radarapertur in zwei Frequenzbereichen (C-Band mit 5,6 cm; X-Band mit 3,1 cm) die Erdoberfläche abgetastet wurde (FARR ET AL., 2007). Mit dem Verfahren der SAR Interferometrie (FARR ET AL., 2007; RABUS ET AL., 2002) wurden zwei globale Höhenmodelle in verschiedenen Auflösungsstufen gerechnet. Beim X-Band entspricht die räumliche Auflösung 1 x 1 Bogensekunde, mit einer relativen horizontalen Genauigkeit von 15 Metern sowie einer relativen vertikalen Genauigkeit von 6 Metern (MARSCHALK ET AL., 2004).

Ein Mosaickingverfahren basierend auf gewichteter Mittelung vereint beide Datensätze zu einem qualitativ hochwertigen DGM (KNÖPFLE ET AL., 1998). Abbildung 2-12 zeigt das sehr hügelige Gelände der Megacity Istanbul mit maximalen Höhenunterschieden bis zu 300 Me-

tern. Die beiden Stadtteile Üsküdar und Zeytinburnu sind nochmals explizit hervorgehoben. Alternativ ermöglicht die Fernerkundung die Ableitung von Höheninformationen aus Stereodatenätzen, die allerdings sehr kostenintensiv und zudem für Istanbul nicht verfügbar sind. Ebenso verhält es sich mit der flugzeuggestützten Ableitung von Höheninformationen mittels Light Detection And Ranging (LIDAR), einem aktiven Fernerkundungssystem basierend auf Laser.

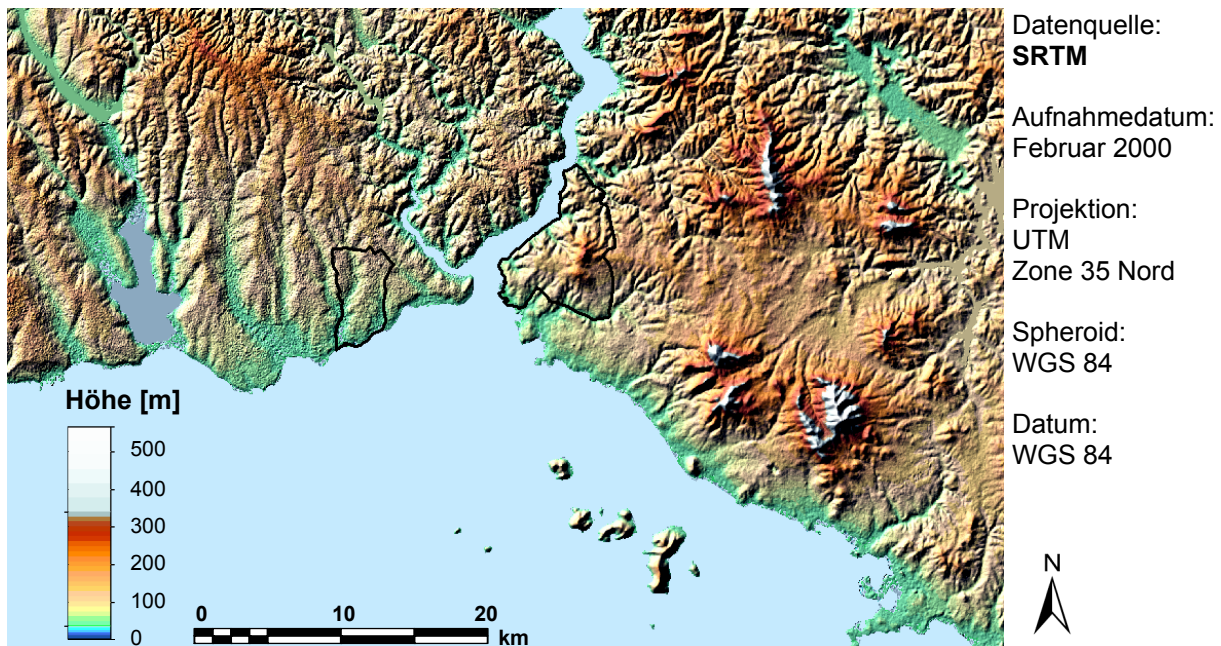


Abb. 2-13: Digitales Geländemodell Istanbul

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Satellitendaten werden mit Hilfe zweier Kartenprodukte, die von der Metropolitan Municipality Istanbul zur Verfügung gestellt wurden, auf ihre Genauigkeit hin analysiert. Eine weitere Datengrundlage basiert auf zwei Feldkampagnen in Zeytinburnu und Üsküdar (CALISKAN, 2006), bei denen physische, demographische sowie sozioökonomische Parameter aufgenommen wurden. Die mittels eigener Beobachtung und mittels eines Fragebogens (Anhang C-4) aufgenommenen Daten dienen einerseits als Datengrundlage zur Extrapolation punktueller Information und andererseits als Möglichkeit eine Genauigkeitsabschätzung basierend auf Referenzdaten zu erlangen.

Zudem steht als Referenzdatensatz ein Klassifikationsergebnis des MURBANDY (Monitoring Urban Dynamics) Projektes für Istanbul zur Verfügung. Die Ziele dabei waren die Entwicklung von Methoden zur Erfassung der urbanen Räume Europas, um daraus Rückschlüsse auf Nachhaltigkeit auf regionaler Basis zu erarbeiten, sowie Szenarien des zukünftigen Städtewachstums aufzustellen (LAVALLE ET AL., 2001). Schließlich stehen noch die Ergebnisse der Red Cross Studie (ERDIK, 2002) als Referenzdatensatz zur Verfügung. Diese zeigen die Bevölkerungsverteilung für Istanbul basierend auf einem 500 x 500 Meter Raster.

### 2.2.2. Vorprozessierung

Eine Geocodierung ist unerlässlich, wenn graphische Informationen aus verschiedenen Datenquellen zur Analyse überlagert werden sollen. Das Ziel dabei ist die Anpassung der Daten an ein einheitliches Referenzsystem. Alle Datenprodukte sind daher nach der Universal Transverse Mercator (UTM) Projektion mit ihren spezifischen Parametern, nördliche Hemisphäre, Zone 35 für Istanbul und dem geodätischen Datum WGS 84 referenziert.

Die Einflüsse der Atmosphäre spielen in der optischen Fernerkundung eine bedeutende und komplexe Rolle. Die am Sensor ankommende und dort aufgezeichnete Strahlung entspricht nach Menge und spektraler Zusammensetzung nicht der von den Objekten der Erdoberfläche ausgehenden Strahlung. Die Bestandteile der Atmosphäre, wie Wasserdampf, Partikel, etc., verändern die Strahlung durch Reflektion, Absorption und Streuung. Das Ziel der Atmosphärenkorrektur ist die Ableitung tatsächlicher physischer Reflektionswerte der Erdoberfläche, um szenenunabhängige Vergleichbarkeit der Datensätze zu erreichen und damit Transferierbarkeit von Klassifikationsalgorithmen zu verbessern. Diese Voraussetzung zu schaffen ist, im Bezug auf Transferierbarkeit von den entwickelten Klassifikationsalgorithmen (Kapitel 4), von zentraler Bedeutung. Im Folgenden wird mittels eines Atmosphärenmodells der Atmosphäreinfluss quantifiziert.

“The three most important atmospheric parameters that vary in space and time are the aerosol type, the visibility or optical depth, and the water vapour” (RICHTER, 1996). Die Korrektur der Datengrundlagen wurde mittels der ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction) Software (RICHTER, 1996) durchgeführt. Das Modell ATCOR ist ein physikalisches Modell, welches auf dem Strahlungsübertragungs-Code MODTRAN-4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) basiert (BERK ET AL., 2003). Es verwendet eine Datenbank von umfangreichen Strahlungsberechnungen mit MODTRAN-4. Diese werden in numerischer Form als Look-Up Tabellen für einen weiten Bereich von atmosphärischen Bedingungen und Sonnenständen gespeichert.



Abb. 2-14: Rohdaten und atmosphärisch korrigiertes Bild des IKONOS Sensors

Um den Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Aufnahmen zu modellieren, wurden entsprechende atmosphärische und szenenabhängige Parameter ausgewählt und abgeschätzt. Dazu gehören das Aufnahmedatum, um die Variation des Sonnenstands im Verlauf eines Jahres mit einzubeziehen, die Tageszeit, um die Sonnenhöhe zu ermitteln, sowie die Sensorhöhe mit seinem Blickwinkel. Ebenso wurde der Aerosoltyp als urban gekennzeichnet, die mittlere Sichtweite für einen klaren Wintertag auf einen typischen klimatologischen Durchschnittswert von 30 km gesetzt. Der Wasserdampfgehalt wurde auf 0.3 to 0.8 g/cm<sup>2</sup> gesetzt, was dem Erfahrungswert dieser Jahreszeit entspricht.

Abbildung 2-13 zeigt das Resultat der Atmosphärenkorrektur. Dabei spiegelt das Resultat deutlich die Verminderung des Dunstes wider und ermöglicht eine klarere Differenzierung der Objekte des urbanen Raumes.

### **2.3. Zusammenfassung**

Dieses Kapitel stellt im ersten Teil den thematischen Rahmen dieser Arbeit - urbane Räume und Naturgefahren - vor. Dabei wird das enorme Risiko aus dem Zusammenspiel struktureller Vulnerabilität im Zuge zu dynamischer Urbanisierung und der Gefährdung durch eine Naturgefahr erläutert. Im geographischen Fokus stehen die urbanen Räume der Megacity Istanbul, mit seiner hohen Erdbebengefahr, der Megacity von Morgen, Hyderabad mit seinen strukturellen Schwierigkeiten auf Grund explosiver urbaner Expansion und schließlich der Submillionenstadt Padang, mit seiner Erdbeben- und Tsunamigefährdung.

Zum anderen werden für diese Arbeit relevante Grundlagen der Fernerkundung rekapituliert. Zudem wird die Datenbasis präsentiert, die von den höchst auflösenden Sensoren IKONOS und Quickbird, über geometrisch mittel aufgelösten Daten des Landsat Satelliten, zu dem DGM aus SRTM-Daten reicht. Externe Zusatzdaten der Stadtverwaltung Istanbul sowie Daten aus einer eigenen Geländebegehung dienen als Referenz zur Genauigkeitsabschätzung. Schließlich resultiert aus der Vorprozessierung die Datengrundlage, die für die Entwicklung fernerkundlicher Methoden zur Ableitung von Vulnerabilität in dieser Arbeit verwendet werden.



# Kapitel 3

## Vulnerabilität

*Vulnerability is a term of such broad use as to be almost useless for careful description at the present, except as a rhetorical indicator of areas of greatest concern (TIMMERMANN, 1981)*

In den letzten Jahren hat in der Risikoforschung ein Umdenkprozess von der Quantifizierung und Analyse von Naturgefahren hin zur Identifikation und Abschätzung von Vulnerabilität eingesetzt. Dieser Paradigmenwechsel beruht auf der Erkenntnis, dass Konsequenzen einer Naturgefahr überwiegend durch die Vulnerabilität der davon betroffenen Entität entstehen. Diesem Gedankengang folgend wird schnell deutlich, dass die Abschätzung von Vulnerabilität die Kernkomponente des Risiko- und Desastermanagements darstellt.

Im Folgenden wird der multidimensionale Begriff Vulnerabilität aus verschiedenen wissenschaftlichen Perspektiven heraus beleuchtet, um zu einer ganzheitlichen Definition zu gelangen. Dies stellt die Basis für einen aus der Literatur abgeleiteten konzeptionellen Rahmen dar, sowie seine Untergliederung in das Konzept von Risiko, Gefahr und Vulnerabilität. Daran wird ein Konzept basierend auf einem Indikatorensystem erarbeitet, um den abstrakten Term Vulnerabilität messbar zu machen. Dieser Rahmen gilt als theoretischer Überbau – eine Art Leitfaden dieser Arbeit –, um die Potentiale der Fernerkundung im Bereich Vulnerabilität und Risiko zu analysieren.

### 3.1. Begriffliche Definition von Vulnerabilität

Der Begriff der Vulnerabilität (Verwundbarkeit) ist in der interdisziplinären Naturrisikoforschung richtungweisend, allerdings haftet ihm durch den häufigen Gebrauch in verschiedenen Kontexten und Disziplinen eine gewisse Unschärfe an (CUTTER, 1996). In der aktuellen Literatur finden sich mehr als 25 verschiedene Definitionen sowie zugehörige Konzepte und Methoden um Vulnerabilität zu systematisieren (...). „We are still dealing

with a paradox: we aim to measure vulnerability, yet we cannot define it precisely” (BIRKMANN, 2006). Dies zeigen auch die verschiedenen Definitionen des Begriffs ‚Vulnerabilität‘ verschiedener Forschungsrichtungen mit jeweils differierenden Schwerpunkten. So tendieren als Beispiel die Geisteswissenschaften zu erklärenden Modellen, die Naturwissenschaften zu beschreibenden Methoden. Die folgenden Definitionen geben einen Überblick über den Begriff Vulnerabilität aus verschiedenen wissenschaftlichen Blickrichtungen:

Innerhalb der Geisteswissenschaften verstehen *Sozialwissenschaften* Vulnerabilität in erster Linie als Lebensbedingungen und Potentiale der Bevölkerung in einem bestimmten Raum:

Vulnerability (in contrast to poverty which is a measure of current status) should involve a predictive quality: it is supposedly a way of conceptualizing what may happen to an identifiable population under conditions of particular risk and hazards. It is the complex set of characteristics that include a person’s

- Initial well-being (health, morale, etc.)
- Self-protection (asset pattern, income, qualifications, etc.)
- Social protection (hazard preparedness by society, building codes, shelters, etc.)
- Social and political networks and institutions (social capital, institutional environment, etc.) (CANNON ET AL., 2003).

Für *Wirtschaftswissenschaften* drückt sich Vulnerabilität in monetären Werten aus, sowohl im Bereich des öffentlichen als auch des privaten Sektors.

Economic vulnerability is assessed by a set or composite index of indicators such as the degree of export dependence, lack of diversification, export concentration, export volatility, share of modern services and products in GDP (Gross domestic product), trade openness or simply GDP (BRIGUGLIO, 1995).

*Naturwissenschaften* fokussieren dagegen auf geschätzte Schäden und damit verbundene Änderungs- und Anpassungsprozesse:

The vulnerability of a given entity (system, sector, region, etc.) with respect to Global Change may tentatively be defined as the expected damage as resulting from the expected environmental perturbations in view of the expected transformation and adaptation processes (CORELL ET AL., 2001).

Aus der speziellen naturwissenschaftlichen Sicht der *Klimatologie* zeigt sich Vulnerabilität als ein Langzeitphänomen des Klimawandels.

Vulnerability is defined as the extent to which a natural or social system is susceptible to sustaining damage from climate change (IPCC, 2001).

Die Zeitkomponente zeigt damit deutlich unterschiedliche Sichtweisen auf. So fokussieren im Gegensatz dazu *Ingenieurwissenschaften* auf kurzzeitige, intensive äußere Einwirkungen auf physische Strukturen und deren damit verbundene Anfälligkeit.

Vulnerability expresses the severity of failure in terms of its consequences. The concern is not how long the failure lasts but how costly it is (CORREIRA ET AL., 1987).

Aus der Sicht des *Desastermanagement* steht das Potential der Bevölkerung im Mittelpunkt die Auswirkungen einer Naturgefahr zu überstehen und sich von ihren Auswirkungen wieder zu erholen. Die Grundvoraussetzung dafür ist eine ganzheitliche Informationsbasis in verschiedenen Maßstabsebenen, um lokal, regional oder national Entscheidungsträger vor, während oder nach einem Desasterfall zu unterstützen.

By vulnerability we mean the characteristics of a person or group in terms of their capacity to anticipate, cope with, resist and recover from the impact of a natural hazard. It involves a combination of factors that determine the degree to which someone's life and livelihood are put at risk by a discrete and identifiable event in nature or in society. (BLAIKIE ET AL., 1994)

Die mannigfaltigen Perspektiven der Definitionen des Begriffs Vulnerabilität spiegeln seine Multidimensionalität wider. FÜSSEL (2005) erkennt, dass trotz unterschiedlicher Sichtweisen von verschiedenen Forschungsdisziplinen in der Literatur der Term 'Vulnerabilität' immer das System (oder Region und/oder Bevölkerungsgruppen und/oder Sektoren) und die Gefährdung mit einschließen. Eine letzte zusammenfassende Definition versucht die vielfältigen Blickwinkel interdisziplinär und ganzheitlich zu formulieren:

The condition determined by physical, social, economic and environmental factors or processes, which increase the susceptibility of a community to the impact of hazards (UN/ISDR, 2004).

Die übergeordnete Zielvorgabe dieser Arbeit ist, Entscheidungsträger im Prä- oder Post-Desasterfall eine räumliche Informationsbasis zur Verfügung zu stellen. Vor diesem Hintergrund wird versucht, eine ganzheitliche Definition von Vulnerabilität zu geben, die es zulässt Potentiale der Fernerkundung in diesem Kontext aufzuzeigen. Somit wird in dieser Arbeit die Komplexität des Terms 'Vulnerabilität' verstanden als die kurz- oder langzeitige Belastung physischer, demographischer, sozialer, ökonomischer, ökologischer und politischer Komponenten und deren Auswirkung auf die Kapazität und Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft und seiner Strukturen durch ein externes Ereignis. Damit wird versucht, der Vielfältigkeit von Vulnerabilität, die durch verschiedene Definitionen unterschiedlicher inhaltlicher Stoßrichtungen aufgezeigt wird, Rechnung zu tragen. Der abstrakte Term 'Vulnerabilität' wird, durch die Aufteilung in Komponenten aus verschiedensten Blickwinkeln unabhängig von der inhaltlichen Ausrichtung, beleuchtet und entspricht somit dem ganzheitlichen Gedankengang und nicht Teilaspekten von Vulnerabilität.

### 3.2. Vulnerabilität als konzeptionelle Idee

Die Konzept von *Vulnerabilität* entstammt der Sozialwissenschaft und wurde als Gegenpol zur rein gefahrenorientierten Forschung der 1970er entwickelt (SCHNEIDERBAUER & EHRlich, 2004). Damit vollzog sich eine Verlagerung von gefahrenorientierten Vorhersagestrategien hin zum alternativen Paradigma Vulnerabilität als Ansatzpunkt zur Risikominimierung.

Ein konzeptueller Rahmen dient einer Systematisierung der komplexen und abstrakten Aspekte von Vulnerabilität. Nach BOHLE (2001) beinhaltet das Konzept Vulnerabilität zwei grundsätzliche Elemente. Eine interne Seite, nämlich das Potential zur Bewältigung, entspricht der Kapazität eines Systems zu erkennen, zu verkraften, stand zu halten und sich wieder zu erholen von der Belastung durch eine Naturgefahr. Dazu beinhaltet Vulnerabilität eine externe Seite, die Gefährdung der Strukturen im Bezug auf die jeweilige Gefahr (VAN

DILLEN, 2004). Diese beiden Seiten zeigen sich auch in der schematischen Darstellung von Elementen, die Vulnerabilität konkretisieren (Gleichung 3-1). Dabei bilden der Gefährdungsgrad, beispielsweise einer physischen Struktur, und ihre Sensitivität die externen Komponenten und das Bewältigungspotential der Gesellschaft die internen Komponenten ab.

$$(3-1) \quad \text{Vulnerabilität} = \frac{\text{Gefährdungsgrad} \times \text{Sensitivität}}{\text{Bewältigungspotential}} \quad (\text{WHITE ET AL., 2005})$$

Vulnerabilität ist also ein dynamisches Konzept, das aus den komplexen Zusammenhängen von Gefährdungsgrad, Sensitivität und Kapazität zur Bewältigung entsteht. Dieser allgemeine Überbau erlaubt eine variable Betrachtungsweise von Vulnerabilität hinsichtlich:

- *Multidimensionalität* und *Unterschiedlichkeit* (variiert innerhalb der physischen Gegebenheiten sowie unter- und innerhalb sozialer Schichten)
- *Maßstabsabhängigkeit* (basierend auf räumlichen Analyseeinheiten: Individuum, Haushalt, Region, System, Nation, etc.)
- *Dynamik* (Änderung über die Zeit: Tag, Jahr, Jahrzehnt).

Der konzeptionelle Rahmen von Vulnerabilität stellt ein abstraktes Gedankenkonstrukt dar und ist damit kaum messbar bzw. abschätzbar. Die Fähigkeit, Vulnerabilität zu messen ist allerdings essentiell im Kontext der Risikominimierung. Im Folgenden wird versucht das Konzept Vulnerabilität systematisch in eine modellhafte, hierarchische Struktur zu gliedern.

Das hierarchische Konzept dient dabei der Konkretisierung des konzeptionellen Rahmens. Dabei wird der abstrakte Begriff ‚Vulnerabilität‘ in Komponenten unterteilt, die ihre jeweiligen Merkmale näher definieren. Komponenten sind dabei die physischen, demographischen, sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Aspekte von Vulnerabilität. Diese Systematisierung wird fortgesetzt durch eine kontinuierliche Untergliederung der Komponenten nach ihren jeweiligen Ursachen. So gliedert sich beispielsweise die physische Vulnerabilität in Ursachen wie Lage oder strukturelle Vulnerabilität auf. Ein letzter Schritt zur Konkretisierung ist die Unterteilung der Ursachen in konkret quantifizierbare oder qualitative Indikatoren bzw. Variablen (Tab. 3-1).

Das Kennzeichen dieser Indikatoren ist, dass sie Informationen zusammenfassen, die im Bezug auf ein bestimmtes Phänomen relevant sind (GALLOPIN, 1997). Folglich kann man einen Vulnerabilitätsindikator als eine Variable definieren, der messbare Information über die Charakteristik oder Qualität eines Systems im Bezug auf den Gefährdungsgrad, die Sensitivität und das Bewältigungspotential im Falle einer Naturkatastrophe zur Verfügung stellt.

Indikatoren sind die entscheidenden Variablen, um Vulnerabilität zu messen und Potentiale zur Bewältigung zu identifizieren (BIRKMANN, 2006). Indikatoren ermöglichen also ein quantitatives und qualitatives Maß zur Beschreibung von Teilaspekten sowie deren Kombinatorik zur Abschätzung von Vulnerabilität. Theoretische Anforderungen an die Charakteristika der Indikatoren sind ihre Gültigkeit, Sensitivität, Verfügbarkeit, Verlässlichkeit sowie ihre Objektivität (HAHN, 2003). BRIGUGLIO (2003) fügt als Anforderungen noch Simplizität, Erschwinglichkeit, Tauglichkeit für internationale und temporale Vergleiche sowie Transparenz an.

Ein Indikatorensystem ermöglicht Schlüsselindikatoren von Vulnerabilität herauszufiltern und als Entscheidungsbasis für Gegenmaßnahmen zu nutzen. Dazu können Einzelindikato-

ren über die Zeit hinweg beobachtet bzw. überwacht werden, um eventuell ergriffene Maßnahmen zu evaluieren.

Die Variabilität der individuellen Variablen (z. B. 10 Millionen Einwohner und Urbanisationsrate) erfordert eine Skalierung, um sie vergleichbar zu machen und damit kombinierbar (BOLLIN & HIDAJAT, 2006). Dafür werden die Variablen unabhängig voneinander in einen qualitativen (z. B. nicht vorhanden, null, gering, mittel, hoch) oder quantitativen (0 bis 1) Vulnerabilitätswert umgerechnet, eine so genannte Indizierung. Bei der Verrechnung der zur Verfügung stehenden Variablen kann ein Gewichtungsfaktor, der dem Einfluss der Variablen auf das System Rechnung trägt, eingerechnet werden.

$$(3-2) \quad \text{Vulnerabilitätsindex} = \frac{1}{n_i} \times \sum_{j=1}^{n_i} (f \times V)$$

$n_i$  = Anzahl der vorhandenen Variablen

$V$  = Indexwert einer Variablen (von 0 bis 1)

$f$  = Gewichtungsfaktor für eine individuelle Variable (von 0 bis 1)

Gleichung 3-2 ist also eine mathematische Umsetzung von Gleichung 3-1 basierend auf der Konkretisierung der theoretischen Komponenten. Die Vulnerabilität eines Indikators errechnet sich hierbei aus einer Kombination aller zur Verfügung stehenden Variablen, kann also entweder auf Teilaspekte fokussieren oder eine ganzheitliche Abschätzung errechnen. Der Vulnerabilitätsindex ist also eine Normierung der individuellen Indikatoren sowie eine Möglichkeit zur Gewichtung ihrer Teilbestandteile. Dadurch ermöglicht man einen Vergleich von räumlichen Einheiten (Nationale Ebene, Megacities, Kleinstädte, Gemeinden, etc.) hinsichtlich ihrer Vulnerabilität. Die so errechneten Indikatoren können analog dazu verrechnet werden, um Vulnerabilität ganzheitlich beurteilen zu können.

Eine weitere Möglichkeit nach der Indizierung eine Kombination der Indikatoren durchzuführen ist die Aufspannung eines n-dimensionalen Merkmalsraums (Abb. 3-1). Dabei bestehen die Achsen aus den jeweiligen indizierten Variablen eines Indikators. Die Länge des entstehenden Vektors bestimmt den Grad der Vulnerabilität einer Raumeinheit. Die Richtung des Vektors enthält zudem Informationen, welche Variable welchen Einfluss auf den Indikator hat. Mit dieser Möglichkeit lassen sich Vulnerabilitätsindikatoren vergleichen, sowie die zentralen Einflusskriterien herausfiltern. Auch hier kann eine Gewichtung der Variablen erfolgen.

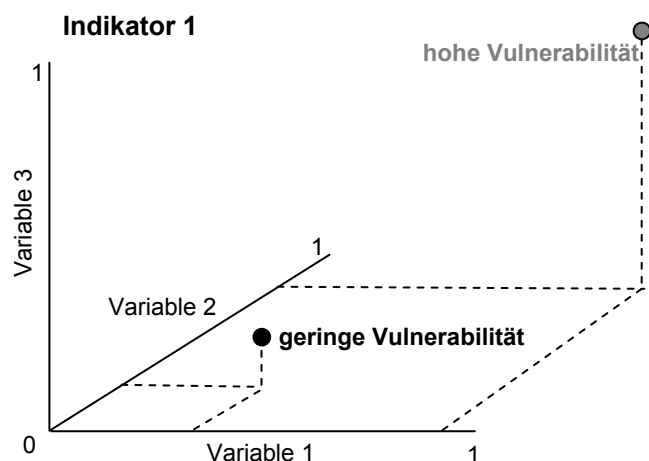


Abb. 3-1: 3D-Merkmalsraum zur Bestimmung von Vulnerabilität

Die hierarchische Struktur vom abstrakten Überbau bis hin zu konkreten Indikatoren und deren Indizierung fasst die konzeptionelle Sichtweise von Vulnerabilität zusammen. Diese

Konkretisierung ermöglicht eine quantitative und qualitative Abschätzung von Vulnerabilität mittels Indikatoren. Diese Aufgliederung der Teilaspekte ermöglicht eine analytische Identifizierung potentieller Beiträge der Fernerkundung zur Abschätzung von Vulnerabilität.

### 3.3. Vulnerabilität im konzeptionellen Rahmen von Risiko und Gefahr

Risiko ist etwas Imaginäres, Zukünftiges und impliziert damit Unsicherheit. Allgemein formuliert definiert sich Risiko als Wahrscheinlichkeit, Verlust und Schaden zu erleiden.

$$(3-3) \quad \text{Risiko} = \text{Wahrscheinlichkeit} \times \text{Konsequenzen} \quad (\text{BROOKS, 2003})$$

Die Projektion dieser allgemeinen Gleichung auf das Forschungsfeld des Disaster- und Risikomanagements konkretisiert diese Definition. Die VEREINTEN NATIONEN (UNDP, 2004) definieren 'Risiko' für ein bestimmtes System (zum Beispiel System ‚Stadt‘) mit zwei Faktoren: Die *Gefährdung* durch ein physisches Schadensereignis, Phänomen oder eine menschliche Aktivität das durch Lage, Intensität, Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit definiert ist, und die *Vulnerabilität*, die das Verhältnis zwischen dem Grad der Gefährdung und dem Grad der Schäden kennzeichnet. Das Konzept von Vulnerabilität ist also als Teilaspekt eingebettet in das Gesamtkonzept von Risiko und Gefahr. Trotz seiner Unschärfe trägt Vulnerabilität doch erheblich zu diesem Gesamtkonzept bei.

$$(3-4) \quad \text{Risiko} = \text{Naturgefahr} \times \text{Vulnerabilität} \quad (\text{UN, 1991})$$

Die allgemeine Komponente Wahrscheinlichkeit der Gleichung 3-3 bildet sich nach wie vor in der Naturgefahr ab, die durch Eintrittswahrscheinlichkeit und Stärke definiert ist. Die Komponente Konsequenzen aus Gleichung 3-3 für das System spiegelt sich in der Wechselwirkung der Naturgefahr mit den vielfältigen Komponenten von Vulnerabilität wider. Gleichung 3-4 zeigt also die Implementierung von Vulnerabilität in das Konzept von Risiko. Dabei bildet sich deutlich eine mathematische Abhängigkeit ab, das heißt im Beispielsfall einer hohen Erdbebengefährdung ergibt die Multiplikation mit einem nicht vulnerablen Gebiet ein Risiko von 0, während ein vulnerables Gebiet das Risiko multiplikativ erhöht. Dies drückt sich auch im sogenannten „Pressure and Release Model (PAR model)“ (BLAIKIE ET AL, 1994) aus, das Prozesse, die Vulnerabilität erzeugen, der Einwirkung der Naturgefahr gegenüberstellt. Der konzeptionelle Rahmen betont also die dynamischen Prozesse eines potentiell einwirkenden Gefahrenereignisses und den damit verursachten Belastungen sowie das Potential des Systems dieser Belastung entgegenzuwirken. Damit entspricht es auch dem in Gleichung 3-1 dargestellten Konzept.

Der konzeptionelle Rahmen einer Risiko- bzw. Vulnerabilitätsabschätzung muss dabei vor dem Hintergrund vier fundamentaler Säulen spezifiziert sein:

- dem betrachteten System (z. B. Stadt)
- der Gefahr (z. B. Erdbeben)
- den betroffenen Entitäten (z. B. Menschenleben, Gebäudestrukturen, usw.)
- der im Fokus der Untersuchung stehenden Zeit bzw. Zeitspanne (FÜSSEL, 2005).

Abbildung 3-2 setzt Gleichung 3-4 graphisch um, und stellt den Bezug zur zeitlichen Dimension eines Desasterereignisses her. Die Abschätzung der Vulnerabilität stellt im Vorfeld eines zu erwartenden Desasters die Grundlage für systematische Maßnahmen zur Prävention. Dies spiegelt sich im Desaster Management Zyklus wider, der die zeitlichen Stadien und deren potentielle Handlungsmaßnahmen schematisch aufzeigt. Nachhaltige Entwicklung bedingt eine ausreichende Informationsbasis zur Identifikation von Vulnerabilität. Erst dadurch können Entscheidungsprozesse gezielt unterstützt werden und zur Prävention und Bereitschaft im Falle des Desasterereignisses beitragen. Das Potential der Fernerkundung zu diesem zeitlichen Stadium eine breite räumliche Informationsbasis bereit zu stellen, steht im Zentrum dieser Arbeit. Diese Informationsbasis kann aber auch im Post-Desaster Stadium Entscheidungsgrundlagen für die unmittelbaren Hilfsmaßnahmen sowie den Wiederaufbau bieten.

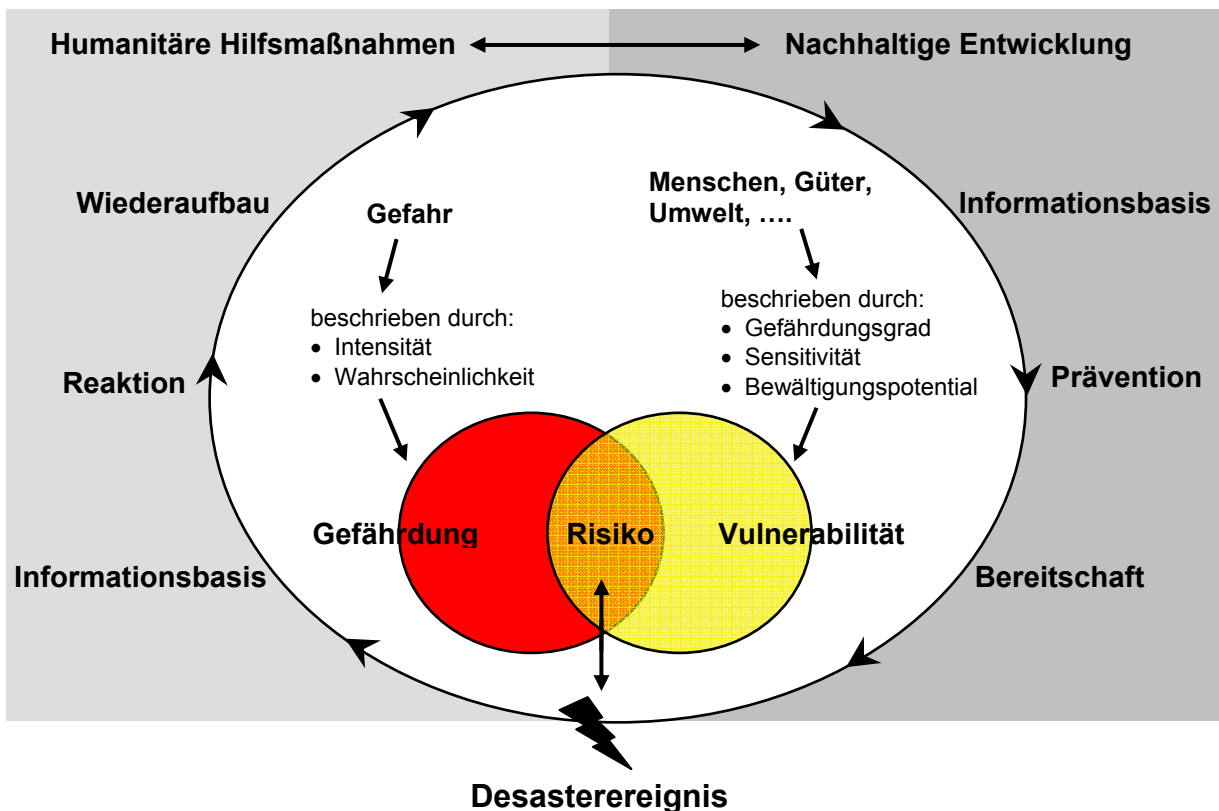


Abb. 3-2: Risiko als Resultat der Interaktion von Vulnerabilität und Gefährdung innerhalb des Desaster Management Zyklus (verändert; DKKV, 2003; WISNER, 2003)

Das Risiko resultiert also aus den potentiellen zukünftigen Wechselwirkungen einer Naturgefahr und deren Eintrittswahrscheinlichkeit mit den vielen Komponenten von Vulnerabilität. Die folgende Tabelle 3-1 versucht einen konzeptionellen und schematischen Überblick zu Risiko, Vulnerabilität und Gefahr zu geben. Dabei wird versucht, das hierarchische Konzept vom theoretischen Überbau bis hin zur Konkretisierung partieller Aspekte von Vulnerabilität mittels einer Auswahl von Indikatoren sowie deren Index aufzuzeigen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit dient dieser konzeptionelle Rahmen und vor allem die Auswahl der für den urbanen Raum relevanten Indikatoren als Leitfaden, um die Potentiale, aber auch Limitierungen der Fernerkundung, für eine Vulnerabilitätsabschätzung analytisch aufzuzeigen.

Konzeptueller Rahmen		Komponenten	Ursachen	Indikatoren / Variablen	Index	
<b>Risiko</b>	<b>Gefährdung</b>	<b>Naturkatastrophen, menschliche Bedrohung, Phänomen</b>	Erdbeben, Vulkanausbrüche, Überschwemmungen, Hangrutschungen, Terroranschläge, etc.	Häufigkeit, Stärke, Eintrittsgeschwindigkeit, räumliche Gefährdung, Wahrscheinlichkeit des Auftretens, Dauer, Zeit, etc.	Indizierung der Indikatoren: nicht vorhanden / keine / gering / mittel / hoch	
			Sekundäre Gefährdung: Hangrutschungen, Tsunami, Brände, etc.	Geländehöhe, Hangneigung, Orientierung, Bodentyp, etc.		
	<b>Vulnerabilität</b>	$\text{Gefährdungsgrad} \times \text{Sensitivität}$ Bewältigungspotential	<b>Physische Vulnerabilität (Fragilität)</b>	Lage		Zugänglichkeit, Distanzen, etc.
				Strukturelle Gefährdung		Anzahl der Gebäudeeinheiten, Gebäudedichte, Gebäudehöhe, Gebäudematerial, Gebäudetyp, Fragilität der Strukturen, Dachtyp, Alter der Struktur, Urbanisationsrate, Versiegelungsgrad, Freiflächen, etc.
				Kritische Infrastruktur		Verkehrsinfrastruktur, öffentliche Verkehrssysteme, Kommunikation, Pipelines, Versorgung, Lifelines, Tragfähigkeit, etc.
			<b>Demographische Vulnerabilität</b>	Bevölkerungsstruktur		Gesamtbevölkerung, Bevölkerungsdichteverteilung, Tag- und Nachtverteilung, Altersstruktur, Geschlecht, etc.
				Bevölkerungsentwicklung		Bevölkerungswachstum, Migrationsrate, etc.
			<b>Soziale Vulnerabilität</b>	Sozialer Status		Bildung, Implementierung von ‚public awareness‘ Programmen, Gesundheit, Soziales Netzwerk, Geschlecht, etc.
				Zugang zu und Versorgung mit lokalen Einrichtungen		Krankenhaus, Schule, Feuerwehr, Notunterkünfte, etc.
			<b>Ökonomische Vulnerabilität</b>	Finanzielles Einzelpotential		Pro-Kopf-Einkommen, Versicherung, Eigentum, Arbeitslosigkeit
				Staatliches Potential		Lokales Budget, Bruttosozialprodukt, Hilfsprogramme, Inflation, Hilfsorganisationen, Human Poverty Index (HPI), etc.
			<b>Politische Vulnerabilität</b>	Entscheidungsstrukturen		Politisches System, Frühwarnsysteme, Katastrophenmanagement, Informationsmanagement, etc.
			<b>Ökologische Vulnerabilität</b>	Natürliche Ressourcen		Wasserreservoir, Anzahl Ackerflächen, Waldgebiete, etc.

Tab. 3-1: Konzept von Risiko, Vulnerabilität und Gefährdung



### 3.4. Urbane Vulnerabilität und Fernerkundung

Der Term ‚urban‘ beschreibt die räumliche Konzentration von Menschen (RASHED, 2003b). Urbane Räume definieren sich aber auch durch die Dominanz sekundär- und tertiärwirtschaftlicher Aktivitäten und weitgehendem Fehlen des Primären Sektors, der Geschlossenheit des Siedlungskörpers mit hohen Bebauungsdichten, der räumlichen Heterogenität der Stadtmorphologie sowie ihrer sozialräumlichen Heterogenität (Viertelbildung), einem Mindestmaß an Zentralität und einer komplexen zeit- und räumlichen Dynamik von ‚städtischem Leben‘ (HOFMEISTER, 1994). Es ergeben sich also eng verzahnte raum-zeitliche Prozesse und Muster zwischen Mensch und urbaner Umwelt.

Urbane Vulnerabilität lässt sich dadurch nicht als simple, geradlinige Kette von Kausalzusammenhängen abbilden (PELLING, 2003). Nicht die Natur verursacht „Katastrophen“, sondern Vulnerabilität mit ihrer Vielzahl von Indikatoren (vgl. Tab 3-1). Gerade das komplexe Geflecht urbaner Zusammenhänge verursacht besondere Rückkopplungsschleifen und Dominoeffekte, das heißt die Vulnerabilität eines urbanen Systems ist daher mehr als nur die Summe ihrer Elemente (Indikatoren). RASHED (2003b) definiert:

“Urban vulnerability to natural hazards such as earthquakes is a function of human behaviour”.

Die konkrete Abbildung des konzeptionellen Rahmens von Risiko und Vulnerabilität auf einen urbanen Raum zeigt sich in der Indikatorenauswahl von Tabelle 3-1. Urbane Vulnerabilität bildet sich dabei in Abhängigkeit von physischen, demographischen, sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Wechselwirkungen in räumlichen Mustern ab. Dieser theoretische Überbau zielt auf ein ganzheitliches Konzept zur Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko. Für eine Forschungsrichtung ist es auf Grund des Umfangs und der verschiedenartigen Typen von Indikatoren unmöglich Vulnerabilität ganzheitlich für ein bestimmtes Gebiet abzuschätzen. Traditionelle Methoden der Feldarbeit, Methoden der Ökonomie, Ingenieurwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften, Stadtplanung, Politik oder Fernerkundung, haben unterschiedliche Sichtweisen und Datengrundlagen. Trotzdem sind es keine Konkurrenten einer Vulnerabilitätsabschätzung, sondern notwendige Komponenten zur Ergänzungen eines Systems von Forschungszweigen für eine umfassende Abschätzung.

Die Potentiale der Fernerkundung im Hinblick auf Vulnerabilität und Risiko in urbanen Räumen stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit. Dabei liegt der Fokus in der Analyse welche Daten, Methoden und Produkte der Fernerkundung Indikatoren zu Vulnerabilität und Gefahr im Bezug auf ein drohendes Erdbeben in urbanen Räumen beisteuern können.

In der Natur von Fernerkundungsdaten liegt die flächendeckende Herangehensweise. Unterschiedliche Datengrundlagen ermöglichen der Fernerkundung zum einen den physischen Überblick von großflächigen Metropolregionen, aber auch lokale Analysen kleinräumiger Stadtstrukturen. Damit schafft Fernerkundung, im Gegensatz zu anderen Wissenschaften, die oft nur punktuell oder sehr lokal agieren, räumlich gesehen, eine ganzheitliche Perspektive. Die Stärken liegen in erster Linie in der Ableitung physischer Komponenten der Vulnerabilität. Die Erfassung von Urbanisation über die Zeit, die räumliche Ausdehnung des urbanen Raumes, die Detektion von Stadtstrukturtypen und Mustern bis hin zu Gebäudecharakteristika sind Beispiele für die Ableitung von Indikatoren unterschiedlichster räumliche Skalierung.

gen. Neben dieser direkten Methode Indikatoren abzuleiten ergeben sich aber auch indirekt Potentiale auf Vulnerabilitätsindikatoren zu schließen.

Moderne städtische Gesellschaften weisen eine ausgeprägte soziale Differenzierung auf (BURGESS, 1925; HARRIS & ULLMAN, 1945; HOYT, 1939). Unter der Annahme, dass soziale und demographische Differenzierung sich in räumlichen Stadtstrukturen niederschlägt, wird die physische Struktur des Raumes zu einer zentralen Variable (HOFFMEYER-ZLOYZTNIK, 2000). Auf der Suche nach jenen, einen Raum strukturierenden zentralen Merkmalen stößt man schnell auf die Merkmale „Größe“, „Dichte“ und „Heterogenität“. Diese Arbeit versucht mit neuen höchst aufgelösten Fernerkundungsdaten als aktueller und flächendeckender Datengrundlage die Ableitung und Analyse hoch detaillierter stadtstruktureller Merkmale. Aus dieser Analyse der physischen Morphologie des urbanen Raumes entstehen Potentiale, nicht nur indirekt auf demographische und sozioökonomische Strukturen zu schließen, sondern auch Indikatoren zur Ableitung von Vulnerabilität zu ermitteln.

### **3.5. Zusammenfassung**

Vulnerabilität ist ein komplexer Term, zu dessen Gesamtkonzept viele Teilaspekte verschiedenster Forschungsrichtungen beitragen. Diese Arbeit versucht, Vulnerabilität als allgemeinen und ganzheitlichen Ansatz aus verschiedensten interdisziplinären Teilkomponenten zu verstehen. Deren Konkretisierung wird in Form von quantitativ oder qualitativ messbaren Indikatoren umgesetzt. Die Auswahl der Indikatoren hängt daher von dem betrachteten thematischen und geographischen Raum/System, ab. Somit ist

Vulnerabilität in Abhängigkeit von betrachteter Zeitdimension und von dem geographischen Raum (System), ein Zusammenspiel physischer, demographischer, sozialer, ökonomischer, ökologischer und politischer Komponenten und deren Auswirkung auf die Kapazität und Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft und seiner Strukturen durch ein externes (Natur)Ereignis.

Das Potential zur Abschätzung von Vulnerabilität für einen Raum hängt von den Datengrundlagen ab und kann daher meist nur Teilaspekte des ganzheitlichen Konzepts beleuchten. Diese Teilaspekte aufzuzeigen, ermöglicht im Folgenden die Potentiale der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität herauszuarbeiten und zu analysieren, aber auch die Limitierungen einer Forschungsrichtung aufzuzeigen. Das Risiko eines Systems, in unserem Fall das System urbaner Raum, ergibt sich schließlich aus der Kombination jener Vulnerabilität und der (Natur)gefahr. Im Folgenden dient dieser konzeptionelle Überbau als Leitfaden zur Ableitung relevanter Indikatoren des Vulnerabilitätskonzepts mit Methoden der Fernerkundung.

# Kapitel 4

## Klassifikation von Fernerkundungsdaten urbaner Räume

Urbane Landschaften, insbesondere Megacities und zukünftige Megacities in Entwicklungsländern, unterliegen einer ungeheueren Dynamik und sind damit Gebiete schneller räumlicher sowie soziodemographischer Veränderungen. Die zur Verfügung stehenden Daten sind daher oft generalisiert, veraltet, unzuverlässig oder in vielen Fällen nicht vorhanden. Die Analyse urbaner Situationen sowie nachhaltige Planung und Stadtmanagement bedingen aber aktuelle und flächendeckende Informationen. Fernerkundungsdaten sowie daraus abgeleitete Parameter vermögen genau diese Informationen für solch dynamische Räume zur Verfügung zu stellen und somit ein zentrales Werkzeug für Entscheidungsträger zu sein.

„Image classification is the process used to produce thematic maps from imagery“ (SCHOWENGERDT, 1997). Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Methode zur automatisierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten. Eine Klassifikation beantwortet die grundlegende Fragestellung nach dem „Was ist wo?“ und ermöglicht darauf aufbauend beispielsweise Analysen hinsichtlich der räumlichen Vulnerabilität der Stadt. Das Ziel ist eine exakte, aktuelle und flächendeckende Extrahierung der Landbedeckung. Dafür stehen einerseits geometrisch höchst aufgelöste Daten des IKONOS bzw. des Quickbird Sensors zur detaillierten Analyse aktueller stadtstruktureller Merkmale zur Verfügung (vgl. Abb. 2-9 und Abb. 2-10). Andererseits werden geometrisch mittel aufgelöste Landsat-Daten für eine temporale und flächendeckende Analyse des Großraums Istanbul herangezogen (vgl. Abb. 2-11).

Basierend auf einem objektorientierten Ansatz wird für die höchst aufgelösten Daten ein theoretischer Rahmen entwickelt, der einfache und schnelle Übertragbarkeit gewährleisten soll. Die modulare Konzeption ermöglicht individuelle und interaktive Anpassung der Module ‚Segmentierung‘ sowie ‚Klassifikation‘ an die jeweiligen Datenvorgaben. Die Entwicklung des Ansatzes basiert auf IKONOS Daten von Istanbul, seine Transferierbarkeit wird in einer zweistufigen Abfolge getestet. Zuerst wird eine Übertragung für eine andere IKONOS-Szene

eines anderen Stadtteils in Istanbul gerechnet. Im zweiten Schritt wird die Übertragbarkeit auf einen weiteren höchst auflösenden Sensor (Quickbird) mit ähnlichen technischen Details (vgl. Tab. 2-1) getestet. Der modulare objektorientierte Klassifikationsansatz soll damit schnelle und einfache Übertragbarkeit auf beide Sensortypen sowie auf andere urbane Räume nachweisen. Anschließend wird eine objektorientierte Methode präsentiert, um mittels Landsat Daten eine flächendeckende Überblicksklassifikation über den Großraum Istanbul zu erhalten. Genauigkeitsabschätzungen für die jeweiligen Datensätze zeigen Potentiale von höchst aufgelösten und mittel aufgelösten Satellitendaten für urbane Klassifikationen sowie das Potential des Transfers.

#### **4.1. Klassifikation geometrisch höchst aufgelöster Satellitendaten urbaner Räume**

Eine traditionelle Methode Informationen aus höchst aufgelösten Satellitendaten abzuleiten, ist die visuelle Interpretation (BAUER & STEINNOCHER, 2001). Sie stellt einen subjektiven, zeitraubenden und teuren Prozess dar. Das fundamentale Konzept für automatisierte Klassifikationsalgorithmen baut auf Ähnlichkeit von Pixel oder Gruppen von Pixel. Zur Bestimmung von Ähnlichkeiten nutzt man einen mehrdimensionalen Merkmalsraum, der von einem Koordinatensystem aufgespannt wird, dessen Achsen durch die einzelnen Bänder des digitalen Datensatzes definiert werden.

Die Komposition der urbanen Landschaft in kleine Objekte unterschiedlichster Materialien auf engem Raum ist ein Merkmal, das traditionelle Auswerteverfahren schwierig macht (MAKTAV & ERBEK, 2005). Mit dem Anstieg der geometrischen Auflösung steigt also auch die interne Variabilität der spektralen Information eines Objektes. Eine effektive Extrahierung städtischer Informationen braucht daher eine komplexere Strategie als traditionelle pixelbasierte Klassifikationsansätze (VAN DER SANDE, 2003). Objektorientierte Bildanalyseverfahren stützen sich im Gegensatz zu pixelbasierten Verfahren auf benachbarte Pixelgruppen, die auf Grund homogener Eigenschaften zu aussagekräftigen Objekten (Segmenten) fusioniert werden. Diese generierten Grundeinheiten repräsentieren im Idealfall Formen und Objekte der realen Welt, wodurch für eine Klassifizierung nicht nur spektrale, sondern auch form-, struktur-, kontext- und hierarchiebezogene Attribute herangezogen werden können.

Diese Erweiterung der Funktionalität macht sich der entwickelte urbane Klassifikationsansatz zu nutze, um die heterogenen, kleinräumigen Strukturen urbaner Räume mit hinreichender Genauigkeit zu klassifizieren. Oberstes Ziel für die methodische Entwicklung des urbanen Klassifikationsansatzes ist eine zeitlich und räumlich stabile Übertragbarkeit. Unter dieser Prämisse wird ein theoretischer Rahmen präsentiert, dessen theoretisches Konstrukt grundsätzlich für urbane Analysen entwickelt ist. Der Rahmen beinhaltet die logische und strukturelle Verkettung von Einzelmodulen, und gibt somit die grundlegende Methode vor. Dieser starre Rahmen beinhaltet einen modularen Aufbau mit Sub-Prozeduren. Diese bieten eine interaktive Möglichkeit, den individuellen Merkmalen einer Szene – sei es spektral oder räumlich – Rechnung zu tragen und gezielt Anpassungen vorzunehmen, ohne dabei den Ablauf zu ändern.

Die beiden Grundkomponenten innerhalb des Rahmenwerks sind die Segmentierung (Abb. 4-1, (1)) und die Klassifikation (12). Unterschiedliche Datensätze weisen je nach Blickwinkel des Sensors, dem jeweiligen Aufnahmezeitpunkt bzw. Sonnenstand sowie den verschiede-

nen atmosphärischen Bedingungen spektrale Differenzen auf. Genauso ergeben sich auch in Abhängigkeit des Kulturraumes strukturelle und damit räumliche Unterschiede in den Datensätzen. Stabile raum-zeitliche Übertragbarkeit ist daher mit Anpassungen verbunden. Mit dem interaktiven, modularen Aufbau ergibt sich für den Anwender die Möglichkeit, innerhalb eines festen Rahmenwerks gezielt spezifische und systematische Anpassungen an die jeweiligen Besonderheiten des aktuellen Datensatzes vorzunehmen.

Abbildung 4-1 zeigt chronologisch den systematischen Aufbau des Rahmenwerkes von den Eingangsdaten (2), über die methodischen Aspekte des Segmentierungsprozesses (3) – (11), hin zu dem modularen Klassifikationsablauf (13) – (21) mit der Landbedeckungsklassifikation (22) als Resultat. Die Einzelschritte werden in den Abschnitten 4.1.1. und 4.1.2. erläutert und diskutiert.

### 4.1.1. Segmentierung

Mit jeder Verbesserung der Auflösung steigt auch die Komplexität des Informationsgehaltes. Die hohe geometrische Auflösung von Daten ermöglicht die detaillierte Abbildung der komplexen, kleinräumigen Strukturen urbaner Räume. Traditionelle pixelbasierte Klassifikationsmethoden haben auf Grund der dadurch entstehenden spektralen Heterogenität innerhalb von Objekten (z. B. ein Dach mit kleinen Fenstern, oder Autos auf Straßen) nicht mehr das ausreichende Potential mit ausreichender Genauigkeit, Objekte richtig zu klassifizieren (HEROLD, 2002b). Objektorientierung bedeutet in der Fernerkundung, dass nicht einzelne Pixel in ihrer spezifischen spektralen Ausprägung betrachtet werden, sondern vielmehr Cluster angrenzender Pixel, sogenannte Segmente.

Segmentierung ist der Prozess einer kompletten Partitionierung einer Satellitenbildszene (Rasterdatensatz) in sich nicht überlappende Regionen (Segmente). Die grundlegende Funktion von Segmentierungsalgorithmen ist die Fusion von Bildelementen (Pixel) basierend auf ihrer Homogenität beziehungsweise ihre Differenzierung von Nachbarregionen auf Grund ihrer Heterogenität (SCHIEWE, 2002). Innerhalb der hier verwendeten Software eCognition wird die Bildsegmentierung über einen Region-Growing-Algorithmus realisiert, der die einzelnen Bildprimitive auf der Basis eines heuristischen Optimierungsalgorithmus zu homogenen Objekten zusammenfasst (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Dabei können die Objekteigenschaften über farb- und formbezogene Heterogenitätsparameter, über einen Skalierungsparameter sowie die Gewichtung der Eingangsdaten erfolgen.

Folgende Heterogenitätskriterien bestimmen im Wesentlichen das räumliche Erscheinungsbild der Segmente: Die spektrale Heterogenität wird über die Summe der Standardabweichungen der jeweiligen Spektralwerte jeder berücksichtigten Ebene ermittelt (4-1). Die formbezogene Heterogenität wird über die Kriterien Smoothness (4-2) (Glattheit der Umrandungslinie) und Compactness (4-3) (Kompaktheit) definiert.

$$(4-1) \quad h = \sum (w_c \times \sigma_c)$$

$h$  = zulässige Heterogenität  
 $w_c$  = Gewichtung  
 $\sigma_c$  = Standardabweichung

$$(4-2) \quad h_{\text{smooth}} = \frac{l}{b}$$

$l$  = Länge der Umrandungslinie  
 $b$  = kürzestmögliche Umrandungslinie

$$(4-3) \quad h_{\text{compact}} = \frac{l}{\sqrt{n}}$$

$n$  = Anzahl der Pixel des Segments

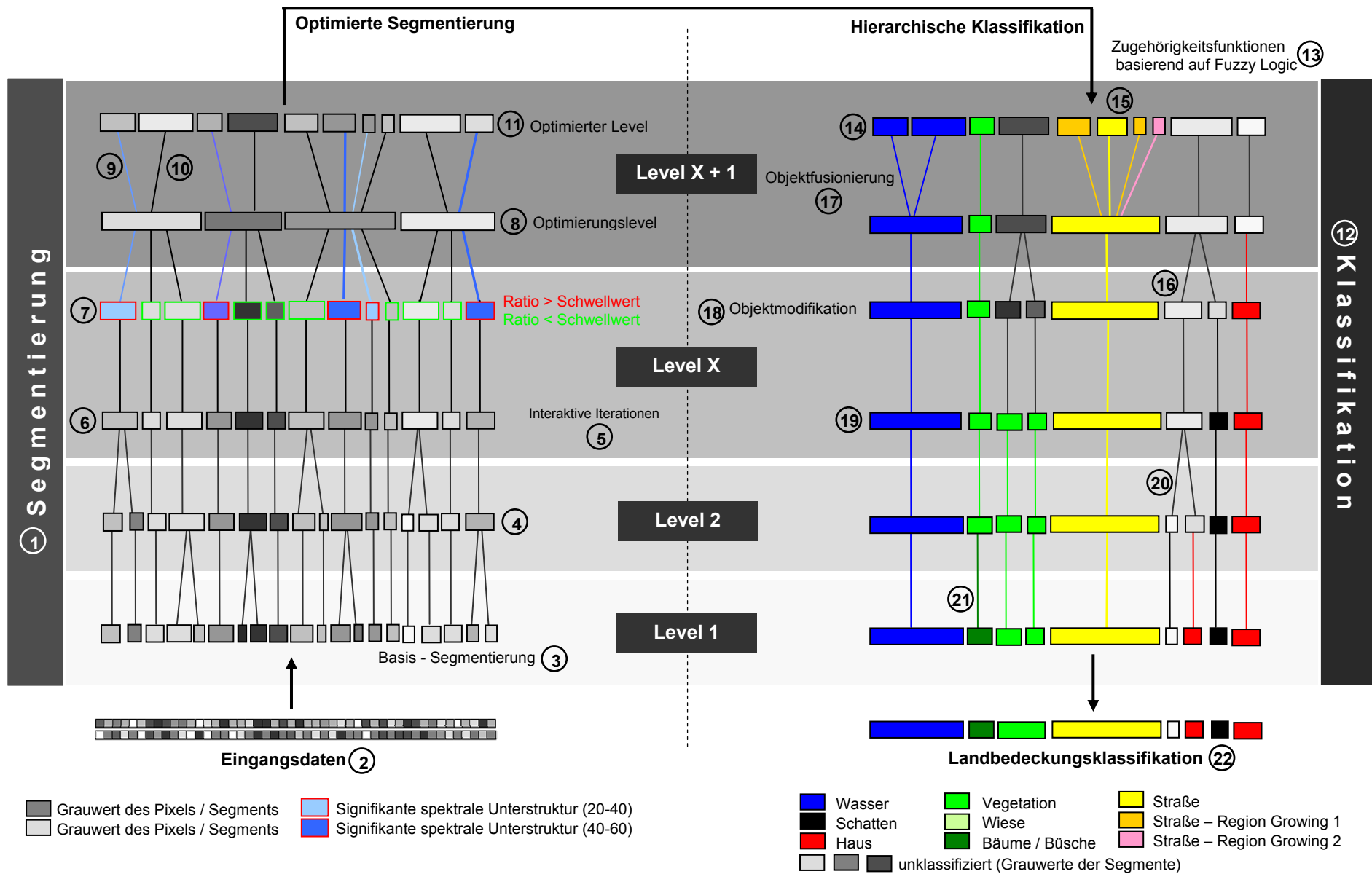


Abb. 4-1: Chronologischer und systematischer Rahmen der objektorientierten Klassifikationsmethode

Die Steuerung der Objektgrößen erfolgt über den Skalierungsparameter, welcher ein Maß für die maximale spektrale oder formbezogene Heterogenität bei der Fusion zweier Pixel oder Segmente ist. Mathematisch betrachtet, wird der Skalierungsparameter quadriert und mit einem Fusionswert verglichen, der sich aus der spektralen und formbezogenen Heterogenität der zu vereinigenden Bildsegmente errechnet. Damit stellt er das Abbruchkriterium des Segmentierungsprozesses dar.

“Single pixels do not represent the important semantic information necessary to interpret an image like meaningful image objects and their mutual relationships do” (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Die resultierenden Segmente bilden im Idealfall die räumlichen Komponenten der realen Welt ab, und ermöglichen dadurch nicht nur eine spektrale Auswertung, sondern auch eine Einbindung von räumlichen, texturalen, Nachbarschafts- und Hierarchieelementen.

Basierend auf unterschiedlichen Skalierungen kann im Rahmen der Multiresolution Segmentation ein hierarchisches Netzwerk von Bildobjekten aufgebaut werden. Dabei können verschiedene Segmentierungsebenen (z. B. Abb. 4-1 (3) und (4)) mit variierenden Objektgrößen und -eigenschaften über- und untereinander angelegt werden, wobei höhere Levels auf den Objekten des direkten Sub-Levels aufbauen. Dadurch sind Segmentgrenzen und Segmentgeometrien über die Levels hinweg konsistent, und es können neben spektralen und formbezogenen Informationen auch entsprechende Eigenschaften der Nachbar-, Ober-, und Unterobjekte abgerufen werden.

Die hier eingesetzte Segmentierungsoptimierung wurde von ESCH (2006) entwickelt. Das zentrale Ziel der Optimierung ist eine robuste Erfassung von Objekten unterschiedlicher Größe innerhalb eines Segmentierungsebenen. Rekapitulierend beinhaltet das Konzept eine Basissegmentierung (6) und ein Optimierungslevel (8) mit einem dementsprechend höheren Skalierungsparameter. Die Optimierungsprozedur gleicht nun die spektrale Differenz jedes Sub-Segments der Basissegmentierung mit der spektralen Signatur des Superobjektes des Optimierungslevels ab. Falls eine signifikante spektrale Differenz errechnet wird, so wird dieses Segment als signifikante Unterstruktur klassifiziert (7). Die Folge davon ist, dass diese signifikante Unterstruktur, die die zulässige spektrale Differenz im Verhältnis zum größeren Segment des Optimierungslevels überschreitet, im Optimierungslevel ein separates Segment

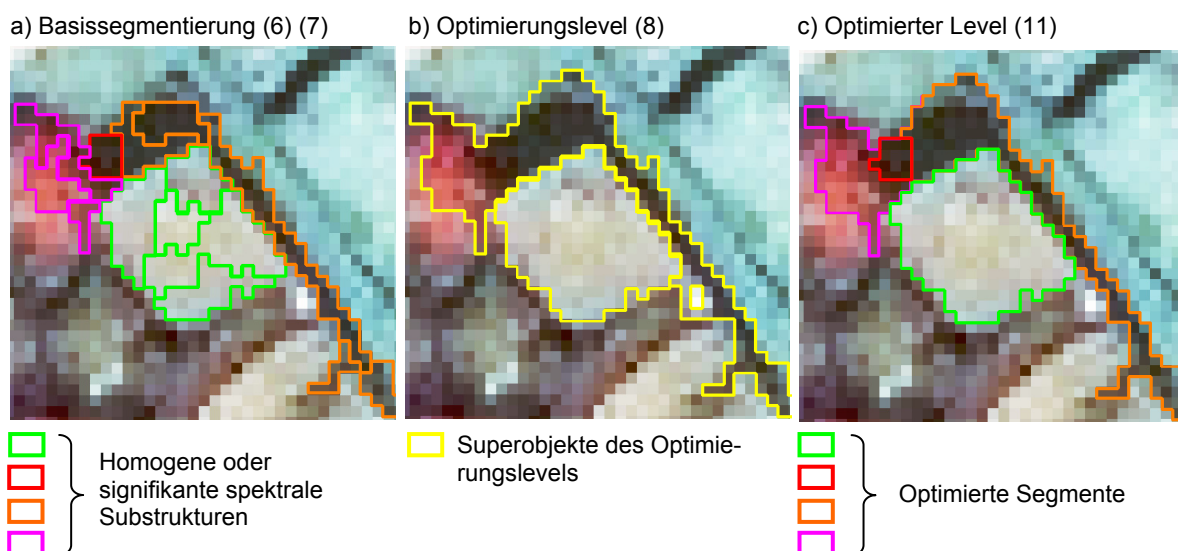


Abb. 4-2: Segmentierungsoptimierung

bleibt (9). Sollte die spektrale Ratio aus Unter- und Obersegment keine signifikante Differenz ergeben, so wird die Fusion der Segmente im Optimierungslevel ermöglicht (10). Mit dieser Prozedur ermöglicht man ein Anwachsen spektral homogener Areale zu großen Segmenten in direkter Nachbarschaft zu spektral heterogenen Gebieten repräsentiert durch kleine Segmente im gleichen Level (ESCH, 2006). Dieser Prozess kann solange analog fortgeführt werden, bis ein optimierter Level die größten Objekte der urbanen Landschaft optimal segmentiert (5). Abbildung 4-2 verdeutlicht diesen Prozess, wobei exemplarisch als Basisobjekt ein Hausdach und ein Schattenbereich dienen. Die spektrale Ähnlichkeit ermöglicht eine Zusammenfassung der Basissegmente des Daches, da sie keine signifikante Substruktur im levelbasierten Abgleich zwischen Basissegmentierung und Optimierungslevel bilden. Die spektralen Differenzen in den Schattenbereichen am Dachrand weisen im Verhältnis zu dem neuen potentiellen Superobjekt im Optimierungslevel signifikante Substrukturen auf, womit eine Fusion der Segmente als unzulässig erkannt wird. Damit werden die signifikanten spektralen Substrukturen im Schattenbereich als einzelne Segmente im optimierten Level erhalten. Das Ergebnis liefert eine typische rechteckige Struktur eines Daches, dessen Formmerkmal ein wesentliches Unterstützungsmerkmal für die spätere Klassifikation darstellt. Dieser spektrale Differenzabgleich zwischen Basissegmentierung und Optimierungslevel erzeugt in heterogenen kleinräumigen urbanen Strukturen entsprechend kleine Segmente, in homogenen Gebieten wie Wiesenflächen aber großflächige Segmente, womit Formmerkmale im urbanen Raum wichtige Kriterien für die Klassifikation darstellen.

Ein Ergebnis des Segmentierungsprozesses ist beispielhaft in Abbildung 4-3 dargestellt. Dabei zeigt sich ein Nebeneinander von großflächigen Segmenten in spektral sehr homogenen Gebieten wie Wasser und kleinen Segmenten im stark strukturierten, heterogenen, urbanen Gebiet, das vom kleinräumigen Wechsel von Haus, Straße, Vegetation und Ähnlichem geprägt ist. In Abbildung 4-3 wird exemplarisch das Potential von Formparameter für die thematische Klassifikation hervorgehoben.

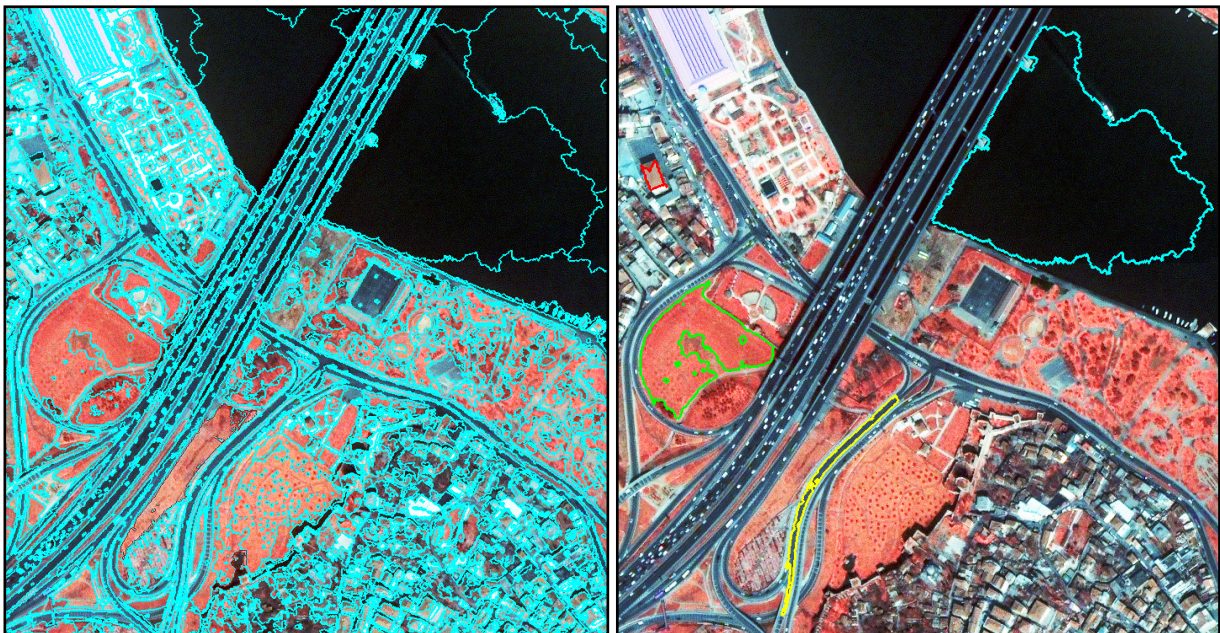


Abb. 4-3: Optimierter Segmentierungslevel mit typischen Formmerkmalen verschiedener Objekte



### 4.1.2. Objektorientierter Klassifikationsansatz

Oberstes Ziel im Rahmen des konzeptionellen und methodischen Ablaufs der Klassifikation urbaner Räume ist eine hohe Genauigkeit. Unter dieser Prämisse soll ebenso eine schnelle und einfache zeitliche und räumliche Übertragbarkeit des Ansatzes gewährleistet sein. Ein festes Rahmenwerk beinhaltet dafür chronologisch die einzelnen Module und damit den konzeptionellen Überbau des Ansatzes. Die Module innerhalb des starren Rahmenwerks können individuell und interaktiv initialisiert bzw. angepasst werden. Dadurch wird es möglich, auf spektrale oder strukturelle Unterschiede verschiedener Datensätze oder urbaner Räume innerhalb der gleich bleibenden Methode spezifische Anpassungen vorzunehmen.

Unter der Prämisse Übertragbarkeit ist es zudem erforderlich, zur Beschreibung der jeweiligen Klassen, Merkmale zu verwenden, die in ihren Eigenschaften möglichst geringen räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegen. Unter der Annahme, dass sich typische urbane Objekte, wie Häuser, Straßen, Freiflächen, etc. in ihrer grundsätzlichen räumlichen Ausprägung weltweit in jedem beliebigen urbanen Raum entsprechen, liegt der Fokus dieses Klassifikationsansatzes auf Formparametern. Der modulare Aufbau der Klassifikationsmethode bedient sich grundsätzlich der im Segmentierungsmodul erzeugten Levels. Während dem Segmentierungsprozess ein bottom-up Prinzip - von der kleinsten Einheit Pixel bis zu den größten Segmenten im Level  $X + 1$  (Abb. 4-1 (2) – (11)) - zu Grunde liegt, wird für den Klassifikationsprozess ein genau gegenläufiges Prinzip implementiert. Die hierarchische top-down Klassifikation baut als Ausgangspunkt auf die Segmente des höchsten, individuell festgelegten Segmentierungslevels  $X + 1$  (Abb. 4-1 (11) (14)) auf. Im Folgenden stehen für die thematische Klassifikation alle optimierten Level bis zur Basissegmentierung zur Verfügung. Der objektorientierten, hierarchischen Klassifikation liegen also aus dem Segmentierungsprozess,  $X + 1$  Level zu Grunde.

Der modulare Aufbau erlaubt grundsätzlich in jedem Level jede Klasse für die Klassifikation zu berücksichtigen. Grundsätzlich sind für jeden Level sieben urbane Klassen – Haus, Straße, Vegetation (Wiese, Bäume), offener Boden, Wasser und Schatten bereitgestellt. Die modulare Konfiguration ermöglicht es nach individuellen Anforderungen alle oder ausgewählte Klassen zu initialisieren. Die Klassifikation selbst basiert auf einem Fuzzy Logic Ansatz.

Abbildung 4-4 zeigt den Prozessbaum mit der chronologischen Abfolge aufsetzend auf dem höchsten Segmentierungslevel  $X + 1$  (14). Darunter finden sich die Einzelmodule, die speziell für die jeweiligen Klassen konzipiert sind.

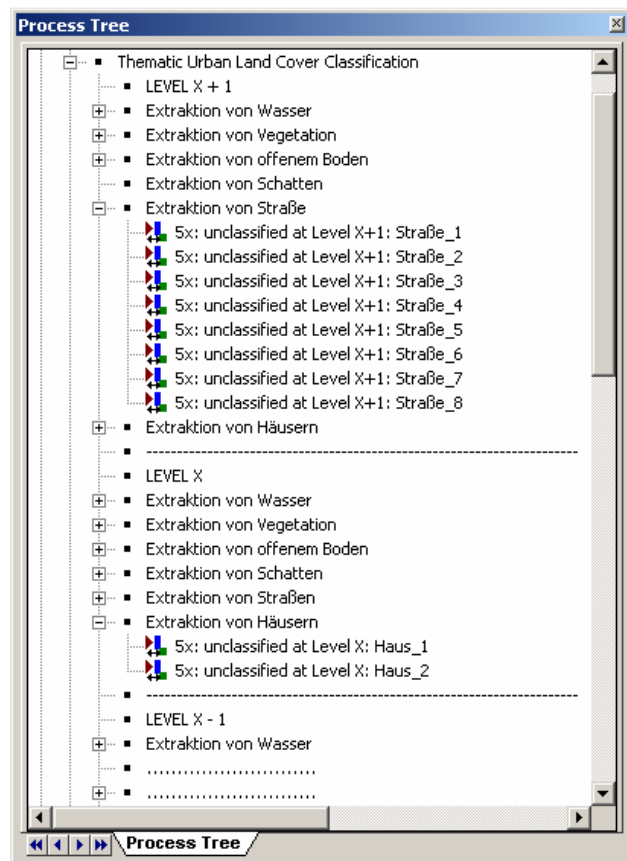


Abb. 4-4: Klassifikationsmodul

Es bleibt daher dem Anwender überlassen, welche Klassen er im jeweiligen Level zur Klassifikation für geeignet hält. Exemplarisch werden die Sub-Prozeduren des Moduls ‚Extraktion von Straße‘ gezeigt. Diese Sub-Prozeduren sind direkt mit den Klassen und den dafür definierten Merkmalen verlinkt. Die acht Klassen von ‚Straße\_1‘ bis ‚Straße\_8‘ zeigen eine implementierte Region-Growing-Technik zur Extraktion von linearen Straßenverläufen, auf die unten explizit eingegangen wird. Für Segmente, die keiner Klasse mit der geforderten Wahrscheinlichkeit in diesem Level zugeordnet werden können, stehen in der Segmentierungsebene darunter (Level X) neue Segmentgeometrien, Spektral- und Nachbarschaftswerte zur Verfügung.

Der grundlegende chronologische Ablauf jedes Levels sieht zuerst eine Eliminierung von ‚Nicht-Haus‘ Klassen vor. Es werden daher in jedem Optimierungslevel Segmente klassifiziert, die sich signifikant von den zu erwartenden Formen der Haussegmente unterscheiden. Großflächige Segmente, die auf Grund homogener spektraler Signaturen entstanden sind, werden in diesem Schritt klassifiziert. Darunter fallen homogene Wasserflächen, die durch ihre Größe sowie ihre charakteristisch geringe Reflexion im nahen Infrarot, zugeordnet werden können. Ebenso werden Vegetationsbereiche klassifiziert, wobei hier der NDVI (vgl. Gleichung 2-1) den entscheidenden Input liefert. Des Weiteren werden offene Bodenflächen, die im Regelfall eine spektrale Ähnlichkeit zu bebauten Arealen aufweisen, auf Grund ihrer unregelmäßigeren Form bzw. größeren Flächen klassifiziert.

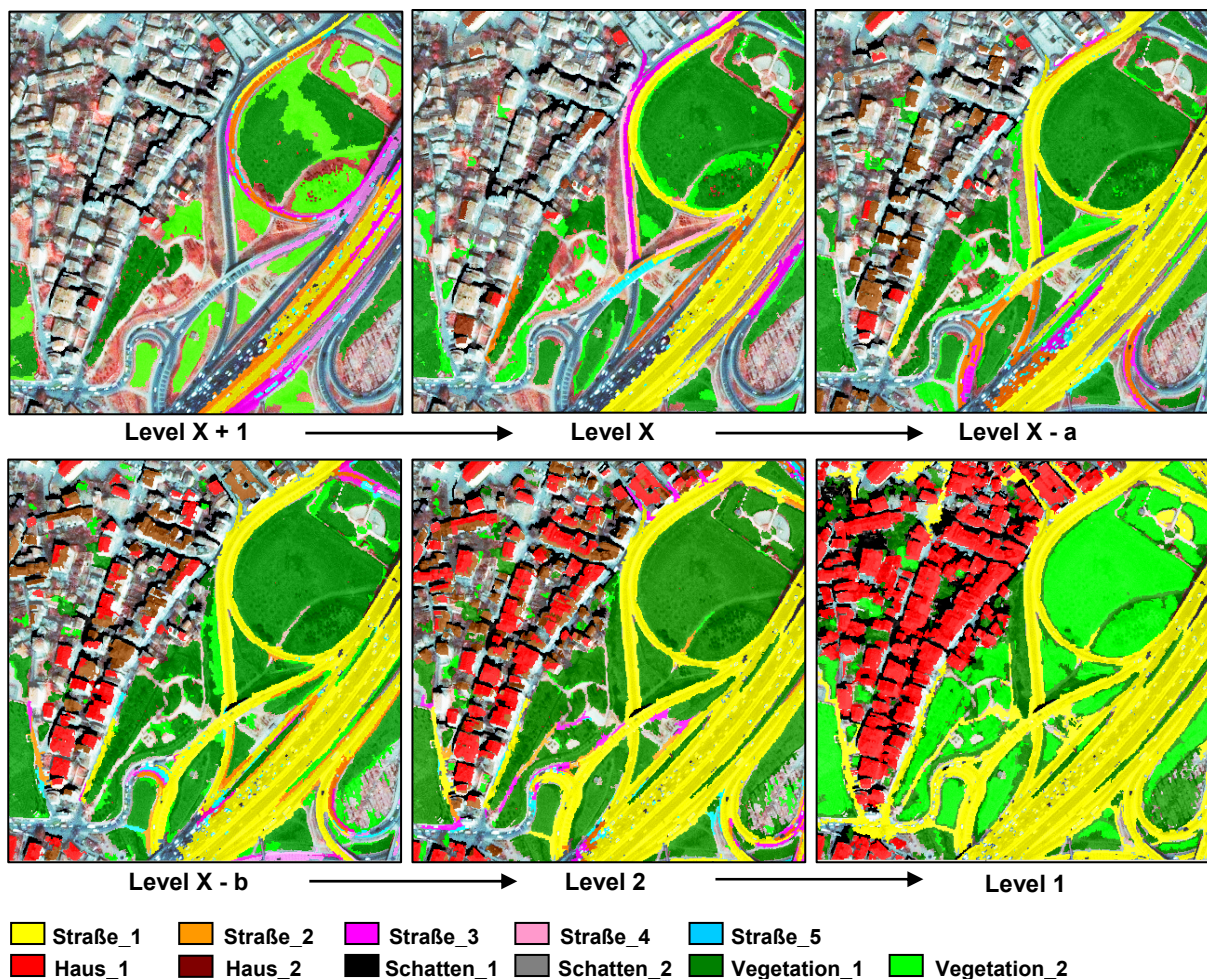


Abb. 4-5: Levelbasierter chronologischer top-down Klassifikationsansatz auf Basis der Segmentierungsebene

Abbildung 4-5 zeigt visuell den chronologischen top-down Klassifikationsverlauf von sechs Levels. Dabei kristallisiert sich die Klassifikation großer Segmente der Vegetationsflächen in den höheren Levels heraus. Die unten näher erklärte Region-Growing-Technik wird für die Straßenverläufe sichtbar, und die kleinräumigen Objekte der Häuser erhalten in niedrigeren Levels hohe Zuordnungswahrscheinlichkeiten.

Die thematische Klassifikation bzw. die Beschreibung der jeweiligen Klassen baut auf die Theorie der Fuzzy Logic (13) (ZADEH, 1978) auf. Der Begriff ‚Fuzzy‘ steht für ‚Unschärfe‘ einer Aussage oder Information, und bedeutet dabei die graduelle Bewertung des Wahrheitsgehaltes (BOTHE, 1993). Die Definition der Klassenzugehörigkeit folgt dabei nicht einem strikt binären Muster – d. h. der Wert nimmt entweder Eins oder Null an -, sondern wird über eine Zuweisungsfunktion (Membership function) als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt.

Die Klassifikation basierend auf Fuzzy Logic bedient sich eines n-dimensionalen Merkmalsraumes von Zugehörigkeitsgraden (BENZ ET AL., 2004). Diese beschreiben den Grad der Zuordnungswahrscheinlichkeit  $\mu$  eines Objektes im Bezug auf die zur Verfügung stehenden Klassen. Die Umsetzung einer fuzzy logic basierten Klassifikation benötigt ein komplettes Ablaufsystem, bestehend aus der Fuzzifizierung der Eingangsvariablen, welche in Fuzzy Sets resultieren, eine Kombinatorik der jeweiligen Fuzzy Sets und einem Defuzzifikationsprozess, um eine letztendliche Zuordnung basierend auf Wahrscheinlichkeiten vornehmen zu können.

Die „Fuzzifizierung“ beschreibt die Umrechnung bzw. Parametrisierung einer potentiellen Klassifikationsvariablen in eine Zugehörigkeitsfunktion. Diese Funktion realisiert den Transfer von absoluten Werten einer Variablen (Spektrale Eigenschaften, Form, Textur, Nachbarschaft) zu einem Grad der Zugehörigkeit. Dabei ist prinzipiell jede stetige Funktion, die die Zugehörigkeit beschreibt, möglich (STOLZ, 1998). Die Beschreibung einer Klasse mit mehr als einem fuzzifizierten Merkmal ist ein sogenanntes Fuzzy Set. Fuzzy sets sind „... a class with a continuum of grades of memberships“ (YAGER, 1987). Mengenalgebraische Operationen ermöglichen die Kombination der verschiedenen Zugehörigkeitsfunktionen innerhalb eines Fuzzy Sets. Kombinationsmöglichkeiten ergeben sich mittels einer Minimumfunktion, die die geringste Wahrscheinlichkeit des Fuzzy Sets heranzieht, mittels einer Maximumfunktion, die die höchste Wahrscheinlichkeit des Fuzzy Sets ermittelt, mittels eines arithmetischen Mittels der Wahrscheinlichkeiten, mittels eines geometrischen Mittels der Wahrscheinlichkeit oder mittels einer Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten. Das Ergebnis liefert für jedes einzelne Objekt auf der Basis der zuvor definierten, klassenspezifischen Merkmale und Zuweisungsfunktionen die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu den verfügbaren Klassen. Dabei kann ein Segment auch hohe Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten zu mehreren Kategorien aufweisen. Damit bietet dieser Ansatz für den Nutzer den großen Vorteil, dass mit dem Klassifikationsergebnis auch direkt ein Qualitätsmaß hinsichtlich der Sicherheit einer Klassenzuweisung bereitgestellt wird und sich darüber hinaus die Wahrscheinlichkeit einer alternativen Zuordnung einsehen lässt (ESCH, 2006). Für viele Anwendungen ist aber eine diskrete Zuordnung erforderlich, die mittels des höchsten Zuweisungswertes („Defuzzifikation“) vollzogen werden kann.

Abbildung 4-6 zeigt exemplarisch die Umsetzung einer Fuzzy Logic basierten Klassifikation innerhalb dieses Ansatzes. Die Klasse ‚Straße‘ wird dabei, gemäß der Hypothese, vorwiegend mit Formparametern sowie dem einzigen spektralen Merkmal ‚NDVI‘ beschrieben. Die Merkmale der Klasse, ‚Länge‘, ‚Länge zu Breite‘, ‚Breite‘ sowie ‚NDVI‘ unterliegen dem Fuzzi-

fizierungsprozess. Dafür wird angenommen, dass Segmente einer Straße die Länge von 100 Metern überschreiten, da sie ein homogenes, lineares Element der Erdoberfläche darstellen. Die Parametrisierung des Formmerkmals ‚Länge‘ ist beispielhaft in Abbildung 4-6 aufgeführt. Eine symmetrisch monoton aufsteigende Zugehörigkeitsfunktion konvertiert die Längenmaße einzelner Segmente in Zugehörigkeitsgrade. Segmente kleiner oder gleich 100 Meter Länge erhalten den Wert 0 (keine Zugehörigkeit) mit steigender Zugehörigkeit bis 150 Meter = 1 (volle Zugehörigkeit).

Die Festlegung der Parameter basiert auf der Einschätzung, dass Häuser im Regelfall diese Länge nicht erreichen und damit eine deutliche Abgrenzung erfolgen kann. Da aber zu erwarten ist, dass homogene urbane Areale, wie zum Beispiel Freiflächen durchaus durch Segmente abgebildet sind, die dieser Länge entsprechen, werden weitere Merkmale zu einem Fuzzy Set kombiniert, um die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Klassifikation zu erhöhen. In diesem Beispiel werden die vier Wahrscheinlichkeiten, die sich aus den merkmals-spezifischen Zugehörigkeitsfunktionen ergeben mittels einer Minimumfunktion kombiniert (Gleichung 4-4). Dies hat zur Folge, dass eine Klassifikation nur erfolgt, wenn alle Merkmale mit ausreichender Wahrscheinlichkeit zutreffen.

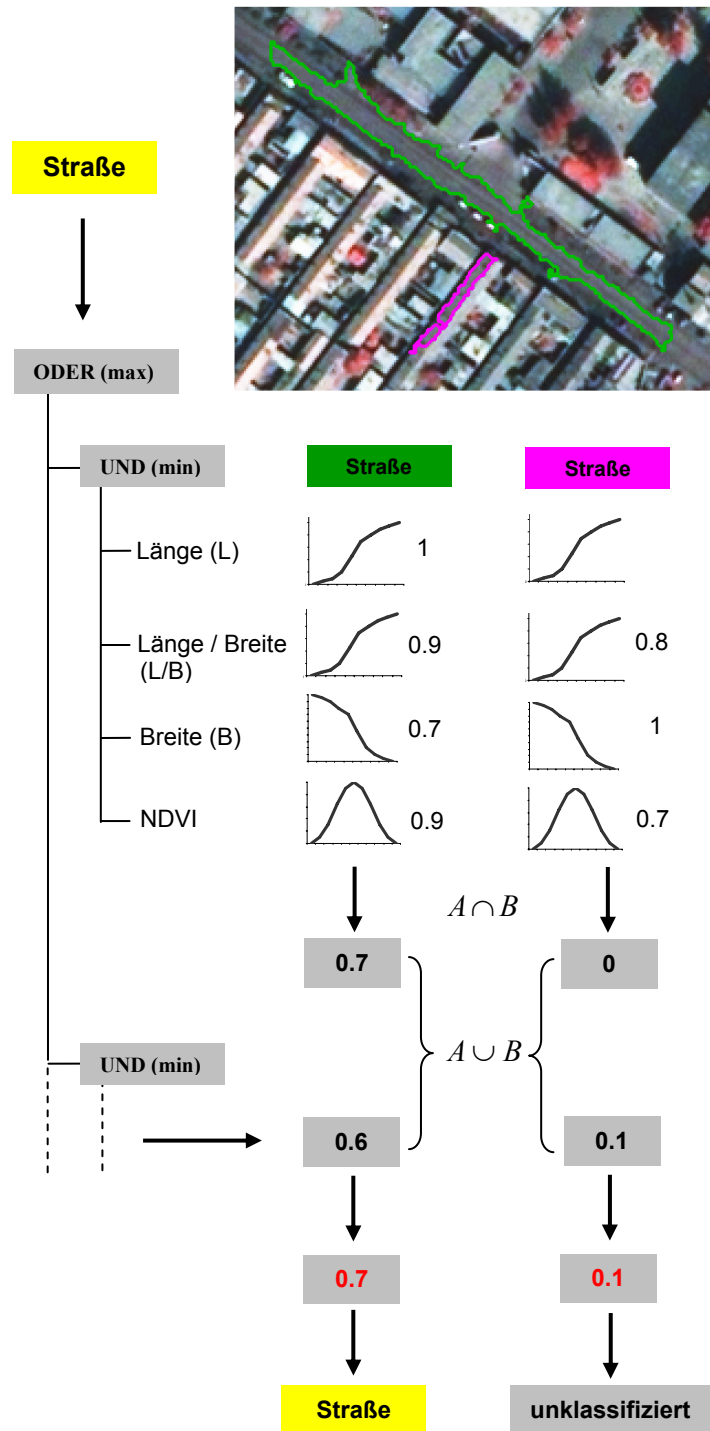


Abb. 4-6: Klassifikationsprinzip basierend auf Fuzzy Logic

$$(4-4) \quad A \cap B = \min \{ \mu_L, \mu_{L/B}, \mu_B, \mu_{NDVI} \} \quad (\text{STOLZ, 1998})$$

Diese Kombination ermöglicht die Einbeziehung verschiedenartiger fuzzifizierter Attribute. Ziel dabei ist es eine Fehlklassifikation der beiden Beispielsegmente (Abb. 4-6), die sich in

Form und spektraler Signatur grundsätzlich ähnlich sind mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit zu vermeiden. Um noch flexibler reagieren zu können, werden zusätzlich oft mehrere Minimumfunktionen genutzt, die dann wiederum miteinander kombiniert werden müssen. In unserem Fall wird dafür eine Maximumfunktion verwendet.

$$(4-5) \quad A \cup B = \max \{ \mu_1, \mu_2 \} \quad (\text{STOLZ, 1998})$$

Dies hat zur Folge, dass man Kriterien innerhalb einer Klasse unterschiedlich kombinieren kann sowie deren Fuzzifizierung individuell abstimmen kann. Schließlich erfolgt noch der Schritt der Defuzzifikation, sozusagen eine endgültige Zuordnung einer Klasse, basierend auf den Wahrscheinlichkeiten. In diesem Ansatz wird dafür ein Schwellwert von mindestens einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit verwendet, und, sollten zwei Klassen diesen Schwellwert überschreiten, eine Klassifikation mittels der höheren Wahrscheinlichkeit erfolgen.

Basierend auf diesem Grundprinzip einer fuzzy logic basierten Klassifikation werden für jede Klasse in jedem Level Fuzzy Sets mit typischen Formparametern bereitgestellt. Innerhalb des Rahmenwerkes sind den physischen Gegebenheiten angepasste Methoden verwirklicht. Zur Extrahierung des linearen Elements 'Straße' ist zum Beispiel innerhalb der Klassifikationsmethode ein Region-Growing-Algorithmus implementiert (15). Die Idee basiert auf einer Fortpflanzungsmethode, die sich die Stetigkeit des Straßennetzwerkes zu Nutze macht. Dabei wird im ersten Schritt das Hauptaugenmerk darauf gelegt, raum-zeitlich robuste räumliche Charakteristika mit hoher Zuordnungswahrscheinlichkeit als Ausgangssegmente zu identifizieren. Nach der Methode von Abbildung 4-6 werden die Bildsegmente also mit Zuordnungsfunktionen gescannt, die hohe Merkmalsanforderungen beinhalten. Die Konzentration liegt dabei auf Formparametern, da zu erwarten ist, dass diese sich in allen urbanen Räumen ähnlich sind und damit einfache und schnelle Übertragbarkeit gewährleisten. Unter dieser Prämisse werden die Formmerkmale der Segmente 'Länge', 'Länge zu Breite', 'Breite' und als einziges spektrales Merkmal der NDVI zur Beschreibung von Straßen herangezogen. Dieses letzte Merkmal dient dazu, die Klassifikation abzusichern, um formale Fehlklassifikationen, wie ein sehr langes, dünnes Segment eines Autobahnmittelstreifens noch spektral ausschließen zu können.

Damit ergeben sich also Straßensegmente mit sehr hoher Zuordnungswahrscheinlichkeit, die den Startpunkt eines Region-Growings markieren. Nun ermöglicht der im Regelfall stetige Straßenverlauf die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen. Dadurch werden im zweiten Durchlauf (vgl. Abb. 4-4 und 4-5; Straße\_2) nicht mehr alle unklassifizierten Segmente des Bildes in Betracht gezogen, sondern nur noch wenige angrenzende Segmente. Mit diesem Prinzip ermöglicht man eine Abschwächung von Schwellwerten bei der Bildung neuer Zugehörigkeitsfunktion, da die Nachbarschaftsvoraussetzung eine zusätzliche Einschränkung darstellt. Dadurch werden durch abgeschwächte Schwellwerte Fehlklassifikationen an anderen Stellen des Bildes vermieden und auch im zweiten Schritt hohe Zuordnungswahrscheinlichkeiten erreicht. Diese Technik des Region-Growings wird analog dazu fortgesetzt (Abb. 4-5).

Diese Methode basiert in erster Linie auf den typischen Formmerkmalen der Straßensegmente. Im idealisierten Fall sollte damit eine komplette Extraktion möglich sein, aber spektrale Änderungen, hervorgerufen vom Straßenbelag, von Autos, von Schatten oder Unterbrechungen des linearen Verlaufs durch Tunnel oder Brücken lassen eine Fortpflanzung der Klassifikation oftmals unmöglich werden. Abbildung 4-3 zeigt zum einen die zu erwartenden

langen dünnen Segmente, zum anderen erkennt man aber auch die kleinen rechteckigen Segmente der Autos. An diesen Knackpunkten, die den zu erwartenden Merkmalen zur Klassifizierung nicht mehr entsprechen, werden sogenannte Zwischenklassen geschaltet (hier zum Beispiel Straße\_5), um den Laufweg der Fortpflanzung wieder zu ebnen. Basierend auf Merkmalen von Autos wie ‚geringe Fläche‘ und vor allem eine hohe Grenzfläche an eine bereits klassifizierte Straße, werden solche Trennsegmente klassifiziert, um im nächsten Schritt wieder mit neuen erreichten Nachbarschaften den Fortpflanzungsmodus weiter zu führen.

Ähnliche Methoden sind für die anderen Klassen implementiert, wobei das Augenmerk in erster Linie auf den Formparametern liegt. Für den Komplettsatz ist als einziges Spektralmerkmal der ‚NDVI‘ als unterstützendes Attribut implementiert. Die Konzentration auf ein Spektralmerkmal erleichtert szenenspezifische Anpassungen bei anderen Datensätzen. Die Segmente, die eine hohe Zuordnungswahrscheinlichkeit aufweisen, werden also in diesem Level klassifiziert, gleichzeitig bleiben aber viele Segmente unklassifiziert, die keinem Fuzzy Set der bisherigen Klasse mit ausreichender Wahrscheinlichkeit entsprechen (16). Benachbarte Segmente, die derselben Klasse zugewiesen wurden, werden nun fusioniert (17). Im Level X, also eine Stufe darunter, wird nach dem Transfer klassifizierter Segmente aus Level X+1, nun neuerlich eine Klassifikation, der bis dato unklassifizierten Segmente durchgeführt. Die Nicht-Klassifikation von Segmenten im Level X + 1 resultiert aus zu geringen Zuordnungswahrscheinlichkeiten, das heißt also, sie entsprechen entweder in Form, spektraler Signatur, Nachbarschaft oder einer Kombination der drei Merkmale, nicht den erwarteten Zugehörigkeitsgraden. Der darunter liegende Level beinhaltet für die unklassifizierten Segmente eine Objektmodifikation, da nun die Segmente des optimierten Levels X zur Verfügung stehen (18). Damit ergeben sich neue Formparameter, spektrale Signaturen, sowie neue Nachbarschaftsbeziehungen, die für einen neuen Klassifikationsdurchgang genutzt werden können. Analog dem Level X + 1 können nun individuell die Klassen initialisiert werden. In diesem Level werden wiederum nur Segmente klassifiziert, die die geforderte Zuordnungswahrscheinlichkeit aufweisen (19) (20).

Jeder Level folgt bei der Klassifikation einer festen Chronologie. Dabei steht an letzter Stelle immer die Klassifikation von Häusern. Diese Reihenfolge beinhaltet die Idee jeweils zu Beginn einer Klassifikation pro Level die relativ großen spektralen Differenzen von versiegelt und nicht-versiegelt für hohe Klassifikationswahrscheinlichkeiten zu nutzen. Mit diesem hierarchischen Ausschlussprinzip erreicht man strukturelle thematische Vorgaben, die zusätzliche Nachbarschaftsinformationen erbringen.

Die Modifikation unklassifizierter Segmente in einem neuen Level wird solange iterativ fortgesetzt, bis der Basislevel erreicht wird. In diesem Basislevel wird schließlich noch die Klasse Vegetation nach NDVI Werten in Wiesenareale und Bäume/Büsche (21) aufgesplittet. Mit einer letzten Fusion benachbarter Segmente gleicher Klassen erreicht man somit das endgültige Produkt: Landbedeckungsklassifikation (22). Im folgenden Abschnitt wird das Klassifikationsergebnis präsentiert und mittels Referenzdaten der Stadt Istanbul und einer visuellen Überprüfung einer quantitativen Genauigkeitsabschätzung unterzogen.

### 4.1.3. Ergebnis und Genauigkeitsabschätzung

Das Ergebnis der objektorientierten Klassifikationsmethode wird in der urbanen Landbedeckungsklassifikation in Abbildung 4-7 dargestellt. Acht Klassen – Häuser, Straßen, Wiese,

Bäume/Büsche, offener Boden, Wasser, Schatten und unklassifiziert – beantworten als aktuelle und flächendeckende Informationsgrundlage die Frage nach dem „Was ist wo“ in der komplexen urbanen Morphologie des Stadtteils Üsküdar in Istanbul. Die Detailansicht offenbart das Potential, Einzelhäuser präzise zu erfassen und damit auch die physischen Strukturen der urbanen Landschaft abbilden zu können.

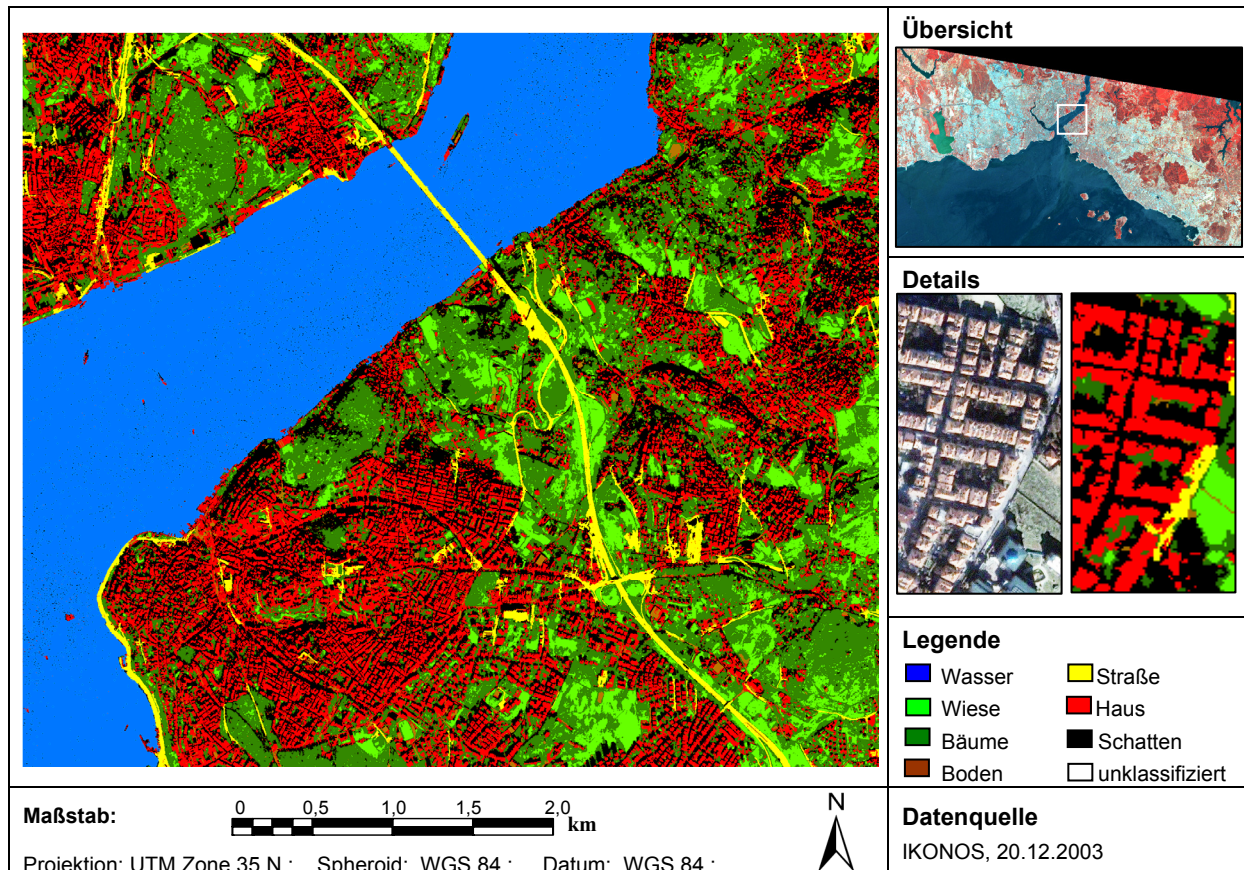


Abb. 4-7: Landbedeckungsklassifikation des Stadtteils Üsküdar

Die Qualität der Landbedeckungsklassifikationen ist von entscheidender Bedeutung für eine Analyse der urbanen Landschaft. Um ihre Genauigkeit abschätzen zu können, wird die Landbedeckungsklassifikation mit Referenzdaten oder Ground Truth Daten verglichen (FOODY, 2002). Die Differenz der Datensätze wird üblicherweise als Fehler in der Klassifikation von Fernerkundungsdaten interpretiert (CONGALTON, 1991). In Abhängigkeit von der geometrischen Auflösung ist jede Karte im Prinzip ein generalisiertes Abbild der Realität. Diese Generalisierung bedeutet bereits den Verlust von Information, und damit Unvollständigkeit (MALING, 1989). Im Wesentlichen aber misst eine Genauigkeitsabschätzung die Güte, mit der die Landbedeckungsklassifikation mit der Realität konform ist (CAMPBELL, 1996; SMITS ET AL., 1999).

Viele Methoden der Genauigkeitsabschätzung, wie beispielsweise der Kappa Koeffizient (RICHARDS & JIA, 1999) oder der Tau Koeffizient (ZHENKURI & REDMOND, 1995) werden in der Literatur diskutiert, das Herzstück stellt dabei die Konfusionsmatrix oder Fehlermatrix dar (FOODY, 2002; MATHER, 2004). Eine Kreuztabulierung der abgeleiteten Klassen gegenüber den Referenzdaten für eine ausgewählte Anzahl Referenzpunkte erlaubt eine objektive Grundlage die Genauigkeit abzuschätzen. Diese Basis ermöglicht die Beschreibung der Ge-

nauigkeit einer thematischen Klassifikation, sowie ihre Fehler zu charakterisieren, und verschiedene thematische Klassifikationen hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu vergleichen.

Die Genauigkeitsanalyse für die Landbedeckungsklassifikation des Stadtteils Üsküdar basiert auf zwei Eingangsdaten. Die Abschätzung der Genauigkeit der klassifizierten Häuser gründet auf einem Vergleich mit einem Referenzdatensatz der Distriktverwaltung Üsküdar<sup>1</sup>. Die Güte der verbleibenden Klassen wird mittels eines visuellen Abgleichs von 100 Zufallspunkten pro Klasse mit den IKONOS Daten ermittelt. Die Güte der entwickelten automatisierten Landbedeckungsklassifikation für den zur Entwicklung des Ansatzes herangezogenen Stadtteil ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Wie diese belegt, lässt sich die thematische Erfassung der urbanen Landschaft mit einer Gesamtgenauigkeit von 84,29 % erfassen.

		Klassifikation								
	Klasse	Häuser	Straße	Wald	Wiese	Boden	Schatten	Wasser	Total	Nutzer*
Realität	Häuser	85	8	2	0	4	1	0	100	85,00%
	Strassen	9	80	3	1	7	0	0	100	80,00%
	Wald	5	2	74	18	1	0	0	100	74,00%
	Wiese	1	0	21	72	6	0	0	100	72,00%
	Boden	6	3	1	0	87	3	0	100	87,00%
	Schatten	1	2	4	1	0	92	0	100	92,00%
	Wasser	0	0	0	0	0	0	100	100	100,00%
	Total	107	95	105	93	105	96	100	700	
<b>Hersteller**</b>		79,44%	84,21%	70,47%	77,42%	82,86%	95,83%	100,00%		<b>84,29%</b>

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. 4-1: Genauigkeitsabschätzung der urbanen Klassifikation im Stadtteil Üsküdar, Istanbul

#### 4.1.4. Transfer

Als ein Ziel des Klassifikationsansatzes ist eine zeitlich und räumlich stabile Übertragbarkeit definiert. Der konzeptionelle Rahmen mit seiner Klassifikationsmethode wurde anhand von IKONOS Daten mit den stadtstrukturellen Merkmalen des urbanen Raumes Istanbul entwickelt. Ein erster Test der Übertragbarkeit wird mittels einer zweiten IKONOS-Szene des Stadtgebietes Istanbul durchgeführt. Ein zweiter Test soll die Übertragbarkeit des Konzepts auf andere stadtstrukturelle Merkmale sowie auf andere Daten eines geometrisch höchst auflösenden Sensors testen. Dafür stehen Quickbird Daten für die zukünftige Megacity Hyderabad in Indien, zur Verfügung.

Die Übertragung des theoretischen Rahmens wird mittels einer IKONOS-Szene des im europäischen Teil Istanbuls liegenden Stadtteils Zeytinburnu (Abb. 2-9) vollzogen. Basierend auf der Hypothese, dass innerhalb einer Stadt die strukturellen Merkmale sehr ähnlich sind, bleiben Formparameter unverändert. Im Zuge eines unterschiedlichen Aufnahmezeitpunktes (Tages- und Jahreszeit), eines anderen Sensorblickwinkels und unterschiedlicher atmosphärischer Verhältnisse werden ausschließlich die NDVI Werte systematisch den neuen Gege-

<sup>1</sup> Georeferenzierte, digitalisierte GIS-Ebene des Hausbestandes in Üsküdar mit einer geschätzten Genauigkeit von 98%. Zur Verfügung gestellt von der Distriktverwaltung Üsküdar, Metropolitan Municipality Istanbul.



benheiten angepasst. Abbildung 4-8 zeigt, dass mittels des entwickelten Klassifikationsrahmens mit seinen implementierten Methoden auch in einem anderen Stadtteil und mit einer anderen IKONOS-Aufnahme die räumlichen Strukturen hoch genau abgebildet werden.

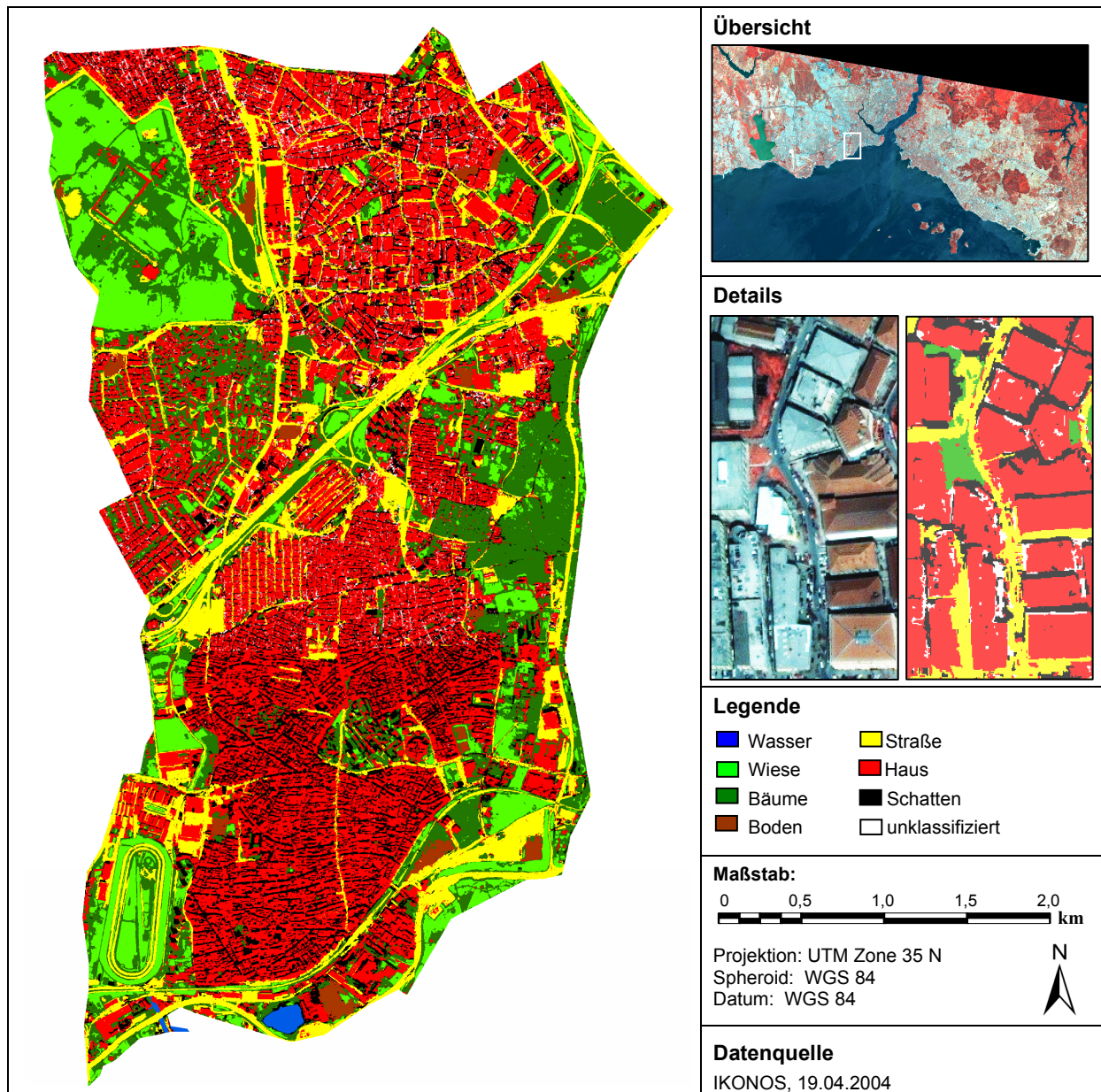


Abb. 4-8: Transfer der Klassifikationsmethode auf den Stadtteil Zeytinburnu

Die Übertragung der Klassifikationsmethode auf eine andere IKONOS-Szene sowie einen anderen Stadtteil Istanbul erfüllt mit einer Anpassung des unterstützenden Spektralmerkmals ‚NDVI‘ ähnliche Genauigkeiten. Der höhere Sonnenstand der zweiten Szene verursacht weniger Schatten im Bild und damit mehr Schwierigkeiten die engen bebauten Strukturen Istanbul zu trennen. Damit ergeben sich im Vergleich zur ersten Szene auch 4,43 % unklassifizierte Bereiche, die in keinem Level eine ausreichende Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit erreichen. Darin liegt im Wesentlichen die etwas geringere Gesamtgenauigkeit begründet, wobei durch den Effekt der Übertragung auch Einzelklassen wie beispielsweise die Häuser eine etwas geringere Genauigkeit aufweisen.

		Klassifikation									Nutzer*
Klasse	Häuser	Straße	Wald	Wiese	Boden	Schatten	Wasser	unklass	Total		
Realität	Häuser	80	6	1	0	7	0	0	6	100	80,00%
	Strassen	7	81	0	0	8	0	0	5	100	81,00%
	Wald	2	3	79	12	3	0	0	1	100	79,00%
	Wiese	1	0	12	78	5	0	0	4	100	78,00%
	Boden	8	1	0	1	81	1	0	8	100	81,00%
	Schatten	0	1	2	0	3	86	1	7	100	86,00%
	Wasser	0	0	0	0	0	1	99	0	100	99,00%
	Total	98	92	94	91	107	95	100	31	700	
<b>Hersteller**</b>	81,6%	88,0%	84,0%	85,7%	75,7%	90,5%	99,00%			<b>83,43%</b>	

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. 4-2: Genauigkeitsabschätzung der Übertragung der urbanen Klassifikationsmethode nach Zeytinburnu, Istanbul mit IKONOS Daten

Die Hypothese aus Abschnitt 4.1.2. besagt, dass die kleinräumigen Formen urbaner Räume sich im Grundsätzlichen weltweit entsprechen. Das gilt nicht für strukturelle Merkmale von Städten, und deren großräumige Zusammenhänge, aber für die physischen Grundformen wie Straßen oder Einzelhäuser. Unter dieser Prämisse wird der konzeptionelle Rahmen für die Klassifikation urbaner Räume auf einen anderen Kulturraum und damit auf andere stadtstrukturelle Merkmale angewandt. Das Testgebiet ist die zukünftige Megacity Hyderabad, Indien, die ein sehr stark verdichtetes Siedlungsbild aufweist. Die Übertragung basiert zusätzlich auf anderen höchst aufgelösten Daten des Quickbird Sensors (vgl. Tab. 2-1). Auf Grund der mit IKONOS vergleichbaren Bandbreiten der vier Spektralkanäle des Quickbird Sensors, werden nur die szenen- und damit aufnahmespezifischen Spektralwerte angepasst.

Eine systematische Anpassung der Sub-Prozeduren des konzeptionellen Rahmens wurde durchgeführt. Ausgewählte Sub-Prozeduren wurden an die neuen räumlichen sowie spektralen Anforderungen angepasst. Eine erste Anpassung ist die Wahl des höchsten Segmentierungslevels (16). Hyderabad weist überwiegend kleinere Häuser, engere Bebauungsstrukturen und damit höhere Bebauungsdichten auf. Auf Grund dessen wurde ein niedrigerer Ausgangslevel mit geringerem Skalierungsparameter gewählt, um der Kleinräumigkeit urbaner Gegebenheiten in Form von geringeren Segmentgrößen Rechnung zu tragen. Weiter wurden auf Grund der geringfügig anderen Bandbreiten von Quickbird, der Veränderung des Sonnenstandes sowie der atmosphärischen Verhältnisse auch hier die Werte des NDVI den Gegebenheiten systematisch angepasst.

Abbildung 4-9 zeigt das Resultat des Transfers der Klassifikation auf Hyderabad. Ein auffallendes Charakteristikum der urbanen Landschaft Hyderabad sind die spektralen Ähnlichkeiten von Straßen, offenem Boden und vielen Flachdächern (vgl. 2.2.1.). Aus diesem Grund ist eine eindeutige Zuweisung ähnlicher Segmentgeometrien mit dem Spektralmerkmal ‚NDVI‘ oft nicht möglich. Somit bleiben im Vergleich zu Istanbul mehr Segmente zweideutig und dadurch unklassifiziert. Trotzdem wird deutlich, dass auch hier Einzelhäuser, das Hauptverkehrsnetz sowie die Freiflächen mit demselben methodischen Konzept klassifiziert werden können.

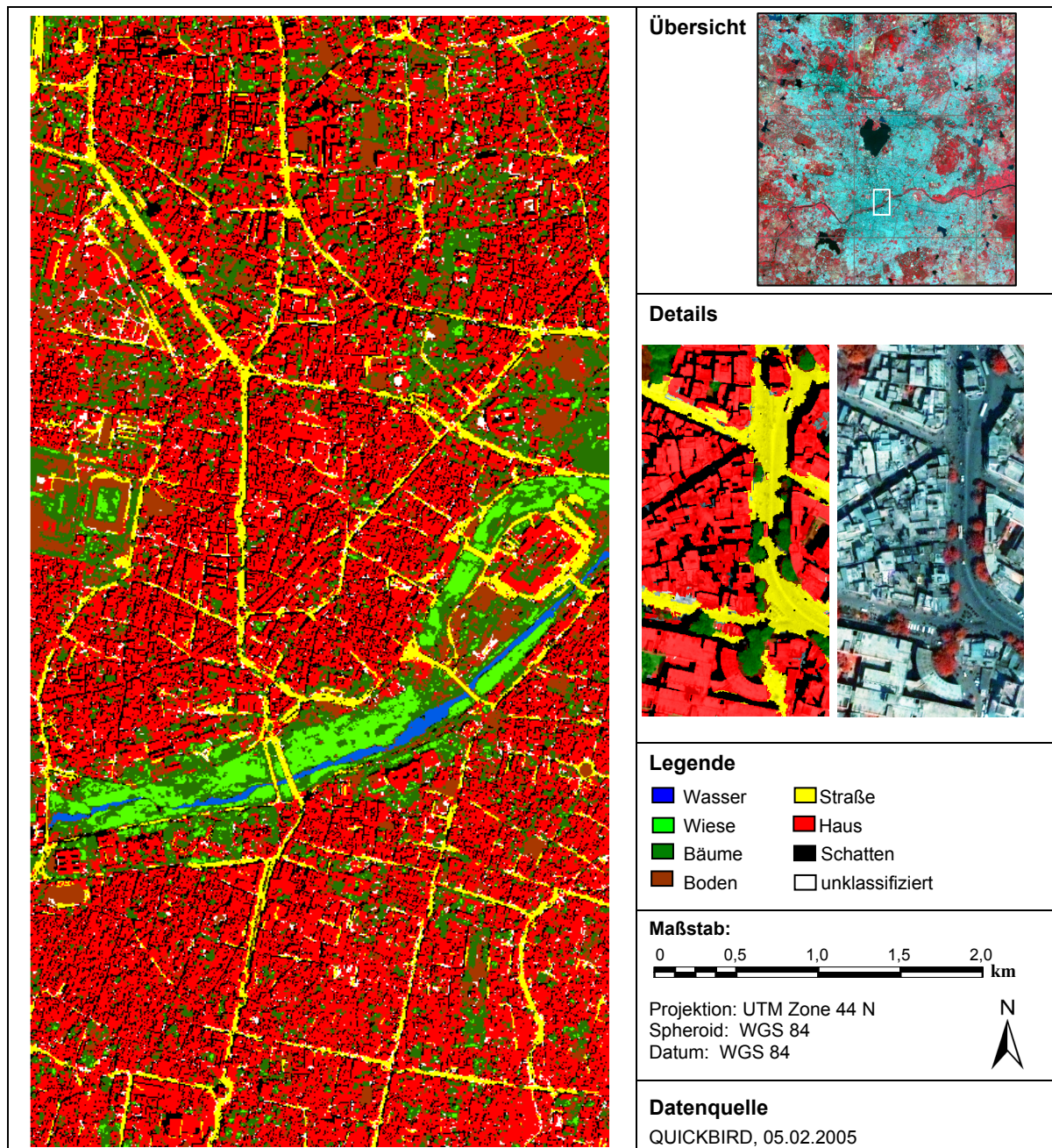


Abb. 4-9: Transfer der objektorientierten Klassifikationsmethode auf Quickbird in Hyderabad

Der Test auf Robustheit des Klassifikationskonzepts auf andere höchst aufgelöste Fernerkundungsdaten sowie eine strukturnäumlich andere Stadt lässt sich mittels einer quantitativen Genauigkeitsabschätzung durchführen. Die Übertragung des Regelwerks auf den Quickbird Sensor, sowie auf den urbanen Raum der zukünftigen Megacity Hyderabad in Indien erfüllt diese Vorgabe. Das homogene, hoch verdichtete Stadtgebiet Hyderabad ist Ursache für 5,86 % unklassifizierte Bereiche, sowie einer schwächeren Differenzierbarkeit von Hausflächen, Straßenbereichen und offenem Boden. Die Anpassung an den neuen Kulturraum mit Änderungen in Form- sowie spektralen Parametern mündet dennoch in einer hohen Gesamtgenauigkeit von 80,14 %. Da sowohl in Zeytinburnu, Istanbul als auch in Hyderabad externe Zusatzdaten fehlen, basiert die jeweilige Genauigkeitsanalyse auf 100 Zufallspunkten pro Klasse und einem anschließenden visuellen Abgleich.

		Klassifikation									
Klasse		Häuser	Straße	Wald	Wiese	Boden	Schatten	Wasser	n-klass	Total	Nutzer*
Realität	Häuser	79	10	0	0	5	0	0	6	100	80,00%
	Strassen	6	77	0	0	8	0	0	9	100	81,00%
	Wald	0	1	71	14	4	4	0	6	100	77,00%
	Wiese	0	0	11	80	5	0	0	4	100	74,00%
	Boden	14	4	0	3	70	0	0	9	100	81,00%
	Schatten	0	0	3	0	0	87	3	7	100	93,00%
	Wasser	0	0	0	0	0	3	97	0	100	99,00%
	Total	98	92	94	91	107	95	100	41	700	
<b>Hersteller**</b>		80,61%	83,70%	75,53%	87,91%	66,67%	91,58%	97,00%			<b>80,14%</b>

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. 4-3: Genauigkeitsabschätzung der Übertragung der Klassifikationsmethode auf Hyderabad, Indien

Ein zusätzlicher Test der Übertragbarkeit der Methode wird auf die IKONOS Daten des strukturell differierenden Stadtgebietes von Padang durchgeführt. Das Resultat findet sich im Anhang D (vgl. Abb. D-1) und liefert eine Gesamtgenauigkeit von 81,45 % (vgl. Tab. D-1). Auf Grund fehlender Zusatzdaten basiert die Genauigkeitsanalyse auch hier auf einem visuellen Abgleich von 100 Zufallspunkten pro Klasse.

Die Resultate beweisen also, dass der konzeptionelle Rahmen grundsätzlich auf verschiedene Stadtstrukturtypen sowie verschiedene höchst auflösende Sensoren transferierbar ist. Die Modularität des Konzepts erlaubt dabei die systematische und schnelle Anpassung an die jeweiligen Anforderungen der Daten. Die Gesamtgenauigkeiten des Transfers der Klassifikation sind zwar mit 83,43 %, 80,14 % bzw. 81,45 % geringer als am entwickelten Beispiel mit 84,29 %, beweisen aber dennoch eine hohe Güte.

## 4.2. Klassifikation geometrisch mittel aufgelöster Satellitendaten urbaner Räume

Die technische Ausstattung der Reihe von Landsat Satelliten bedingt eine andere Art der urbanen Analyse. Die geringere geometrische Auflösung verwischt die strukturellen Details urbaner Landschaften, der Aufnahmestreifen von 185 km Durchmesser ermöglicht dafür die komplette Abdeckung der großflächigen urbanen Räume von Megacities.

Zur Klassifikation von Landsat Daten können verschiedenste Methoden herangezogen werden: Überwachte und unüberwachte statistische Klassifikationsverfahren (MATHER 2004), hierarchische Entscheidungsbaumansätze (WARD ET AL., 2000), neurale Netze (BISCHOF ET AL., 1992) oder Spectral Mixture Analysis (LU & WENG, 2004) zur Analyse von Landbedeckung im Sub-Pixel-Bereich. Der hier entwickelte Ansatz beruht auf einem hierarchischen, objektorientierten, fuzzy logic basierten Ansatz. Die Klassifikation der Landsat Daten wurde sowohl für eine pixelbasierte als auch eine objektorientierte Klassifikationsmethode durchgeführt. Ziel dabei ist es in erster Linie versiegelte von nicht versiegelten Bereichen abzugrenzen, um Änderungen, also Art und Dimension der Urbanisierung über die Zeit nachvollzieh-

en zu können. Im Folgenden wird explizit auf das, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte objektorientierte Verfahren eingegangen, da es im Vergleich zu der pixelbasierten Methode zu einer höheren Klassifikationsgenauigkeit führt (PENGLER, 2007). Basierend auf einer auf spektralen Informationen beruhenden Segmentierung zeigt Abbildung 4-10 den Entscheidungsbaum zur Klassifikation mittels spektralen und räumlichen Merkmalen.

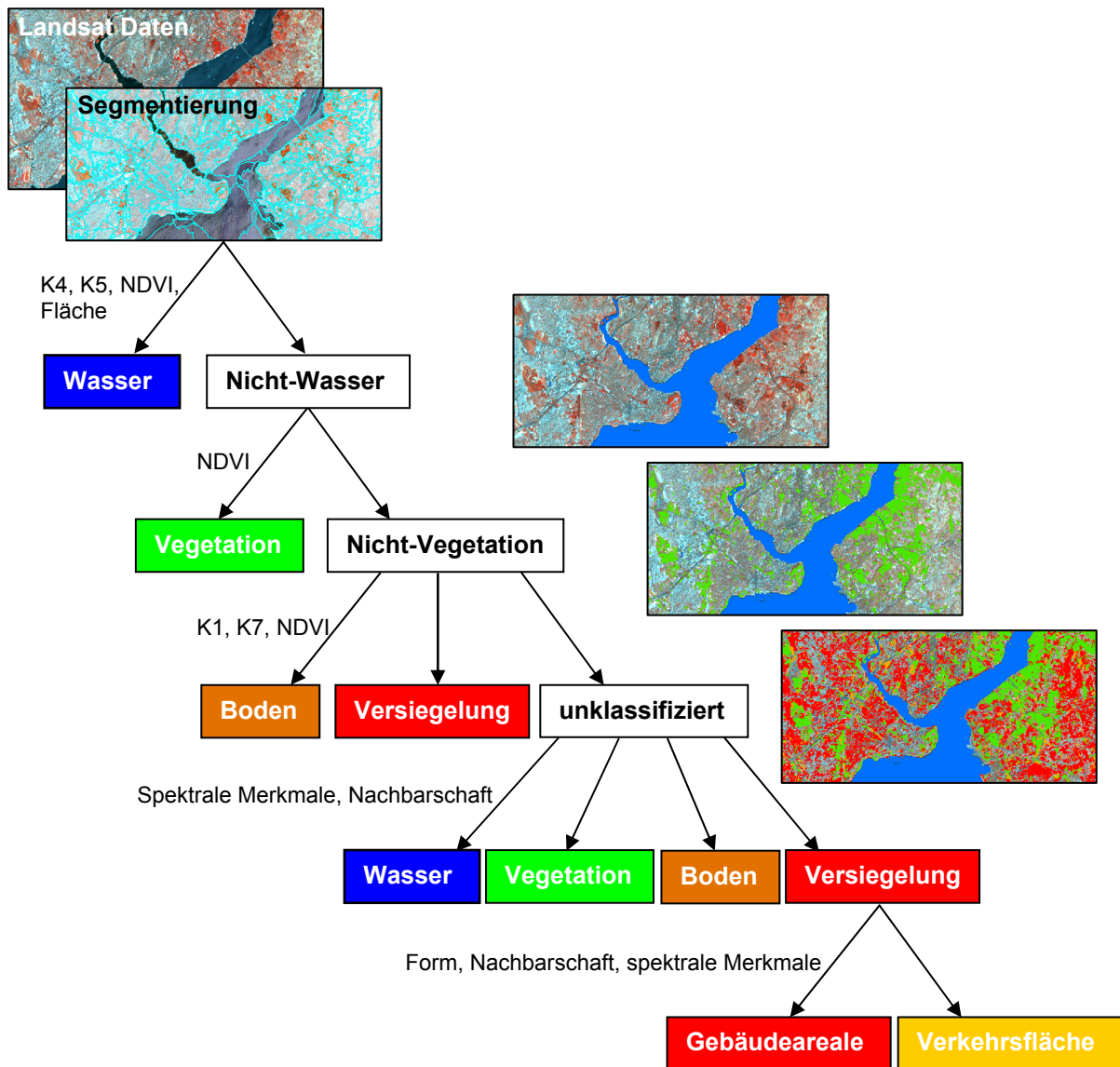


Abb. 4-10: Hierarchischer, objektorientierter, fuzzy logic basierter Klassifikationsbaum

Die Klassifikationsmethode stützt sich auf ein hierarchisches, objektorientiertes, fuzzy-logic basiertes Klassifikationssystem (Abb. 4-10). Der Zweck ist eine Extrahierung der deutlich von urbanen Räumen abzugrenzenden Klassen, um Klassen, die spektral hohe Differenzen zu versiegelten Gebieten aufweisen, von Beginn an auszuschließen. Dafür werden zuerst eindeutige Basisklassen extrahiert. Dazu zählt im ersten Schritt die Klassifizierung von Wasserflächen. Die Abtrennung von Wasserflächen basiert in erster Linie auf der geringen Reflekti-

on von Wasser im Nahen und Mittleren Infrarot, den charakteristisch niedrigen Werten um -0,50 des NDVI sowie den großen Segmenten, die auf Grund der homogenen Wasserflächen entstehen. Im nächsten Schritt wird der NDVI als Merkmal zur Abgrenzung der Vegetation benutzt. Die deutlich positiven Werte um 0,40 und aufwärts ermöglichen eine gute Abgrenzung der Grünareale. Die Extrahierung von offenen Bodenflächen ist durch die spektrale Nähe zu bebauten Arealen sowie auch zu karger Vegetationsflächen mit einer Ausweitung der Merkmale realisierbar. Dabei ist der Kanal 7 (Mittleres Infrarot), der im Vergleich zu Vegetation in diesem Spektralbereich eine signifikant höhere Reflektion aufzeigt, von Nutzen. Als zusätzliches Merkmal wird die Standardabweichung von Kanal 1 verwendet. Der Grund für seine Verwendung liegt in der Unterscheidbarkeit aus konträren Richtungen. Kanal 7 bewerkstelligt die Unterscheidung von Seiten der vegetativen Flächen zum offenen Boden, hat aber wenig Information zur Differenzierung zwischen Boden und bebauten Flächen. Die Standardabweichung im Kanal 1 ist dafür für offenen Boden um ein wesentliches niedriger als in sehr heterogenen bebauten Arealen mit seinen auf kleinem Raum vielfältigen Materialien und dadurch auch heterogenen Reflektionsverhalten. Als zusätzliches Merkmal wird noch unterstützend der NDVI eingesetzt, um über ein Fuzzy Set die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Mit einer Minimum Funktion wird die Klasse ‚offener Boden‘ nur bei ausreichender Eintrittswahrscheinlichkeit von mindestens 50 % klassifiziert. Das Resultat sind mit hoher Zuordnungswahrscheinlichkeit klassifizierte Segmente.

Mit diesem hierarchischen Klassifikationsverfahren von Grundklassen bleiben Segmente mit geringer Zuordnungswahrscheinlichkeit bis dato unklassifiziert. Noch unklassifizierte Segmente, die auf Grund von spektraler und formaler Uneindeutigkeit keiner Klasse mit der ausreichenden Wahrscheinlichkeit von mehr als 50 % zugeordnet werden konnten, werden im Folgenden mit einem wahrscheinlichkeitsbasierten Region-growing ergänzt. Dabei werden die Nachbarschaften der unklassifizierten Segmente als entscheidendes Merkmal herangezogen, während die spektralen Grenzwerte im Fuzzifizierungsprozess gelockert werden. Die spektrale Komponente bleibt aus dem Grund erhalten, um nicht durch zufällige Nachbarschaft eine Klassenzuordnung zu generieren, sondern um offensichtliche Fehler zu eliminieren. Sollte also das spektrale Verhalten des Segments im erweiterten Rahmen seiner eigentlichen Charakteristik sein, so entscheidet die Nachbarschaft über seine Zuordnung. Davon betroffen sind vor allem Segmente im Übergangsbereich von versiegelten Flächen zu Bodenflächen, die also auch durch die Pixelgrößen Mischinformationen enthalten.

Schließlich wird im komplett klassifizierten Bild noch eine weitere Unterscheidung bebauter Areale erreicht. Durch die Segmentierung können nun zusätzlich auch Formmerkmale benutzt werden, um typische räumliche Ausprägungen bebauter Strukturen zu extrahieren. Mit diesem Element wird es möglich, die bebaute Fläche in zwei weitere Klassen, ‚bebaute Strukturen‘ und ‚große Verkehrsinfrastruktur‘, zu differenzieren. Mit den Merkmalen ‚Länge‘, ‚Breite‘ und der Ratio ‚Länge zu Breite‘ der Segmente werden im Folgenden die großen Verbindungslinien der Verkehrsinfrastruktur klassifiziert.

Abbildung 4-11 zeigt die Klassifikation einer Landsat Szene vom Großraum Istanbul aus dem Jahr 2000. Die lineare Ost-West Erstreckung von an die 80 km zeigt die Dimension dieses Ballungsraumes. Sichtbar sind auch die großen Verkehrsachsen, die trotz der geringen geometrischen Auflösung mittels des objektorientierten Ansatzes extrahiert werden konnten. Analog dazu wurden auch die zur Verfügung stehenden Datensätze aus den Jahren 1987 und 1975 klassifiziert (vgl. Anhang D, Abb. D-6).

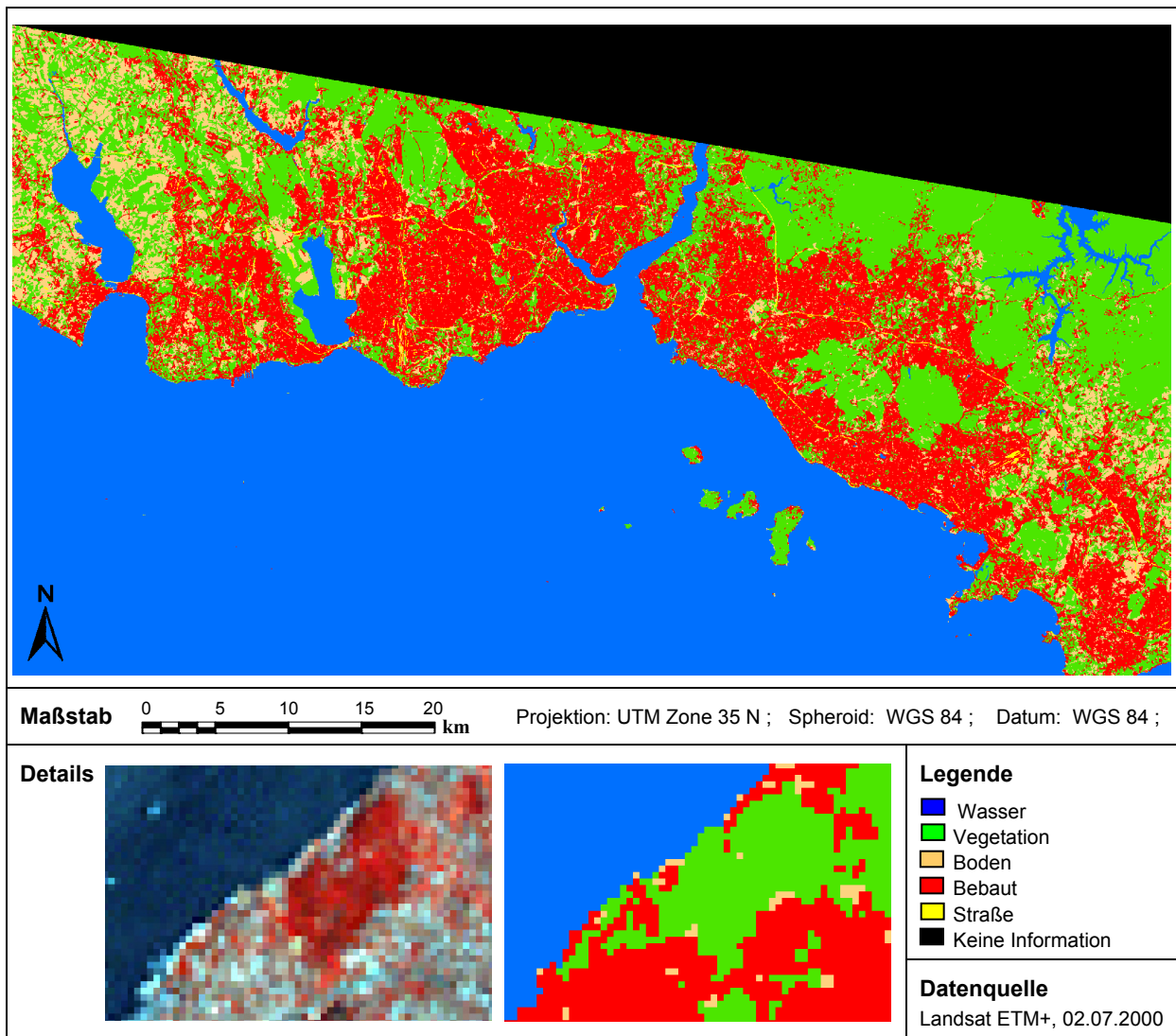


Abb. 4-11: Klassifikation des Großraumes der Megacity Istanbul mit Landsat Daten

### 4.2.1. Genauigkeitsabschätzung

Die geometrische Auflösung von Landsat Daten bedingt ein Gemisch verschiedener Landbedeckungen innerhalb eines Pixels. Das heißt, dass ein Pixel mit Spektralmerkmalen, die auf Versiegelung hindeuten, auch Vegetationsflächen beinhalten kann. Vor diesem Hintergrund muss man die im Folgenden durchgeführte visuelle Genauigkeitsabschätzung basierend auf 100 Zufallspunkten einer jeden Klasse betrachten. Dies erscheint jedoch als absolut ausreichend, da mittels dieser Klassifikation die Dimensionen sowie die Tendenzen der urbanen Entwicklung und nicht die Details kleinräumiger Stadtstrukturen im Fokus stehen.

Die Güte der Klassifikationsresultate ist in Tabelle 4-4 dargestellt. Wie diese belegt, lassen sich mittels des entwickelten Regelwerks die Landbedeckungsklassen mit einer Genauigkeit von über 90 % erfassen. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse, dass trotz der geringen geometrischen Auflösung sich die Tendenzen der räumlichen Entwicklung hinreichend genau klassifizieren lassen.

Klasse	Landsat ETM 2000		Landsat TM 1987		Landsat MSS 1975	
	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*
Siedlung	81,22 %	85,00 %	76,19 %	92,00 %	85,33 %	90,00 %
Vegetation	90,43 %	85,00 %	98,94 %	78,00 %	87,74 %	93,00 %
Boden	81,26 %	72,00 %	84,15 %	71,00%	84,71 %	74,00 %
Wasser	99,01 %	100,00 %	99,01 %	100,00 %	99,01 %	100,00 %
<b>Gesamt</b>	<b>90,8 %</b>		<b>92,4 %</b>		<b>93,9 %</b>	

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. 4-4: Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen

Im Anhang D findet sich die Genauigkeitsabschätzung der analog durchgeführten objektorientierten Klassifikationen für die Landsat Daten der Übertragungsgebiete Hyderabad und Padang (vgl. Tab. D-2 und D-3). Auch für diese urbanen Räume bilden sich deutlich die Dimensionen urbaner Entwicklung mit ähnlich hohen Genauigkeiten um knapp 90 % ab.

### 4.3. Bewertung

Das zentrale Ziel der entwickelten Klassifikationsmethode für höchst aufgelöste urbane Satellitendaten besteht darin, das Rahmenwerk schnell, einfach und stabil mit systematischen Anpassungen mit einer hohen Klassifikationsgenauigkeit übertragen zu können. Dieses Rahmenwerk mit seinem interaktiven modularen Aufbau ist als Prozessbaum in der Software eCognition implementiert, wodurch es auf verschiedenste Bilddaten anwendbar ist. Dabei können die einzelnen Module interaktiv und individuell modifiziert, ergänzt, angepasst oder auch nicht berücksichtigt werden. Dadurch soll eine höchst mögliche Flexibilität für den Nutzer gewährleistet sein, um auf die Spezifika des jeweiligen Datensatzes explizit eingehen zu können. Dabei ist das entwickelte Verfahren so ausgelegt, dass es innerhalb der Methode eine größtmögliche Transparenz der Prozesse bietet, um den Nutzer innerhalb seiner Chronologie systematisch zu führen. Dabei entspricht die Grundeinstellung einer Lösung, die für alle verwendeten Datensätze gute Ergebnisse liefert, optionale Module ermöglichen dem erfahrenen Anwender allerdings datenabhängige Anpassungen und Ergänzungen vorzunehmen. Das modulare Verfahren zielt auf Übersichtlichkeit und Anwenderfreundlichkeit, erfordert aber trotzdem ein gewisses Maß an Wissen über die Software eCognition. Der große Umfang an Sub-Prozeduren gestaltet den Ansatz zwar einerseits sehr variabel, macht es aber neuen Nutzern schwer, Methoden und strukturelle Zusammenhänge schnell zu durchschauen. Der Umfang der Prozeduren ist auch der Grund für lange Rechenzeiten, die für eine Komplettszene im Bereich mehrerer Tage liegen.

Die eigentliche Steuerung der Klassifikation erfolgt über die Definition der Schwellwerte (Fuzzifikation) für die klassenabhängig verwendeten Merkmale. Diese wissensbasierte Bestimmung der Objekteigenschaften ist nach den bisherigen Erfahrungswerten vorgegeben, verlangt aber nach datenspezifischen Anpassungen. Die Güte der Auswahl der Schwellwerte bestimmt letztendlich auch die Güte des Resultats und birgt dadurch unabhängig von der Systematik Unsicherheit. Da spektrale Werte eine wesentlich größere Differenz zwischen Datensätzen aufweisen als räumliche Komponenten urbaner Räume, basiert der Ansatz in erster Linie auf Form- und Kontextmerkmalen und nur unterstützend aus einem spektralen



Merkmale. Diese Basis ermöglicht die schnelle und einfache Anpassung, schöpft aber im Gegenzug nicht das volle Potential spektraler Information aus.

Im Vordergrund der Klassifikation steht die Detektion bebauter Strukturen. Dabei erweist es sich als Vorteil, wenn ein Datensatz mit geringer Sonnenstandshöhe Schatten verursacht. Zwar vermindert der Schatten den Informationsgehalt des Pixels, gleichzeitig ermöglicht er aber in hoch verdichteten, bebauten Gebieten eine Abgrenzung von Haus und Nicht-Haus und damit eine Erfassung der Stadtstrukturen. Datensätze mit fast senkrechten Sonnenständen, wie sie in den urbanen Räumen Hyderabad und Padang vorliegen, bereiten dieser Abgrenzung erheblich mehr Probleme (vgl. Abb. 2-10 und D-1), da die meist versiegelten Flächen zwischen dichten Wohngebieten durch hohe spektrale Ähnlichkeit zu Dachstrukturen, eine Differenzierung erschweren. Dies zeigt sich bereits in dem Vergleich des Üsküdar Datensatzes, bei dem durch den niedrigen Sonnenstand sogar 100 Prozent der Fläche klassifiziert werden konnten, mit der „Zeytinburnu Szene“. Dessen höherer Sonnenstand, erschwert die eindeutige Zuordnung von Dach oder Straße, und resultiert aus diesem Grund in 4,43 % unklassifizierte Pixel, die in keinem Level eine ausreichende Klassifikationswahrscheinlichkeit erreichen konnten.

Die Klassifikationsergebnisse aller urbanen Datensätze erzielen eine Güte von etwas über 80 %. Die Transferergebnisse liefern die geringere Güte, wobei dafür aber in erster Linie, die szenenspezifischen Merkmale die Ursache sind und nicht Schwierigkeiten, die sich durch den systematischen Anpassungsprozess, ergeben. Das Potential höchst auflösender Daten zeigt sich im Vergleich zu einem Ergebnis des MURBANDY-Projektes (Abschnitt 2.2.1.). Die Ergebnisse sind Produkte visueller Interpretation und Digitalisierung und basieren auf IRS/D Daten mit einer geometrischen Auflösung von 5 Metern im panchromatischen Kanal (KEMPER, 2002). Der Vergleich der Klassifikationsresultate dieser Arbeit zu Abbildung 4-12 zeigt einen enormen Detailunterschied beider Produkte, von zusammengefassten Blöcken als Einheiten zu Einzelhausniveau. Während Abbildung 4-12 einen generalisierten Überblick über die Grundstrukturen der urbanen Landschaft liefert, ermöglicht der hohe Detailgrad des IKONOS Klassifikationsproduktes die Strukturen im Bereich einzelner Häuser oder kleiner Straßen abzubilden.

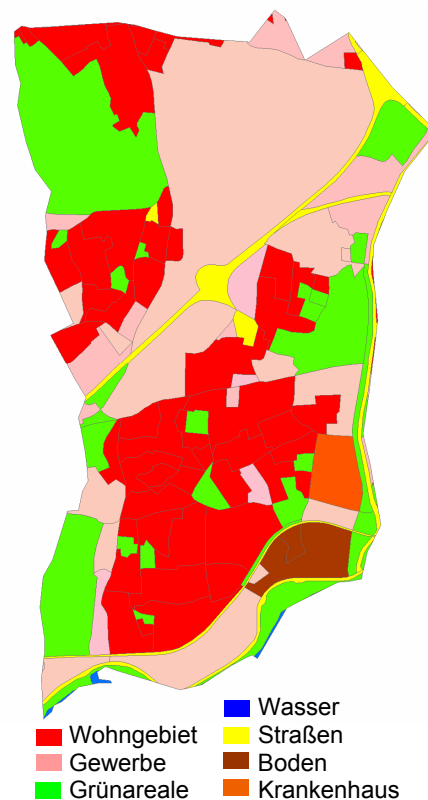


Abb. 4-12: Vergleich zur urbanen Klassifikation der MURBANDY-Studie

Somit liefern die semi-automatischen Klassifikationen objektive, und damit von visueller Interpretation unabhängige Resultate. Dadurch kann auch das Potential der Daten, die der Interpretation durch das menschliche Auge überlegen ist, ausgeschöpft werden. Damit wird eine kostengünstige, flächendeckende und aktuelle Informationsbasis für sich dynamisch verändernde urbane Räume mittels höchst aufgelösten Satellitendaten geschaffen.

Die Klassifikationen der Landsat Daten ermöglichen die Erfassung des kompletten urbanen Raumes, allerdings auf Grund eingeschränkter geometrischer Auflösung, mit geringerem Detailgehalt. Die erzielten hohen Genauigkeiten um 90 % der Klassifikationsresultate zeigen die tendenzielle Dimension der Ausdehnung sowie der temporalen Änderung des urbanen Raumes. Die spektrale Mischinformation verschiedenster Objekte im kleinräumigen urbanen Raum innerhalb eines Pixels von Landsat Daten werden in diesem Ansatz, um mehr inhaltliche Details abzuleiten, nicht aufgelöst. Der zeitliche und methodische Aufwand bzw. der Zugewinn an Genauigkeit solcher Analysen steht dabei nicht im Verhältnis zu den, für die Abschätzung großflächiger Änderungen zwischen ‚versiegelt‘ und ‚nicht-versiegelt‘, benötigten tendenziellen Dimensionen.

#### **4.4. Zusammenfassung**

Dieses Kapitel legt mit seinen Klassifikationsprodukten den Grundstein zur Analyse des heterogenen urbanen Raumes. Die Klassifikationen geometrisch höchst sowie mittel aufgelöster Satellitendaten ermöglichen die aktuelle Detailanalyse urbaner Strukturen, aber auch die großflächige und temporale Analyse urbaner Entwicklungen. Diese Klassifikationsergebnisse beinhalten

- 7 urbane Landbedeckungsklassen mit hohem Detaillierungsgrad aus geometrisch höchst aufgelösten Datensätzen
- 5 urbane Landbedeckungsklassen aus geometrisch mittel aufgelösten Datensätzen zu drei Zeitpunkten

Die Resultate bieten eine multiskalige Informationsbasis verschiedenster urbaner Räume bzw. urbaner Strukturen mit Klassifikationsgenauigkeiten von über 80 %.

Zudem zeigen die entwickelten Methoden ein hohes Potential zur Übertragbarkeit. Zum einen wird gezeigt, dass die Ansätze auf unterschiedlichste urbane Strukturen verschiedener Städte dieser Welt erfolgreich angewendet werden können, zum anderen wird auch eine Übertragbarkeit auf andere höchst aufgelöste Satellitendaten gezeigt und umgesetzt. Die Klassifikationen bilden eine flächendeckende und aktuelle Informationsgrundlage, um verschiedenste Potentiale der Fernerkundung im urbanen Raum (Kapitel 5) zu beleuchten und Komponenten bzw. Indikatoren des Risiko- und Vulnerabilitätsrahmens (Kapitel 3) abzuleiten.

# Kapitel 5

## Analyse des urbanen Raumes basierend auf Fernerkundungsdaten

Auf der Grundlage der Landbedeckungsklassifikation (vgl. Kapitel 4) wird im Folgenden der komplexe urbane Raum nach physischen Kriterien räumlich strukturiert. Die Vorgabe zur Strukturierung orientiert sich am Leitfaden dieser Arbeit (Tab. 3-1) und den darin für das System „urbaner Raum“ erarbeiteten Indikatoren. Dieses Kapitel konzentriert sich dabei auf die methodischen Gesichtspunkte zur Extrahierung essentieller Kriterien wie Gebäudedichte, Gebäudehöhen, Dach- und Haustypen, Lageparameter oder Bevölkerungsparameter. Diese aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten räumlichen Indikatoren der urbanen Landschaft bilden die Grundlage für eine Abschätzung von Vulnerabilität (vgl. Kapitel 6).

Moderne Städte weisen eine ausgeprägte Differenzierung auf. Dabei ist die sozialräumliche Differenzierung untrennbar mit stadtstrukturellen bzw. stadtmorphologischen Komponenten eines urbanen Raumes verbunden. Die kleinräumigen Veränderungen heterogener urbaner Strukturen wirken in ihrer physischen Ausstattung und Nutzung, über ihre Nutzer bzw. Nutzergruppen prägend auf die Vulnerabilität eines Ortes. Die Einteilung homogener Raumeinheiten innerhalb urbaner Landschaften, die physisch in sich homogene und untereinander unterschiedliche Raummerkmale aufweisen, ermöglicht also, über räumliche Differenzen Aussagen über Vulnerabilitäten zu treffen. Diese Raummerkmale sind überwiegend gekennzeichnet durch ihre charakteristische Konfiguration der Bebauung und der Freiflächen. Jeder Strukturtyp kennzeichnet sich durch ein spezifisches Anordnungsmuster. Dieses wird mittels Indikatoren beschrieben wie die charakteristische Dichte der Bebauung, Eigenschaften der Gebäude selbst, die Lage, die infrastrukturelle Anbindung, die Bevölkerung oder Ähnliches.

### 5.1. Gebäudedichteanalyse

Die Gebäudedichte gilt als ein Maß zur Abschätzung eines urbanen Typs sowie zur Detektion innerstädtischer Strukturübergänge (KARATHANASSI ET AL., 2000). Grundsätzlich spezifiziert sich die Gebäudedichte eines urbanen Ortes über seine Umgebung. Dabei spielen Dis-

tanz zu und Anzahl der Nachbarhäuser sowie der Anteil von Grün- oder Verkehrsflächen die entscheidende strukturelle Rolle. Urbane Stadtlandschaften haben dabei unterschiedlichste Gebäudedichten mit teils unscharfen, teils harten Übergängen zwischen verschiedenen Zonen. In Bezug auf räumliche Verteilung von Vulnerabilität spezifiziert die Gebäudedichte die Quantität gefährdeter Strukturen.

In der Literatur werden zur Bestimmung von Gebäudedichten verschiedene Methoden präsentiert. KARATHANASSI ET AL. (2000) präsentieren einen texturbasierten Ansatz auf Originaldaten, während ANAS ET AL., (1998) mittels fraktaler Geometrie strukturelle Ähnlichkeiten aus einer Landbedeckungskarte ableitet. Weitere Ansätze beruhen auf Stadtmodellen, die über statistische Parameter wie Distanzfunktionen zu vordefinierten Punkten oder die künstliche Einteilung des urbanen Raumes (ANAS ET AL., 1998; HEROLD, 2002a; TORRENS & ALBERTO, 2000) Einheiten von gleicher oder ähnlicher Gebäudedichte errechnen. Der Fokus der folgenden Methoden zielt im Gegensatz dazu auf eine, von vorgegebenen Trennlinien oder einer künstlichen räumlichen Voreinteilung, unabhängige Berechnung von Grenzen zwischen unterschiedlichen Zonen.

### **5.1.1. Zweistufiger Ansatz zur pixelbasierten Errechnung von Gebäudedichten**

Im Folgenden wird eine Methode entwickelt, die homogene Gebäudedichtezonen automatisiert und interpreterunabhängig mittels einer Segmentierungstechnik und einer Savitzky-Golay-Filterung errechnet. Die Datengrundlage stellt die Landbedeckungsklassifikation aus Kapitel 4 (Abb. 4-7) dar. Den grundlegenden Ausgangspunkt stellt ein zweistufiger Ansatz zur Analyse einer definierten Nachbarschaft dar, der die Umgebung des jeweiligen Pixels analysiert.

Die erste Stufe betrachtet die nächste Umgebung jedes Pixels mit einem Radius von 20 Metern bzw. Pixeln. Die betrachtete Nachbarschaft ist in iterativen Schritten so angepasst, bis ein Maß erreicht ist, das die direkten Nachbarobjekte repräsentativ in jeder Richtung erfasst. Dabei wurde vornehmlich darauf geachtet, die Dichte von der unmittelbaren Nachbarschaft abhängig zu machen, um kleinräumige und harte Dichteübergänge erfassen zu können. Geringere Distanzen beispielsweise mit einem fünf Meter Radius resultieren in einer nicht repräsentativen Erfassung der Nachbarschaften, da die Variabilität der direkten Hausumgebung innerhalb einer homogenen Zone sehr hoch sein kann. Größere Distanzen dagegen zeigen sich als nicht sensibel genug, um Übergänge und Grenzen homogener Dichtezonen abzubilden.

Die Berechnung der Dichtewerte kann grundsätzlich für alle vorhandenen urbanen Klassen, wie Haus, Vegetation und Verkehrsflächen durchgeführt werden. Das hoch strukturierte, sehr heterogene urbane Stadtgebiet weist speziell bei der Gebäudedichte eine hohe lokale Variation in seiner räumlichen Verteilung auf. "Once again, we find that urban structure is inconveniently irregular and scale-dependent – features that are important clues to the scale-dependent processes governing agglomeration in the modern world" (ANAS ET AL., 1998). Diese lokale Variation ist in erster Linie durch den statischen Ansatz eines 20 x 20 Fensters zur Umgebungsanalyse bedingt. Abbildung 5-1 zeigt beispielhaft entstehende Randeffekte und die direkte Auswirkung auf die Quantifizierung der Dichte. Der abrupte Übergang von bebautem Gebiet zu einem innerstädtischen Park resultiert für Randpixel in signifikant unter-

schiedlichen Dichtewerten für Häuser und Vegetation. Unabhängig von den errechneten Dichtewerten erscheint allerdings die klassifizierte Häuserstruktur als sehr homogen, womit eine unterschiedliche Gebäudedichteklassifikation, trotz signifikant differierender Dichtewerte für diese beiden Beispielpixel, nicht der Realität entspricht.

Diese erste Annäherung an die Verteilung der Gebäudedichten innerhalb des Stadtgebietes, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, ist, auf Grund der hohen Variabilität der sehr lokalen Analyse, ungeeignet für eine gute Klassifikation.

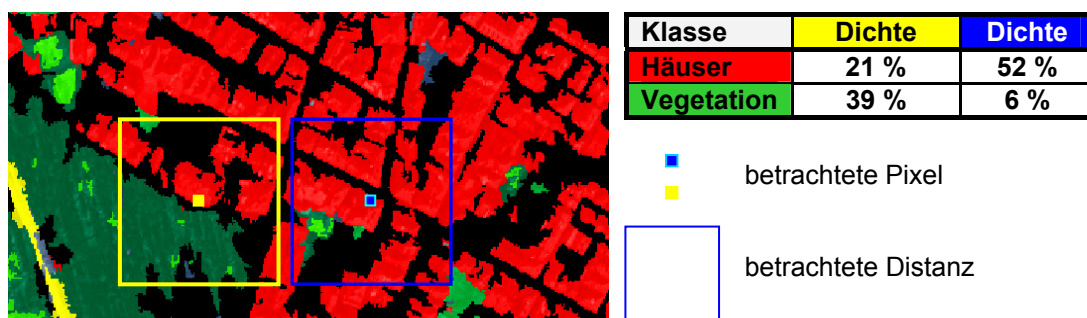


Abb. 5-1: Variationen von errechneten Dichtewerten resultierend aus dem Moving-Window Ansatz innerhalb einer visuell homogenen Dichtezonen

Um diesem Problem zu begegnen, wird diese lokale Dichteanalyse in zweiter Stufe mit einem weiteren Moving-Window Ansatz ergänzt. Dabei werden die errechneten Dichtewerte mit einem 100 Meter Fenster gescannt und für jedes Zentrumspixel der Medianwert gebildet. Der Medianwert erweist sich gegenüber dem arithmetischen Mittel als robuster gegenüber Ausreißern und er erreicht, dass die hohe Variabilität der Dichtewerte der lokalen Nachbarschaft aus der ersten Stufe durch die Einbeziehung eines größeren räumlichen Kontextes einer Glättung unterzogen wird. Diese Methode ermöglicht die Quantifizierung der Gebäudedichten unter Berücksichtigung einer direkten lokalen Nachbarschaft sowie einer größeren räumlichen Einheit.

Abbildung 5-2 stellt die errechneten Hausdichten als dreidimensionalen Verlauf der Dichtewerte dar. Die Übergänge zwischen homogenen Dichtezonen sind also unscharf, wobei der Verlauf der Welle verschiedene Zonen widerspiegelt. Die Steilheit des dreidimensionalen Verlaufs gilt als ein Indikator für die Art der Übergänge. Zwischen einer Freifläche und einem hoch verdichtetem Gebiet ist die Steigung um ein wesentliches höher als zwischen einem gering verdichtetem und einem dicht bebauten Gebiet. Die obere Hälfte der Abbildung 5-2 zeigt die hohe Variabilität der räumlichen Gebäudedichteverteilung der ersten Stufe des lokalen Ansatzes. Dadurch ergibt sich ein sehr unregelmäßiges Bild von Gebäudedichten mit starken Variationen innerhalb visuell homogener Zonen. Eine vernünftige Klassifizierung von homogenen Dichtezonen wird dadurch erschwert. Die geglättete wellenförmige Verteilung der Dichte der zweiten Stufe wird in der unteren Hälfte von Abbildung 5-2 präsentiert. Im direkten Vergleich weist das geglättete Bild ein wesentlich homogeneres Bild auf und spiegelt dadurch die räumliche Verteilung der Gebäudedichten wider.

Die dreidimensionale Darstellung der Dichtewerte für Gebäude spiegelt die räumliche Verteilung von Freiflächen, sowie von wenig, mittel und hoch verdichteten Arealen im Stadtgebiet wider. Traditionelle pixelbasierte Klassifikationsmethoden sind für eine Klassifikation von homogenen Dichtezonen ungeeignet. Der Grund liegt in den hohen Differenzen nahe gele-

gener Dichtewerte in Übergangsbereichen, wodurch eine Vielzahl von Übergangsklassen detektiert werden, die realen stadtstrukturellen Übergängen widersprechen. Aus diesem Problem heraus ergibt sich also die Vorgabe, automatisch und damit interpreterunabhängig, Grenzen zwischen homogenen Zonen zu generieren. Im Folgenden werden zwei entwickelte Methoden vorgestellt und diskutiert: Ein objektorientierter Ansatz und ein Ansatz basierend auf einer Savitzky-Golay-Filterung, aus dem eine Analyse der aus der wellenförmigen Dichteverteilung entstehenden mathematischen Funktion mittels einer Kurvendiskussion hervorgeht.

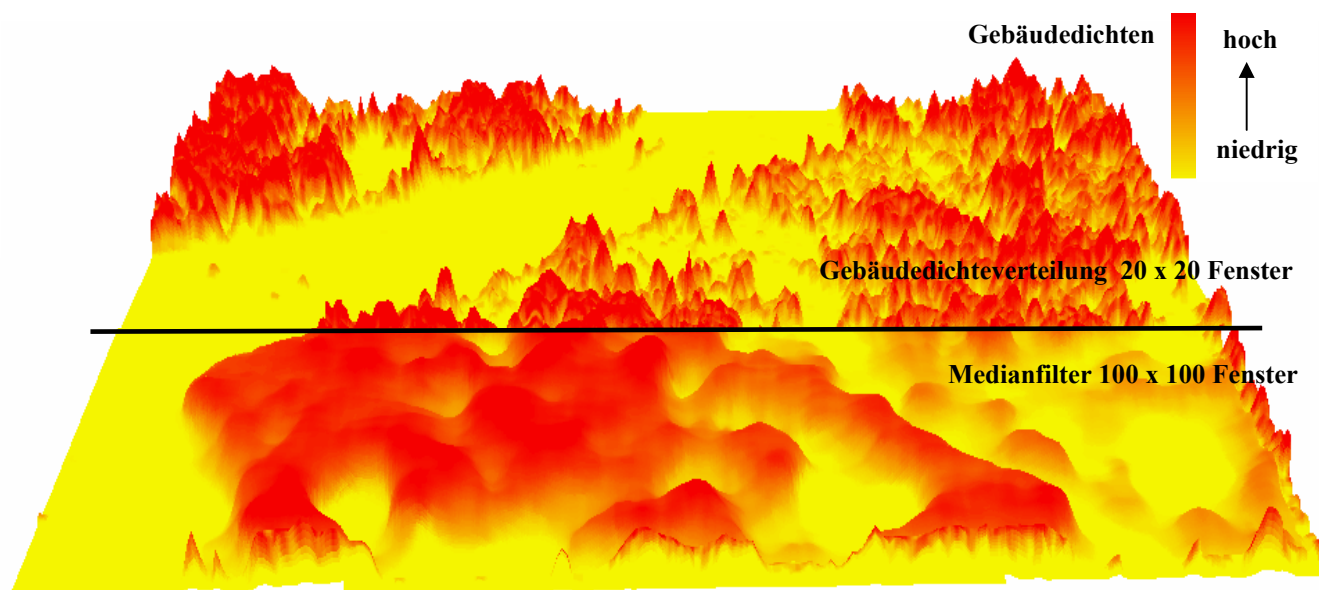


Abb. 5-2: Perspektivische Darstellung des Dichtefilters für Gebäudedichten für lokale Nachbarschaften und wellenförmige Übergänge durch Median-Filterung

### 5.1.2. Segmentierungsansatz zur automatisierten Ableitung von Dichtegrenzen

Homogene Dichtezonen innerhalb einer sehr heterogenen urbanen Landschaft basieren auf ähnlichen Dichtewerten hinsichtlich ihrer Nachbarschaften. Eine Zusammenfassung von homogenen Werten mit räumlichen Zusammenhängen sollte daher eine Abgrenzung heterogener Zonen bewirken. HARALICK und SHAPIRO (1993) fassen dafür nötige Segmentierungsprozesse zusammen. Eine Region-growing-Segmentierungstechnik, beginnend bei jedem Einzelpixel im Bild fusioniert in einem paarweisen ‚clustering-Prozess‘ Nachbarpixel zu einem Segment, wenn die Eigenschaften beider Pixel dem Ähnlichkeitskriterium entsprechen (vgl. 4.1.1.). Anstatt der spektralen Kanäle eines Satellitenbildes wird dieser Prozess also auf die Dichtewerte angewendet. Die Homogenitätstoleranz, die für das Region-growing angewendet wird, muss sensibel genug sein, um Übergänge von Dichtezonen, wie z. B. von einer Freifläche zu einem gering verdichteten Gebiet erkennen zu können. Dadurch wird allerdings eine Vielzahl von Grenzen bei Übergängen von kleinen zu sehr hohen Dichtewerten erkannt, Diese Vielzahl an Grenzen ist für viele Beispiele nicht realitätsnah, während eine harte Grenze die Wirklichkeit abbildet.

Die so erzeugten Segmente dienen als Basis für eine Abgrenzung verschiedener Dichtezonen. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass der Segmentierungsprozess, also das Erzeugen

von Grenzen zwischen Zonen, nicht auf eine Informationsebene beschränkt ist. Die Segmentierung kann sich, basierend auf der Landbedeckungsklassifikation, inklusive unterschiedlicher Gewichtung der Informationsebenen, auf mehrere errechnete Dichtewerte beziehen. Somit können gleichzeitig Vegetationsanteile, Verkehrsflächen und Gebäudedichten zur Grenzerrechnung verwendet werden. Die Segmentierung liefert in hochvariablen Gebieten, wo das Nebeneinander von hoch verdichteten Gebieten und Freiflächen eine hohe Differenz der Dichtewerte verursacht, eine Vielzahl von Grenzen bzw. Segmenten. Aus diesem Grund wird ein hierarchisch absteigender (top-down) Klassifikationsansatz implementiert, um das Problem an den Übergängen von homogenen Zonen bei der Klassifikation nachträglich zu beheben. Abbildung 5-3 zeigt an harten Dichtegrenzen in der Realität eine Vielzahl von Grenzen.

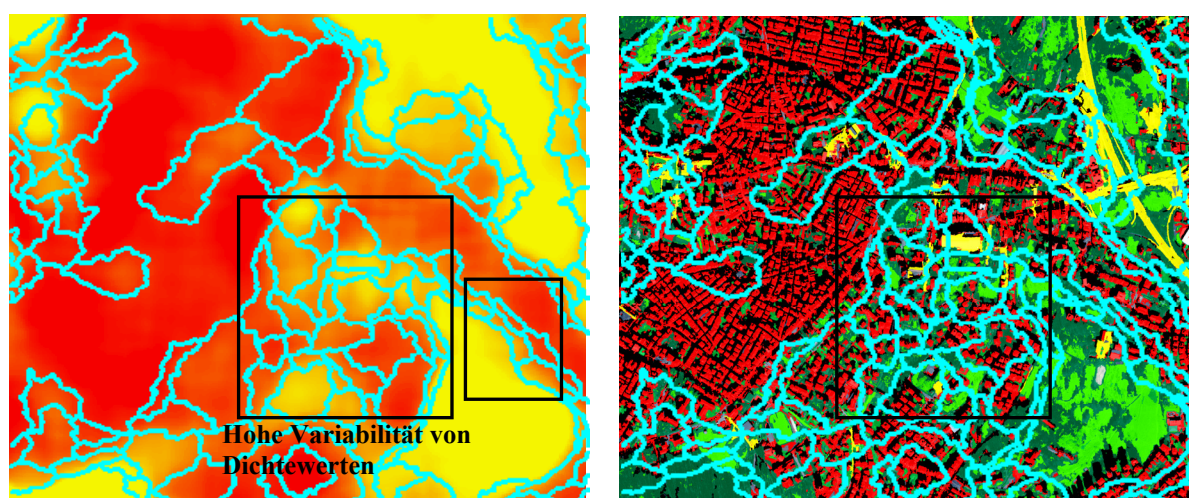


Abb. 5-3: Generierung von Grenzen mittels objektorientierter Segmentierung mit einer Vielzahl von Grenzen in Übergangsbereichen bedingt durch hohe Dichtewertdifferenzen

“Based on a generic model, the algorithm used to classify the scene into discrete land use parcels must be able to measure the degree of similarity between the observed region and the spatial object model” (DONNAY ET AL., 2001). Als thematische Klassen werden hoch verdichtete, mittel verdichtete, gering verdichtete Zonen und Freiflächen differenziert. Diese werden anhand der errechneten Gebäudedichten und dem Vegetationsanteil klassifiziert. Die Klassifikation der Dichtezonen beginnt mit Segmenten, die durch eine hohe Homogenität, durch eindeutige Dichtewerte sowie ein Mindestmaß an Fläche eine hohe Zuweisungswahrscheinlichkeit aufweisen. Damit werden Teilbereiche der Szene klassifiziert, während die kleineren Segmente in Übergangsbereichen zunächst unklassifiziert bleiben (Abb. 5-3 - Ausschnitt). Im nächsten Schritt werden dann mittels Nachbarschaft die Klassifikationsschwellwerte der jeweiligen Klasse gelockert, um zwischen einer harten Grenze wie einer Freifläche und einem hoch verdichtetem Strukturtyp, nicht mehrere künstliche Übergangszonen zu detektieren.

Abbildung 5-4 zeigt die, mit dieser Region-growing Klassifikationsmethode, erreichte Grenzoptimierung. Im Vergleich zu Abbildung 5-3 wird deutlich, dass die Zonen nun überwiegend durch eine Grenze voneinander getrennt sind und realen Übergängen entsprechen. Diese Segmente ermöglichen nun die Klassifikation homogener Gebäudedichteareale unter Verwendung von Gebäudedichten und Vegetationsanteilen.

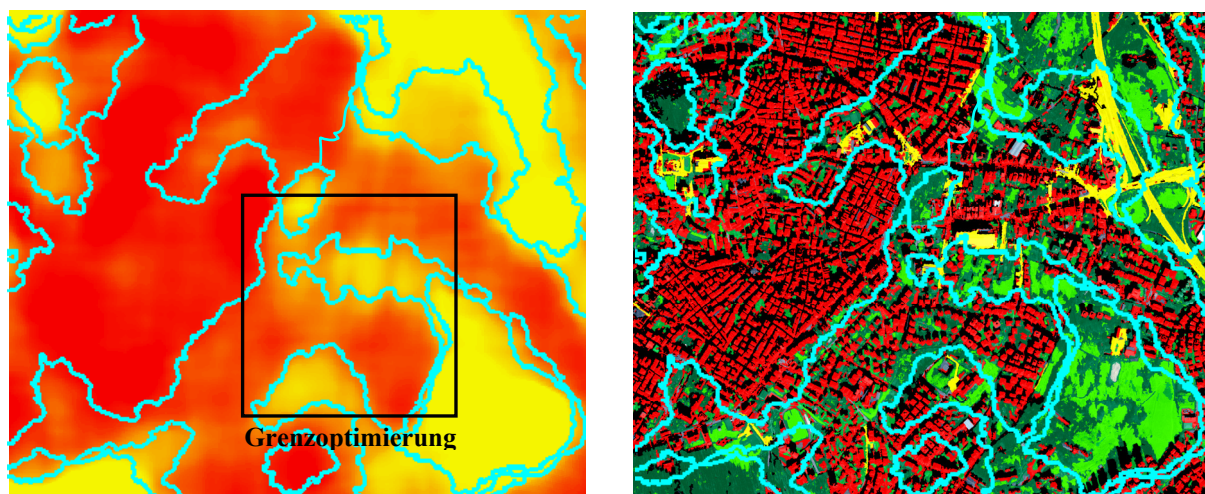


Abb. 5-4: Grenzoptimierung zwischen homogenen Dichtezonen durch eine top-down Klassifikationsmethode

### 5.1.3. Savitzky-Golay Ansatz mit Kurvendiskussion zur automatisierten Generierung von Grenzen zwischen Dichtezonen

Die Generierung exakter Grenzen gestaltet sich beim Segmentierungsansatz vor allem bei Zonenübergängen mit höchst divergenten Dichtewerten schwierig. Ein zweiter Ansatz basiert auf der mathematischen Analyse der erzeugten Dichtewertverteilung. Im Folgenden wird eine mathematische Analyse der Dichteverteilung mittels einer Savitzky-Golay-Filterung und einer anschließenden Kurvendiskussion gezeigt.

Die wellenförmige Darstellung von Dichtewerten aus Abbildung 5-5 zeigt graphisch, dass jede Reihe und jede Spalte mathematisch als stetige Polynomfunktion abgebildet werden kann. Folgerichtig lässt sich die wellenförmige Dichteverteilung mathematisch mittels einer Kurvendiskussion analysieren. Die Zu- oder Abnahme der Gebäudedichte über den Raum hinweg ist also durch die Art der Steigung oder des Gefälles in der Dichtewelle repräsentiert. Eine sprunghafte Veränderung der urbanen Dichte in der Realität, zum Beispiel zwischen einer Freifläche und einem hoch verdichteten bebauten Gebiet, spiegelt sich in einer starken Steigung der Kurve wider. Die Art der Inklination der Welle korreliert daher mit der Eigenschaft direkt benachbarter Zonen. Der fließende Übergang zweier Zonen, der sich in der Dichtewelle zeigt, ermöglicht aber auch die Lokalisation von Übergängen. Ein innerurbaner Wechsel zweier homogener Dichtezonen drückt sich daher durch eine Veränderung der Krümmung der Kurve aus. Diese Lage wird in Form mathematischer Wendepunkte beschrieben, d. h. ein Wechsel von Links- zu Rechtskrümmung oder umgekehrt. Beispielhaft zeigt Abbildung 5-5 den graphischen Verlauf der Dichtewerte einer Zeile.

Der Kurvenverlauf einer jeweiligen Zeile oder Spalte repräsentiert die Übergänge zwischen Dichtezonen innerhalb der Stadtlandschaft. Für eine objektive Lösung, verschiedene homogene Dichtezonen unabhängig von visueller Interpretation voneinander zu trennen, werden nun zwei Anforderungen nötig: Zuerst bedarf es einer Methode, die eine Funktion, die dem Graph mathematisch zugrunde liegt, abschätzt. Aus dieser Vorgabe heraus bedarf es einer Methode, die aus dieser Funktion die Wendepunkte, als Möglichkeit Übergänge von Dichtezonen zu identifizieren, errechnet.



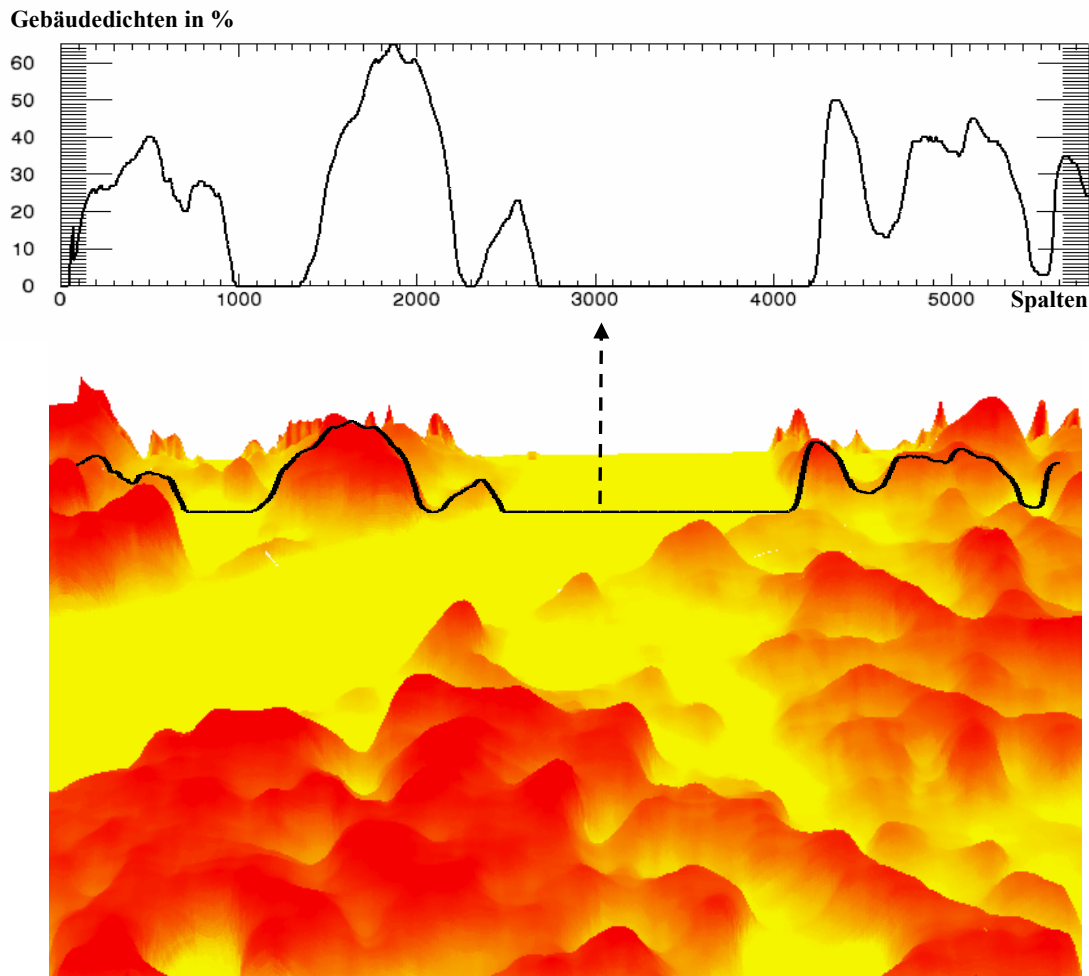


Abb. 5-5: Gebäuedichte dargestellt als dreidimensionale Welle und der daraus resultierende Graph einer Beispielszeile

Um den Graph als mathematische Annäherungsfunktion darzustellen, gibt es einige Methoden. Darunter fallen Curve-Fitting-Methoden, Fourier Analyse oder Numerische Multikomponenten Analysen wie zum Beispiel Least Square Fitting. Für diesen Fall allerdings wurde ein Spezialfall der numerischen Multikomponentenanalyse ausgewählt: Savitzky-Golay-Filter beinhalten nicht nur eine Glättung des Graphs bzw. der Daten, sondern schätzen Funktionen auf eine computereffiziente Art ab.

### 5.1.3.1. Savitzky-Golay-Filter

Das fundamentale Konzept des Savitzky-Golay-Filters ist die Annäherung eines Polynoms an die Daten um den jeweiligen Pixel herum (SAVITZKY UND GOLAY, 1964). Der Savitzky-Golay-Filter ist ein digitaler Filter der auf die Information innerhalb eines regelmäßigen Abstands um den zu berechnenden Pixel angewandt wird. Der einfachste Typ dieses Filters ersetzt jeden Pixelwert  $f_i$  am Pixel  $i$  durch eine lineare Kombination  $g_i$  von sich selbst und einer vorherbestimmten Zahl an Nachbarpixel. Mathematisch ausgedrückt ist

$$(5-1) \quad g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n \times f_{i+n}$$

wobei  $g_i$  den ursprünglichen Pixelwert ersetzt,  $n_L$  die Anzahl einbezogener Pixelwerte links vom neu berechneten Pixel zeigt,  $n_R$  die Anzahl einbezogener Pixelwerte rechts von  $i$  darstellt,  $c_n$  ein Faktor und  $f_i$  der zugehörige Pixelwert ist. Für ein konstantes  $c_n = (n_L + n_R + 1)$  wird Gleichung 5-1 zu einem Filter, der den Zentralwert aus dem Mittelwert der Pixel im Fenster, das den Zentralpixel umgibt, errechnet.

Die Neuheit im Ansatz von Savitzky und Golay (1964) liegt in der Approximation der graphischen Funktion durch ein Polynom höherer Ordnung anstatt einer Konstanten  $c_n$ . Also wird für jeden Pixelwert  $f_i$ ,  $n_L \leq i \leq n_R$ , eine Polynomannpassung für alle Punkte  $n_L + n_R + 1$  durchgeführt, und der errechnete Wert  $g_i$  an die Stelle des ursprünglichen Pixelwerte an der Position  $i$  gesetzt:

$$(5-2) \quad g_i = a_0 i^0 + a_1 i^1 + a_2 i^2 + \dots + a_M i^M$$

Die Matrixnotation für dieses Problem sieht dann wie folgt aus:

$$(5-3) \quad \mathbf{A} * \mathbf{a} = \mathbf{f},$$

wo

$$(5-4) \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} (-n_L)^2 & -n_L & \dots & (-n_L)^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k^0 & k & \dots & k^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_R^0 & n_R & \dots & n_R^M \end{bmatrix}$$

$a_j$ ,  $0 \leq j \leq M$  sind die Koeffizienten des Polynoms,  $\mathbf{a}$  der in Bezug gesetzte Vektor, und  $\mathbf{f}$  der Vektor der Pixelwerte.  $k$  in Gleichung 5-4 zeigt dabei die Distanz zum Zentrumspixel an. Die Gleichung kann also geschrieben werden als:

$$(5-5) \quad (\mathbf{A}^T * \mathbf{A}) * \mathbf{a} = \mathbf{A}^T * \mathbf{f}$$

Daraus ergibt sich folgerichtig, dass

$$(5-6) \quad \mathbf{a} = (\mathbf{A}^T * \mathbf{A})^{-1} * (\mathbf{A}^T * \mathbf{f})$$

Damit wird die fundamentale Idee von Savitzky und Golay aufgezeigt (SAVITZKY UND GOLAY, 1964). Da Gleichung 5-6 linear ist, kann Gleichung 5-7 folgendermaßen aussehen:

$$(5-7) \quad \mathbf{a} = \mathbf{C} * \mathbf{f}, \text{ wobei}$$

$\mathbf{a}$  den Vektor der Polynomkoeffizienten für die beste Approximation darstellt, und  $\mathbf{C}$  die Matrix von Koeffizienten zeigt, die komplett unabhängig von  $\mathbf{f}$  ist. Gleichung 5-8 zeigt nun die Errechnung dieser Matrix.

$$(5-8) \quad \mathbf{C} = ((\mathbf{A}^T * \mathbf{A})^{-1} * (\mathbf{A}^T * \mathbf{E})), \quad \text{wobei E die Identitätsmatrix darstellt.}$$

In der ersten Spalte finden sich die Koeffizienten zur Glättung der Ausgangsfunktion. Gleichung 5-8 besitzt zudem die Eigenschaft, Ableitungen zu berechnen, die die Grundlage für eine Berechnung und damit Analyse der Wendepunkte sind (SAVITZKY UND GOLAY, 1964). In der zweiten Spalte der Matrix sind die Koeffizienten der ersten Ableitung, in der dritten Spalte wird schließlich die zweite Ableitung dargestellt.

### 5.1.3.2. Kurvendiskussion zur objektiven Berechnung von Grenzen zwischen unterschiedlichen Dichtezonen

Die abgeleiteten Polynomfunktionen einer jeden Zeile bzw. Spalte sind die Grundlage für die Analyse der räumlichen Dichteverteilung mittels einer Kurvendiskussion. Wendepunkte lassen sich mathematisch durch die 2. Ableitung, die dabei 0 sein muss, bestimmen:

$$(5-9) \quad f''(x) = 0$$

Durch Savitzky-Golay-Filterung wird also für jedes Pixel eine Polynomfunktion mit Hilfe einer bestimmten Anzahl Pixelwerte links und rechts davon abgeleitet. Wann immer die zweite Ableitung dieser Polynomfunktion 0 ergibt, wird ein Grenzpixel als Übergang zweier Dichtezonen errechnet. Abbildung 5-6 zeigt die errechneten Grenzen bestehend aus Wendepunkten.

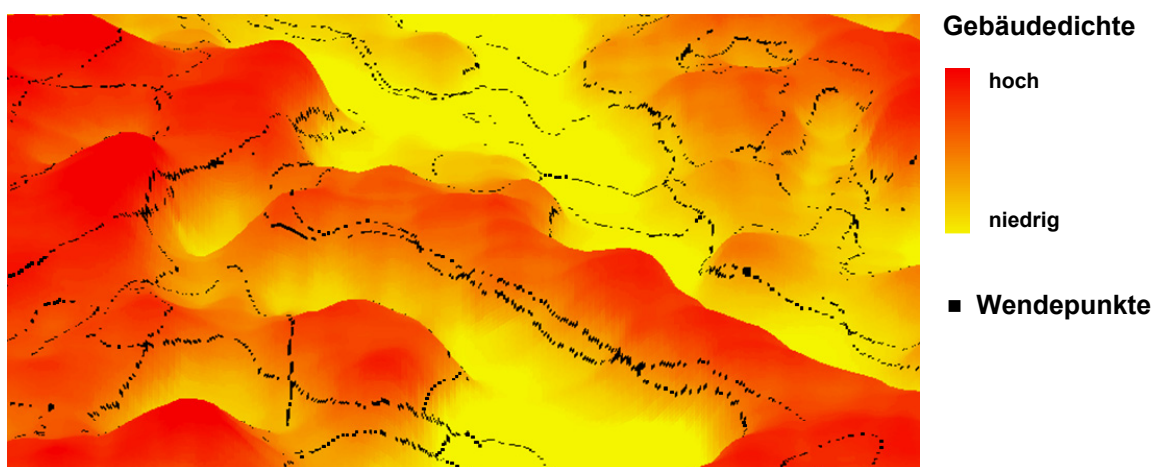


Abb. 5-6: Wendepunkte als Differenzierungsmöglichkeit zwischen homogenen Dichtezonen

Dieser Ansatz, entwickelt an der Verteilung der Gebäudedichte, ist im Allgemeinen ein Segmentierungsalgorithmus. Dieser fasst homogene Pixelwerte in einem Segment im Hinblick auf ihre Lage zusammen. Der entscheidende Vorteil durch eine Grenzdetection mittels Wendepunkte ist, dass bei einem abrupten Übergang zwischen einem hoch verdichteten Gebiet zu einer Freifläche nur eine Grenze errechnet wird. Dieser fällt genau auf den Ort, wo das Gefälle von einer Krümmungsrichtung in die andere wechselt, unabhängig von dem Betrag der Pixelunterschiede. Der Vorteil von diesem Ansatz zeigt sich eindeutig in Gebieten, wo die absoluten Werte der Gebäudedichte hohe Differenzen aufweisen. In diesen Gebieten zeigt zum Beispiel die Segmentierungstechnik des Region-growing, die im Abschnitt 5.1.2. angewendet wurde, eine Vielzahl an Grenzen, bedingt durch die hohen Werteunterschiede in unmittelbarer Nachbarschaft.

#### 5.1.4. Klassifikation der homogenen Zonen und Genauigkeitsanalyse

Nach der Generierung der Grenzen, die verschiedene homogene urbane Dichtezonen voneinander abgrenzen, werden die entstandenen Flächen klassifiziert. Dafür können nun die Dichtewerte aus dem Moving-Window Ansatz herangezogen werden. Jedes generierte Segment beinhaltet nun die Mittelwerte aus Gebäudedichte und Vegetationsanteil. Genau diese beiden Parameter werden auch für eine abschließende thematische Zuordnung der Flächen zu urbanen Dichtezonen verwendet. Tabelle 5-1 spezifiziert dafür die verwendeten Werte für eine Einteilung in vier verschiedene homogene urbane Zonen: Hoch verdichtet, mittel verdichtet, gering verdichtet und Freifläche.

Klassen	Hoch verdichtet	Mittel verdichtet	Gering verdichtet	Freiflächen
Gebäudedichten	> 50 %	35 – 50 %	10 % - 35 %	< 10 %
Vegetationsanteil	< % 5	< 15 %	15 % - 75 %	> 75 %

Tab. 5-1: Parameter zur Klassifizierung der Gebäudedichtezonen

Die Resultate beider Methoden zur Bestimmung von homogenen Dichtezonen sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Dabei zeigt sich grundsätzlich eine ähnliche Grenzziehung zwischen den Dichtezonen der urbanen Landschaft. Als entscheidender Unterschied kristallisieren sich durch Savitzky-Golay-Filterung überwiegend schärfere Grenzen heraus ohne eine Zwischenstufe zu klassifizieren. Die Resultate der Übertragung der Gebäudedichteklassifikation auf Zeytinburnu, sowie auf das Zentrum in Hyderabad finden sich im Anhang D (Abb. D-2).

a) objektorientiert



b) Savitzky-Golay Filterung

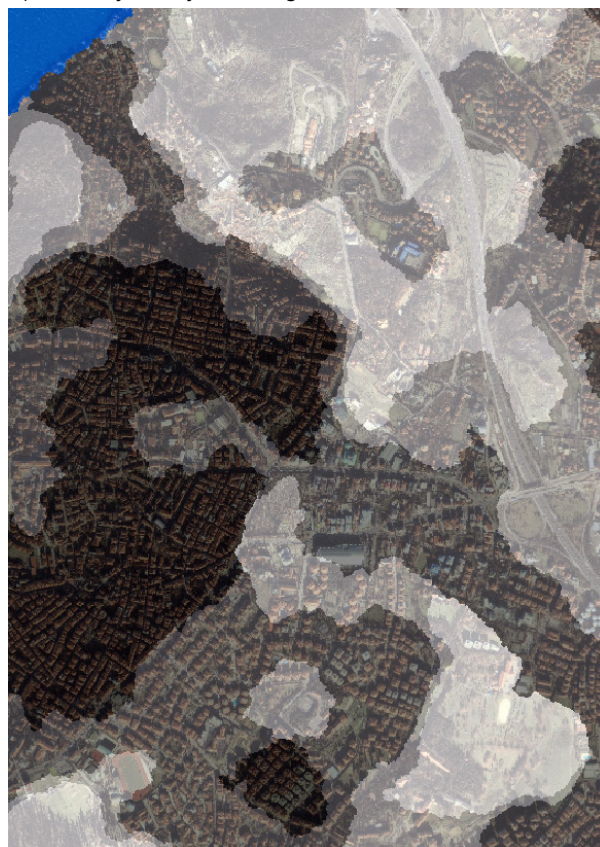


Abb. 5-7: Klassifikationsergebnisse der Gebäudedichtezonen beider entwickelter Methoden

### 5.1.5. Bewertung der zwei methodischen Ansätze

Eine Genauigkeitsanalyse der generierten Grenzen und der daraus resultierenden homogenen Dichtezonen gestaltet sich schwierig, da es weder eine Norm noch vergleichbare Einteilungen der Stadt Istanbul gibt. Aus diesem Grund wurde eine zweistufige Genauigkeitsanalyse ausgearbeitet, die zum einen auf einer visuellen Klassifikation von Dichtezonen im Testgebiet beruht, und zum anderen einem Vergleich mit administrativen Grenzen innerhalb des Testgebiets.

Der erste Schritt zur Überprüfung der Dichtergebnisse besteht aus einer Digitalisierung von Dichtezonen, die visuell abgeschätzt werden. Die Übergänge von Dichtezonen sind im Stadtbild visuell gut detektierbar. Zudem entspricht die Methode der Digitalisierung nach wie vor vielen Anwendungen in der Fernerkundung. Die Ergebnisse der automatisierten Generierung der Dichtezonen aus beiden entwickelten Methoden werden also mit Hilfe der Digitalisierung auf ihre Genauigkeit überprüft. Die folgende Tabelle zeigt die Genauigkeiten in Prozent auf.

Methode Klasse	Objektorientiert		Savitzky-Golay-Filterung	
	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*
Hoch verdichtet	74,31 %	82,75 %	84,31 %	94,32 %
Mittel verdichtet	62,90 %	70,06 %	86,47 %	77,42 %
Gering verdichtet	67,71 %	55,92 %	72,14 %	57,79 %
Freifläche	83,54 %	91,26 %	71,24 %	89,88 %
<b>Gesamt</b>	<b>75,22 %</b>		<b>80,65 %</b>	

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab 5-2: Genauigkeitsanalyse für die urbanen Dichtezonen und Gegenüberstellung der Methoden

Tabelle 5-2 zeigt die Genauigkeiten der Dichteverteilung. Dabei fällt die höhere Genauigkeit bei Savitzky-Golay-Filterung auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass gewisse Übergangszonen, die nicht der visuellen Interpretation von Gebäudedichten innerhalb des Stadtbildes entsprechen, durch Savitzky-Golay-Filterung eliminiert werden konnten. Der entscheidende Vorteil liegt darin begründet, dass bei direkter Nachbarschaft von Freiflächen und hoch verdichtetem Gebiet dieser Übergang mit dem Wendepunkt als Grenze genau eine Trennlinie generiert, was der Realität im Stadtbild entspricht. Der objektorientierte Ansatz dagegen liefert genau in diesen Bereichen, wo in direkter Nachbarschaft hohe absolute Differenzwerte der Dichte auftreten, durch Segmentierung eine Vielzahl von Grenzen. Im Gegensatz dazu ist ein Vorteil des objektorientierten Ansatzes die Möglichkeit sowohl die Gebäudedichteverteilung als auch die Vegetationsraten in den Segmentierungsprozess mit einfließen zu lassen. Damit trägt man schon bei der Grenzziehung einem zweiten Merkmal Rechnung, während dieses bei der Savitzky-Golay Methode erst bei der Klassifizierung, also nach der Detektion der Grenzen, passiert.

Eine weitere Genauigkeitsanalyse wurde mit Hilfe eines Datensatzes<sup>1</sup> durchgeführt, der lokale, administrative Grenzen innerhalb des Testgebiets darstellt. Diese Grenzen sind künstliche Produkte, die sich historisch und auf Grund der Topographie, Infrastruktur, Lage, aber auch Gebäudedichte entwickelt haben. Dadurch sind diese Übergänge nur teilweise relevant, um die errechneten Dichtegrenzen auf Genauigkeiten zu bestimmen, bieten aber trotz-

<sup>1</sup> Informationsebene bereitgestellt von der Metropolitan Municipality Istanbul, Distrikt Üsküdar.

dem visuelle Anhaltspunkte. Dabei stimmen ca. 70 % der administrativen Grenzen mit den errechneten Dichtegrenzen überein, was ein weiterer Beweis für eine akkurate Berechnung der Zonen ist.

Beide Methoden resultieren in einer Klassifikation von homogenen urbanen Dichtezonen. Die Methoden sind mathematisch nachvollziehbar, und damit für alle urbanen Räume durchführbar. Dies ermöglicht nicht nur eine vom Interpretier unabhängige Errechnung von Dichtezonen, sondern auch einen objektiven Vergleich verschiedener Städte weltweit. Im Vergleich zu bisherigen Studien die zur Analyse auf vorgefertigte künstliche Einheiten wie z. B. Hektar basieren (HEROLD ET AL., 2002), generiert der Algorithmus die Grenzen zwischen Zonen aus den Datenvorgaben heraus, und bietet dadurch selbstständig eine strukturabhängige Anpassung an den expliziten urbanen Typ. Das Wissen über Gebäudedichten im räumlichen, aber auch temporalen Kontext ist eine zentrale Information für die Stadtplanung, und damit auch für Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzungen.

## 5.2. Gebäudehöhenanalyse

Urbane Morphologie zeichnet sich nicht nur durch die heterogene Verteilung unterschiedlicher Gebäudedichten aus, sondern auch durch Parameter zur physischen Charakterisierung von Gebäudestrukturen, wie beispielsweise die Höhen der Gebäude. Gebäudehöhen sind ein zentrales strukturelles Merkmal zur Einteilung homogener Zonen innerhalb der komplexen urbanen Landschaft. Die Extrahierung von Gebäudehöhen ist ein typisches Fernerkundungsprodukt aus Stereodaten (KRAUSS ET AL., 2005; MÜLLER ET AL., 2006; TOUTIN, 2004). In vielen Fällen stehen allerdings aus Kosten- oder aus aufnahmetechnischen Gründen, keine Stereopaare zur Verfügung.

Schatten beinhalten dreidimensionale Information über die entsprechenden Objekte. Die Schattenlänge korreliert direkt mit der jeweiligen Gebäudehöhe. Die meisten Studien zur Ableitung von Gebäudehöhen aus Fernerkundungsdaten basieren auf Radartechniken (GAMBA ET AL., 2000; LUCKMANN & GREY, 2003) oder Stereoanalysen (GRODECKI, 2001; BAILLARD & MAITRE, 1999). SHETTIGARA & SUMERLING (1998) errechneten indirekt Gebäudehöhen mittels Kalibrationskurven. Gebäudehöhen aus Schattenlängen abzuleiten ist ein bereits präsentierter Ansatz (CHENG & THIEL, 1995; FRICK 2006; HARTL & CHENG, 1995; IRVIN 1989; MASSALABI ET AL., 2004), allerdings für frei stehende Gebäude oder in gering verdichteten Gebieten. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die Schattenlänge mit der Gebäudehöhe korreliert, als Basis für eine statistische Abschätzung von Höhen in hoch verdichteten urbanen Landschaften.

### 5.2.1. Mathematische Grundlagen

Grundsätzlich ergibt sich die Höhe eines Gebäudes aus einem singulären Satellitenbild durch folgende Parameter: Die Länge des projizierten Schattens, die Position der Sonne (Azimut und Zenit) sowie des Sensors zur Zeit der Aufnahme (MASSALABI ET AL., 2004). Erstere Information ist ableitbar aus der thematischen urbanen Klassifikation, die weiteren Daten sind in den Metadaten der Aufnahme enthalten. Einen graphischen Überblick über die Einflussparameter sowie die mathematischen Grundlagen bietet Abbildung 5-8. Dargestellt sind

der Winkel der Sonnenhöhe  $\alpha$ , die Bodenneigung  $\pi$ , und die Korrelation zwischen Schattenlänge und Gebäudehöhe. Zusätzlich wird der Sonnenazimutwinkel und der Satellitentrack gezeigt. Zudem wird mathematisch aufgezeigt, wie sich die Schattenlänge aus dem Einfallswinkel der Sonne und dem detektierten Schatten errechnet:

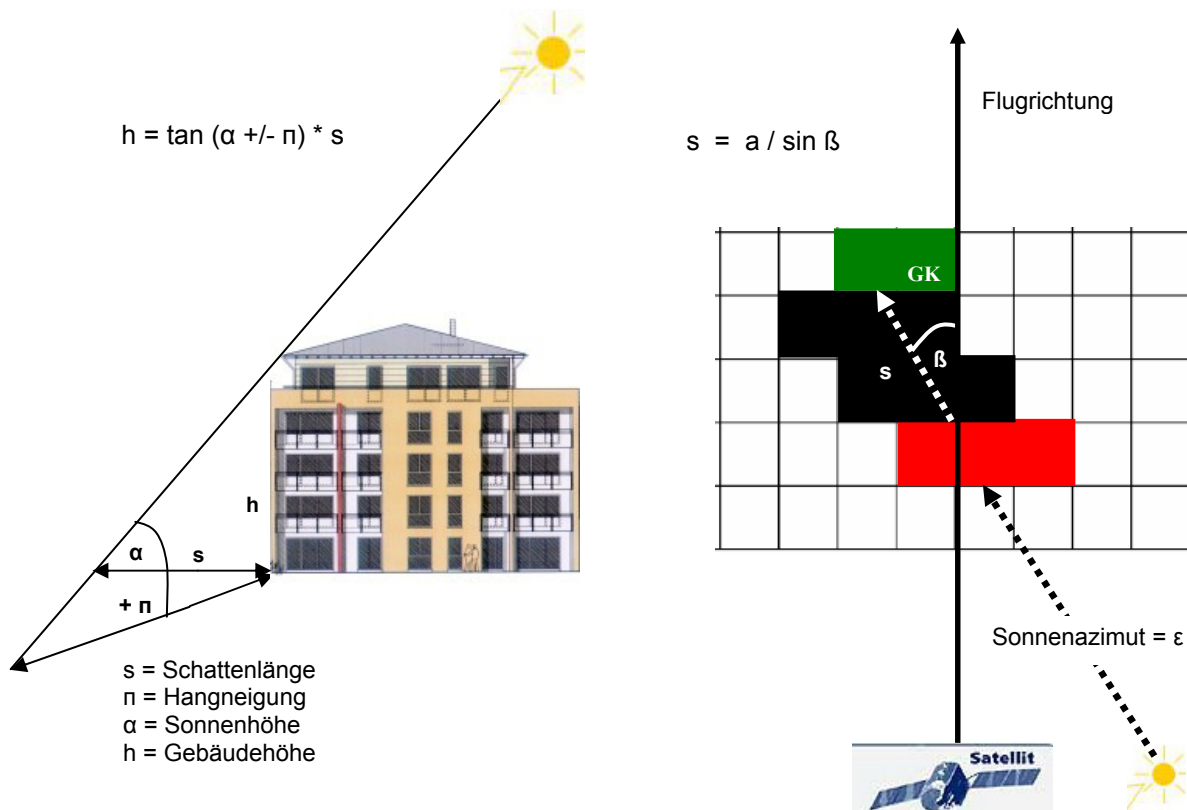


Abb. 5-8: Mathematische Grundlagen zur Extraktion von Gebäudehöhen aus Schattenlängen

Der Algorithmus startet mit einem pixelweisen Scannen der thematischen Klassifizierung aus der Sonnenazimutrichtung ( $\epsilon$ ). Der Sonneneinfallswinkel  $\lambda$  (umgerechnet in Radiant) wird umgerechnet in den Gradienten  $m$ , der die Steigung des Algorithmus zum Scannen vorgibt.

$$(5-10) \quad \lambda = \frac{\tan(\epsilon \times \pi)}{180}$$

$$(5-11) \quad m = \tan(\lambda)$$

Die Steigung  $m$  stellt die Scanrichtung für den Algorithmus dar. Der Algorithmus tastet das klassifizierte Bild aus Sonnenazimutrichtung, resultierend aus der Steigung  $m$ , ab. Dabei identifiziert er im ersten Schritt Pixel, die als ‚Haus‘ klassifiziert wurden. Wenn der Algorithmus in Scanrichtung ein dem Hauspixel direkt angrenzendes Schattenpixel detektiert, aktiviert das Programm einen Zähler, der die Anzahl stetige Schattenpixel in Scanrichtung aufnimmt. Sobald der Algorithmus dann auf eine andere Klasse als ‚Schatten‘ stößt, wird die Länge des Schattens mit dem Satz von Pythagoras errechnet. Die Schattenlänge ( $s$ ) ergibt sich daher aus dem Produkt des Sinus von  $\beta$  und der Gegenkathete ( $a$ ), wobei sich  $\beta$  in direkter Abhängigkeit von  $\epsilon$  ergibt (Abb. 5-8).

$$(5-12) \quad s = \frac{a}{\sin \beta}$$

Sollte das erste detektierte Pixel nach der Schattenlänge als ‚Haus‘ klassifiziert sein, wird eine Minimalhöhe errechnet. Minimalhöhen werden dann gerechnet, wenn Schatten auf gegenüberliegende Hauswände fallen und dadurch die komplette Schattenlänge aus dem Bild, und damit aus der Klassifizierung nicht ableitbar ist. Ist der Folgepixel allerdings eine andere thematische Klasse als ‚Haus‘ so wird angenommen, dass die Komplettlänge des Schattens detektiert wird und damit die wahre Gebäudehöhe ermittelt werden kann. Der bisherige Algorithmus basiert allerdings auf der Annahme, dass Haus und Bodenfläche exakt senkrecht zueinander stehen. Die Neigung der Bodenfläche allerdings beeinflusst die Schattenlänge. Während eine abfallende Fläche den Schatten verlängert, verkürzt er sich bei einer ansteigenden Fläche.

Aus diesem Grund wurde ein DGM (Digitales Geländemodell) implementiert, um die Boden­neigung für die Bestimmung der Schattenlänge mit einzurechnen. Das DGM entstammt der SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) aus dem Jahre 2000 (vgl. 2.2.1.). Das DGM ist auf eine geometrische Auflösung von 1 Meter interpoliert, um es auf die 1 Meter Auflösung der IKONOS Daten anzupassen. Dabei kann eine Verkürzung der Schattenlänge (s) im Falle einer Bodensteigung und eine Verlängerung des Schattens im Falle eines Gefälles ( $\pi$  = Neigung der Bodenoberfläche) detektiert werden. Die folgende Gleichung zeigt die Einbeziehung der Boden­neigung für die Berechnung der Gebäudehöhe (h).

$$(5-13) \quad h = \tan(\alpha \pm \pi) * s$$

### 5.1.2. Algorithmus zur automatisierten Berechnung von Gebäudehöhen in hoch verdichtetem urbanem Gebiet

Basierend auf diesen mathematischen Grundlagen weist der implementierte Algorithmus jedem Hauspixel bei richtungsabhängiger Nachbarschaft zu Schatten eine Gebäudehöhe bzw. eine Mindesthöhe zu. Abbildung 5-9 zeigt ein IKONOS Bild eines Hauses mit seinem zugehörigen Schatten. Dabei fällt auf, dass der Schatten inkonstante Längen aufweist (Abb. 5-9a). Dementsprechend weist auch die klassifizierte Schattenfläche aus der Landbedeckungsklassifikation diese Varianz auf (Abb. 5-9b). Daraus ergeben sich für das Beispiels­haus in der Abbildung viele verschiedene unterschiedliche Höhenwerte, die aus der Schattenlänge in Scanrichtung (angedeutet durch die Pfeile) errechnet wurden. In Abbildung 5-9c wird eine Extrapolation der Höhenwerte auf die restlichen Hauspixel mittels eines Medianfilters gezeigt. Das Beispiel in Abbildung 5-9 zeigt 28 Pixel, denen der Algorithmus verschiedene Höhenwerte zuweist.

Im Folgenden wird ein statistisches Mittelungs- und Extrapolationsverfahren vorgestellt, das nicht nur eine einheitliche Gebäudehöhe berechnet, sondern Höhenwerte auf Häuser extrapoliert, wo entweder keine Höhenwerte abgeleitet sind oder nur Mindesthöhen berechnet werden. Der Ansatz zur Mittelung und Extrapolation der Werte für Gebäudehöhen beinhaltet zwei Bedingungen: Die erste Bedingung beinhaltet, dass für eine Mittelung der Gebäudehöhen innerhalb einer Umgebung von 50 Meter des betroffenen Hauspixels eine Population von mindestens zehn Höhenwerten gemessen sein muss. Die zweite Bedingung ist eine Abschätzung der Homogenität der einbezogenen Höhenwerte. Unter der Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung der Höhenwerte, sollten mehr als 68 % aller Werte innerhalb der Standardabweichung um das arithmetische Mittel liegen. Mit der Erfüllung dieses Homogenitätskriteriums wird angenommen, dass die geringe Variation der gemessen Ge-



bäudehöhen innerhalb dieses bestimmten urbanen Gebiets auch der Realität entspricht. Nach Erfüllung beider Kriterien wird durch eine Medianberechnung der Höhenwert für die Häuser innerhalb dieses Gebiets ermittelt. Der Grund für die Verwendung des Medians liegt in der Tatsache begründet, dass damit Ausreißer, sei es durch Fehlklassifikation von Schattenpixel oder durch inkonstante Schattenwürfe, eliminiert werden, während beim arithmetischen Mittel Ausreißer nach wie vor Einfluss haben.

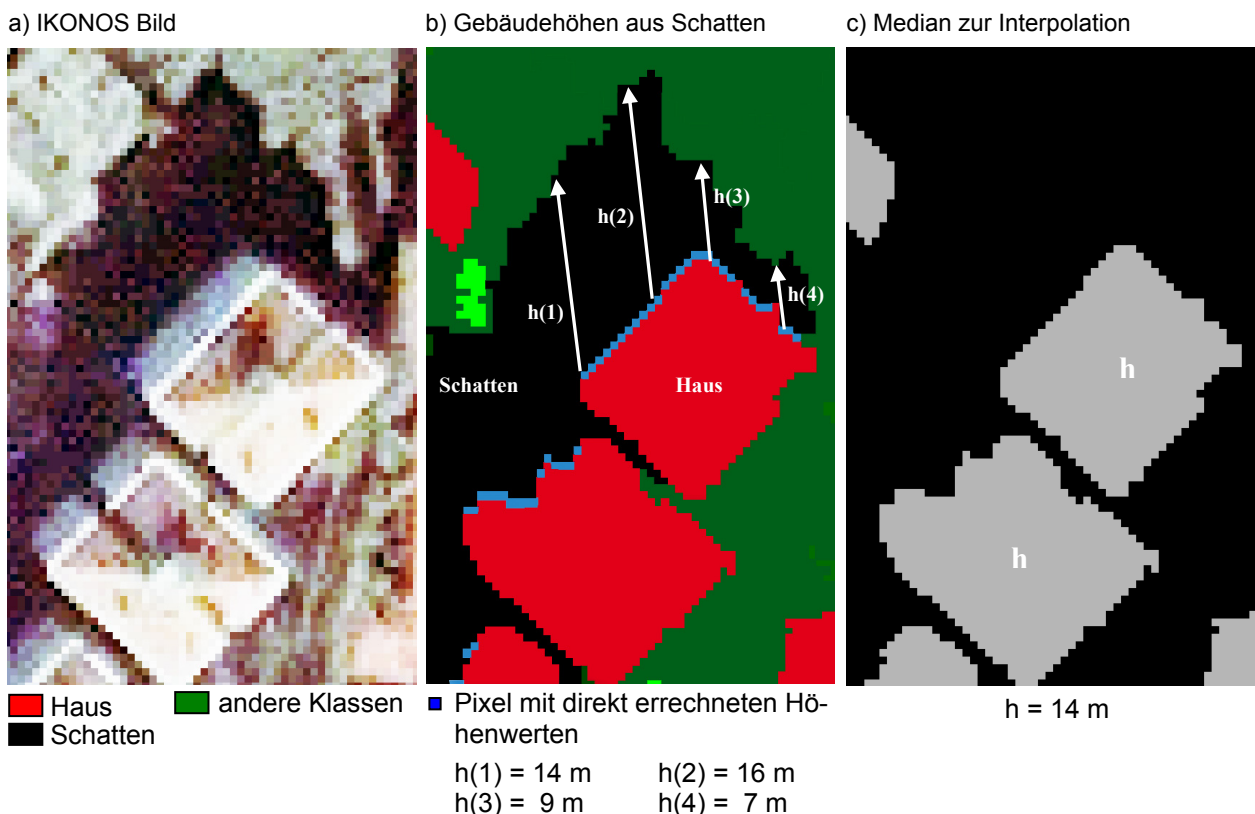


Abb. 5-9: Interpolationsansatz zur direkten Ableitung von Gebäudehöhenklassen

Am Beispiel von Abbildung 5-9 wird nun exemplarisch die Gebäudehöhe für das abgebildete Haus errechnet. Der Algorithmus errechnet für das Haus 28 Höhenwerte, die in Abbildung 5-10 aufgelistet und als Histogramm dargestellt sind. Unter der Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung, die durch einen Gauß'schen Curve Fit angepasst wurde, ergeben sich eine Standardabweichung von 4,02 und ein arithmetischer Mittelwert von 12,21. Innerhalb der Standardabweichung liegen also 75 % aller Höhenwerte, was besagt, dass die statistische Distribution von Höhenwerten mit der zweiten Bedingung konform ist. Das Resultat der Medianberechnung liefert eine Gebäudehöhe von 14 Metern. Dieser Wert wird nun auf alle Hauspixel in der Umgebung extrapoliert. Im konkreten Fall der Abbildung 5-10 konnte die errechnete Höhe mittels einer Begehung direkt geschätzt werden. Das vierstöckige Haus mit Giebeldach hat eine Höhe von ca. 13 Metern und entspricht damit der Dimension des errechneten und interpolierten Ergebnisses.

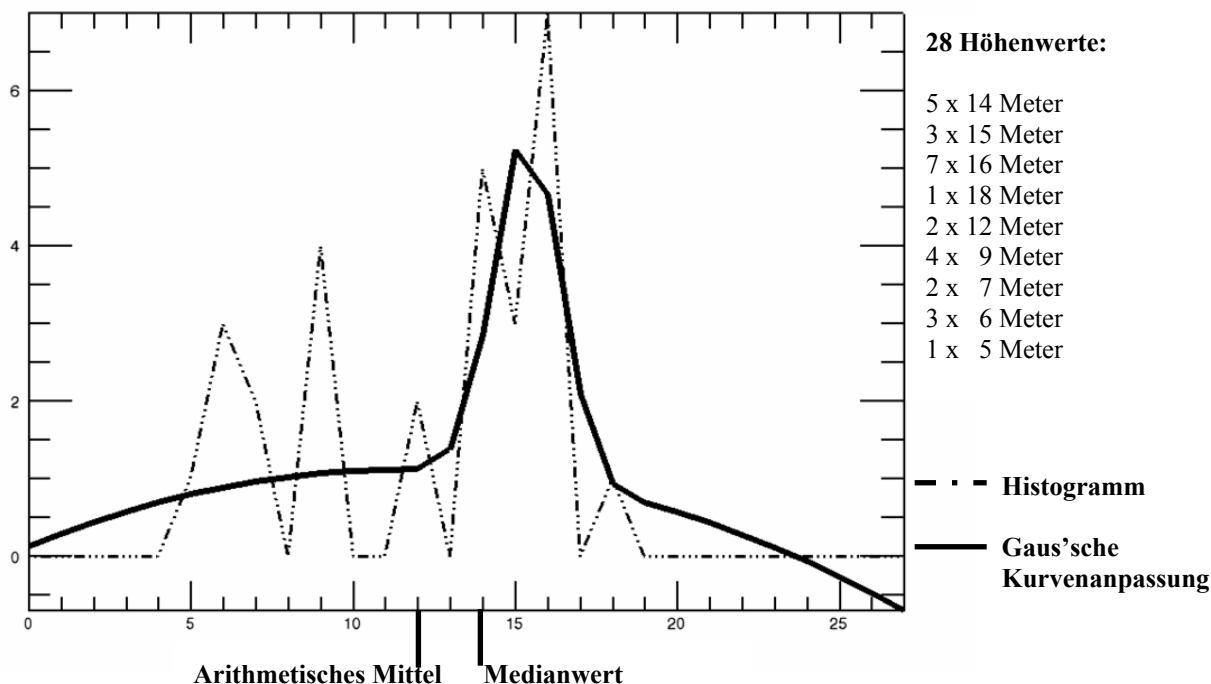


Abb. 5-10: Statistische Errechnung der Gebäudehöhe

Der Algorithmus zur Extrapolation aller direkt errechneten Gebäudehöhenwerte basiert auf einem künstlichen Schachbrettmuster. Aus der Erfahrung der Geländearbeit sowie unter der Annahme, dass sich die Gebäudehöhen innerhalb eines Viertels in Istanbul überwiegend entsprechen, wurde der Scanalgorithmus mit einem 100 Meter Raster angelegt. Sollte bei der Abtastung eines 100 Meter Areals der Variationskoeffizient, d. h. die Homogenität der Höhenwerte unter 68 % liegen, so wird für dieses Areal eine Mittelung und Extrapolation nicht umgesetzt. Der Abtastalgorithmus wird, auf Grund der lokalen Variation der Werte, in ein kleineres Gitter zu 50 Meter Seitenlänge aufgesplittet. Falls in den vier entstehenden Teilflächen die Anzahl an Höhenwerten noch ausreichend ist, und durch die höhere Lokalität der gemessenen Höhenwerte die Homogenität steigt, so wird nun diesen Arealen der jeweilige Höhenwert zugewiesen. Sollten auch hier nicht beide Bedingungen erfüllt sein, so bekommen die Häuser dieses Bereichs die Information ‚keine Höhenwerte vorhanden‘ zugewiesen. Die Eliminierung dieser Höhenwerte erfolgt also bei ungenügender Anzahl oder in Gebieten, wo durch eventuelle Fehlklassifikation der Klassen ‚Schatten‘ oder ‚Haus‘ in der lokalen Nachbarschaft hohe Wertdifferenzen auftreten. Diese Werte besitzen deshalb eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit und werden daher im ersten Schritt nicht klassifiziert.

Schwierigkeiten bei der Berechnung von Gebäudehöhen aus korrespondierenden Schattenlängen entstehen dort, wo die hohe Gebäudedichte die Detektion von nur wenigen kompletten Schattenlängen von Häusern ermöglicht. Abbildung 5-11 zeigt ein Klassifikationsergebnis von Gebäuden und den wenigen direkt ermittelten Gebäudehöhen eines hoch verdichteten urbanen Areals. Abgebildet ist auch das 100 Meter Raster zur Extrapolation der Höheninformation auf die anderen Hauspixel.

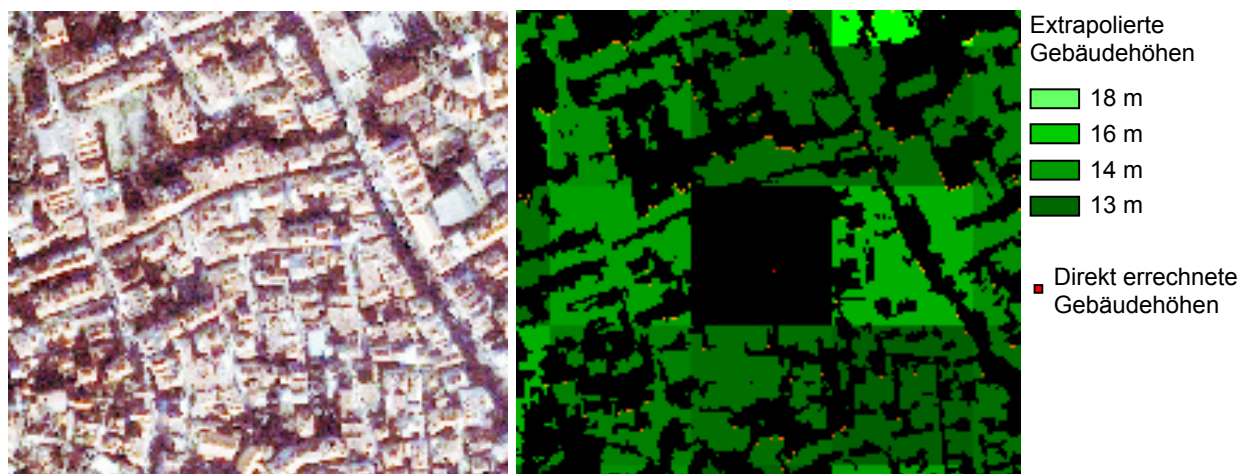


Abb. 5-11: Statistische Extrapolation von direkt errechneten Gebäudehöhen

Das oben beschriebene statistische Extrapolationsverfahren liefert Ergebnisse zwischen 13 und 18 Metern, also 4-5 stöckige Häuser, welche typisch sind für hoch verdichtete Zonen in Istanbul. In Abbildung 5-11 zeigt sich ein quadratisches Muster, das die einbezogene Nachbarschaft errechneter Gebäudehöhenpixel widerspiegelt. Ein Quadrant bleibt dabei unklassifiziert. Der Grund dafür liegt in einer zu geringen Anzahl an direkt errechneten Gebäudehöhen und damit eines Verfehlens der ersten Bedingung. Um eine flächendeckende Zuweisung von Höhenwerten zu gewährleisten, aber gleichzeitig die Fehlerwahrscheinlichkeit nicht zu erhöhen, werden für die Klassifikation der fehlenden Gebäudehöhen andere Parameter verwendet. Für die Zuordnung werden die errechneten Mindesthöhen als Ausgangsbasis verwendet. Entscheidender aber sind Nachbarschaftsinformationen, über die Gebäudehöhen der angrenzenden Raster, sowie die aus dem vorherigen Kapitel zur Verfügung stehenden homogenen Dichtezonen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass homogene urbane Gebiete basierend auf physischen Parametern wie Gebäudedichte oder Lage, sich mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls in ihrer Gebäudehöhe entsprechen. Diese Annahme basiert auf Beobachtungen aus der Geländebegehung. Entspricht also die Kachel derselben Dichtezone wie die angrenzenden Kacheln, so wird ein Mittelwert der umgebenden Höhen berechnet und für die fehlenden Häuser interpoliert, sofern die Mittelwerte nicht niedriger als die Mindesthöhen sind. Natürlich entspricht das künstliche Schachbrettmuster nicht realen Höhenübergängen, sondern einer Abschätzung der durchschnittlichen Gebäudehöhe in diesem Gebiet.

Abbildung 5-12 zeigt die drei abgeleiteten Höhenklassen im Stadtteil Zeytinburnu. Zudem zeigen drei repräsentative Gebiete, Bilder aus der Geländearbeit, die die verschiedenen klassifizierten Gebäudehöhen dokumentieren. Bild (1) zeigt ein 1,5 stöckiges Gewerbegebiet, (2) ein Hochhaus mit 13 Stockwerken und (3) ein typisches Wohngebiet mit 5 Stockwerken. Das Resultat der Übertragung der Methode auf den Stadtteil Üsküdar findet sich im Anhang D (vgl. Abb. D-3).

### 5.2.3. Genauigkeitsanalyse, Fehlerquellen und Limitierungen

Eine Genauigkeitsanalyse stützt sich auf die Datenerhebung aus der Geländearbeit. Dabei wurde die Gebäudehöhe durch eine Stockwerkszählung an 50 Häusern in Zeytinburnu durchgeführt. 94,1 % der Häuser wurden durch diese Methode der richtigen Gebäudehöhen-

klasse zugeordnet. Die Genauigkeit des Klassifikationsergebnisses wurde auch in Üsküdar mittels Geländebegehung überprüft. Dabei wurde die Gebäudehöhe durch eine Stockwerkszählung an 74 Häusern durchgeführt. 92,1 % der Häuser wurden durch diese Methode der richtigen Gebäudehöhenklassen zugeordnet.

Grundlegende Auflage für diesen Ansatz ist ein Sonnenstand, der im Verhältnis zur geometrischen Bodenaufösung des Bildes weit genug vom Zenitwinkel abweicht, um Schattenflächen zu produzieren, die mehr als nur 1-3 Pixel betragen. Das heißt, dass die Fehleranfälligkeit bei hohen Sonnenständen mit kurzen Schattenflächen steigt. So würde bei einem Sonnenstand von  $45^\circ$  und einer realen Gebäudehöhe von 10 Metern, die Fehlklassifikation eines zusätzlichen Schattenpixels eine Gebäudehöhe von 11 Metern ergeben. Der Einfluss einer Sonnenhöhe von  $70^\circ$  auf diese Fehlklassifikation spiegelt sich dagegen in einer Gebäudehöhe von 13,74 Metern negativ wider.

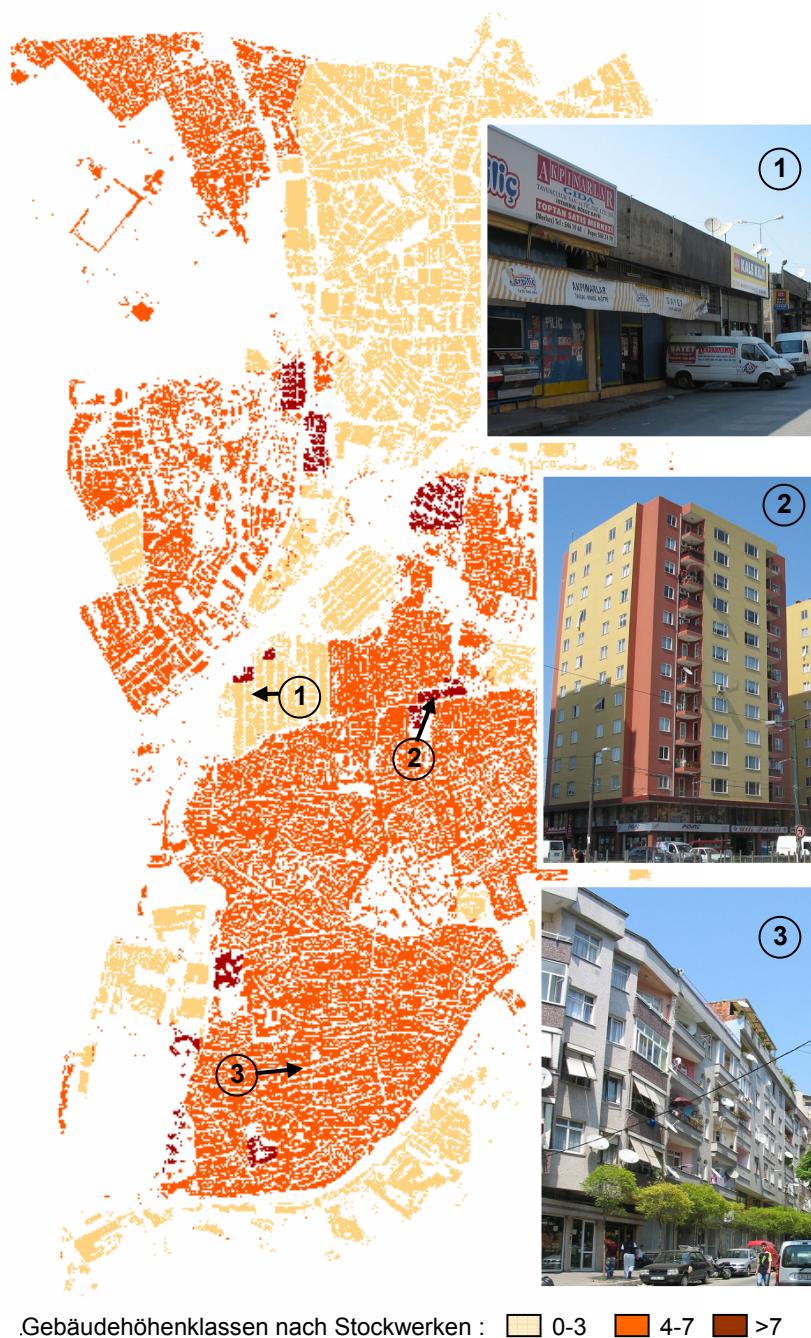


Abbildung 5-12: Gebäudehöhenklassen aus Schattenlänge

Der Ansatz basiert auf einer Reihe von potentiellen Fehlerquellen bei der Berechnung. Die Eingangsinformation ist die thematische Klassifizierung des Satellitenbildes. Ungenauigkeiten oder Fehlklassifikationen, die für diesen Ansatz relevanten Klassen transferieren diese Fehler in den Algorithmus zur Gebäudehöhenberechnung. Dies wirkt sich entweder durch falsche Höhenwerte aus oder durch die Detektion von Gebäudehöhen an Stellen, wo eigentlich kein Haus steht. Ein weiterer Eingangsparameter ist das DGM. Die Interpolation des 25

Meter Rasters auf die 1 Meter Auflösung des IKONOS Bildes birgt große Unsicherheiten in sich. Die Interpolation verschleiert lokale Unebenheiten des Geländes, was den wahren Winkel zwischen Gebäude und Bodenoberfläche verfälschen kann. Außerdem sind in hoch verdichteten urbanen Gebieten Schattenlängen im Regelfall nicht voll einsehbar und durch andere Objekte unterbrochen. Dadurch können in diesen Gebieten oft nur Mindesthöhen errechnet werden.

Das Mittelungsverfahren beinhaltet durch die Einbeziehung von Nachbarschaftshöhen, Mindesthöhen und homogenen Dichtezonen eine höhere Unsicherheit als die direkte Ableitung der Höhen bei frei stehenden Objekten. Weiterhin nimmt der Ansatz an, dass in Gebieten mit gleicher Lage und equivalenter Dichtezone sich auch die Gebäudehöhen entsprechen. In Gebieten mit sehr heterogenen Gebäudehöhen wird dies allerdings zu vielen Fehlklassifikationen führen.

Auf Grund dieser Vielzahl an Eingangsparametern, die eine Fehlervererbung beinhalten können, wird es als sinnvoll angesehen, keine absoluten Gebäudehöhen zu errechnen, sondern Höhenklassen einzuführen. In Abstimmung mit dem Bauingenieurwesen werden die Detailhöhen, zu Gunsten höherer Genauigkeit, zu drei Höhenklassen zusammengefasst. Diese Höhenklassen entsprechen Differenzierungsmöglichkeiten für das Bauingenieurwesen (vgl. 6.2.) zur Charakterisierung von relevanten Haustypen für eine Stabilitätsabschätzung.

### 5.3. Analyse von Dach- bzw. Haustypen

Die heterogene, sich kleinräumig verändernde urbane Morphologie lässt sich mit Methoden der Fernerkundung nicht nur nach Gebäudedichten oder Gebäudehöhen in homogene Zonen unterteilen, sondern auch nach Dach- bzw. Haustypen. Die Unterscheidung von Dachtypen basiert dabei auf dem Konstruktionstyp, also Flach- oder Giebeldach. Diese Information in Kombination mit einem Haustyp, charakterisiert durch Form und Größe der Häuser, ermöglicht eine weitere Zonierung, aber auch Rückschlüsse auf die Nutzung von Gebäuden oder sogar deren Vulnerabilität.

Der Parameter ‚Dachtyp‘ wird basierend auf der Gebäudemasken aus der Landbedeckungsklassifikation mittels einer spektralen Differenzanalyse abgeleitet. Die Methode basiert dabei auf einem Ansatz, der sich spektrale Eigenschaften zweier Segmentierungsebenen zu Nutze macht. Dabei wird die Gebäudemasken aus der Landbedeckungsklassifikation mit zwei unterschiedlichen Skalierungsparametern segmentiert, um zum einen die klassifizierten Dächer nach ihrer spektralen Heterogenität in ihre Bestandteile zu unterteilen und zum anderen die Komplettdächer zu erfassen. Die Idee beruht darauf, die Subsegmente eines kompletten Daches auf spektrale Homogenität zu untersuchen. Dazu wird in erster Linie die Helligkeit als Parameter genutzt, um eventuell vorhandene Schattenseiten von sonnenzugewandten Dachseiten spektral zu unterscheiden. Der Basislevel (Abb. 5-13a) zeigt die in der Landbedeckungsklassifikation als Haus erkannten Flächen, die nach spektralen Differenzen untersegmentiert sind. Abbildung 5-13b zeigt den Level mit höherem Skalierungsparameter. Die Klassifikation beruht nun auf einem spektralen Differenzvergleich zwischen Subobjekt und Superobjekt basierend auf Helligkeit. Wenn die levelbasierte Ratio nicht dem Homogenitätskriterium entspricht, werden im Basislevel verschiedene Dachhelligkeiten klassifiziert. Die Klassifikation unterschiedlicher Helligkeitstypen mündet dann in der Klassifikation eines Giebeldaches, bei homogenen Helligkeitswerten wird ein Flachdach klassifiziert (Abb. 5-13c).

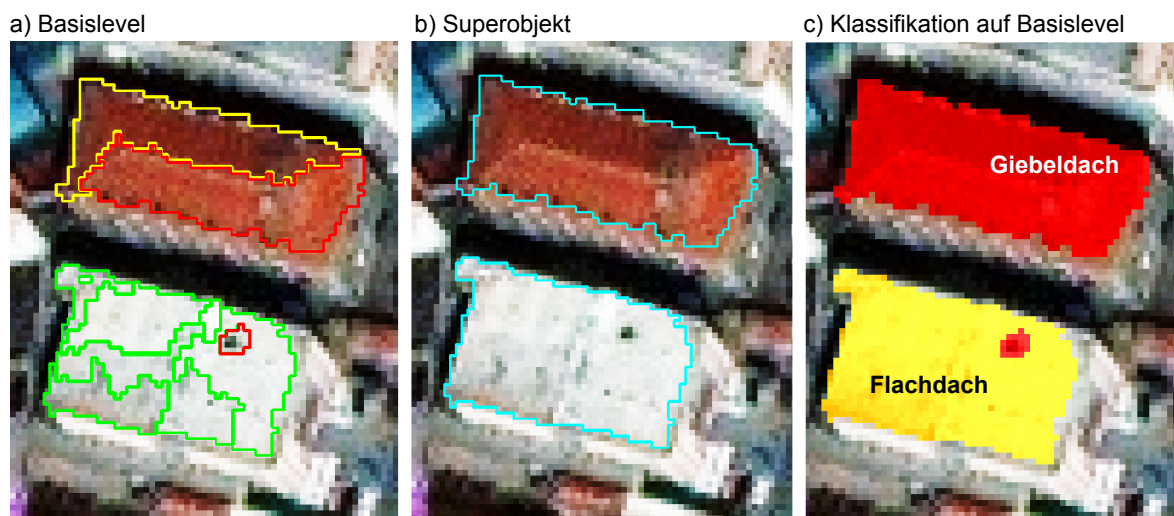


Abb. 5-13: Levelbasierter Ansatz zur Klassifikation von Dachtypen

Die Genauigkeit des Klassifikationsresultates ist mittels der Daten aus der Geländebegehung abgeschätzt. 50 Referenzhäuser im Stadtteil Zeytinburnu ergeben im Abgleich eine Genauigkeit der Klassifikation von 92,8 %. Die Klassifikationsresultate der Dachtypen für die Stadtteile Zeytinburnu und Üsküdar finden sich im Anhang D (vgl. Abb. D-4 und D-5). Im Falle unseres Beispiels Istanbul treten überwiegend Ziegeldächer und Betondächer auf, während im Beispiel Hyderabad fast ausschließlich Betondächer auftreten, was eine weitere Dachtypisierung nach Farbe erübrigt. In anderen urbanen Räumen, wie beispielsweise Padang, weisen Dächer auf Grund vielfältigerer Materialien ebenso vielfältige Dachfarben auf. Diese Information in Kombination mit der Gebäudegröße ermöglicht die Ableitung von Gebäudetypen.

Auch dafür ist die Landbedeckungsklassifikation in Form der Gebäudemasken die Datengrundlage. Es erfolgt analog zu der Dachtypenklassifizierung eine Neusegmentierung der klassifizierten Gebäude, um diese Segmente rein spektral nach ihrer Dachfarbe in Klassen einzuteilen. Mittels der rein spektralen Information lassen sich in Padang sechs unterschiedliche Dachfarben einteilen (Abb. 5-14b).

Diese Unterteilung der Gebäudemasken dient nun dazu, die Dimensionen der Häuser als weiteren Parameter zu nutzen. Methodisch wird zu dieser Abschätzung wieder eine mehrstufige Segmentierung herangezogen, da die Segmente der Basissegmentierung die spektralen Details von Dächern erfassen und nicht ganze Dachflächen. Mit dem Abgleich der Segmentgrößen über mehrere Level hinweg erhält man die Information über die Dimension der Superobjekte. Unter der Annahme, dass sich kleine Häuser über verschiedene Segmentierungsebenen von großen Häusern in ihrer Segmententwicklung differenzieren, ermöglicht dieser levelübergreifende Ansatz die Ableitung von Gebäudegrößenklassen. Die Umgebungsstruktur kleiner Häuser charakterisiert sich durch vom Dach spektral heterogene Nachbarobjekte. Dadurch bleiben auch bei höheren Segmentierungsebenen die Segmente kleiner, während bei größeren Gebäuden die Segmente durch relative Homogenität großer Dachflächen anwachsen. Der levelübergreifende Abgleich klassifiziert mit dieser Methode drei Gebäudegrößenklassen (KASS, 2007).

Abbildung 5-14c zeigt die Differenzierung von Gebäudegrößenklassen nach kleinen Gebäuden mit einer Größe von weniger als 40 m<sup>2</sup>, mittlere Größe von 40 m<sup>2</sup> bis 150m<sup>2</sup> und gro-

ßen Gebäuden mit mehr als 150m<sup>2</sup>. Die Genauigkeitsabschätzung beruht auf 100 Zufalls-  
punkten jeder Klasse und einer visuellen Überprüfung. Die Genauigkeit durch eine visuelle  
Überprüfung aus den IKONOS Daten beträgt dabei 89,92 % für die Dachfarbenklassifikation  
und 78,09 % bei der Bestimmung der Gebäudegrößen.

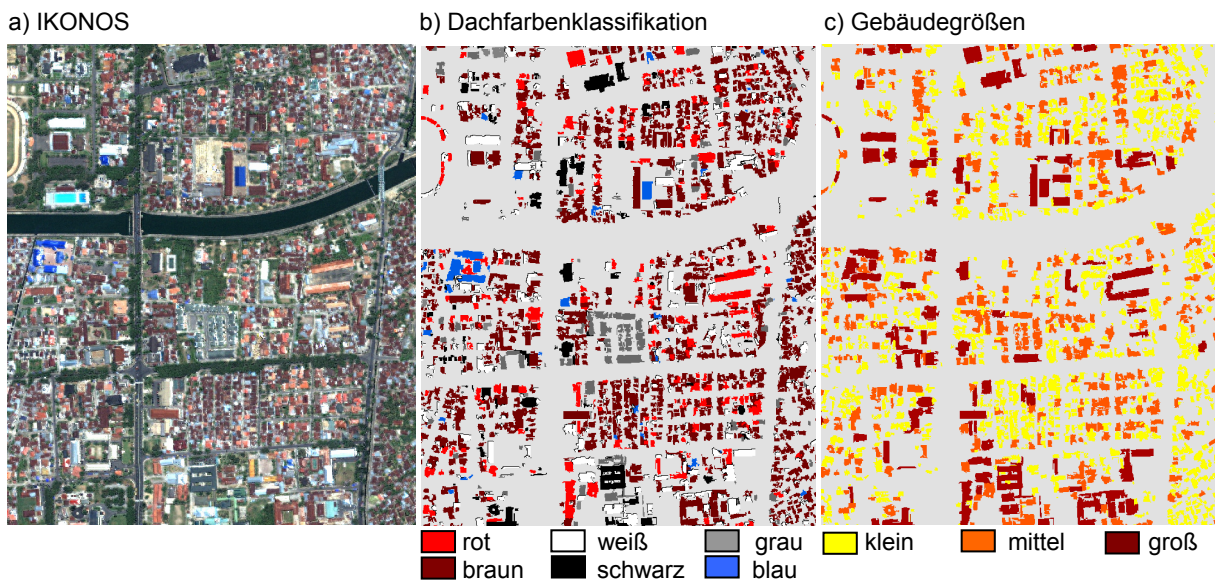


Abb. 5-14: Typisierung von Gebäuden nach Dachfarbe und Gebäudegröße

## 5.4. Ableitung von Landnutzungsklassen

„The fundamental problem for remote sensing is that while there is often a relatively simple, direct relationship between land cover type and detected spectral reflectance, the same is seldom true for land use: land use is an abstract concept, an amalgam of cultural and economic factors, most of which cannot be determined directly by means of remote sensing” (BARNESLEY & BARR, 1997).

Urbane Morphologie weist einen statistischen Zusammenhang mit seiner Funktion auf (BARR ET AL. 2004). Unter dieser Prämisse kann eine Abschätzung der Landnutzung aus Fernerkundungsdaten indirekt, über direkt abgeleitete physische Parameter, wie die Landbedeckung (vgl. 4.1.3.), die Gebäudedichte (vgl. 5.1.), die Gebäudehöhe (vgl. 5.2.) oder die Dach- bzw. Haustypen (vgl. 5.3.), sowie deren charakteristische morphologische Muster erfolgen.

Eine indirekte Schlussfolgerung auf die Landnutzung jedes Gebäudes der Gebäudemasse beruht daher auf einer Einschätzung der Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Parameter für einen Landnutzungstyp. Im konkreten Fall Istanbul sind das Flachdach und größere Gebäudegrundflächen die zentralen Bedingungen für die Ableitung eines Gewerbegebietes. Ergänzende Funktion beinhalten eine niedrige Gebäudehöhe, und die homogene Textur (vgl. 2.2.1.) des Gebietes. Diese wird zur Analyse der urbanmorphologischen Struktur herangezogen. Ein künstlich erzeugtes Schachbrettmuster errechnet die Homogenität eines 100 m<sup>2</sup> Rasters. Dabei spiegelt sich für Gewerbegebiete die Annahme wider, dass größere Grundflächen und geringere Gebäudedichten, eine höhere lokale Homogenität der Grauwerte aufweisen. Für die Klassifikation der Landnutzungsklasse ‚Wohngebiet‘ spielen die Parameter Giebedach, geringere Gebäudegrößen sowie typische rötliche Farben der Ziegeldächer die

entscheidende Rolle. Die Klassifikation ergibt sich daher über eine Abfrage und wahrscheinlichkeitbasierte Kombination der physischen Parameter des jeweiligen Hauses. Das methodische Prinzip zur Kombination der Parameter entspricht dem fuzzy logic Ansatz aus Abbildung 4-6 (vgl. 4.1.2.). Abbildung 5-15 zeigt das Resultat der Landnutzungsklassifikation. Darin werden zwei Landnutzungstypen - Wohngebiet und Gewerbegebiet - dargestellt und exemplarisch aus der Geländebegehung visuell dokumentiert. Die 50 Referenzhäuser liefern bei der Genauigkeitsabschätzung 91,5 % richtig klassifizierte Nutzungstypen. Als weitere Referenz steht das Klassifikationsresultat aus dem MURBANDY-Projekt (vgl. 2.2.1.) zur Verfügung. Das Klassifikationsresultat basierend auf den oben definierten Gebäudeparametern zeigt eine 87,3 prozentige Übereinstimmung mit dem visuell klassifizierten Ergebnis der Landnutzung aus der MURBANDY Studie.



Abb. 5-15: Landnutzungsklassifikation

Als Einschränkung zeigt sich allerdings die in Istanbul typische Nutzung der Wohnhäuser. Die überwiegend fünfstöckigen Häuser haben im Erdgeschoss meist kommerziell genutzte Ladenflächen, wobei die übrigen vier Stockwerke Wohnflächen darstellen. Diese Nutzungsmischung lässt sich für Wohngebiete durch die Natur der Fernerkundungsdaten nicht ableiten, sondern nur abschätzen. Zudem zeigt sich ein kulturraumspezifischer Einfluss auf diese indirekte Ableitung. Die für Istanbul geeigneten Parameter, um Landnutzung mit hoher Wahrscheinlichkeit abzuleiten, sind in Hyderabad, auf Grund homogenerer physischer Strukturen, nicht mehr umsetzbar.

### 5.5. Die geographische Lage als räumlicher Standortfaktor

Der konzeptionelle Rahmen bezüglich Risiko, Gefahr und Vulnerabilität in Tabelle 3-1 (vgl. 3.3.) weist explizit auf die geographische Lage als Teilkomponente physischer Vulnerabilität hin. Dabei kommen Indikatoren wie Zugänglichkeiten, Oberflächenbeschaffenheiten oder Distanzen als sehr lokal verteilte urbane Standortfaktoren zum Tragen.



Die Zugänglichkeit eines Ortes hat zentralen Einfluss auf das Potential im Katastrophenfall für Hilfsmaßnahmen erreichbar zu sein. Erreichbarkeit, definiert sich nach DALVI (1978), als das Potential einen bestimmten Ort von einem anderen Ort aus mit einem bestimmten Verkehrsmittel zu erreichen. Das Potential wird dabei in Zeit und/oder Kosten ausgedrückt. Die Verkehrsinfrastruktur aus der Landbedeckungsklassifikation dient zur Abschätzung der Zugänglichkeit als Ausgangsbasis. Dafür werden die klassifizierten Straßen extrahiert und nach mittlerer Breite in verschiedene Kategorien klassifiziert. Die größte Breite weisen dabei innerstädtische Verbindungsachsen auf, die auf direktem Wege Stadtteile miteinander verbinden und damit die höchste Tragfähigkeit aufweisen. Verbindungsachsen innerhalb eines Distrikts sind die nächste Kategorie, und schließlich kleine Straßen innerhalb des Distrikts. Durch diese Einteilung ermittelt man zum einen eine Aussage über die Tragfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur, zum anderen ermöglicht eine Distanzanalyse zu diesen Straßenkategorien, den Raum nach Zugänglichkeit zu unterteilen. Ausgehend vom Straßensegment wird für jeden Punkt der Umrandungslinie die Senkrechte zur Tangente jenes Punktes als Distanzfunktion gerechnet. Abbildung 5-16a zeigt eine Distanzfunktion zu den Hauptverkehrsadern, im konkreten Fall sind die innerstädtische Verbindungsachse abgebildet sowie eine Distanzfunktion zum Bosphorus als Wasserweg. Die Genauigkeit dieser Distanzanalysen ist abhängig von der Güte der klassifizierten Straßen aus der Landbedeckungsklassifikation. Wie in Abschnitt 4.1.3. aufgelistet, weisen die klassifizierten Straßen eine Genauigkeit von knapp 80 % auf. Dabei sind auf Grund ihrer Dimension innerstädtische Verbindungsachsen und die großen Distriktstraßen zum großen Teil klassifiziert, dagegen sind kleine Straßen in hoch verdichteten Gebieten durch Schatten verdeckt, damit nicht einsehbar und unklassifiziert. Dadurch ist keine Klassifikation des Gesamtstraßennetzes erreichbar.

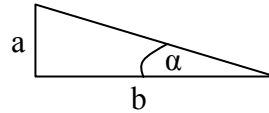
Im Gegensatz zu den lokalen Standortfaktoren stellt auch die Lage eines Distrikts im Verhältnis zum gesamturbanen Raum einen wichtigen deskriptiven Parameter dar. Wie in den Abbildungen 2-3 und 2-11 gezeigt, ist Üsküdar ein zentraler Distrikt, während Zeytinburnu mit ca. 5 km Entfernung zum historischen Zentrum einen peripheren, innerstädtischen Distrikt einer späteren Entwicklung darstellt. Somit kann man mittels Distanzfunktionen zum Stadtrand sowie zur Wasserfläche seine Zugänglichkeit einschätzen.

Freiflächen innerhalb hoch verdichteter urbaner Landschaften sind im Katastrophenfall von enormer Bedeutung für die Bevölkerung, für das Risiko- bzw. Katastrophenmanagement, aber auch als natürliche Barrieren von Sekundärgefahren eines destruktiven Erdbebens, wie beispielsweise Flächenbrände (FLÜCHTER, 1997). Die Distanz zu Freiflächen spielt im Katastrophenfall für die Bevölkerung eine ebenso übergeordnete Rolle wie die Zugänglichkeit von Gebieten. Zum einen entspricht die zunehmende Distanz einer abnehmenden Chance für die Bevölkerung sich innerhalb von Sekunden oder Minuten in Sicherheit vor Gebäudeschäden zu bringen, zum anderen dienen Freiflächen je nach Beschaffenheit und Größe als Orte für Zeltstädte. Abbildung 5-16b zeigt die Art der Freiflächen aus der Landbedeckungsklassifikation, deren Lage und Größe sowie die Distanzen zu ihnen. Im Gegensatz zu der Zugänglichkeitsdistanzfunktion, die auf die Erreichbarkeit mittels motorisierten Verkehrs abzielt, sind hier geringere Distanzen als kritisch aufgeführt, da es sich im Regelfall um eine Flucht zu Fuß handelt.

Zur Beschreibung der geographischen Lage zählen neben Distanzen zu urbanmorphologischen Parametern auch das Gelände und seine Beschaffenheit. Um Aussagen über das Gelände treffen zu können, wird das DGM aus SRTM Daten verwendet (vgl. Abb. 2-12). Die Analyse des Geländes ermöglicht räumliche Abschätzungen so genannter Sekundärgefahr-

ren eines Erdbebens. Dazu zählen in Istanbul vor allem Hangrutschungen und Tsunamis (ALPAR ET AL, 2004; ALTINKOK ET AL., 2001). Neben der Basisinformation ‚Geländehöhe‘, ermöglicht eine Tangentialgleichung (5-14) die Berechnung der Hangneigung basierend auf den Höhenwerten benachbarter Pixel des DGM (Abb. 2-12).

$$(5-14) \quad \alpha = \arctan \frac{a}{b}$$



Die Hangneigung ist im Falle eines Erdbebens ein wichtiger geographischer Standortfaktor. Zum einen sind urbane Objekte in Hanglagen stärker gefährdet, zum anderen sind steile Hänge exponierte Orte für Hangrutschungen. Abbildung 5-16c zeigt exemplarisch für das sehr hügelige Gelände Üsküders vier verschiedene Hangneigungsklassen.

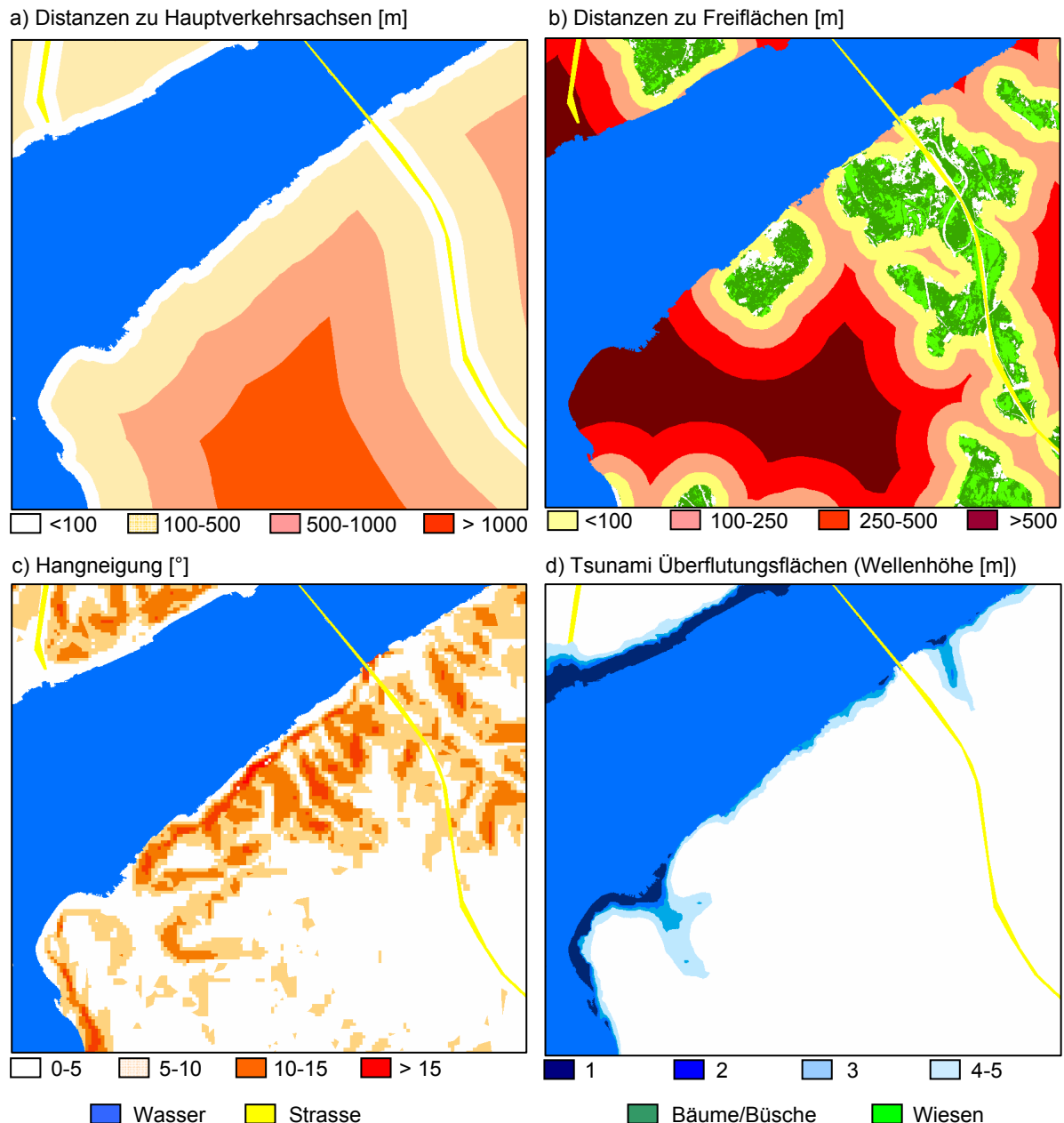


Abb. 5-16: Räumliche Indikatoren einer urbanen Landschaft

Da das DGM auf einer interferometrischen Auswertung basiert, zeigt es nicht Geländehöhen, sondern Oberflächenhöhen, d. h. Boden-, Gebäude- und/oder Bewuchshöhen. In Kombination mit einer geometrischen Auflösung von 1 x 1 Bogensekunde ist es daher nicht möglich, die lokalen Details der Hangneigung exakt abzubilden, sondern lediglich die Tendenzen.

Ebenfalls zum Einsatz kommt das DGM bei der Modellierung von potentiellen Überflutungsflächen durch die Sekundärgefahr eines Tsunamis. Die Verschneidung der klassifizierten Wasserfläche aus den IKONOS Daten mit dem DGM bildet die Grundlage einer höhenabhängigen Modellierung potentieller Überflutungsflächen. Unter der Bedingung einer Nachbarschaft zur klassifizierten Wasserfläche wird höhenabhängig die statische Auswirkung einer möglichen Flutwelle klassifiziert. Dadurch können zwar keine dynamischen Entwicklungen aus der Interaktion der Flutwelle mit den urbanen Objekten modelliert werden, allerdings lassen sich, in Abhängigkeit von der Flutwellenhöhe, die gefährdeten Flächen lokalisieren. Abbildung 5-16d zeigt dabei deutlich die gefährdeten Flächen verschiedener Wellenhöhen von 1–5 Meter.

Parameter zur Einschätzung der geographischen Lage urbaner Landschaften stellen kritische Infrastrukturen dar. Dazu zählen Bereiche wie Energieversorgung, Kommunikation, Verkehr oder Gesundheitswesen (ROBINSON ET AL., 1998). Die Lage und Anzahl der Krankenhäuser, Feuerwehrestationen, Polizeistationen oder anderen zentralen Einrichtungen zur Versorgung sowie Distanzen dazu sind wichtige Parameter zur Einschätzung von räumlicher Vulnerabilität, sowie eine zentrale Informationsbasis des Risikomanagements. Eine visuelle oder gar automatisierte Detektion dieser Infrastruktureinrichtungen scheitert in Istanbul allerdings an mangelnden Differenzen des Dach- oder Haustyps zu Gewerbe- und teils Wohngebieten. Hier stoßen höchst aufgelöste Fernerkundungsdaten an die Grenzen ihres Potentials.

Trotz dieser Limitierung ermöglicht die Fernerkundung mit der Ableitung der Hauptinfrastruktur und den Freiflächen Parameter zu Lage und Zugänglichkeit, mittels des DGM, Parameter zu Geländehöhe, Neigung und potentiellen Überflutungsflächen sowie eine Einordnung im gesamturbanen räumlichen Kontext. Das Potential der errechneten Lageparameter zeigt sich in einer Vulnerabilitätsanalyse der vielfältigen Informationsebenen (vgl. 6.1.3.).

## 5.6. Urbanisationsraten aus einer temporalen Änderungsdetektion

Die Klassifikation der Landsat Daten aus den Jahren 1975, 1987 und 2000 ermöglicht die temporale, flächenhafte urbane Entwicklung über einen langen Zeitraum hinweg zu analysieren. Diese Analysen ergänzen die geometrisch hoch genauen Resultate vorheriger Abschnitte, und geben einen raumzeitlichen Überblick über die Urbanisation. Das mittlere Alter der Bebauung gilt als Indikator zur Abschätzung der Belastbarkeit der Strukturen sowie der Infrastruktur (DAVIDSON, 1997; KAKHANDIKI, 1998). Veraltete Konstruktionstypen sowie täglicher Gebrauch lassen auf höhere Vulnerabilität schließen. Der direkt ableitbare Indikator ‚Versiegelungsgrad‘ lässt auf Quantität und räumliche Verteilung gefährdeter Strukturen (KUNDAK & TÜRKÖGLÜ, 2005) schließen. Absolute Zuwachsraten beschreiben die Quantität und Schnelligkeit von Migration, und erlauben Rückschlüsse auf ungeplante Besiedlung. Ungeplante Besiedlung impliziert geringe Gebäudequalität und das Fehlen notwendiger Infrastruktureinrichtungen. Aber auch die indirekt ableitbaren Indikatoren wie die demographische Entwicklung, ergänzen in grobmaßstäbigerem Rahmen die Analysen zur Abschätzung von Vulnerabilität.

MAS (1999) präsentiert sechs verschiedene Methoden zur Ableitung von Landbedeckungsänderungen – image differencing, vegetative index differencing, selective principal components analysis (SPCA), direct multi-date unsupervised classification, post-classification change differencing and a combination of image enhancement and post-classification comparison. “Post classification comparison was found to be the most accurate procedure and presented the advantage of indicating the nature of the changes (MAS, 1999; SINGH, 1989). Die voneinander unabhängigen Klassifikationsergebnisse der drei Zeiten stellen daher die Grundlage für die Durchführung der Änderungsdetektion. Dabei wird mittels einer räumlichen Überlagerung der Klassifikationsergebnisse der drei Zeitschritte die temporale Änderung abgefragt. Der Fokus liegt dabei auf der Detektion der Änderung von versiegelten Flächen. Die Genauigkeit der Änderungsdetektion ist dabei direkt abhängig von der Güte der Landbedeckungsklassifikationen (vgl. Tab. 4-4).

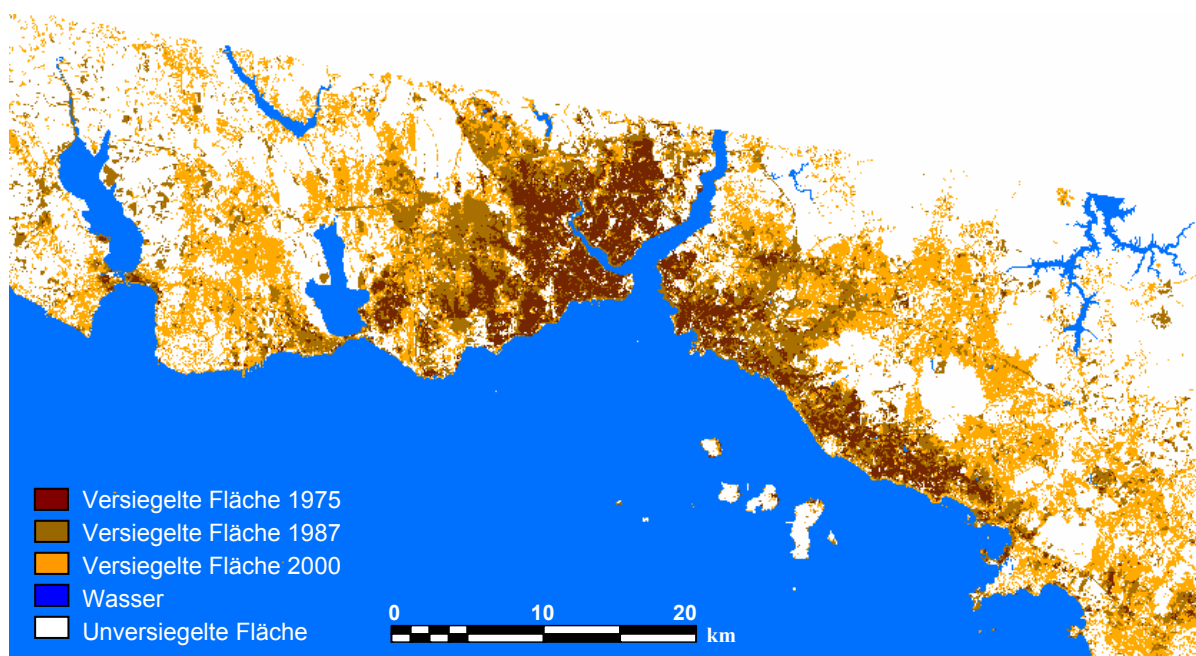


Abb. 5-17: Änderungsdetektion versiegelter Areale in Istanbul mit Landsat-Daten

Abbildung 5-17 zeigt eine annähernde Verfünffachung der versiegelten Fläche im Zeitraum 1975 bis 2000. Die Änderungsdetektion versiegelter Areale in Istanbul zeigt eine tendenzielle räumliche Verteilung des Alters bebauter Strukturen. Damit lassen sich Aussagen über Konstruktionstypen und Baumaterialien treffen, die als Parameter für eine interdisziplinäre Nutzung dieser Information von Interesse sind (vgl. 6.2.).

Die Quantität exponierter Strukturen im räumlichen Überblicksvergleich bietet der Parameter ‚Versiegelungsgrad‘ (Abb. 5-18). Im Vergleich der beiden im Fokus dieser Arbeit stehenden Stadtteile, weist Zeytinburnu einen wesentlich höheren Versiegelungsgrad auf. Dies lässt auf einen höheren Gefährdungsgrad auf Distriktebene schließen. Die Analyse des Versiegelungsgrades zentraler Distrikte weist eine charakteristisch abnehmende Kurve auf, was auf einen Sättigungsgrad der Bebauungsstrukturen hinweist (Abb. 5-18). Der gegenteilige Verlauf ist für periphere Distrikte typisch, d. h. eine zunehmende Verdichtung. Dies spiegelt sich auch in den prozentualen Zuwachsraten wider, die in peripheren Distrikten einen explosiven Charakter aufweisen, und damit ein Zeiger für ungeplante, unstrukturierte Expansion

der Stadtfläche sind. In zentralen Distrikten, wie auch Zeytinburnu, sind die Urbanisationsraten wesentlich geringer. Das verweist im Hinblick auf Vulnerabilität der Strukturen auf bereits durchgeführte restrukturierende Maßnahmen, d. h. beispielsweise Infrastruktureinrichtungen die den Gefährdungsgrad eines Distrikts herabsetzen. In peripheren Gebieten, aber auch in Üsküdar, ergeben sich explosivere Zuwachsraten, was als ein Indikator für höhere Vulnerabilität gewertet wird. Im Gegensatz dazu weisen die höheren Zuwachsraten in Üsküdar auf durchschnittlich neuere Baustrukturen als in Zeytinburnu hin, was als Eingangsparameter für die Gebäudevulnerabilität im Kapitel 6 eine tragende Rolle spielt.

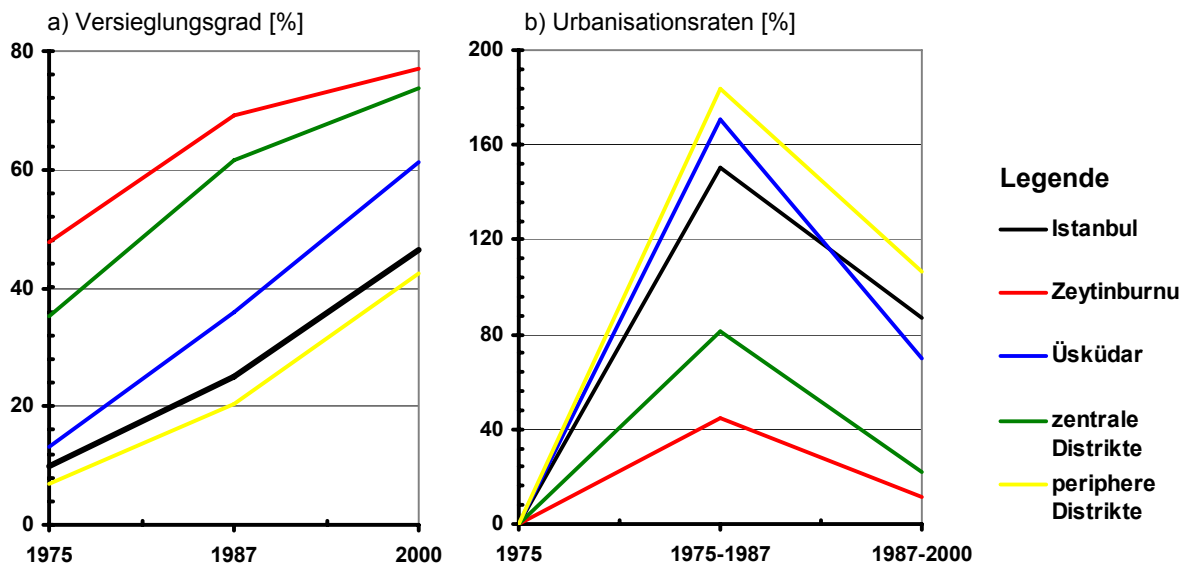


Abb. 5-18: Temporale Entwicklung von Versiegelungsgraden und Urbanisationsraten in Istanbul

Abbildung 5-19 und 5-20 zeigen die räumliche Verteilung absoluter Zuwachsraten innerhalb eines 250 x 250 Meter Rasters auf.

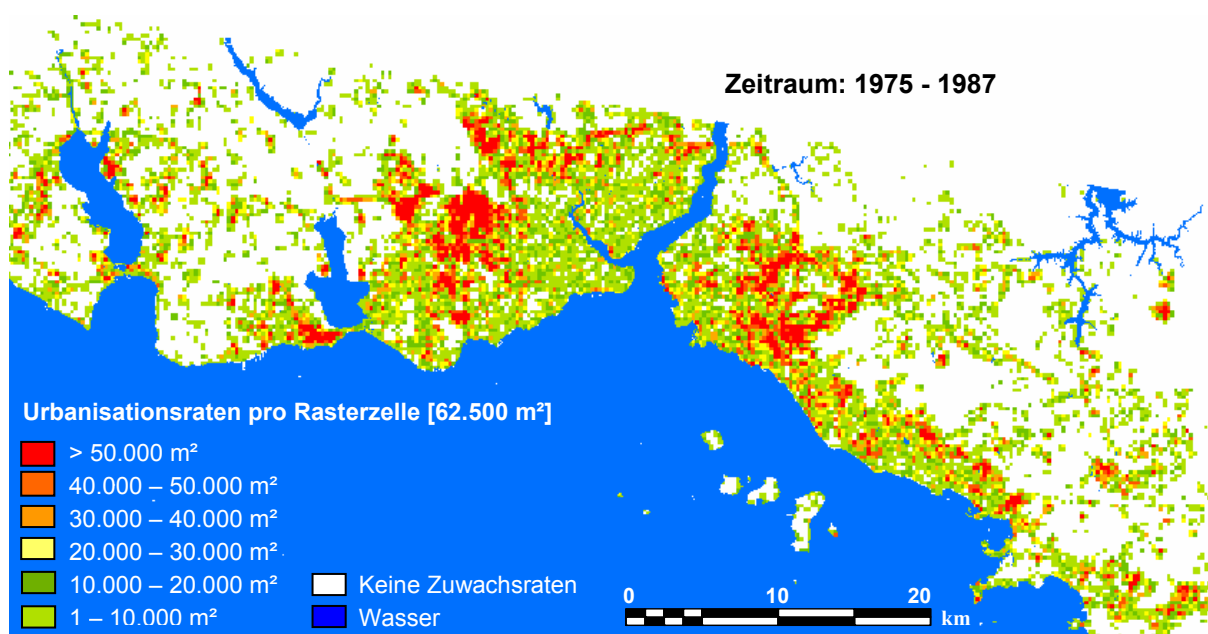


Abb. 5-19: Absolute Urbanisationsraten zwischen 1975 und 1987

Die oben beispielhaft aufgezeigte urbane Analyse nach administrativen Distrikten verschleiert auf Grund nicht repräsentativer, künstlicher Grenzen die exakte räumliche Verteilung von Wachstum. Deswegen wird ein Schachbrettraster mit 250 x 250 Metern über die Änderungsdetektion gelegt, um Zuwachs und Versiegelungsgrad auf eine repräsentative, und damit vergleichbare räumliche Einheit abzubilden. Dabei wird für jedes Quadrat die Versiegelung pro Einheit pro Jahr sowie der absolute und prozentuale Zuwachs an Versiegelungsfläche zwischen zwei Zeiträumen errechnet.

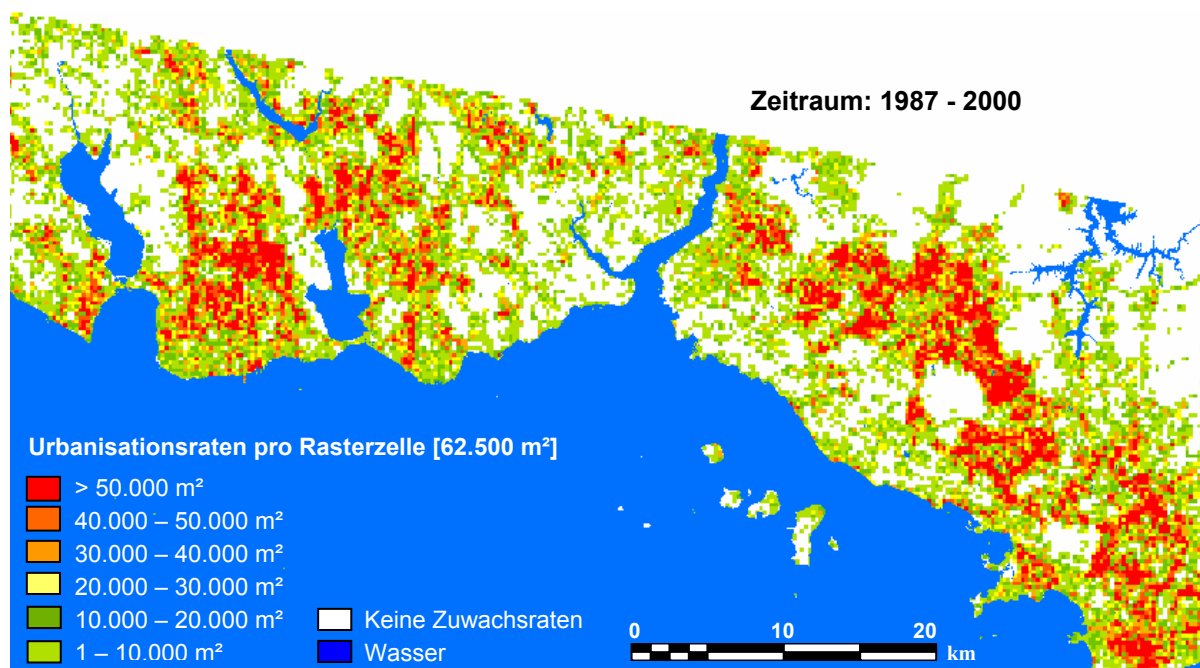


Abb. 5-20: Absolute Urbanisationsraten zwischen 1987 und 2000

Die temporalen Analysen für Istanbul zeigen im Zeitraum 1975-1987 eine Nachverdichtung zentraler Gebiete um den Bosphorus, und einen deutlich ringförmigen und flächenhaften Expansionsgürtel in direkten Stadtrandlagen. Für 1987-2000 zeichnet sich eine zunehmende Sättigung zentraler Gebiete Istanbuls ab. Zudem ist eine Verlagerung des ringförmigen Wachstums räumlich in die Peripherie sichtbar, bei gleichzeitigen Nachverdichtungserscheinungen in Expansionsgebieten des vorherigen Untersuchungszeitraumes. Der urbane Raum weist vor allem ein flächenhaftes Wachstum auf, was sich deutlich vom punktuellen Wachstum im Transferraum Hyderabad unterscheidet.

Anhang D zeigt die Resultate der Übertragung der Methoden zur Änderungsdetektion, sowie zur Errechnung der Zuwachsraten auf die urbanen Räume Hyderabad (vgl. Abb. D-7) und Padang (vgl. Abb. D-8).

Somit lassen sich in großmaßstäbigem Rahmen tendenzielle Aussagen über Vulnerabilitätsindikatoren treffen. Räumliche und temporale Analysen über das durchschnittliche Alter der Bebauungsstrukturen, des Versiegelungsgrads oder der Zuwachs- bzw. Urbanisationsraten ermöglichen zum einen eine Ergänzung von Information bisheriger Erkenntnisse aus höchst aufgelösten Daten, zum anderen aber auch einen relativen Vergleich großflächiger Ergebnisse im innerurbanen Bereich.

## 5.7. Demographische Indikatoren

Die statische urbane Morphologie charakterisiert eine Stadt genauso wie das dynamische Verhalten seiner Bewohner. Die Korrelation von statischen physischen Stadtstrukturen mit dem dynamischen Element zeitlicher und räumlicher Verhaltensweisen der Bevölkerung ermöglicht der Fernerkundung indirekt Rückschlüsse auf die Gesamtbevölkerung und ihre räumliche und zeitliche Verteilung.

Die Korrelation von Fernerkundungsdaten mit Zensusdaten ist ein gängiges Forschungsfeld. SUTTON (1997) setzt Zensusdaten der Vereinigten Staaten mit einem 1 km Raster von Lichtdetektionen mittels Nachtaufnahmen in Verbindung. Aufbauend auf eine Änderungsdetektion aus einer Zeitserie von Landsat Daten mit einer Bodenauflösung von 15 m projizierte MASEK ET AL. (2000) Zensusdaten auf das flächenhafte Wachstum einer Stadt. Mit höherer Auflösung des SPOT Satelliten schätzt LO (1995) die Bevölkerungsverteilung urbaner Landschaften. Das Ergebnis weist auf der Makroebene hohe Genauigkeiten auf, zeigt aber im Detail erhebliche Ungenauigkeiten basierend auf unzureichender Ableitung von Stadtstrukturen. Mit Hilfe von höchst aufgelösten Satellitendaten stellen sowohl BAUDOT (2000) als auch BJORGO (2000) mittels eines linearen Verhältnisses der Anzahl an detektierten Häusern und Schätzungen über die Anzahl ihrer Bewohner die Korrelation her. Für diese Arbeit wird eine direkte Korrelation von homogenen Stadtstrukturen bzw. Gebäudeparametern mit der Bevölkerungsverteilung angenommen. Diese Annahme wird benutzt, um indirekt aus Fernerkundungsprodukten Bevölkerungsinformationen innerhalb urbaner Landschaften abzuschätzen.

Regionalisierung oder Lokalisierung bedeutet in der Sozialforschung, dass ein Raum nach wirtschaftlichen, baulichen, planerischen, demographischen und/oder sozialen Merkmalen strukturiert und untergliedert wird (HOFFMEYER-ZLOYTNIK, 2000). Als Ergebnis entstehen nach außen funktional oder strukturell abgegrenzte räumliche Einheiten, die den Untersuchungsraum nach einer Typik untergliedern. Diese Strukturierung des Raumes kann analytisch oder synthetisch vorgenommen werden. Die analytische Lokalisierung geht von einer bestimmten Raumeinheit (Bundesland, Stadt, Stadtviertel, o. ä.) aus, unterteilt diesen Untersuchungsraum nach einer Reihe von speziellen Merkmalen in homogene Teilgebiete, was zu einer Gliederung der Raumelemente führt. Die synthetische Lokalisierung geht von einer kleinsten Gebietseinheit (Haus, Nachbarschaft, o. ä.) aus, und gruppiert Einheiten nach ihrer Ähnlichkeit hinsichtlich des ausgewählten Merkmalssets zu Klassen. Unabhängig von der methodischen Herangehensweise, gilt es also strukturelle räumliche Einheiten im heterogenen urbanen Gebiet zu typisieren. Auf der Basis von Fernerkundungsprodukten stehen dafür physische Strukturmerkmale zur Verfügung, während die oben genannten wirtschaftlichen oder sozialen Merkmale für eine Typisierung fehlen. Basierend auf der Hypothese, dass Raumeinheiten mit fast identischen physischen Strukturmerkmalen ebenso homogene demographische und soziale Charakteristiken aufweisen (BARNSLEY & BARR, 1997; ANAS ET AL., 1998; HOFFMEYER-ZLOYTNIK, 2000; WLODDARZEK, 2005), wird im Umkehrschluss eine indirekte Ableitung entsprechender Indikatoren ermöglicht.

Eine Korrelation von physischen stadtstrukturellen Merkmalen wie ‚Lage‘, ‚Bebauungsdichte‘, ‚Gebäudehöhe‘ oder auch ‚Nutzung‘ mit der Bevölkerungsverteilung ermöglicht also eine indirekte Abschätzung der urbanen Population. Dafür werden im Folgenden zwei verschiedene Methoden entwickelt. Ausgehend von zwei verschiedenen externen Datenquellen wer-

den Distributionstechniken entwickelt, die eine sehr lokale Abschätzung der Bevölkerungsdichte ermöglichen. Zum einen eine top-down Methode (analytisch) zur Verteilung eines Bevölkerungswertes für eine übliche räumliche Einheit, wie zum Beispiel ein Stadtviertel. Zum anderen eine bottom-up Methode (synthetisch), basierend auf Geländearbeit, zur Extrapolation punktueller Information. Diese punktuelle Information stammt von der durchgeführten Geländearbeit in den Stadtteilen Zeytinburnu und Üsküdar (CALISKAN, 2006), wo mittels eines Fragebogens Bevölkerungsdaten zur Tages- und Nachtzeit aufgenommen wurden. Bei der Erhebung der Daten wurde versucht, die Stichproben räumlich auf möglichst verschiedene urbane Strukturtypen sowie über das komplette Stadtviertel hinweg zu verteilen. Dies spiegelt sich in der räumlichen Verteilung der Stichproben wider (vgl. Anhang C, Abb. C-2, Abb. C-3), wobei allerdings eine komplette Erfassung aller physischen Strukturtypen im Rahmen dieser Arbeit nicht erreicht werden konnte. Abbildung 5-21 zeigt das Schema das mittels eines methodischen Gegenstrom-Prinzips, ausgehend von den erwähnten unterschiedlichen Eingangsdaten, die Bevölkerung lokal auf die physischen Strukturen des urbanen Raumes anpasst.

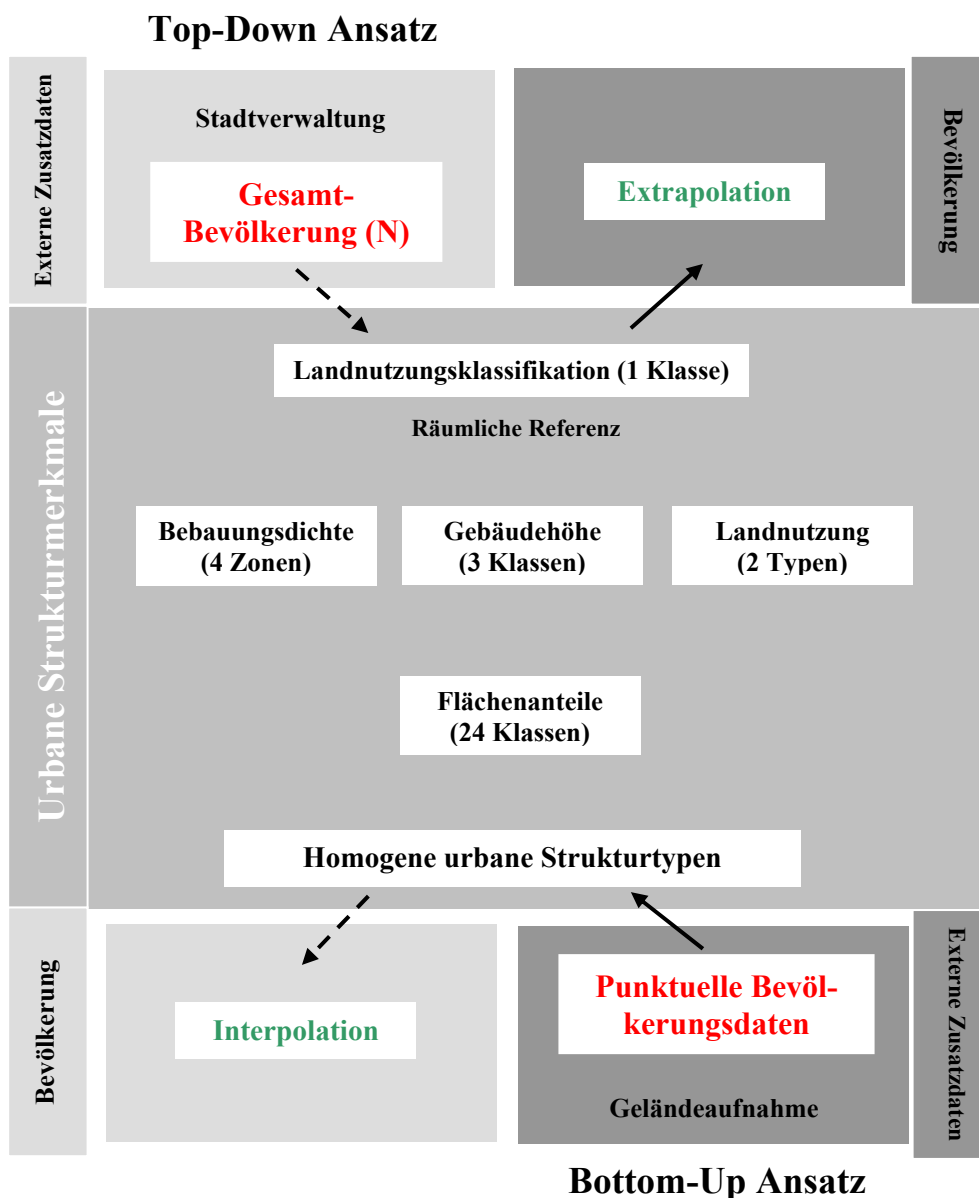


Abb. 5-21: Schematischer Überblick zur indirekten Ableitung von Bevölkerungsdaten



Die Notwendigkeit der kleinräumigen Interpolation ergibt sich aus den üblichen statistischen Datenvorgaben. So hält die Stadtverwaltung in der Regel Bevölkerungsdaten in der administrativen Einheit Stadtviertel vor. Diese Einheit bewegt sich oft im Bereich von mehr als 20 km<sup>2</sup> und ist dadurch ein stark generalisierendes Element. Höchst aufgelöste Satellitendaten dagegen bieten eine wesentlich lokalere Analyse des urbanen Raumes, wodurch eine Interpolation basierend auf strukturellen Merkmalen der urbanen Morphologie auch sehr lokale Bevölkerungsdichteabschätzungen zulassen. Auf der anderen Seite verursacht die enorme Dynamik urbaner Räume schnell überholte Zensusdaten oder in vielen Städten in Entwicklungsländern fehlen sogar grundsätzlich stadtviertelbezogene Bevölkerungsdaten. Darauf basiert die gegenläufige Idee auf der Grundlage von wenigen punktuellen Informationen zur Bevölkerung eine Extrapolation dieser Daten vorzunehmen. In beiden Fällen werden die strukturellen urbanen Strukturmerkmale aus Fernerkundungsdaten genutzt, jedoch in konträrer Zielrichtung.

### 5.7.1. Top-down Methode zur lokalen Distribution von Bevölkerungsdaten

Die Methode basiert auf einer statistischen räumlichen Verteilung der Gesamteinwohnerzahl. Dafür werden die oben erzeugten Informationsebenen – Landbedeckungsklassifikation, Bebauungsdichte, Gebäudehöhe sowie Flächennutzung – herangezogen. Die Landbedeckungsklassifikation dient einer grundsätzlichen räumlichen Referenzierung von Hausflächen. Die Bebauungsdichte wird herangezogen, um innerhalb des entsprechenden Stadtviertels homogene Flächen zu lokalisieren, die auf Grund ihrer strukturellen Morphologie ähnliche Bevölkerungswerte erwarten lassen. Die Gebäudehöhe dient einer weiteren Unterteilung dieser homogenen Flächen. Und schließlich dient die Flächennutzung einer genaueren Verteilung der Bevölkerungsdaten bezüglich ihrer Funktion.

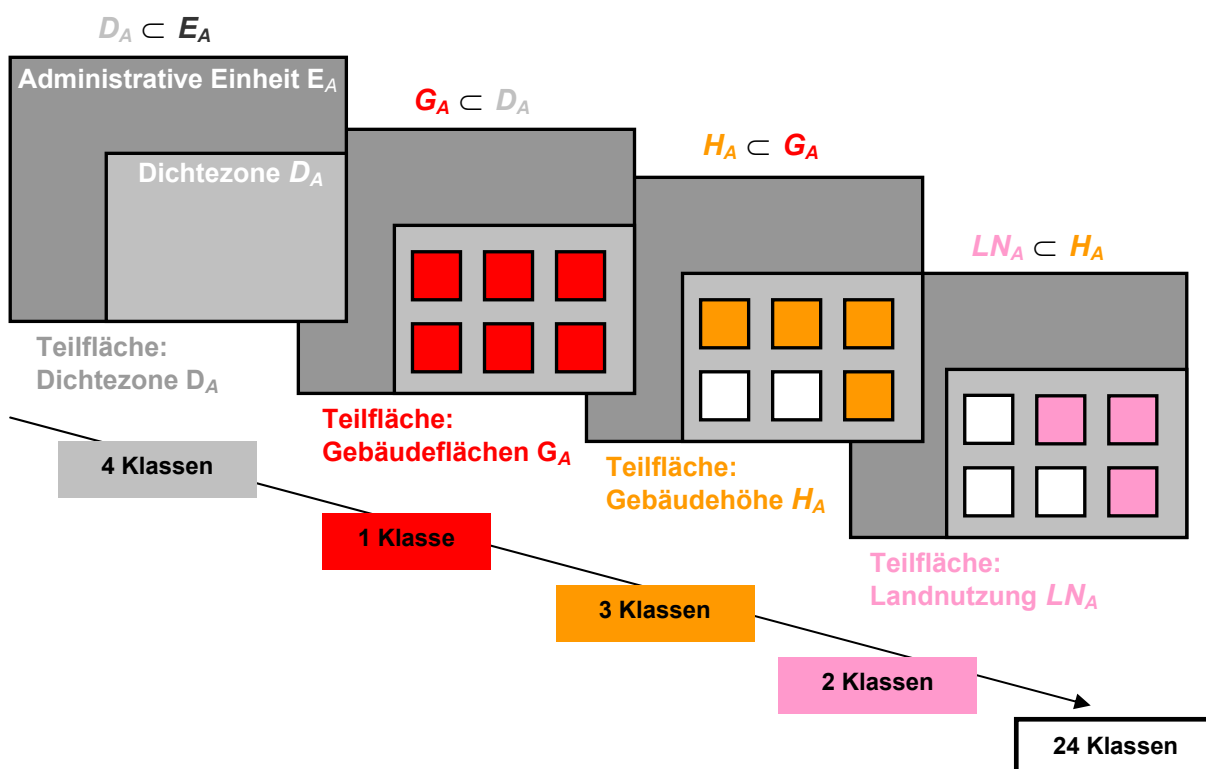


Abb. 5-22: Ermittlung der Gebäudefläche für homogene physische urbane Strukturtypen

Die Verteilung der Gesamtbevölkerungszahl beruht auf der Annahme, dass Raumeinheiten basierend auf urbaner Morphologie in direkter Abhängigkeit mit der Bevölkerungszahl stehen. Der Fokus liegt darin, physische Charakteristiken der Stadt mit der Gesamtbevölkerung zu korrelieren.

Zunächst erfolgt eine räumliche Quantifizierung homogener Raumeinheiten. Zu diesem Zweck werden die zur Verfügung stehenden strukturellen Merkmale – Gebäudedichte, Hausflächen, Gebäudehöhe und Landnutzung – räumlich miteinander verschnitten (Abb. 5-22). Jede Dichtezone gilt als homogene Teilfläche der Ausgangseinheit, die hier die Fläche der administrativen Einheit ‚Stadtviertel‘ darstellt (5-15). Die klassifizierten Häuser der Landbedeckungsklassifikation ergeben eine räumliche Teilfläche einer jeden Dichtezone (5-16). Eine weitere Unterteilung der Fläche erfolgt mittels der drei Gebäudehöhenklassen (5-17). Schließlich werden die ermittelten Flächenanteile noch nach Landnutzung differenziert (5-18). Es ergeben sich durch die vier Gebäudedichteklassen, drei Gebäudehöhenklassen sowie zwei Landnutzungsklassen 24 verschiedene homogene urbane Strukturtypen mit ihren jeweiligen Flächenanteilen ( $LN_A$ ) innerhalb der betrachteten Raumeinheit.

$$(5-15) \quad D_A \subset E_A \quad \rightarrow \quad (5-16) \quad G_A \subset D_A \quad \rightarrow$$

$$(5-17) \quad H_A \subset G_A \quad \rightarrow \quad (5-18) \quad LN_A \subset H_A$$

$E_A$  = Fläche der administrativen Einheit (hier: Stadtviertel)

$D_A$  = Fläche der jeweiligen homogenen Dichtezone

$G_A$  = klassifizierte Gebäudefläche aus der Landbedeckungsklassifikation

$H_A$  = klassifizierte Hausfläche einer Gebäudehöhenklasse

$LN_A$  = klassifizierte Hausfläche einer Landnutzungs-klasse & Fläche der Gebäude einer homogenen Strukturzone

Die klassifizierte Dachfläche eines Hauses korreliert im Regelfall mit dem Wohnraum eines Stockwerkes. Demnach ergibt sich die Wohnfläche eines homogenen Strukturtyps aus dem Produkt der jeweiligen errechneten Hausfläche mit der Anzahl der abgeleiteten Stockwerkszahl.

$$(5-19) \quad W_{A_i} = LN_{A_i} * S$$

$LN_{A_i}$  = Fläche der Gebäude der homogenen Strukturzone i

$W_{A_i}$  = Wohnraum der homogenen urbanen Zone i

S = mittlere Stockwerksanzahl einer Gebäudehöhenklasse in der Zone i

Daraus ergibt sich für jeden der 24 physisch homogenen urbanen Strukturtypen eine individuelle Wohnfläche. Eine grundlegende Distribution der Gesamtbevölkerung des administrativen Distrikts auf ein lokales Level bedingt eine proportionale Verteilung auf die jeweiligen Wohnflächen (5-20).

$$(5-20) \quad B_{Z_i} = \frac{N}{\sum_{j=1}^g W_{A_j}} * W_{A_i}$$

$B_{Z_i}$  = absolute Bevölkerung der homogenen urbanen Zone i

N = Gesamtbevölkerung einer statistischen räumlichen Einheit (hier: administrativer Distrikt)

g = Anzahl homogener urbaner Zonen innerhalb einer statistischen räumlichen Einheit

Das Ergebnis ist eine proportionale, räumliche Distribution der Gesamtbevölkerung des Distriktes auf die errechneten Wohnflächen der jeweiligen physisch homogenen urbanen Zone. Damit wird die durchschnittliche Bewohnerzahl pro Haus abgeschätzt. Gleichung 5-20 berücksichtigt allerdings nicht das Potential zur Bevölkerungsverteilung auch Landnutzungsinformation mit einzubeziehen. Dies wird in erster Linie interessant, wenn Bevölkerungsdaten sowohl für die Nacht als auch für den Tag vorliegen. Die Einbeziehung der Landnutzung ermöglicht innerhalb der errechneten Wohnflächen in Abhängigkeit von der Tageszeit Gewichtungen einzuführen. Unter der Annahme, dass Gewerbegebiete eine wesentlich geringere Nacht- als Tagbevölkerung aufweisen, kann nun basierend auf den errechneten Wohnflächen der Dichtezonen umverteilt werden. Dazu werden die absoluten Bevölkerungszahlen einer Dichtezone aufsummiert (5-21). Mittels eines Gewichtungskoeffizienten wird innerhalb der Dichtezone die Bevölkerung basierend auf der obigen Annahme zwischen Wohn- und Gewerbegebieten umverteilt (5-22).

$$(5-21) \quad B_{D_i} = \sum_{i=1}^h B_{Z_i} \quad (5-22) \quad B_{C_i} = B_{D_i} -/+ k * B_{D_i} \cup B_{r_i} = B_{D_i} +/- k * B_{D_i}$$

$B_{D_i}$  = absolute Bevölkerung innerhalb der Gebäudedichtezone i

$B_{C_i}$  = absolute Bevölkerung eines Gewerbegebietes der Dichtezone i

$B_{r_i}$  = absolute Bevölkerung eines Wohngebietes der Dichtezone i

h = Anzahl homogener urbaner Strukturzonen innerhalb einer Dichtezone

k = Gewichtungskoeffizient (je nach Tages- oder Nachtzeit)

Für das Beispiel Zeytinburnu wird kein Gewichtungskoeffizient zur Errechnung der Tagbevölkerung eingesetzt. Für die Nachtbevölkerung wird dagegen der Gewichtungsfaktor 0,8 benutzt, um der Annahme Rechnung zu tragen, dass Gewerbegebiete nachts entvölkert sind. Somit erfolgt nachts eine Umverteilung der proportional errechneten Bevölkerung der Gewerbegebiete auf die Wohngebiete. Dies wird mittels des Gewichtungsfaktors von 80 % der proportional errechneten Bevölkerung der Gewerbegebiete vollzogen.

Die Berechnung der absoluten Bevölkerung einer entsprechenden homogenen Zone ist ein zentraler räumlicher Indikator zur Unterstützung von Vulnerabilitäts- und Risikoabschätzung. Die Einteilung in künstliche, physisch homogene, urbane Zonen hat eine inkonsistente räumliche Einheit zur Folge, und beinhaltet damit keine Vergleichbarkeit. Standardmäßig wird die Bevölkerungsverteilung mathematisch als „Einwohner pro km<sup>2</sup>“ abgebildet. Im Folgenden werden die errechneten absoluten Bevölkerungswerte pro homogener urbaner Zone in diese vergleichbare Einheit umgerechnet (5-23).

$$(5-23) \quad E_{D_i} = \left( \frac{B_{D_i}}{D_{A_i}} \right)$$

$E_{D_i}$  = Einwohner pro km<sup>2</sup> innerhalb der Gebäudedichtezone i

Das Resultat ist die durchschnittliche Bevölkerung pro km<sup>2</sup> innerhalb einer entsprechenden Dichtezone. Mittels der Information Gebäudehöhe kann nun innerhalb der Dichtezone wiederum eine Umverteilung der durchschnittlichen Bevölkerung auf die jeweilige Stockwerksanzahl erfolgen.

$$(5-24) \quad E_{Z_i} = \left( \frac{E_{D_i}}{S_m} \right) * S$$

$E_{Z_i}$  = Einwohner pro km<sup>2</sup> des homogenen urbanen Strukturtyps i basierend auf Gebäudedichte, Gebäudehöhe und Gebäudenutzung

$S_m$  = durchschnittliche Anzahl an Stockwerken pro Gebäude

Das Ergebnis zeigt die lokale Bevölkerungsdichte basierend auf den physischen Strukturmerkmalen der urbanen Landschaft (Abb. 5-23).

### 5.7.2. Bottom-up Methode zur Extrapolation punktueller Bevölkerungsdaten

Der bottom-up Ansatz ist vom methodischen Ablauf her gesehen eine direkte Umkehrung des top-down Ansatzes (vgl. Abb. 5-21). Die Basis stellen dafür punktuelle Informationen über die Anzahl von Bewohnern von Beispielshäusern, die bei der Geländearbeit aufgenommen wurden. Die gleichen physischen Parameter der urbanen Morphologie werden in einem gegenläufigen Prinzip zur mathematischen Extrapolation der punktuellen Bevölkerungsdaten verwendet. Im Gegensatz zum generalisierenden Element ‚Gesamtbevölkerungszahl‘ eines Distrikts, wird nun von der Einheit ‚Einwohner pro Haus‘ ausgegangen. Je nach Zugehörigkeit der zur Verfügung stehenden Geländedaten, wird für die jeweilige urbane Zone (homogene Gebäudehöhe, Gebäudedichte und Landnutzungstyp) eine mittlere Einwohnerzahl pro Haus ermittelt. Dieses Resultat wird dann mittels der ermittelten Wohnfläche im entsprechenden Gebiet in Einwohner pro m<sup>2</sup> umgerechnet (5-25).

$$(5-25) \quad E_{w_i} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n E_{i_j}}{\sum_{j=1}^n W_{h_j}} \right)$$

$E_{Z_i}$  = Einwohner pro m<sup>2</sup> Wohnfläche des homogenen Strukturtyps i

$E_i$  = Einwohner pro Einheit „Haus“ im Strukturtyp i, ermittelt aus der Feldkampagne

$W_h$  = Wohnfläche des jeweiligen Hauses

$n$  = Stichprobenanzahl für einen bestimmten urbanen Strukturtyp

Dabei ist die Anzahl der Stichproben für die Genauigkeit der Extrapolation von zentraler Bedeutung. Für die Testgebiete Zeytinburnu und Üsküdar liegen jeweils 50 Stichproben vor (vgl. Abb. C-2 und C-3). Dieses Resultat ist die Grundlage zur proportionalen Extrapolation der Information 'Einwohner pro m<sup>2</sup>' einer entsprechenden urbanen Zone auf die errechnete Wohnfläche dieser urbanen Zone (5-26).

$$(5-26) \quad E_{Z_i} = E_{W_i} * W_{A_i}$$

Damit wird eine Extrapolation punktueller Information, basierend auf aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten physisch homogenen Charakteristiken der komplexen urbaner Morphologie, ermöglicht. Das Ergebnis ist eine räumliche Hochrechnung von Einzelinformationen auf die lokalräumlichen Merkmale einer großen urbanen Raumeinheit, wie zum Beispiel eines Distrikts.

### 5.7.3. Ergebnis und Genauigkeitsabschätzung

Die Notwendigkeit der kleinräumigen Interpolation ergibt sich aus den üblichen statistischen Datenvorgaben. So hält die Stadtverwaltung in der Regel Bevölkerungsdaten in der administrativen Einheit Stadtviertel vor, was ein stark generalisierendes Element darstellt. Höchst aufgelöste Satellitendaten dagegen ermöglichen eine wesentlich kleinräumigere Analyse des urbanen Raumes, wodurch eine Interpolation basierend auf strukturellen Merkmalen der urbanen Morphologie auch sehr lokale Bevölkerungsdichteabschätzungen zulassen. Die hohe Dynamik urbaner Räume verursacht allerdings schnell überholte Zensusdaten oder in vielen Städten in Entwicklungsländern fehlen sogar grundsätzlich stadtviertelbezogene Bevölkerungsdaten. Darauf basiert die gegenläufige Idee, auf der Grundlage von wenigen punktuellen Informationen zur Bevölkerung eine Extrapolation dieser Daten vorzunehmen. In beiden Fällen werden die strukturellen urbanen Strukturmerkmale aus Fernerkundungsdaten genutzt, jedoch in konträrer Zielrichtung.

Sowohl der top-down Interpolationsansatz als auch der bottom-up Extrapolationsansatz (vgl. Abb. 5-21) resultieren in einer lokalen Verteilung der Bevölkerungsdichte. Abb. 5-23 zeigt das Ergebnis der Interpolation der Gesamteinwohnerzahl des Distrikts Üsküdar auf die physischen Strukturen der urbanen Landschaft. Die verwendeten Strukturen der Gebäudedichte, Gebäudehöhe sowie Landnutzung spiegeln sich deutlich im Ergebnis wider. Das Wissen über die lokale Distribution der Bevölkerung anstatt nur auf Distriktebene, ist ein zentraler Standortfaktor bei der Einschätzung von Vulnerabilität. Maximale Extreme zeigen ein räumliches Nebeneinander von Freiflächen ohne Einwohner bis zu 60 000 und mehr Einwohner pro km<sup>2</sup> in Zonen hoch verdichteter Wohngebieten mit mehr als 7 Stockwerken. Die lokalräumliche Bevölkerungsverteilung in Kombination mit der temporalen Komponente ermöglicht zudem die Einschätzung der dynamischen Mobilität der Bevölkerung im Tagesrhythmus. Damit kommt mit der Dimension ‚Zeit‘ als zusätzlicher Komponente ein neuer Aspekt bezüglich Vulnerabilitäts- und Risikoabschätzung in Spiel.

Üsküdar weist eine wesentlich höhere Nacht- als Tagbevölkerung auf. Daraus lässt sich ableiten, dass Üsküdar eine Schlafstadt darstellt, deren Bewohner durch Auspendeln die Tagbevölkerung signifikant verringern. Ein genau gegenteiliges Resultat ergibt sich im Distrikt Zeytinburnu (vgl. Abb. 6-6). Dort ist die Tagbevölkerung höher, was den Rückschluss auf ein Viertel mit vielen arbeitsplatzbedingten Einpendlern erlaubt. Besonders auffällig ist der

erhebliche Anstieg der Bevölkerung in den großflächigen Gewerbegebieten Zeytinburnus. Aber auch ein Anstieg in den Wohngebieten ist zu verzeichnen, was die Annahme einer Mischnutzung (vgl. 5.4.) bestärkt. Im Vergleich der beiden Distrikte zeigt sich also ein temporal gegenläufiger Verlauf demographischer Vulnerabilität.

Der bottom-up Ansatz liefert in der Dimension der Bevölkerungsverteilung ähnliche Ergebnisse. Beide Ansätze beruhen entweder auf Zusatzdaten aus dem Zensus oder aus der Geländebegehung. Das Wissen über die physischen Strukturen, und damit der Dimension an Wohnfläche ermöglicht sogar eine Tendenzabschätzung ohne Zusatzdaten. Dieses Potential der Fernerkundung hat enormen Wert für unzugängliche Gebiete, sowie in Gebieten von ungeheurer Dynamik, wie eben in Megacities, wo Zensusdaten schnell veraltet sind.

Der methodische Ansatz die Bevölkerungsverteilung mittels der physischen Parameter aus der Klassifikation von höchst aufgelösten Satellitendaten abzuleiten ist natürlich abhängig von der Güte der Klassifikationsergebnisse. Fehler in der Landbedeckungsklassifikation, der Dichteverteilung, der Gebäudehöhe oder der Landnutzung pflanzen sich in der Bevölkerungsabschätzung fort. Die erzielten Genauigkeiten der eingesetzten Resultate (vgl. 4.2. 5.1., 5.2., 5.4.) lassen allerdings eine hohe Genauigkeit auch für die Bevölkerungsverteilung erwarten.

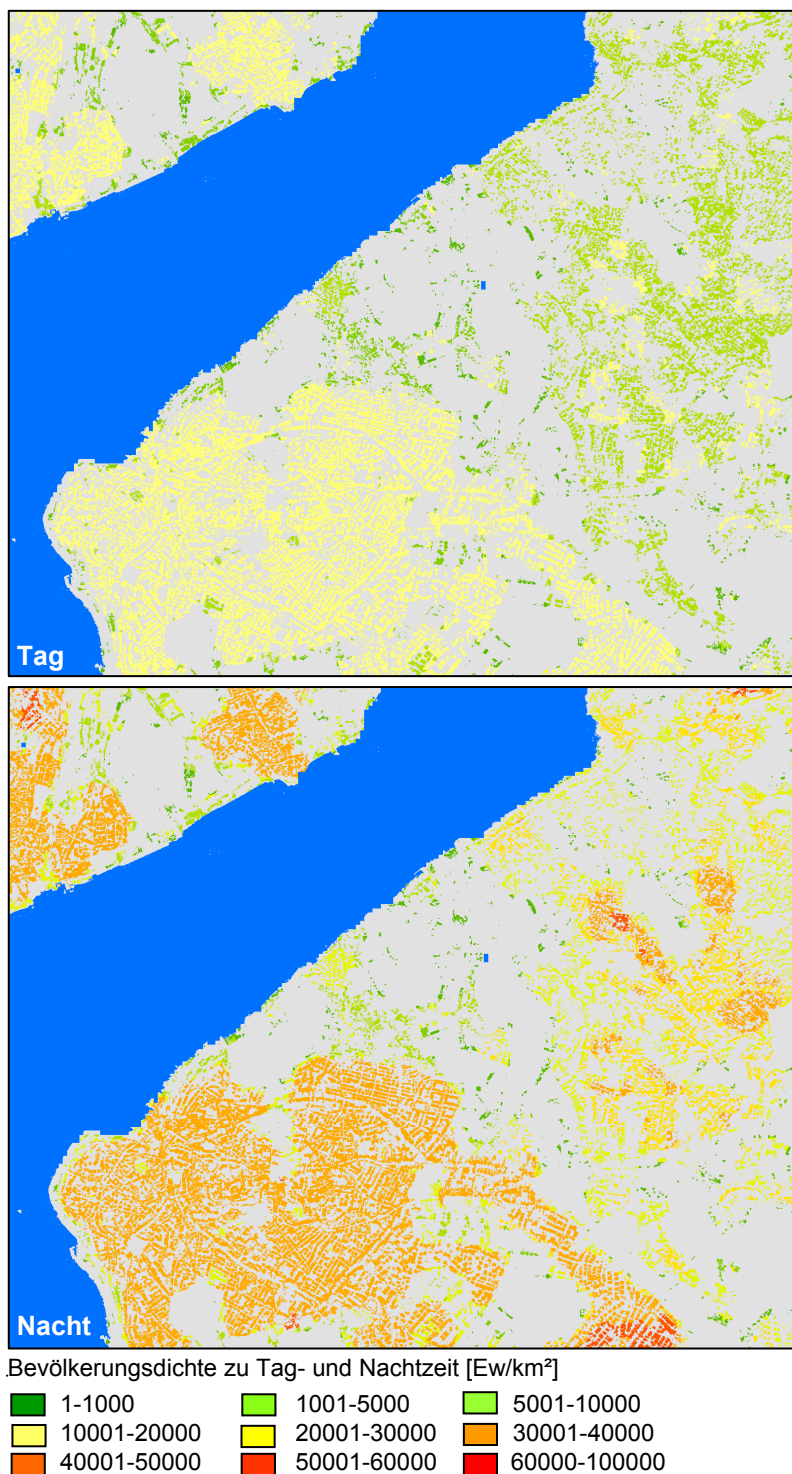


Abb. 5-23: Bevölkerungsverteilung im Stadtteil Üsküdar zu Tages- und Nachtzeit

Eine Genauigkeitsabschätzung beruht auf einer Studie, die die Bevölkerungsverteilung innerhalb eines 500 x 500 Meter Raster in Zeytinburnu angibt (ERDIK, 2002). Entsprechend dieses räumlichen Rasters wird die absolute Bevölkerungszahl aus den beiden obigen Methoden errechnet. Tabelle 5-3 zeigt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den Resultaten der bottom-up und top-down Methode. Die errechneten Bevölkerungswerte weisen eine hohe Übereinstimmung mit den Referenzdaten auf, und zeigen trotz der Fortpflanzung von Klassifikationsfehlern der eingesetzten Fernerkundungsprodukte das Potential auf, indirekt Bevölkerungsdaten in ihrer Dimension richtig abzuschätzen.

Der top-down Ansatz weist eine leichte Unterschätzung der Bevölkerungsverteilung in Wohngebieten, aber eine Überschätzung in Gewerbegebieten auf. Basierend auf diesen Ergebnissen kann der spezifische Gewichtungsfaktor aus Gleichung 5-21 für die Verteilung innerhalb der beiden Landnutzungsklassen für die Stadt Istanbul angepasst werden. Im Gegensatz dazu führt der bottom-up Ansatz zu einer leichten Überschätzung der Bevölkerung im Distrikt Zeytinburnu. Die Abweichung zeigt jeweils die prozentuale Differenz der Ergebnisse von den Referenzdaten sowie deren Abweichungsrichtung. In hoch verdichteten Gebieten deutet die geringe Abweichung im Vergleich zur absoluten Bevölkerung die korrekt abgeschätzte Dimension an Einwohnern an. Für gering verdichtete Gebiete, insbesondere nachts in Gewerbegebieten ist die Abweichung sehr hoch. Diese hohe Abweichung mit einem Maximalwert von 74,3% ist durch die geringe Anzahl an Menschen (in diesem Beispiel 732 Einwohner im Vergleich zu 420 im Referenzdatensatz) bedingt, womit auch hier die Dimension an Einwohner korrekt abgeschätzt ist.

Absolute Bevölkerung pro 500 x 500 m in Zeytinburnu	Referenzdaten	top-down	Abweichung [%]	bottom-up	Abweichung [%]
<b>Wohngebiet</b>	16 795	16 162	-3.8	17 958	+6.9
	24 221	21 981	-9.3	24 723	+2.1
	13 219	12 259	-7.3	13 922	+5.3
<b>Gewerbegebiet</b>	947	1 152	+21.6	1 250	+32.0
	420	694	+65.2	732	+74.3
<b>Mischgebiet</b>	7 441	8 784	+18.0	9 260	+24.4
	2 281	3 055	+33.9	3 295	+44.5
<b>Gesamt</b>	<b>65 324</b>	<b>64 087</b>	<b>-1.9 %</b>	<b>71 140</b>	<b>+8.9</b>

Tab. 5-3: Genauigkeitsanalyse der kleinräumigen Bevölkerungsverteilung mittels Methoden der Fernerkundung

Die Resultate bestätigen die Hypothese, dass die Bevölkerungsverteilung direkt mit strukturellen Charakteristiken der urbanen Landschaft korreliert. Die errechneten Absolutwerte entsprechen konsistent den Referenzdaten. Eine akkurate katastergenaue Ableitung der Bevölkerungsverteilung ist mittels Fernerkundungsmethoden nicht erreichbar, aber für schnelle, in ihrer Dimension richtige Einschätzungen im Hinblick auf Vulnerabilitätsabschätzung bzw. Risikomanagement auch unnötig. Das präzise räumliche, temporale und quantitative Wissen über die Bevölkerungsdichte und -verteilung erlaubt in Kombination mit den vielen anderen räumlichen Informationsebenen aus Fernerkundungsdaten Bevölkerungsströme, Tragfähigkeiten der Verkehrsinfrastruktur, Einzugsbereiche, notwendige Ver- und Entsorgung, oder die quantitative Einschätzung von Hilfsmaßnahmen zu analysieren.

## 5.8. Zusammenfassung und Bewertung

Dieses Kapitel zeigt Methoden und Produkte basierend auf der Landbedeckungsklassifikation sowie dem DGM zur direkten und indirekten Ableitung von Indikatoren zur Charakterisierung urbaner Landschaften. Dabei werden folgende Produkte aus höchst und mittel aufgelösten Fernerkundungsdatensätzen abgeleitet:

- Gebäudedichte
- Gebäudehöhe
- Dachtypen
- Haustypen spezifiziert durch Gebäudegrößen- und Gebäudeformen
- Landnutzungstypen
- Parameter zur geographischen Lage: Zugänglichkeit, Verkehrsinfrastruktur, Freiflächenanalyse, Oberflächenbeschaffenheit bzw. Hangneigung, Tsunamigefährdungsflächen
- temporale Urbanisationsraten
- Alter von Gebäuden
- großflächige Versiegelungsrate
- Bevölkerungsdichteverteilung

Dieses Ergebnis weist bereits auf das vornehmliche Leistungsvermögen von Fernerkundungsdaten in urbanen Räumen hin. Das Potential liegt in erster Linie in der Ableitung physischer Parameter sowie deren räumlicher Verteilung. Es zeigt aber auch, dass direkt ableitbare Parameter zur indirekten Ableitung von Parametern genutzt werden können. So weist die Korrelation von Parametern zur Charakterisierung der urbanen Morphologie mit der Verteilung und Dichte der Bevölkerung eine hohe Genauigkeit auf. Für diese Art der indirekten Ableitung von Parametern ist die Fernerkundung in diesem Beispiel allerdings auf externe Zusatzdaten angewiesen. Aber auch ohne externe Zusatzdaten erscheint die Schätzung der Bevölkerungsdichte basierend auf der errechneten Wohnfläche viel versprechend.

Zur Kalkulation der thematischen Genauigkeiten der jeweiligen Auswertung eines Parameters werden diese Resultate mit Daten aus der Geländebegehung, aus einer Informationsebene der Stadt Istanbul, aus der Red Cross Studie (ERDIK, 2002), aus dem MURBANDY-Projekt (LAVALLE ET AL., 2001) und/oder aus einer visuellen Interpretation verglichen. Tabelle 5-4 listet nun die Indikatoren und deren Referenzdatensätze auf, um einen Überblick über die erzielten Genauigkeiten zu geben. Nicht aufgeführt sind die Parameter, deren Genauigkeit direkt von den Klassifikationsergebnisse aus Kapitel 4 abhängen, wie die Distanzanalysen, die temporalen Urbanisationsraten oder das Alter von Gebäuden.

Referenzdaten Ergebnisse	Gelände- begehung	GIS-Ebene	Red Cross Studie	Visuelle Inter- pretation	MURBANDY Projekt
Gebäudedichte	-	80,65 %	-	80,65 %	-
Gebäudehöhe	94,1 %	-	-	-	-
Dachtypen	92,8 %	-	-	89,92 %	-
Gebäudegrößen	-	78,09 %	-	-	-
Landnutzungstypen	91,5 %	-	-	-	87,3 %
Bevölkerungsdichte	-	-	91,1 %	-	-

Tab. 5-4: Übersicht über Genauigkeit der abgeleiteten Parameter im Bezug auf die Referenzdatensätze



Die Resultate liefern durchwegs hohe Genauigkeiten. Allerdings sind auf Grund des Charakters der Parameter meist keine absoluten Genauigkeiten zu ermitteln. So sind die Referenzdatensätze der Gebäudedichte keine absoluten Ergebnisse, sondern Einschätzungen. Während die Gebäudehöhen, Dachtypen und Größen der Gebäude mittels Geländearbeit bzw. visueller Interpretation der Satellitendaten absolut gemessen werden können, unterliegt die Abschätzung der Genauigkeit der Landnutzung einem generalisierenden Element. Viele als Wohngebiet klassifizierte Gebäude, haben ein kommerziell genutztes Erdgeschoß, womit eine Ableitung dieser Mischnutzung verfehlt ist. Ebenso unterliegt die Verifizierung der Bevölkerungsdichteverteilung dem generalisierenden Element einer 500 x 500 Meter Raster Analyse aus der Red Cross Studie. Im Vergleich mit den früheren Studien weisen die Ergebnisse eine wesentliche höhere geometrische Genauigkeit auf und sind jederzeit automatisiert reproduzierbar. Zusammengefasst zeigen die durchwegs hohen Genauigkeiten aller abgeleiteten Parameter der urbanen Landschaft das enorme Potential der Fernerkundung für urbane Analysen.

Die Standortfaktoren zur Beschreibung von urbaner Morphologie, wie für das Beispiel Istanbul entwickelt, sind nicht alle grundsätzlich auf andere urbane Räume übertragbar bzw. machen dort Sinn. Die Parameter Gebäudedichte, Gebäudegrößen, Standortfaktoren zur Analyse der geographischen Lage, temporale Änderungsdetektion, Alter der Gebäude und die großflächige Versiegelungsrate basieren auf einer direkten Analyse der Resultate der Landbedeckungsklassifikationen. Damit sind die Analysen ausschließlich abhängig von der Güte der Landbedeckungsklassifikationen bzw. der Güte der Satellitendaten, und somit grundsätzlich auf andere urbane Räume übertragbar.

Die entwickelte Methode zur Ableitung der Gebäudehöhe ist dagegen von datenspezifischen Merkmalen abhängig. Die Übertragung der Methode zur Ableitung der Gebäudehöhe scheitert für die Testdatensätze Hyderabad sowie Padang auf Grund deren senkrechter Sonnenstände. Dort ist keine oder nur eine sehr kurze Schattenlänge detektierbar, was die Korrelation unmöglich oder sehr fehleranfällig macht.

Die entwickelten Methoden zur Ableitung der Dachtypen sowie der Landnutzung hängen dagegen von raumspezifischen Merkmalen ab. Die Unterscheidung der Dachtypen zwischen Giebel- oder Flachdach in Istanbul, bzw. zwischen Dachfarben in Padang, ist für den urbanen Raum Hyderabad nicht übertragbar. Der Grund sind die homogene Flachdachstruktur, sowie das einheitliche Dachmaterial, was Differenzierungen nach obigen Parametern unmöglich macht. Die indirekte Ableitung von Landnutzungsklassen ermöglicht für den urbanen Raum Istanbul die Korrelation von Dachtyp und Gebäudegröße mit der Landnutzung. Dieser Zusammenhang ist durch den einheitlichen Flachdachtyp in Hyderabad nicht mehr übertragbar und bedingt daher eine neue Methode bzw. neue raumspezifische Parameter zur indirekten Ableitung.

Die Ableitung der Bevölkerungsverteilung, basierend auf strukturellen Merkmalen der urbanen Morphologie, ist grundsätzlich auf alle urbanen Räume übertragbar. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist allerdings abhängig von der Anzahl der abgeleiteten physischen Parameter sowie der Güte und der Anzahl an Zusatzinformationen für Stadtviertel oder aus Geländearbeiten. Zusammengefasst ermöglichen die Methoden flächendeckende, aktuelle und in ihrer Dimension korrekte Informationsbasen für Entscheidungsträger in hoch dynamischen urbanen Räumen. Diese räumlichen Informationen finden sich als Indikatoren zur Beschrei-

zung von Vulnerabilität bzw. Gefährdung im Leitfaden (vgl. Tab. 3-1) dieser Arbeit wider, und sie stellen die Grundlage zur konkreten Abschätzung der Vulnerabilität sowie des Risikos in urbanem Raum im folgenden Kapitel 6 dar.

# Kapitel 6

## Abschätzung von Vulnerabilität

So far, the international community's response to disasters has been mostly reactive, with only limited budget invested in prevention. (...) Even if there were a willingness to invest in prevention, the question would be: where? (PEDUZZI, 2006)

Die Verschmelzung des theoretischen, konzeptionellen Rahmens von Risiko und Vulnerabilität (Kapitel 3) mit konkreten Fernerkundungsprodukten (Kapitel 4, 5) stellt den Rahmen dieses Kapitels dar. Ziel ist es, die Potentiale, aber auch die Limitierungen der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität aufzuzeigen. Zu einer relativen Abschätzung der Vulnerabilität und der Gefährdung werden die unterschiedlichen Indikatoren auf vergleichbare standardisierte Indizes konvertiert. Mittels Kombination der diversen Indizes wird die räumliche Projektion von Vulnerabilität und Gefährdung auf den urbanen Raum ermöglicht, um Risiko als Zusammenspiel verschiedenster Einflussfaktoren abzubilden.

Zudem steht die interdisziplinäre Nutzung von Fernerkundungsprodukten mit Methoden des Bauingenieurwesens im Fokus dieses Kapitels. So ermöglicht die Fernerkundung eine aktuelle und flächendeckende Abbildung von Gebäudeparametern, wie beispielsweise Höhe, Alter, Dach- und Haustyp (vgl. Kapitel 5), und das Bauingenieurwesen eine Stabilitätsanalyse von Gebäudestrukturen im Falle eines Erdbebens. Die Synergie aus beiden Methodenzweigen ermöglicht eine detaillierte Stabilitätsanalyse von Gebäudetypen, und damit das Potential strukturelle Vulnerabilität sehr lokal, und trotzdem flächendeckend, abbilden zu können.

Schließlich zeigt das Endprodukt der Vulnerabilitäts- und Risikoabschätzung eine räumliche und zeitliche Informationsbasis für Entscheidungsträger. Ein Szenario für ein Beispielgebiet quantifiziert die Informationen für Entscheidungsträger, und ermöglicht im Vorfeld eines Desasters Art und Ort für gezielte präventive Maßnahmen zu identifizieren sowie während des Desasterfalles gezielte Koordination und Management.

## 6.1. Vulnerabilität und der Beitrag der Fernerkundung

Kapitel 3 erarbeitet ein theoretisches, ganzheitliches Konzept zur Analyse von Risiko und Vulnerabilität. Dabei wird Vulnerabilität sowohl aus physischer, demographischer, sozialer, ökonomischer, ökologischer als auch aus politischer Perspektive beleuchtet. Kapitel 4 und 5 zeigen auf systematische Weise Methoden und entsprechende Resultate aus Fernerkundungsdaten, die aufgeführte Indikatoren des Konzeptes ableiten. Die modifizierte Tabelle 6-1 aus Abschnitt 3.3. (vgl. Tab. 3-1) zeigt mittels Fernerkundungsmethoden abgeleitete Indikatoren des Risiko- und Vulnerabilitätskonzepts. Es kristallisieren sich 24 Indikatoren heraus, die auf direktem oder indirektem Wege abgeleitet wurden, und welche das Potential der Fernerkundung für den urbanen Raum markieren. Diese Indikatoren sind dabei keineswegs unabhängig, wie die Beispiele Gebäudetyp und Gebäudehöhe zeigen, sondern listen das Potential der Fernerkundung im Überblick auf. Bei der Abschätzung der Vulnerabilität mittels Kombination dieser Indikatoren muss allerdings deren Unabhängigkeit gewährleistet sein. Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass die Indikatoren maßstabsabhängig betrachtet werden. Das bedeutet beispielsweise, dass die Gesamtbevölkerung von Distrikten zum innerurbanen Vergleich von Stadtvierteln dient, während die Bevölkerungsverteilung innerhalb von Distrikten die lokale räumliche Differenzierung zulässt.

*In Bezug auf die abgeleiteten Indikatoren kristallisiert sich als das Potential der Fernerkundung vor allem die Abschätzung physischer und demographischer Indikatoren heraus. Dies begründet sich darin, dass physische Indikatoren, wie Gebäudedichte oder Distanzen zu Infrastruktureinrichtungen, einen direkten Zusammenhang zur Bildinformation aufweisen. Die Ableitung von beispielsweise demographischen oder sozioökonomischen Indikatoren steht dagegen in keinem direkten Zusammenhang, sondern zeigt nur bei bestimmten Indikatoren eine indirekte Korrelation zu den physischen Strukturen. Daraus ergeben sich auch die Limitierungen der Fernerkundung bei der Ableitung ganzheitlicher Vulnerabilität, welche durch die Lücken bei sozioökonomischen, ökologischen und politischen Komponenten innerhalb des Leitfadens widergespiegelt werden. Ebenso angedeutet sind potentiell aus Fernerkundung ableitbare Indikatoren, wie Gebäudematerial oder Bodentyp, die aber auf Grund fehlender spezifischer Datensätze innerhalb dieser Arbeit nicht abgeleitet wurden.*

Für die Ableitung sozioökonomischer Indikatoren standen zu wenige qualitative Informationen zur Verfügung, bzw. die untersuchten Stadtteile bilden in sich zu homogene Bevölkerungsschichten ab, um physische Strukturen sinnvoll mit diesen Komponenten zu korrelieren. Im ökologischen Bereich – Indikatoren wie z. B. Wasserreservoirs sind relativ einfach detektierbar - erscheint die Fernerkundung als ein wichtiger Baustein zur Vulnerabilitätsabschätzung, spielt aber im konkreten Fall des urbanen Raumes nur eine untergeordnete Rolle. Schließlich lässt sich aus den gewonnenen Erkenntnissen schließen, dass die abgeleiteten räumlichen Informationen Entscheidungsträger substantiell unterstützen können. Damit könnte die Vulnerabilitätsanalyse indirekt Einfluss auf die politische Komponente gewinnen.

Im Hinblick auf die Abbildung ermittelter Vulnerabilitätsindikatoren, sowie den Indikatoren zur Sekundärgefährdung, wird in dieser Arbeit eine konstante räumliche Einwirkung eines Erdbebenereignisses vorausgesetzt. Grund dafür sind fehlende Daten zu seismischen Szenarien sowie zur räumlichen Verteilung von Bodentypen, die aus Fernerkundung nicht abgeleitet werden konnten. Im Bezug auf die Erdbebengefährdung kann die Fernerkundung allerdings Indikatoren zur räumlichen Verteilung potentieller Sekundärgefahren, wie Hangrutschungen oder tsunamigefährdete Areale abschätzen.

■ □ Potential der Fernerkundung

abgeleitete Indikatoren

potentiell noch ableitbare Indikatoren

Konzeptueller Rahmen		Komponenten	Ursachen	Indikatoren / Variablen	Index	
<b>Risiko</b>	<b>Gefährdung</b>	<b>Naturkatastrophen, menschliche Bedrohung, Phänomen</b>	Erdbeben, Vulkanausbrüche, Überschwemmungen, Hangrutschungen, Terroranschläge, etc.	Häufigkeit, Stärke, Eintrittsgeschwindigkeit, <b>räumliche Gefährdung</b> , Wahrscheinlichkeit des Auftretens, Dauer, Zeit	Indizierung der Indikatoren: nicht vorhanden / keine / gering / mittel / hoch	
			Sekundäre Gefährdung: Hangrutschungen, Tsunami, Brände, etc.	<b>Geländehöhe, Hangneigung, Orientierung, Bodentyp</b> , etc.		
	<b>Vulnerabilität</b>	Gefährdungsgrad x Sensitivität Bewältigungspotential	<b>Physische Vulnerabilität (Fragilität)</b>	Lage		<b>Zugänglichkeit, Distanzen</b>
				Strukturelle Gefährdung		<b>Anzahl der Gebäudeeinheiten, Gebäudedichte, Gebäudehöhe, Gebäudematerial, Gebäudetyp, Fragilität der Strukturen, Dachtyp, Alter der Struktur, Urbanisationsrate, Versiegelungsgrad, Freiflächen</b>
				Kritische Infrastruktur		<b>Verkehrsinfrastruktur</b> , öffentliche Verkehrssysteme, Kommunikation, Pipelines, <b>Versorgung</b> , Lifelines, <b>Tragfähigkeit</b>
			<b>Demographische Vulnerabilität</b>	Bevölkerungsstruktur		<b>Gesamtbevölkerung, Bevölkerungsdichteverteilung, Tag- und Nachtverteilung</b> , Altersstruktur, Geschlecht
				Bevölkerungsentwicklung		<b>Bevölkerungswachstum, Migrationsrate</b>
			<b>Soziale Vulnerabilität</b>	Sozialer Status		Bildung, Implementierung von ‚public awareness‘ Programmen, Gesundheit, Soziales Netzwerk, Geschlecht
				Zugang zu und Versorgung mit lokalen Einrichtungen		Krankenhaus, Schule, Feuerwehr, Notunterkünfte
			<b>Ökonomische Vulnerabilität</b>	Finanzielles Einzelpotential		Pro-Kopf-Einkommen, Versicherung, Eigentum, Arbeitslosigkeit
	Staatliches Potential	Lokales Budget, Bruttosozialprodukt, Hilfsprogramme, Inflation, Hilfsorganisationen, Human Poverty Index (HPI)				
	<b>Politische Vulnerabilität</b>	Entscheidungsstrukturen	Politisches System, Frühwarnsysteme, Katastrophenmanagement, Informationsmanagement			
	<b>Ökologische Vulnerabilität</b>	Natürliche Ressourcen	<b>Wasserreservoir, Anzahl Ackerflächen, etc., Waldgebiete</b>			

Tab. 6-1: Das Potential der Fernerkundung und GIS zur Abschätzung von Risiko, Vulnerabilität und Gefährdung

### 6.1.1. Ableitung von Vulnerabilitätsindizes

In Tabelle 6-1 ist deutlich herausgestellt, welche Indikatoren die Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko, Vulnerabilität und Gefährdung beitragen kann. Ziel ist es (vgl. 1.3.) die Komplexität der vielen Resultate zu vereinfachen, und ein Produkt zu generieren, das einen räumlich detaillierten, aber thematisch einfachen Überblick über die vorhandene Situation geben kann, um Entscheidungsträger vor und während eines Desasterereignisses mit räumlichen Informationen entscheidend zu unterstützen.

Die Unterschiedlichkeit der abgeleiteten Indikatoren drückt sich in ihren quantitativen und qualitativen Differenzen (z. B. 35000 Einwohner/km<sup>2</sup> und 2 km Distanz zu Hauptverkehrsachsen) aus. Das bedingt eine einheitliche Skalierung (BOLLIN & HIDAJAT, 2006), um die unterschiedlichen Indikatoren im Bezug auf Vulnerabilität relativ zueinander ins Verhältnis setzen zu können, und damit räumlich vergleichbar zu machen. Dazu werden die Indikatoren auf einen einheitlichen Vulnerabilitätsindex indiziert, der die thematischen Werte auf Indizes zwischen 0 und 1 transformiert. Das Indexsystem leistet dabei folgenden Mehrwert:

- eine Systematisierung und Harmonisierung von Informationen zu Risiko und Vulnerabilität.
- mittels einheitlicher Skalierung eine vergleichbare Informationsbasis zu schaffen, um räumlich relative Vergleiche innerhalb von urbanen Räumen oder verschiedenen Städten zu ermöglichen.
- eine vergleichbare Informationsbasis aufzubauen, um Änderungen über die Zeit messbar zu machen und damit Effekte von präventiven Maßnahmen zu überwachen.
- die räumliche Identifizierung von Gefährdungsgebieten und ihrer Schlüsselindikatoren, zur Analyse sinnvoller präventiver Maßnahmen.
- die Unterstützung von Entscheidungsträgern mit räumlicher Information, um Risiken und daraus entstehende Notwendigkeiten und Ziele in den politischen Prozess zu integrieren.

Zur Beschreibung von Desasterrisiko sind seit 2004 drei internationale Indizes veröffentlicht worden. Davon sind der Disaster Risk Index (DRI) (UNDP, 2004) sowie das Disaster Risk Hotspots Programm (Columbia Universität und Weltbank) deduktiv, das American Indexing Programme (Nationale Universität von Kolumbien und InterAmerican Development Bank) dagegen induktiv (PELLING, 2006). Deduktiv beschreibt eine Schlussfolgerung vom Allgemeinen auf das Besondere, das heißt in unserem konkreten Fall, die Messung von Vulnerabilität und Risiko ist gefährdungsspezifisch und an diese Daten gebunden. Induktiv impliziert Gegenteiliges, also die Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko basierend auf vorhandenen Datensätzen. Die verwendeten Verfahren stützen sich auf großskalige statistische Analysen basierend auf räumlichen Einheiten wie Länder oder Regionen, die Gefährdungsarten mit allgemeinen Vulnerabilitätsindikatoren, wie Pro-Kopf-Einkommen oder Bevölkerungsdichte, in Abhängigkeit bringen (CARDONA, 2006; DILLEY, 2006; PEDUZZI, 2006).

### 6.1.2. Indizierung der Indikatoren

Die folgende entwickelte induktive Methode stützt sich auf die Indikatoren, die aus Fernerkundungsdaten abgeleitet wurden, deren absolute Werte über ein Indizierungsverfahren in ein relatives Vulnerabilitätsmaß umgerechnet werden. Diese einheitliche Skalierung simplifiziert die komplexen Datenbestände und ermöglicht sowohl Vergleiche zwischen verschiedenen geographischen Gebieten als auch über die Zeit.

Im Folgenden wird die exemplarische Parametrisierung von Vulnerabilitätsindikatoren aus Fernerkundungsprodukten aufgezeigt. Für die Parametrisierung der Indikatoren ist prinzipiell jede stetige Funktion möglich. Die hier verwendete S-Funktion hat gegenüber einer linearen Funktion den Vorteil, dass die Punkte „nicht vulnerabel = 0“ und „100 % vulnerabel = 1,0“ nie erreicht werden, sondern sich asymptotisch annähern, und damit in Extremwerten ebenfalls noch eine Differenzierung erlauben. Als weitere Anforderung soll die Steigung der S-Funktion keine großen Indexwertunterschiede bei geringen Unterschieden im Wertebereich aufweisen, was durch einen flachen Kurvenanstieg umgesetzt wird. Am Wendepunkt der Kurve, also am Indexwert 0,5, steht je nach Indikator ein Wert, der im Bezug auf die Vulnerabilität den Übergang zu einem kritischen Punkt markiert. Mathematisch ausgedrückt stellt sich die S-Kurvenfunktion folgendermaßen dar (6-1), wobei die Steigung der S-Funktion von der Wahl der Variable  $a$  abhängig ist:

$$(6-1) \quad P(t) = \frac{1}{1 + e^{(a \times (-t))}}$$

Somit ist mittels einer normierten Berechnung der Vulnerabilitätsindizes gewährleistet, dass auch sehr gegensätzliche urbane Räume basierend auf derselben Skala verglichen werden können.

Der Parameter ‚Gebäudedichte‘ (vgl. 5.1.) gibt grundsätzlich Aussage über die räumliche Verteilung der Quantität potentiell gefährdeter Strukturen im urbanen Raum. Der Parameter ‚Distanz zu Hauptverkehrsachsen‘ (vgl. 5.5.) gilt als räumliche Aussage über die Erreichbarkeit von Orten im urbanen Raum. Für jeden Indikator sind vier beschreibende Klassen aus Fernerkundungsdaten abgeleitet. Die Gebäudedichte ist durch ‚Freiflächen‘, ‚gering verdichtet‘, ‚mittel verdichtet‘ und ‚hoch verdichtet‘ charakterisiert, wobei jede Fläche auch einen Klassifikations-

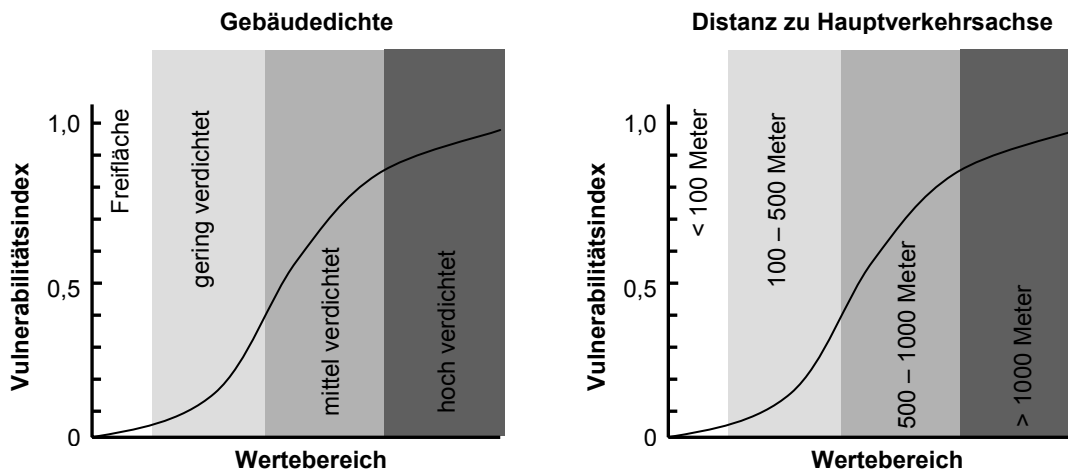


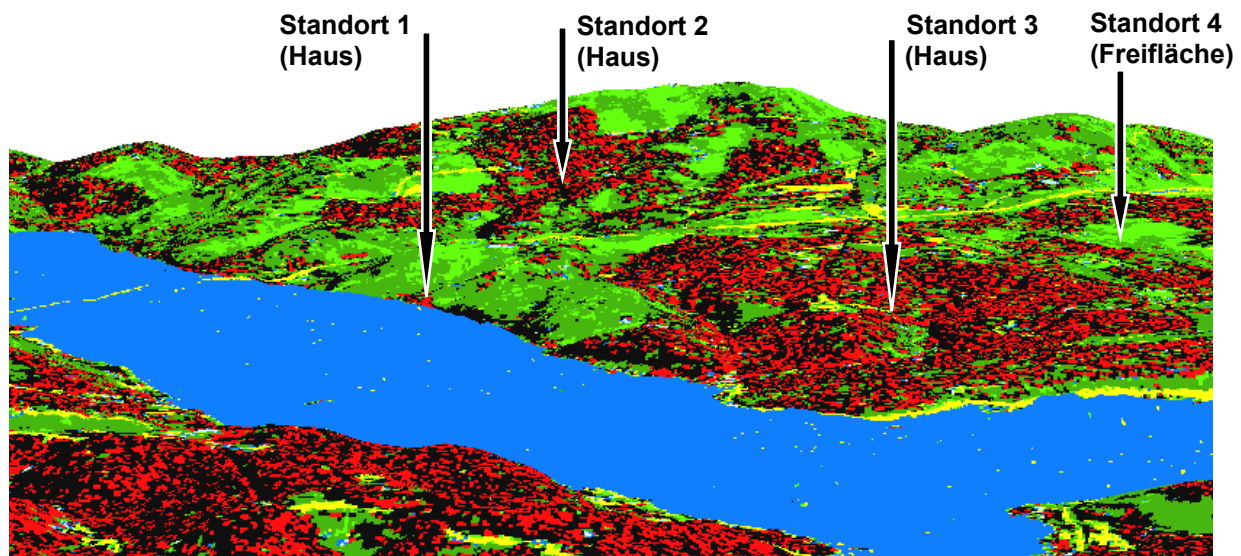
Abb. 6-1: Parametrisierung von Vulnerabilitätsindikatoren für eine einheitliche Skalierung

dichtewert aufweist. Als Beispiel kann ein mittel verdichtetes Gebiet Gebäudedichten von 30 – 50 % aufweisen, was sich in seinem Vulnerabilitätsindex von 0,35 bis 0,75 auswirken kann. Analog verhält es sich bei dem Indikator ‚Distanz zu Hauptverkehrsachsen‘. Abbildung 6-1 zeigt nun die einheitliche Parametrisierung zweier unterschiedlicher Indikatoren auf den einheitlichen Vulnerabilitätsindex abgebildet auf der Y-Achse.

Die Kombination beider Indikatoren drückt den synergetischen Mehrwert dieser räumlichen Informationen aus. Eine Freifläche in 500 Meter Distanz zur Hauptverkehrsachse weist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine wesentlich höhere Zugänglichkeit als ein hoch verdichtetes Gebiet in gleicher Distanz nach einem Erdbeben auf. Damit ist die Kombination beider Indikatoren essentiell, um Vulnerabilität in seiner räumlichen Verteilung abbilden zu können. Die weiteren Vulnerabilitätsindikatoren aus Fernerkundungsdaten werden analog zu diesen exemplarisch vorgestellten Indikatoren indiziert. Daraus ergibt sich eine Reihe einheitlich skaliertes und damit vergleichbarer Vulnerabilitätsindizes.

### 6.1.3. Kombination der Vulnerabilitätsindizes

Die einzelnen Vulnerabilitätsindizes jedes Indikatoren können als räumliche Informationsebenen abgebildet werden. Das ermöglicht die genaue Detailanalyse von Einzelindikatoren, wird aber dem ganzheitlichen Konzept von Vulnerabilität und Risiko nicht gerecht. Zu diesem Zweck können die errechneten Vulnerabilitätsindizes wie in Abschnitt 3.2. vorgestellt, kombiniert werden. Abbildung 6-2 zeigt exemplarisch vier räumlich verteilte Standorte im Stadtviertel Üsküdar. Die Standorte 1-3 bilden jeweils ein Haus ab, während Standort 4 eine Freifläche repräsentiert. Anhand dieser Beispiele wird die methodische Herangehensweise zur Kombination aus Fernerkundungsdaten ermittelter Vulnerabilitätsindizes aufgezeigt.



**Thematische Klassen:**

■ Gebäude ■ Schatten ■ Wiesen ■ Bäume/Büsche ■ Straßen ■ Wasser

Abb. 6-2: Vulnerabilitätsabschätzung für vier Beispielsstandorte in Üsküdar



Im Folgenden listet Tabelle 6-2 die für alle vier Standorte parametrisierten Vulnerabilitätsindizes vorhandener Informationsebenen auf. Damit können Einzelindikatoren direkt räumlich miteinander verglichen werden, die Parametrisierung bildet aber gleichzeitig die Basis zur Kombination der Indikatoren. Die Kombination der Indizes wird mittels Gleichung 3-2 aus Abschnitt 3.2. verwirklicht:

$$(6-2) \quad \text{Vulnerabilitätsindex} = \frac{1}{n_i} \times \sum_{j=1}^{n_i} (f \times V)$$

$n_i$  = Anzahl der vorhanden Variablen

$V$  = Indexwert einer Variablen (von 0 bis 1)

$f$  = Gewichtungsfaktor für eine individuelle Variable (von 0 bis 1)

Zusätzlich werden Faktoren eingeführt, um Indikatoren nach ihrer Wichtigkeit zu bewerten. Die zentrale Gefahr im Falle eines Erdbebens für die Bevölkerung geht von Gebäudestrukturen aus (BAKIR & BODUROGLU, 2002). Diesem Fakt wird mit einem vierfachen Gewichtungsfaktor für klassifizierte Häuser in der Landbedeckungsklassifikation ( $L_b$ ) Rechnung getragen. Objekt der Gefährdung durch den zentralen Indikator „Gebäudestrukturen“ sind die dort lebenden Menschen. Aus diesem Grund wird auch der Bevölkerungsdichte ( $B_{T/N}$ ) eine 4-fache Gewichtung zu Teil. Der Grund für das Gewichtungsmaß beruht auf einer mathematischen Überlegung: Freiflächen sollen auch bei maximaler Vulnerabilität der nicht-gebäudebezogenen Indikatoren keine höhere Vulnerabilität als bebauten Areale aufweisen können. Daraus ergibt sich für die exemplarischen Standorte aus Abbildung 6-2 folgende Gleichung (6-3).

$$(6-3) \quad \text{Vulnerabilitätsindex} = \frac{1}{14} \times (4 \times L_b + G_d + G_h + D_v + D_f + U + A_G + 4 \times B_{T/N})^*$$

\*Die Bezeichnungen der Variablen bzw. Indikatoren finden sich in Tabelle 6-2

Bei der Kombination der Indikatoren muss darauf geachtet werden, redundante Informationen vorher zu eliminieren. Die im Folgenden aufgeführten Indikatoren sind im Vergleich zu den 24 Indikatoren aus Tabelle 6-1, auf die für ein Stadtviertel relevanten und dabei nicht redundanten Indikatoren reduziert. Die Prüfung der Redundanz ergibt sich in dieser Arbeit aus dem Kontext. So wird angenommen, dass die Klasse ‚Haus‘ aus der Landbedeckungsklassifikation mit der Gebäudedichte keine Redundanz aufweist, da ein Haus in einem hoch verdichteten Gebiet im Vergleich zu einem gering verdichteten Gebiet, auf Grund geringerer Zugänglichkeit eine höhere Vulnerabilität aufweist. Ebenso weist die Bevölkerungsdichte im Tagesverlauf nur bedingt eine Korrelation zur Gebäudedichte auf, da ein hoch verdichtetes Gewerbegebiet von tagsüber bis zu 20000 Einwohnern pro km<sup>2</sup> bis zu weniger als 1000 Einwohnern pro km<sup>2</sup> in der Nacht schwankt. Ebenso verhält es sich mit allen gebäudespezifischen Parametern, sowie mit den Distanzparametern.

Allerdings wird die Kombination der Indikatoren jeweils separat für die Tages- oder Nachtzeit berechnet, um die Dimension Zeit abbilden zu können. Tabelle 6-2 zeigt nun die Kombination von 11 Vulnerabilitätsindikatoren, abgeleitet mit Fernerkundungsmethoden. Die Einfärbung der Vulnerabilitätsindizes zeigt dabei gleichzeitig die Schlüsselindikatoren der jeweiligen Standorte auf.

Vulnerabilitätsindikator	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Standort 4
Landbedeckung ( $L_b$ )	1,00	1,00	1,00	0,00
Gebäudedichte ( $G_d$ )	0,57	0,64	0,87	0,00
Gebäudehöhe ( $G_h$ )	0,25	0,25	0,50	0,00
Distanz zu Verkehrsinfrastruktur ( $D_v$ )	0,28	0,34	0,81	0,18
Distanz zu Freiflächen ( $D_f$ )	0,15	0,29	0,77	0,00
Urbanisationsraten (U)	0,10	0,50	0,10	0,00
Alter der Gebäude ( $A_G$ )	0,75	0,25	0,75	0,00
Bevölkerungsdichte (Tag) ( $B_T$ )	0,16	0,22	0,44	0,00
Bevölkerungsdichte (Nacht) ( $B_N$ )	0,44	0,54	0,85	0,00
<b>Vulnerabilitätsindex (Tag)</b>	<b>0,48</b>	<b>0,51</b>	<b>0,68</b>	<b>0,01</b>
<b>Vulnerabilitätsindex (Nacht)</b>	<b>0,56</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>	<b>0,01</b>
Hangneigung (H)	0,65	0,43	0,05	0,15
Tsunamigefährdung (T)	0,82	0,00	0,01	0,00
<b>Risikoabschätzung (Tag)</b>	<b>0,51</b>	<b>0,46</b>	<b>0,60</b>	<b>0,02</b>
<b>Risikoabschätzung (Nacht)</b>	<b>0,58</b>	<b>0,55</b>	<b>0,70</b>	<b>0,02</b>

Vulnerabilität: ■ sehr hoch ■ hoch ■ mittel ■ gering ■ gering bis keine

Tab. 6-2: Kombination der parametrisierten Vulnerabilitätsindizes von vier Beispielsstandorten

Da die Einwirkung eines Erdbebens als räumlich gleich verteilte Hauptgefährdung angenommen wird, spielt neben der Vulnerabilität, die Abschätzung der Sekundärgefahren die entscheidende Rolle. Die Parameter ‚Hangneigung‘ (H) und ‚Tsunamigefährdung‘ (T) sind innerhalb des Risikokonzeptes im Bereich Gefährdung angesiedelt, werden aber gleichermaßen analog zu den Vulnerabilitätsindikatoren indiziert. Somit können Vulnerabilität und Gefährdung separat betrachtet werden bzw. in der Kombination das Risiko abbilden. Die Verknüpfung von den zur Verfügungen stehenden Indikatoren (Teilaspekten) der Bereiche Vulnerabilität und Gefährdung erfolgt analog zu den oben gezeigten Methoden zur Indizierung:

$$(6-4) \text{ Risikoindex} = \frac{1}{3} \times (\text{Vulnerabilitätsindex} + H + T)$$

Damit ermöglicht man, das Risiko, die Vulnerabilität und die Gefährdung sowohl getrennt voneinander als auch kombiniert zu betrachten. Die Auflistung der indizierten Vulnerabilitäts- und Gefährdungsindikatoren der vier betrachteten Beispielsstandorte in Üsküdar zeigt das Potential zur Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzung (Tab. 6-2).

Grundsätzlich weist das Stadtviertel Üsküdar im tageszeitlichen Verlauf eine höhere Vulnerabilität sowie ein höheres Risiko zur Nacht auf. Dafür ist die höhere Bevölkerungsdichte zu dieser Zeit verantwortlich. Fokussiert man auf die Analyse der Vulnerabilität, zeigen die ersten

drei Standorte ‚Häuser‘, und damit eine grundsätzliche hohe Vulnerabilität im Vergleich zu Standort 4, der eine Freifläche abbildet. Die fehlende strukturelle Vulnerabilität zeichnet sich für den geringen Vulnerabilitätsindex verantwortlich.

Standort 3 weist als hoch verdichtetes, schlecht zugängliches Gebiet mit hoher Bevölkerung die höchste Vulnerabilitätsstufe auf. Mittels dieser Tabelle lässt sich nicht nur die Vulnerabilität verschiedener Orte im komplexen urbanen Raum vergleichen, sondern sie ermöglicht auch die Identifikation von Schlüsselindikatoren. So kristallisieren sich bei Standort 3 beispielsweise als Schlüsselindikatoren für die hohe Vulnerabilität, die hohe Gebäudedichte, die große Distanz zur Hauptverkehrsinfrastruktur sowie die hohe Bevölkerungsdichte heraus.

Interessant ist die Verschneidung der Vulnerabilität mit den Sekundärgefahren der jeweiligen Standorte. So weist Standort 2 eine höhere Vulnerabilität als Standort 1 auf. In Kombination mit den Sekundärgefahren allerdings, zeigt das Risiko eine konträre Veränderung. So zeichnet sich Standort 1 vor allem durch seine exponierte Hangneigung und Tsunamigefährdung aus, während Standort 3 dafür keine Gefährdung aufweist. Daraus ergibt sich für ein Gebiet geringerer Vulnerabilität trotzdem ein höheres Risiko.

Das Resultat sind also vier Vulnerabilitätsindizes für die vier verschiedenen urbanen Standorte, sowie die Einschätzung des zeitlichen Verlaufes der Vulnerabilität zwischen Tag- und Nacht. Mit dieser induktiven Methode zeigt sich das Potential zur Abschätzung von Teilaspekten des ganzheitlichen Konzeptes von räumlicher Vulnerabilität und Risiko mittels Fernerkundungsdaten. Die Kombination der Indikatoren mittels Indizierung unterliegt einer gewissen Subjektivität, ermöglicht dafür aber räumliche Vulnerabilitäten relativ zueinander abzubilden, und damit der Frage nach dem „Wo“ und der „Art“ präventiver Maßnahmen nachzugehen. Gleichzeitig gibt die Klassifikation von Vulnerabilitätsindizes von Einzelindikatoren Aufschluss über die Schlüsselindikatoren, die für die Vulnerabilität bzw. das Risiko eines Standortes verantwortlich sind.

## **6.2. Interdisziplinärer Ansatz mit Fernerkundung und Bauingenieurwesen**

Fernerkundung stellt eine Forschungsdisziplin zur Ableitung von Indikatoren für das holistische Konzept von Risiko, Vulnerabilität und Gefahr dar. Die vorherigen Kapitel und Abschnitte zeigen deutlich das Potential dieser Disziplin auf, es werden aber auch die Grenzen bei der Vulnerabilitätsabschätzung der abgeleiteten Indikatoren deutlich. Ein interdisziplinärer Ansatz ermöglicht die synergetische Verwendung fernerkundlich ermittelter Strukturdaten mit Methoden aus einer anderen Forschungsrichtung.

Die Schadensanfälligkeit von Strukturen wird vorwiegend durch gebäudespezifische Eigenschaften bestimmt. Im Hinblick darauf wird im Folgenden versucht, fernerkundliche Resultate mit Methoden des Bauingenieurwesens zu verknüpfen, um statt einer quantitativen Abschätzung einzelner gebäudebezogener Parameter, eine quantitative Schadensanfälligkeit der Strukturen errechnen zu können. Die bisherigen Methoden des Bauingenieurwesens nutzen zur Erhebung von Daten die Geländebegehung, die sehr zeit- und kostenaufwendig ist, sowie das Auswerten von Konstruktionsplänen, die gerade in Schwellen- oder Entwicklungsländern selten vorhanden sind.

Die enorme Dynamik und das Ausmaß urbaner Räume in Entwicklungs- und Schwellenländern benötigt allerdings neuere Methoden, um eine aktuelle Informationsbasis zu Gebäudeparametern bereitstellen zu können. Hintergrund dieses Konzepts ist die nutzbringende Verwendung der Fernerkundungsmethoden, um aktuelle und flächendeckende Parameter zu Gebäuden ableiten zu können, um weiterführend mittels eines interdisziplinären Ansatzes Synergieeffekte, in Form einer Abschätzung von zu erwartender Gebäudestabilität im Falle eines Erdbebens, zu aktivieren.

### 6.2.1. Einteilung von Gebäudeklassen

Die Klassifikation des Gebäudebestandes nach physischen Charakteristiken zielt auf eine Typisierung der Gebäude nach deren zu erwartendem Verhalten bei Erdbeben (BOMMER ET AL., 2002; CROWLEY ET AL., 2004). Als zuverlässige Parameter haben sich in vergangenen Studien Gebäudeeigenschaften wie Konstruktionstyp und -material, Alter und Höhe herausgestellt (ATC 13, 2006). Weitere bestimmende Indikatoren, die eine detailliertere Bestandsaufnahme der Struktur voraussetzen, sind beispielsweise das Vorhandensein von so genannten weichen Geschossen, kurzen Stützen, oder die Veränderung des Grundrisses über die Höhe. Die Verwendung von Fernerkundungsmethoden ermöglicht ein hohes Detail an räumlichen Informationen über den aktuellen Gebäudebestand, erfüllt aber nicht alle Parameteranforderungen zur Abschätzung von Gebäudevulnerabilität. So lassen sich mit fernerkundlichen Methoden die Standorte der Gebäude (vgl. 4.1.3.) räumlich erfassen und diese in Gebäudeklassen unterteilen. Diese Differenzierung geschieht mittels der Gebäudeeigenschaften ‚Alter‘ (vgl. 5.6.), ‚Höhe‘ (vgl. 5.2.) und indirekt über die statistische Korrelation des Dachtyps (vgl. 5.3.) mit dem Konstruktionstyp bzw. dem Baumaterial.

Das Alter einer Konstruktion spielt eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der Schadensanfälligkeit. Ein unterschiedliches Verhalten im Falle eines Erdbebens lässt sich häufig auf die Anwendung unterschiedlicher Normen beim Bau zurückführen. Frühere Studien (AYDINOGLU & ERDIK, 2002) zeigen, dass die Aufteilung in zwei Klassen eine sinnvolle Klassifizierungsmöglichkeit für den Gebäudebestand in Istanbul ist: Prä 1979 und post 1980. Eine Neueinführung einer Erdbebennorm in der Türkei ab 1975 und die schrittweise Umsetzung dieser, erklären diese Einteilung.

Die Klasseneinteilung der Gebäudehöhe aus Fernerkundungsdaten in dieser Arbeit basiert auf den Einteilungen bereits durchgeführter Studien (ATC 40, 1997). Die Gebäudehöhe steht in direktem Zusammenhang mit dem Schwingungsverhalten der Struktur. Des Weiteren kann durch Auswertung der Daten, die

Kürzel	Stockwerke	Höhe [m]
n	1 – 3	$0 < h \leq 10,5$
m	4 – 7	$10,5 \leq h < 22,5$
h	8+	$22,5 \leq h$

Tab. 6-3: Gebäudehöhenklassen

nach dem Izmit Erdbeben von 1999 aufgenommen wurden, ein indirekter Zusammenhang in Bezug auf die Qualität der Struktur erkannt werden. So sind tendenziell Gebäude mittlerer Höhe stärker schadensanfällig als hohe Strukturen. Hintergrund hierfür ist die Tatsache, dass niedrige Gebäude oft nachträglich mit weiteren Geschossen beaufschlagt werden, die in der Statik (falls überhaupt vorhanden) nicht vorgesehen waren. Diese in besonderem Maße schadensanfälligen Bauwerke erhöhen die Vulnerabilität der 4-7 Stockwerke hohen Gebäude, wel-

che schon durch die schlechte Qualität der Gebäude mittlerer Höhe, oftmals statisch bedenklich errichteten Gebäude mit Stahlbetonrahmen und Mauerwerksausfachung vorbelastet sind.

Der Dachtyp ist kein direktes Indiz auf die Schadensanfälligkeit einer Struktur. Durch statistische Auswertung von Katasteramtinformationen und Gebäudedaten, die durch Vor-Ort-Begehung gesammelt wurden, lässt sich die Form des Daches jedoch als indirekter Indikator benutzen, um eine probabilistische Aussage über den Gebäudekonstruktionstyp zu treffen. In dieser Studie wird zwischen Giebel- und Flachdächern unterschieden. Tabelle 6-4 zeigt die exemplarische statistische Auswertung des Material- und Konstruktionstyps niedriger Gebäude mit Flach- bzw. Giebeldächern im Stadtteil Zeytinburnu.

Geschosse	Dachform	Material	Anzahl	%
1-3	Flachdach	Stahlbeton	1312	90,17%
		Stahl	16	1,10%
		Mauerwerk, Sonstige	127	8,73%
1-3	Giebeldach	Stahlbeton	2088	51,45%
		Stahl	127	3,13%
		Holz	14	0,34%
		Mauerwerk, Sonstige	1829	45,07%

Tab. 6-4: Probabilistische Abschätzung des Konstruktionstyps über den Dachtyp

Die Angabe des Konstruktionstyps und –materials hingegen lässt einen Rückschluss auf die Vulnerabilität des Gebäudes zu. Durch die indirekte Bestimmung des Tragwerks werden räumliche Unsicherheiten in Kauf genommen, die aber dafür das tendenzielle Verhalten des gesamten Gebäudebestandes bei einem Erdbeben widerspiegeln.

### 6.2.2. Abschätzung der Gebäudevulnerabilität

Mittels fernerkundlicher Methoden lässt sich die komplexe urbane Morphologie nach physischen Kriterien der vorhandenen Gebäude räumlich unterteilen. Das Vorgehen zur Abschätzung des zu erwartenden Schadens dieser Gebäudetypen im Falle eines Erdbebens beruht auf der Kapazitätsspektrummethode (KSM) aus dem Bauingenieurwesen. Ein kurzer Exkurs zeigt die methodische Herangehensweise des Bauingenieurwesens, um die Korrelation der Ergebnisse beider Disziplinen synergetisch in eine flächendeckende Projektion von Gebäudevulnerabilität auf den urbanen Raum abzubilden (MÜNICH ET AL., 2006). Dabei ist das Ziel, die Wahrscheinlichkeit des Schädigungsgrades verschiedenster Gebäudetypen für eine simulierte seismische Einwirkung abzuschätzen.

Die KSM wurde in den 70er Jahren eingeführt und findet ihre Wurzeln in John A. Blume's „Reserve Energy Technique“ (RET) (FREEMANN, 2004). Die KSM ist ein weit verbreitetes, vereinfachtes, nichtlineares, statistisches Verfahren, zur Abschätzung der zu erwartenden Schäden an Gebäuden. Standardisiert wurde die Kapazitätsspektrummethode für Kalifornien in dem Report ATC 40 des Applied Technology Councils (ATC, 1997). Die vorliegende Arbeit basiert auf der in ATC 40 beschriebenen Methode und berücksichtigt Änderungen, die durch AYDINOGLU & ERDIK (2002) vorgeschlagen wurden, um den landestypischen Unterschieden in Begebenheiten und Bebauung in der Türkei gerecht zu werden. Die Kapazitätsspektrummethode gliedert sich in drei Schritte: im ersten Schritt wird die Einwirkung, also im Fall dieser Studie das seismische Ereignis, ermittelt und zur weiteren Bearbeitung bereitgestellt. Dies

erfolgt in der Angabe des Antwortspektrums (Abb. 6-3). Der zweite Schritt zeigt die Eigenschaften des Gebäudes auf, sich unter Belastung zu verformen (Abb. 6-4), während der dritte und letzte Schritt die Zuordnung zwischen der Verformung und der Wahrscheinlichkeit des zu erleidenden Schadens darstellt (Abb. 6-5).

Den Ausgangspunkt der Kapazitätsspektrummethode stellt ein seismisches Ereignis dar, das eine Bodenanzregung (Weg-Zeit-Verlauf) in Abhängigkeit lokaler Parameter wie Bodentyp sowie Bodenaufbau bewirkt. Diese Einwirkung regt ein System von Einmassenschwingern an, die, gemeinsam betrachtet, ersatzweise für Mehrmassenschwinger (Gebäude) in der Kapazitätsspektrummethode verwendet werden. In Abbildung 6-3 ist

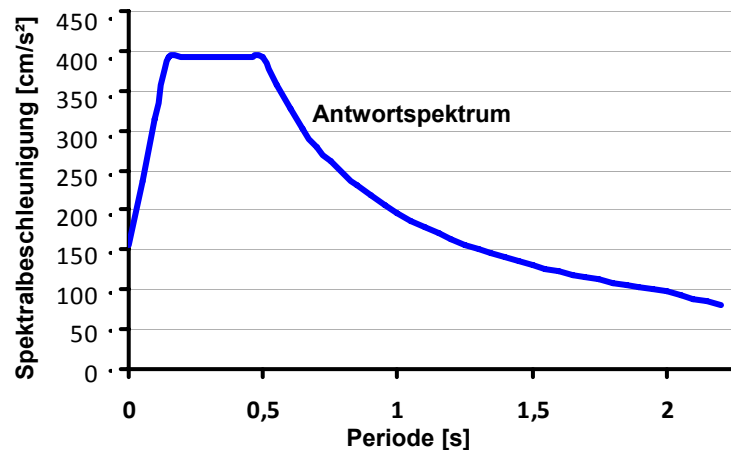


Abb. 6-3: Antwortspektrum

die, durch die seismische Einwirkung erzeugte Beschleunigung der Einmassenschwinger auf der y-Achse aufgetragen. Diese verschiedenen Einmassenschwinger zeigen eigenfrequenzspezifische Auslenkungen. Die maximalen Antwortschwingungen der Einmassenschwinger werden über der Periode (Schwingungsdauer) dargestellt. Die Maximalwerte werden durch eine umhüllende Kurve umrissen – dem Antwortspektrum (BACHMANN, 2002; MÜLLER & KEINTZEL, 1984). Das in dieser Studie zur Verwendung gekommene Antwortspektrum wurde dem Eurocode 8 (EC8) entnommen. Der Eurocode 8 (EC8, 2004) ist eine europäische Normierung zur Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben.

Im zweiten Schritt wird eine Funktion benötigt, die Information enthält, ab welcher Belastung (seismischer Einwirkung) ein Gebäudetyp eine bestimmte Verformung erreicht – die so genannte Kapazitätskurve. Die Kapazitätskurve gibt die globale Beanspruchbarkeit eines Tragwerks wieder, zeigt also die Einwirkung die nötig ist, um eine bestimmte Spektralverschiebung für einen bestimmten Gebäudetyp zu erhalten (Abb. 6-4). Die Spektralverschiebung stellt dabei die relative Auslenkung des Einmassenschwingers über seinem Fußpunkt dar. Die Kapazitätskurven basieren auf den von AYDINOGLU & ERDIK (2002) auf die landestypischen Bauweisen und Konstruktionstypen angepassten Kurven, die ihren Ursprung im ATC 40 finden. In der vorliegenden Arbeit werden Gebäude nach Höhe, Dachaufbau und Form, sowie dem Alter unterschieden. Eine weitere Unterteilung in Konstruktionstyp und -material kann aufgrund der fernerkundlichen Datenermittlung indirekt erfolgen (vgl. Tab. 6-4). Diese Parameter fließen in die Erstellung der verwendeten Kapazitätskurven ein. Abbildung 6-4 zeigt die zur Verwendung gekommenen Kapazitätskurven, abgeleitet aus den Parametern, die mittels fernerkundlicher Analysen raumbezogen bereit gestellt wurden.

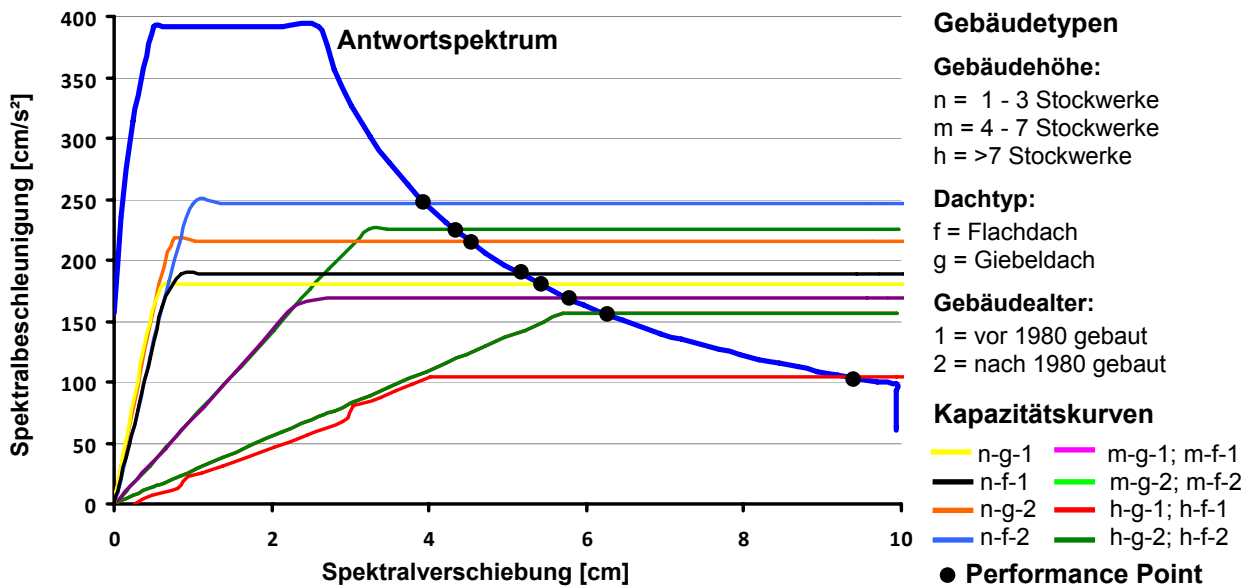


Abb. 6-4: Verschneidung der Kapazitätskurven für aus Fernerkundung ermittelten Gebäudetypen mit dem Antwortspektrum

Die Frequenz (Kehrwert der Periode) im Antwortspektrum kann direkt in die Spektralverschiebung umgerechnet werden (Abb. 6-4). Durch die Überlagerung des Antwortspektrums mit den Kapazitätskurven ist es möglich, den so genannten Performance-Point zu bestimmen. Dies ist in Abbildung 6-4 für die verschiedenen Gebäudetypen abgebildet. Der Performance Point gibt die maximale Spektralverschiebung eines Gebäudetyps für das gegebene Antwortspektrum an. Dadurch lässt sich die maximale Beanspruchung des Gebäudetyps für das angenommene Erdbeben, ermittelt durch den Performance Point, in die Fragilitätskurven übertragen. Dies wird über die Spektralverschiebung in Zentimeter vollzogen, die es ermöglicht, die Korrelation zur Wahrscheinlichkeit des Schädigungsgrades des jeweiligen Gebäudetyps für ein beispielhaftes Erdbeben, abzuleiten (Abb. 6-5).

Die Fragilitätskurven selbst stammen aus dem beobachteten Verhalten unterschiedlicher Gebäudetypen bei einer seismischen Einwirkung in der Vergangenheit (AYDINOGLU & ERDIK, 2002). So kann beispielsweise die ermittelte Spektralverschiebung des Gebäudetyps – höher 7 Stockwerke, Flachdach, vor 1980 gebaut [h-f-1] – von 9,5 cm in die Fragilitätskurven übertragen werden. Diese Übertragung ermöglicht die quantitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Schädigungsgrades dieses Gebäudetyps – in unserem exemplarischen Fall ergeben sich 3 % komplett zerstörte Gebäude, 12,5 % stark zerstörte Gebäude, 11 % moderat geschädigte Gebäude und 42 % gering geschädigte Gebäude und schließlich 31,5 % nicht betroffene Gebäude. Die finale Kurve entsteht aus einer Quantifizierung der jeweiligen Schadensgrade (Abb. 6-5).

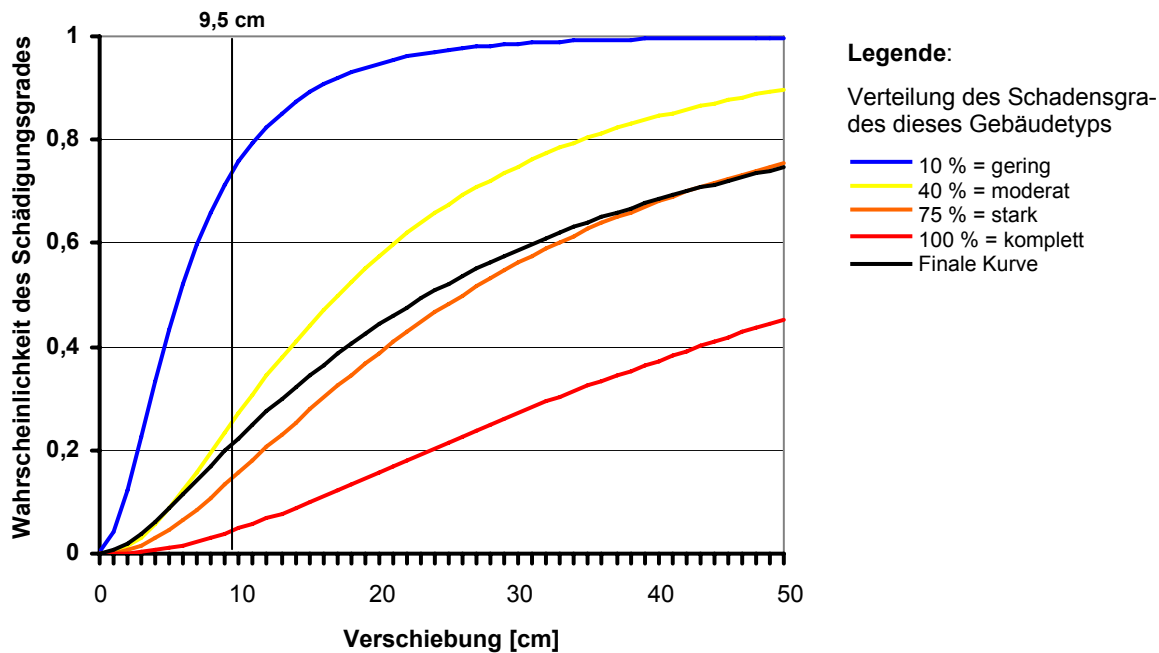


Abb. 6-5: Fragilitätskurven für den Gebäudetyp: höher 7 Stockwerke, Flachdach, vor 1980 gebaut [h-f-1]

Die Wahrscheinlichkeit des Schädigungsgrades kann mittels der Gebäudeklassifizierung aus Fernerkundungsdaten in die Fläche projiziert werden (Abb. 6-6a) und zeigt deutlich die räumliche Verteilung von Gebäudevulnerabilitäten auf. Die finalen Fragilitätskurven aller abgeleiteten Gebäudetypen finden sich im Anhang D (Abb. D-9). Anders als durch die qualitative Einschätzung mit rein fernerkundlichen Methoden, erlaubt der interdisziplinäre Ansatz nun die quantitative Abschätzung der Vulnerabilitäten des Gebäudebestandes, sowie den entstehenden physikalischen Schaden für ein gegebenes Erdbeben. Die Genauigkeit dieser interdisziplinären Methode ist in hohem Maße von der Genauigkeit von den Eingangsparametern abhängig. Die aus Fernerkundung abgeleiteten physischen Gebäudeparameter weisen durchwegs hohe Genauigkeiten auf (vgl. Kapitel 4 und 5). Zusatzdaten über die räumliche Verteilung vorhandener Bodentypen und daraus errechnete seismische Einwirkungen, lassen eine räumliche Präzisierung dieser Vulnerabilitätsabschätzung der Gebäudestrukturen erwarten.

### 6.3. Ergebnisse

Das Ergebnis zur Erfassung der Vulnerabilität mittels fernerkundlicher sowie interdisziplinärer Methoden lässt sich räumlich für das Beispiel Zeytinburnu abbilden. Dafür wird, wie oben bereits erwähnt, eine konstante räumliche Erdbebeneinwirkung für das Stadtviertel angenommen. Als Resultat ergeben sich thematisch vier räumliche Informationsebenen zur Analyse von Vulnerabilität und Gefährdung. Aus den fernerkundlich ermittelten Gebäudeparametern errechnet sich mit Methoden des Bauingenieurwesens die räumliche Verteilung von Gebäudevulnerabilität (Abb. 6-6a). Die Kombination der Lageparameter zeigt die standortbedingte Vulnerabilität basierend auf Zugänglichkeit oder Sekundärgefährdung (Abb. 6-6b). Schließlich ermöglicht die Bevölkerungsdichte eine genaue Abschätzung über die Lage und Quantität betroffener Menschen zu unterschiedlichen Tageszeiten (Abb. 6-6c und 6-6d). Abbildung 6-6 macht also auf den ersten Blick die relative räumliche Verteilung hoch vulnerabler sowie siche-



rer Gebiete im Stadtviertel, sowie deren tageszeitliche Veränderung sichtbar. Durch die Potentiale zur Lokalisierung dieser verschiedenen räumlichen Informationen im komplexen urbanen Gefüge, kristallisieren sich Art und Ort potentieller präventiver Maßnahmen heraus, aber auch geeignete Hilfsmaßnahmen während und kurz nach einem Desaster.

Die räumliche Verteilung der Gebäudevulnerabilität stellt eine Informationsebene dar, die Entscheidungsträgern Informationen zu Anzahl und Lage der Strukturen und deren wahrscheinlichem Schädigungsgrad bei einer Erdbebeneinwirkung bietet. Als besonders vulnerabel zeigen sich die großen Werk- und Lagerhallen der Gewerbegebiete, sowie mittel hohe Wohngebäude, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nachträglich erhöht wurden. Viele neu gebaute Hochhäuser dagegen bilden sich als zuverlässige und stabile Konstruktionen ab. Damit können Prioritätsgebiete für eine nachträgliche Verstärkung der Konstruktion lokalisiert werden und gezielt in präventive Maßnahmen umgesetzt werden. Gleichzeitig aber dient diese Information dazu, während eines Desasterereignisses die Anzahl der betroffenen Häuser einzuschätzen, was eine Abschätzung der Anzahl und Lage der betroffenen Menschen ermöglicht, und eine Quantifizierung benötigter Hilfsmaßnahmen zulässt.

Zusätzlich stehen Informationen über die Zugänglichkeit innerhalb der komplexen urbanen Landschaft zur Verfügung. Der im Hinblick auf die Lage errechnete Vulnerabilitätsindex, bildet zwei großflächige, zusammenhängende Areale mit geringer standortbezogener Vulnerabilität ab. Zum einen im Nordwesten und zum anderen im Osten Zeytinburnus weisen beide Freiflächen eine hohe Zugänglichkeit mit sehr geringer Sekundärgefährdung auf, und stellen daher potentielle Evakuierungsflächen im Desasterfall dar. Konträr dazu kristallisieren sich als standortbezogen hoch vulnerabel, hoch verdichtete Gebiete mit schlechter Zugänglichkeit zu Hauptverkehrsachsen sowie großen Distanzen zu den Freiflächen heraus. Vor allem im Straßengewirr des südlichen Wohngebietes zeigen viele Gebiete diese negativen Standortfaktoren und verstärken die physische Vulnerabilität.

Bei der Bevölkerung weist Zeytinburnu im innerstädtischen Vergleich zu Üsküdar eine höhere Dichte, und damit in diesem Hinblick grundsätzlich eine höhere Vulnerabilität auf Distriktebene auf. Als weitere Dimension kommt im Bezug auf die Vulnerabilität die Zeit ins Spiel, die für die räumliche Verteilung der urbanen Bevölkerung ausschlaggebend ist. So weist Zeytinburnu als Viertel mit vielen arbeitsplatzbedingten Einpendlern, konträr zu Üsküdar, einer Schlafstadt, eine höhere Tag- als Nachtbevölkerung auf. Zusätzlich ist die räumliche Verteilung der Bevölkerung innerhalb des Stadtviertels selbst entscheidend. So zeigt der zeitliche Gegensatz in Zeytinburnus Gewerbegebieten mit um die 1000 Ew/km<sup>2</sup> nachts zu tagsüber mit etwa 20000 Ew/km<sup>2</sup> drastische Differenzen und damit für die Abschätzung der Situation im Falle eines Desasters elementare Veränderungen.

Abbildung 6-6 zeigt nun also die vier verschiedenen thematischen Informationsebenen im Stadtteil Zeytinburnu zur räumlichen und zeitlichen Abschätzung von Vulnerabilität und Risiko basierend auf Fernerkundungsdaten. Für den markierten Ausschnitt wird im Anschluss exemplarisch ein Szenario gezeigt, wobei dafür konkrete Zahlen zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen errechnet werden.

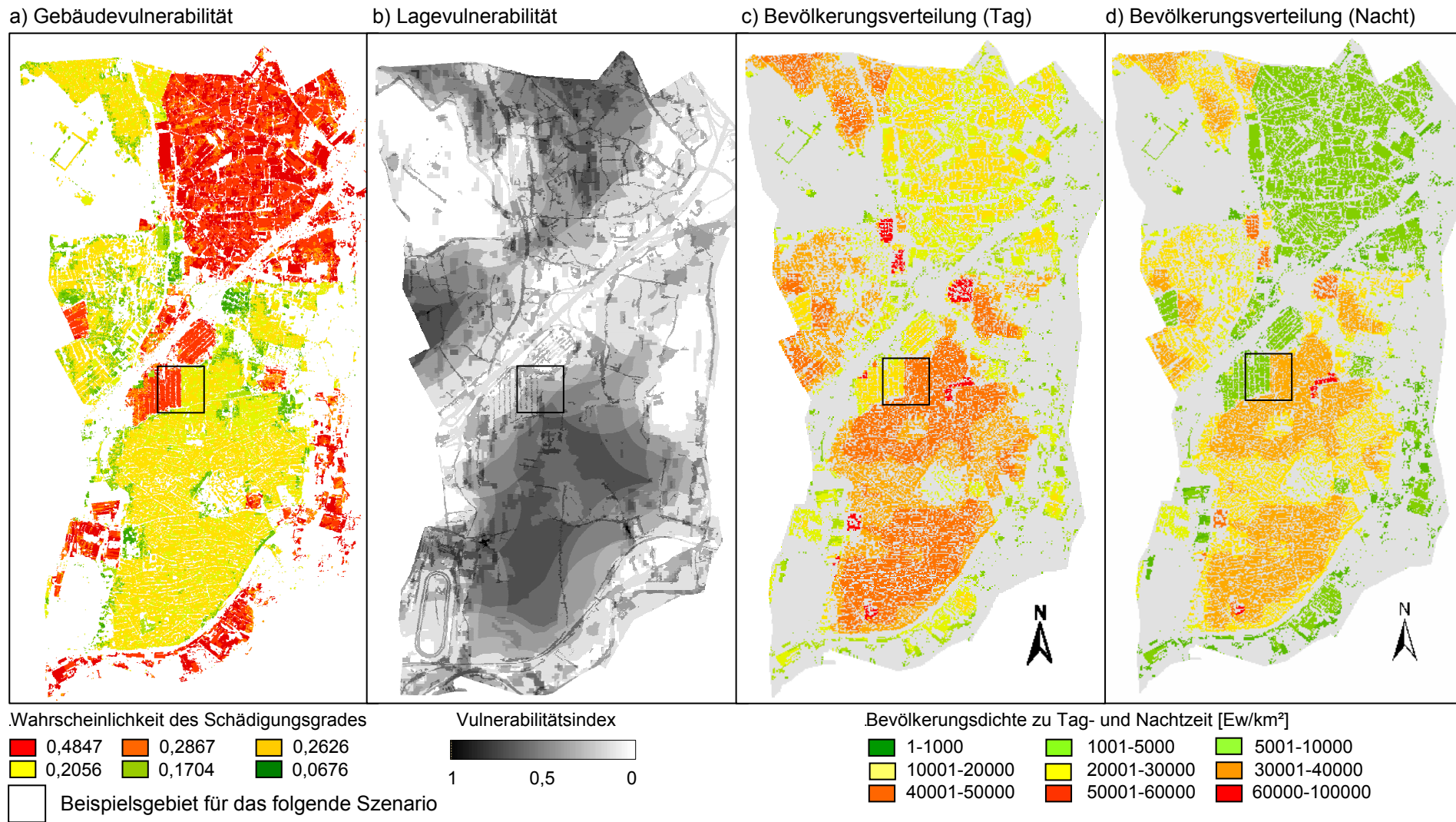


Abb. 6-6: Informationsebenen zur räumlichen Abschätzung von Vulnerabilität

## 6.4. Szenario

Das für die Gebäudevulnerabilität oben angenommene Erdbeben mit konstanter Einwirkung, dient zur Entwicklung eines konkreten Szenarios für ein Teilgebiet in Zeytinburnu (Abb. 6-7). Das Potential der Informationsebenen für das Katastrophenmanagement zeigt sich in der exemplarischen Analyse des gekennzeichneten Ausschnitts von 500 x 500 Meter. Aus den entwickelten Methoden ergeben sich konkrete, raumbezogene Informationen zu den Landnutzungstypen, zu der Anzahl an Häusern, zu den ermittelten wahrscheinlichen Schädigungsgraden der Häuser und zur Tag- und Nachtbevölkerung. Aus den Schädigungsgraden der Häuser sowie der Bevölkerungsdichte lässt sich die Anzahl betroffener Gebäude sowie die Anzahl betroffener Menschen abschätzen. Diese Informationen stellen die Grundlage zur Unterstützung von tageszeitabhängigen Entscheidungen im Disasterfall, bzw. ermöglichen eine quantitative Prognose über raumbezogenes Risiko für Häuser bzw. Menschen (Tab. 6-5):



Abb. 6-7: Teilgebiet in Zeytinburnu zur exemplarischen Szenarioentwicklung

Nutzungs typen	Anzahl Häuser	Schädigungs grad	Betroffene Häuser	Bevölkerung		Betroffene	
				Tag	Nacht	Tag	Nacht
Wohngebäude	410	20,56 %	<b>84,30</b>	6250	5350	<b>1285</b>	<b>1097</b>
Gewerbegebiet	81	48,47 %	<b>39,26</b>	2100	295	<b>1018</b>	<b>143</b>

Tab. 6-5: Informationsübersicht für ein Erdbebenszenario in einem Beispielsgebiet

Diese Informationen mit räumlichem Bezug zeigen explizit die Quantität betroffener Häuser. Für die Art und Anzahl von Hilfsmaßnahmen zeichnet sich in erster Linie die Tageszeit verantwortlich. So sind am Tag in diesem Gebiet 2303 Menschen im Vergleich zu 1240 in der Nacht betroffen. Des Weiteren zeigt sich eine räumliche Verschiebung der Vulnerabilität. So sind die Betroffenen tagsüber zwischen Wohn- und Gewerbegebieten recht gleichmäßig verteilt, nachts dagegen ist das Gros der Betroffenen in Wohngebieten zu finden. Diese Informationsgrundlage ist die Basis für die richtige Einschätzung der Quantität von geeigneten Hilfsmaßnahmen.

Zu diesen zentralen Informationen stehen noch Daten zur Lage dieses Teilgebietes zur Verfügung. Die Kombination der Parameter ‚Gebäudedichte‘, ‚Distanz zur Hauptverkehrsachse‘ sowie ‚Distanz zu Freiflächen‘ ergibt einen Überblick über die Zugänglichkeit des Gebietes. Zudem geben die beiden Gefährdungsindikatoren ‚Tsunamirisiko‘ und ‚Hangneigung‘ noch zusätzliche Informationen über potentielle Sekundärgefahren (Tab. 6-6):

Nutzungstypen	Gebäude- dichte	Distanz zu Haupt- verkehrsachse	Distanz zu Freiflächen	Tsunami- risiko	Hang- neigung
Wohngebäude	Hoch	300 – 800 m	200-700 m	Nein	bis zu 10°
Gewerbegebiet	Mittel	25 – 550 m	50 – 575 m	Nein	bis zu 9°

Tab. 6-6: Informationsübersicht zur Lage des Beispielsgebietes

Mit diesen Lageparametern lässt sich die Zugänglichkeit des Gebietes einschätzen, und Zugangsrouten ermitteln. Mit dem Wissen über das komplette Stadtviertel lassen sich beispielsweise auch die Distanz zu und die Fläche der geeigneten Freiflächen für Zeltstädte errechnen. Somit stehen dem Entscheidungsträger im Vorfeld der Katastrophe umfangreiche räumliche Informationen zur Verfügung, um über die Art und den Ort präventiver Maßnahmen entscheiden zu können. Zudem lassen sich aus den Ergebnissen im Desasterfall benötigte Hilfsmaßnahmen quantifizieren und damit Einsätze räumlich koordinieren.

## 6.5. Zusammenfassung und Bewertung

Dieses Kapitel listet zu Beginn die Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität auf. Dabei kristallisieren sich physische und demographische Indikatoren als der Fokus heraus, denen Limitierungen in sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Teilaspekten gegenüber stehen. Des Weiteren entwickelt dieses Kapitel eine Methode zur Kombination der vielfältigen Informationsebenen aus Fernerkundungsdaten zur räumlichen Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität. Mittels Indizierung werden die Indikatoren einheitlich skaliert, und damit kombinierbar sowie räumlich und zeitlich vergleichbar gemacht. Dabei unterliegt die Indizierung bzw. die Gewichtung der Parameter bei der Kombination allerdings einer gewissen Subjektivität. Trotz der Subjektivität ergibt sich für den Entscheidungsträger ein schneller erster Überblick über die räumliche Verteilung der Brennpunkte im Falle eines Desasters.

Die spezielle Abschätzung von Gebäudevulnerabilität mit Methoden der Fernerkundung erschöpft sich allerdings in der quantitativen Analyse der abgeleiteten physischen Parameter. Diese physischen Parameter von Gebäuden korrelieren nicht linear mit Vulnerabilität, wodurch eine quantitative Abschätzung der Gebäudevulnerabilität große Unsicherheiten birgt. Darüber hinaus ermöglicht die synergetische Anwendung einer interdisziplinären Methode aus Fernerkundung und Bauingenieurwesen eine quantitative Abschätzung der Gebäudevulnerabilität. Mittels einer Gebäudetypisierung mit Fernerkundungsmethoden werden Fragilitätskurven mit der Kapazitätsspektrummethode an flächendeckend vorhandene physische Parameter angeglichen. Das Resultat zeigt die lokale Verteilung von wahrscheinlichkeitsbasierten Schädigungsgraden von Gebäuden bei unterschiedlichen Einwirkungen eines Erdbebenereignisses. Im Vergleich zur Red Cross Studie (ERDIK, 2002) steigert sich mittels dieser interdisziplinären Methode das Potential räumlicher Abschätzung der Gebäudevulnerabilität von generalisierten Mittelwertsannahmen eines 500 x 500 Meter Rasters auf Einzelhausebene.

Ein Szenario für ein Beispielsgebiet zeigt exemplarisch die konkreten Informationen zur Unterstützung der Entscheidungsträger im Vorfeld oder während eines Desasterereignisses auf. Die Ermittlung der Genauigkeit der erzielten Abschätzung ist auf Grund fehlender Vergleichsdaten nicht direkt ermittelbar, allerdings zeigen die hohen Genauigkeiten der verwendeten Inputparameter, dass die Tendenzen und Dimensionen von Risiko und Vulnerabilität in ihrem

räumlichen Verhältnis zueinander richtig ermittelt sind. Dabei stellt sich auch die Frage nach der benötigten Genauigkeit. Das verwendete Szenario ermittelt die Zahl betroffener Häuser und Menschen aus den abgeschätzten Vorgaben mathematisch genau, und bedingt dadurch in seiner absoluten Angabe Fehler. Für das Krisenmanagement spielt der hohe, mit Unsicherheit behaftete, Detailgrad der ermittelten absoluten Zahl von 491 betroffenen Häusern und 2303 betroffenen Menschen zur Tageszeit nicht die entscheidende Rolle. Entscheidend ist vielmehr die ungefähre Einschätzung der Tendenz und Dimension, also die Einschätzung ob 500 oder 5000 Häuser mit hoher Wahrscheinlichkeit betroffen sind, bestimmt die Entscheidungen. Dabei bleibt aber anzumerken, dass Vulnerabilität nicht im Sinne der ganzheitlichen konzeptionellen Idee dargestellt wird, sondern induktiv, also bezogen auf die Teilaspekte, die mit den Methoden der Fernerkundung und des Bauingenieurwesens abgeleitet wurden.

Das fernerkundliche Potential zur räumlichen Analyse und der räumlichen Darstellung von Vulnerabilität ermöglicht einen umfassenden Überblick über herrschende Zustände innerhalb der komplexen urbanen Landschaft. So lassen sich mit hoher räumlicher Detaillierung das Risiko und die Vulnerabilität zwischen Gebäuden, Infrastruktureinrichtung und Freiflächen in Abhängigkeit von deren Lage bestimmen. Rekapitulierend zeigen die zusammengefassten Ergebnisse die Fernerkundung in Zeiten rasender urbaner Veränderungen als essentielle Datenquelle, aus der zuverlässig, detailliert und umfangreich räumliche Informationen zur Vulnerabilitätsanalyse abgeleitet werden können.

Diese Informationsbasis besitzt während und vor einem erwarteten Disasterereignis eine hohe Relevanz für das Krisenmanagement, und damit hohen Einfluss bei politischen Entscheidungsprozessen. Die Identifikation von Vulnerabilität nützt aber nur bei einem vorhandenen politischen Willen zur Investition in präventive Maßnahmen, welcher, wie PEDUZZI (2006) im Einleitungssatz dieses Kapitels deutlich herausstellt, selten vorhanden ist. Die Verfügbarkeit dieser Resultate für politische Entscheidungsträger, für Krisenmanager und Hilfsorganisationen sowie für die Bevölkerung selbst, ist daher ein entscheidendes Mittel zur Schulung des Bewusstseins dieser Risiken. Das Ziel muss dabei sein, einen Umdenkprozess von der Reaktion auf ein Disaster auf vorbeugende Maßnahmen einzuleiten.



# Kapitel 7

## Fazit und Ausblick

Dieses Kapitel fasst den inhaltlichen Rahmen dieser Arbeit zusammen und versucht dabei basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, die in der Einleitung (Kapitel 1) aufgeworfenen Fragestellungen zu bilanzieren, zu diskutieren und zu bewerten. Auf den Grundlagen der urbanen Thematik, der Fernerkundung und der Datenbasis (Kapitel 2) aufbauend, gilt die konzeptionelle Idee von Risiko- und Vulnerabilität und das entwickelte Indikatorensystem für urbane Räume (Kapitel 3) als Leitfaden, um die Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung zu identifizieren. Die entwickelten Methoden und Verfahren zur Ableitungen entsprechender Indikatoren aus Fernerkundungsprodukten (Kapitel 4 und 5) führen schließlich zur Abschätzung der Vulnerabilität (Kapitel 6). Aus der gesammelten Beantwortung der zentralen Fragestellungen ergibt sich der Ausblick auf zukünftige Potentiale der Fernerkundung und damit den zukünftigen Forschungsbedarf.

### **7.1. Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung urbaner Räume für die Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität**

Die Fernerkundung bietet, für so dynamisch sich verändernde urbane Räume der Entwicklungs- und Schwellenländer, oft die einzige Quelle aktueller, flächendeckender und relativ kostengünstiger Datengrundlagen. Vor diesem Hintergrund war es das primäre Ziel dieser Dissertation das *Potential und die Limitierungen der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität im urbanen Raum* zu untersuchen. Diesbezüglich haben die Resultate generell gezeigt, dass

- Fernerkundung in urbanen Räumen eine umfangreiche Informationsbasis zur räumlichen Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität beisteuern kann.
- die Potentiale der Fernerkundung im urbanen Raum dabei in der Abschätzung physischer und demographischer Teilaspekten liegen, die Limitierungen

bei sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Teilaspekten zum Vorschein kommen.

Im Folgenden werden die zentralen Fragestellungen aus Abschnitt 1.3., basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen in dieser Arbeit bilanziert, diskutiert und bewertet. Den thematischen Leitfaden dieser Arbeit bildet das entwickelte Indikatorensystem zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität. Im Bezug auf diese Konzeptionalisierung mittels eines Indikatorensystems für urbane Räume lässt sich resümieren, dass

- die abstrakten Überbegriffe ‚Risiko‘, ‚Vulnerabilität‘ und ‚Gefährdung‘ durch Systematisierung auf messbare Indikatoren konkretisiert werden können.
- die Vielzahl an konkreten Indikatoren die ganzheitliche Idee nicht aus allen Perspektiven ausreichend beleuchten kann.
- das holistische Indikatorensystem es ermöglicht, die Potentiale und Limitierungen der Fernerkundung herauszuarbeiten.
- die Systematisierung grundsätzlich für alle Systeme oder Räume gelten kann und nur die Indikatoren nach Bedarf angepasst werden müssen.

Die Fernerkundung bietet zur Ableitung der erarbeiteten Indikatoren umfangreiche Datensätze verschiedenster technischer Details. Um den kleinräumigen Wechsel von Objekten im urbanen Raum mit seinen Details ausreichend erfassen zu können, sind höchst aufgelöste Satellitendaten essentiell. Die neue Generation an höchst auflösenden optischen Sensoren bietet für den urbanen Raum den nötigen Detailgrad, um die kleinräumigen und heterogenen Objekte zu erfassen. Deren Einschränkung im Bereich Abdeckung, sowie deren Verfügbarkeit seit erst etwa 1999 bedingt die Hinzunahmen komplementärer Datensätze. Die Analysen und Resultate dieser Arbeit lassen im Bezug darauf die Schlussfolgerungen zu, dass

- höchst aufgelöste Satellitendaten der IKONOS und Quickbird Sensoren den kleinräumigen Anforderungen des hoch strukturierten urbanen Raumes gerecht werden.
- die mittel aufgelösten Datensätze des Landsat Programmes wichtige komplementäre temporale und gesamtstädtische Übersichtsanalysen ermöglichen.
- die geometrische Auflösung mittel aufgelöster Datensätze den Detailanforderungen urbaner Räume nicht ausreichend gerecht wird, aber in ihrer Dimension und Tendenz richtige Aussagen erlaubt.

Im Hinblick auf die Möglichkeit zur Erschließung des Informationsgehalts der höchst aufgelösten, optischen Satellitendaten hat sich die objektorientierte Bildanalysesoftware eCognition als sehr flexibles und effektives Werkzeug erwiesen. Gerade im Kontext kleinräumiger, heterogener, urbaner Strukturen hat sich die umfangreiche Funktionalität – spektrale-, form-, textur-, kontext- und hierarchiebezogene Parameter – als entscheidende Größe zur robusten und akkuraten Klassifikation herausgestellt. Im Bezug auf den entwickelten modularen Prozessbaum zur Klassifikation der Landbedeckung zeigt sich, dass

- der konzeptionelle Rahmen für verschiedene Sensoren und verschiedene urbane Räume übertragbar ist.



- basierend auf einer akkuraten Bildsegmentierung aussagekräftige Bildprimitive geschaffen werden.
- die fuzzy-basierten Klassifikationsmethoden eine enorme Flexibilität erlauben.
- aufnahme- und raumspezifische Parameter verschiedener Szenen bei Übertragung Anpassungen der Schwellwerte erfordern.
- objektorientierte Verfahren im Vergleich zu pixelbasierten bei höchst und mittel aufgelösten Datensätzen höhere Klassifikationsgüten erzielen.
- die Komplexität des Klassifikationsansatzes einen hohen Wissensstand des Nutzers voraussetzt.
- bei großen Bildausschnitten eine hohe Prozessierungsdauer auftritt.

Die automatisierte Extrahierung der Information weist eine Reihe offensichtlicher Vorteile auf, allerdings oft auf Kosten der Genauigkeit. Die interaktive Kartierung und Datenanalyse ist zeit- und kostenintensivem sowie subjektivem Einfluss unterlegen. Sie profitiert aber von menschlichen Fähigkeiten den Raum und seine Objekte zu erfassen, welche automatisierte Verfahren noch nicht in dieser Qualität liefern. Es bleibt also abzuwägen, welcher Aufwand zur Verbesserung der Automatisierung einem interaktiven Eingriff gegenüber steht. Unter diesen Gesichtspunkten erscheinen die Kombination, also die Automatisierung bis zu einem gewissen Genauigkeitsgrad und eine anschließende interaktive Verbesserung bis zur gewünschten Güte des Produktes, ratsam.

Die in dieser Arbeit im Zentrum stehende Automatisierung der Prozesse und Verfahren liefert aus fernerkundlicher Perspektive hohe Genauigkeiten im Bereich von 80 - 90 % für die Landbedeckungsklassifikationen. Diese Produkte sind weitgehend die Informationsbasis, um Vulnerabilitätsindikatoren abzuleiten. Gerade deshalb spielt die Güte der Landbedeckungsklassifikation eine so zentrale Rolle, da sich Fehlklassifikationen fortpflanzen. Die erreichte Güte der Resultate zeigt mit hoher Präzision die richtige Klasse, ihre räumliche Verteilung und Häufigkeit in der Landbedeckung auf, stellt aber dennoch keine katasterreife Information dar.

Die Ableitung der Vulnerabilitätsindikatoren aus der Landbedeckungsklassifikation beruht auf mathematischen Methoden. Damit wird grundsätzlich die Nachvollziehbarkeit, Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit hergestellt. Die Übertragbarkeit ist dabei in manchen Fällen von den oben erwähnten aufnahme- oder objektspezifischen Parametern abhängig. Als Beispiel sei hier die Methode herausgegriffen, die mittels der Schattenlänge eines Hauses auf die Gebäudehöhe schließt. Auf Grund der fast senkrechten Sonnenstände beim Aufnahmezeitpunkt der Szenen in Hyderabad und Padang ist eine Übertragung der Methode für diese Räume nicht durchführbar. So sind nicht alle Methoden, die exemplarisch für Istanbul anhand der IKONOS-Datensätze entwickelt wurden, übertragbar, sondern bedürfen einer Weiterentwicklung der Methoden oder neuer, andersartiger Datensätze.

Als einziger errechneter Vulnerabilitätsindikator dieser Arbeit, bedingt die Ableitung demographischer Informationen aus Fernerkundungsdaten externe Zusatzdaten. Mittels punktueller Informationen aus der Geländearbeit sowie flächendeckender Stadtvierteldaten der Stadtverwaltung, war eine lokale Distribution von Bevölkerungsdichte mit hoher Genauigkeit möglich. Mit einer gewissen Einschränkung dieser Genauigkeit, ist zukünftig auch ein Ver-

zucht auf Zusatzdaten denkbar, um die oft schwierige Datenerfassung in urbanen Räumen zu umgehen.

Die Güte der abgeleiteten Vulnerabilitätsindikatoren zeigt durchwegs hohe Genauigkeiten von über 80 %. Exemplarisch weist die Gebäudehöhenklassifikation sogar eine Genauigkeit von 94,1 % auf. Diese Genauigkeiten werden allerdings mittels einer Generalisierung der Ergebnisse erreicht, das heißt beim Beispiel Gebäudehöhen bleibend, dass die Genauigkeit auf drei Höhenklassen und nicht auf absolute Höhen bezogen wird. Die entwickelten Methoden erlauben in Abhängigkeit von der Güte der Landbedeckungsklassifikation und der zur Verfügung stehenden Datenbasis eine

- übertragbare Ableitung der Vulnerabilitätsindikatoren ‚Gebäudedichte‘, ‚Dach- und Haustypen‘, ‚Lageparameter‘, ‚Urbanisationsraten‘ bzw. ‚Alter der Gebäude‘ und ‚Bevölkerungsdichte‘.
- aufnahme- und raumspezifische Ableitung der Vulnerabilitätsindikatoren ‚Gebäudehöhe‘ und ‚Landnutzung‘.

Diese multiskaligen Datensätze resultieren in einer Informationsbasis, die einen umfangreichen Beitrag zur Abschätzung von Vulnerabilitätsindikatoren erlaubt und zu einer Rekapitulation der Potentiale aber auch Limitierungen der Fernerkundung für die Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität führt. Diesbezüglich resultieren die durchgeführten fernerkundlichen Studien in der Erkenntnis, dass

- die Stärke in der direkten Ableitung physischer Vulnerabilitätsindikatoren liegt.
- physische urbane Charakteristika eine hohe Korrelation mit Bevölkerungsdichte und -verteilung aufweisen, und damit indirekt auf demographische Indikatoren schließen lassen.
- die abgeleiteten physischen Stadtstrukturen eine Korrelation mit sozioökonomischen Parametern nahe legen, die untersuchten Stadtviertel sich in dieser Studie als zu homogen für den Nachweis erwiesen.
- für ökologische Indikatoren ein hohes Potential vorhanden ist, im innerurbanen, stadtviertelbezogenen Raum aber nur eine geringe Rolle spielen.
- die abgeleiteten aktuellen Informationen eine hohe Relevanz für das Krisenmanagement aufweisen und damit hohen Einfluss bei politischen Entscheidungsprozessen haben können.

Die Vielzahl an räumlichen Informationsebenen, abgeleitet aus Fernerkundungsdatensätzen, bedingt eine Simplifizierung, um die Quintessenz der komplexen Informationsflut übersichtlich abbilden zu können. So leitet sich aus den Anforderungen der Entscheidungsträger ein Produkt ab, das durch eine Kombinatorik aller vorhandenen Indikatoren, eine, aus fernerkundlicher Perspektive, ganzheitliche Abbildung der räumlichen Vulnerabilität ermöglicht. Diese Übersicht generiert einen entscheidenden Mehrwert zur Identifikation, Lokalisierung und Bewertung von Vulnerabilität in der komplexen urbanen Landschaft. So zeigen die Resultate der Vulnerabilitätsabschätzung, dass

- die Kombination der Informationsebenen mittels Indizierung einen gezielten Überblick über die räumliche Situation des urbanen Raumes vermittelt.
- die Indizierung eine zeitliche und räumliche Vergleichbarkeit der Indikatoren schafft und damit eine Bewertung von Maßnahmen ermöglicht.
- die Indizierung der Indikatoren einer gewissen Subjektivität unterliegt.
- die Resultate mittels interdisziplinärer Weiterverarbeitung einen Mehrwert an detaillierter Information und Güte liefern.
- die Übersichtsabbildung Brennpunkte lokalisiert und im Rückschluss auf die Einzelindikatoren, die Identifikation von Schlüsselindikatoren zulässt, um gezielte Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Rekapitulierend zeigen die zusammengefassten Ergebnisse die Fernerkundung in Zeiten rasender urbaner Veränderungen als essentielle Datenquelle. Speziell für physische und demographische Teilaspekte der Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzungen zeigen sich fernerkundliche Methoden als zuverlässige und detaillierte Werkzeuge zur Ableitung benötigter Informationen. Mittels integrierter interdisziplinärer Methoden lässt sich durch die Steigerung der Informationstiefe sogar noch ein Mehrwert generieren.

Somit lässt sich abschließend feststellen, dass die Fernerkundung durch ihre hoch detaillierten und vielfältigen Daten einen essentiellen Baustein für Vulnerabilitätsabschätzungen darstellt, und mittels der entwickelten Methoden räumliche Vulnerabilität im komplexen Gefüge urbaner Räume errechnet werden kann.

## **7.2. Zukünftiger Forschungsbedarf**

Der zukünftige Forschungsbedarf zur Abschätzung von Risiko- und Vulnerabilität im urbanen Raum leitet sich prinzipiell aus den in dieser Arbeit abgeleiteten Erkenntnissen zu den Limitierungen der Fernerkundung ab (vgl. 6.1. & 7.1.). Dabei spielen nicht-berücksichtigte oder zukünftige Sensoren genauso eine Rolle wie methodische Potentiale oder der verstärkte Bedarf separate Forschungsfelder synergetisch mit Fernerkundung einzusetzen.

Die Abschätzung von Risiko- und Vulnerabilität dieser Dissertation ergab sich aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen. Nicht im Fokus dieser Arbeit stehen alternative fernerkundliche Sensoren, deren Datensätze komplementäre Informationen zur Abschätzung von Risiko- und Vulnerabilität beisteuern können. Eine Alternative bzw. in der geometrischen Auflösung sogar eine Verbesserung der Datenbasis stellen Luftbildaufnahmen dar, die im Vergleich zu Satellitendaten, vor allem für die großen Flächen der Megacities allerdings einen erheblichen Kostenmehraufwand bedeuten.

Stereoaufnahmen ermöglichen zum einen eine wesentlich genauere Ableitung von Höheninformationen (KRAUSS ET AL., 2005; MÜLLER ET AL., 2006; TOUTIN ET AL., 2004) und zum anderen eine Unabhängigkeit von den aufnahmespezifischen Parametern, die in dieser Dissertation eine Limitierung darstellen. Diese vielversprechende Datenquelle bringt wiederum einen erheblichen Kostenmehraufwand mit sich.

Das Gebäudematerial stellt einen zentralen Parameter zur Abschätzung der Vulnerabilität dar, konnte aber in dieser Arbeit nur indirekt über den Dachtyp statistisch abgeleitet werden. Hyperspektralsysteme weisen bis zu 250 Spektralkanäle auf und ermöglichen somit eine detaillierte Charakterisierung der städtischen Oberflächenmaterialien (HEIDEN, 2004). Neben dem Gebäudematerial wäre auch eine Abschätzung des Bodentyps denkbar, wodurch im Bereich Gefährdung ein weiterer Parameter beigesteuert werden könnte. Allerdings werden qualitativ hochwertige Aufnahmen in geeigneter hoher räumlicher Auflösung bisher nur von flugzeuggetragenen Sensoren wie etwa ARES (MÜLLER ET AL., 2003) oder HyMap (KRUSE ET AL., 2000) bereitgestellt.

Die Fähigkeit der Radarfernerkundung zur wetter- und tageslichtunabhängigen Datenaufzeichnung bietet im Vergleich zu optischen Systemen eine wesentlich höhere Konstanz, Verlässlichkeit und Flexibilität (ROTH ET AL. 2005). Die neuen Satellitenmissionen wie der deutsche TerraSAR-X, der kanadische Radarsat 2 oder der japanische ALOS-Palsar liefern nun erstmals eine mit optischen Systemen vergleichbare Geometrie der Aufnahmen mit bis zu einem Meter Bodenauflösung. Allerdings zeigen die Bildinhalte moderner SAR-Daten, die durch physikalische Objekteigenschaften bestimmt werden, mitunter keine Relevanz hinsichtlich der benötigten thematischen Information, womit eine ähnliche inhaltliche Informationstiefe zu optischen Systemen noch schwer zu realisieren ist.

Im Bereich der verwendeten höchst auflösenden optischen Satellitensysteme lässt die nahe Zukunft sowohl eine geometrische als auch eine spektrale Verbesserung der Daten erwarten. Der 2007 gestartete GeoEye-1 Sensor (GEOEYE, 2007) verwirklicht mit einer Bodenauflösung von 41cm für den panchromatischen Kanal eine Steigerung der geometrischen Auflösung. Besonders aber der für 2008 vorgesehene Start des WorldView II Sensors (DIGITALGLOBE, 2007), lässt mit 50 cm Bodenauflösung und einer, im Vergleich zu jetzigen höchst auflösenden Systemen, Erweiterung der spektralen Kanäle im mittleren und thermalen Infrarot, neue Potentiale in der Präzision der automatisierten Informationsextraktion erwarten.

Im methodischen Bereich stellt die Prozessierungsdauer bei großen Datensätzen eine deutliche Einschränkung dar. Zwar erreicht die Segmentierung robuste, akkurate Resultate, zeigt aber für komplette höchst aufgelöste Datensätze Rechenzeiten von mehreren Tagen. Der Rahmen des Klassifikationsansatzes ist übersichtlich modular strukturiert und dadurch leicht zu bedienen. Da aber andere Szenen eine Anpassung von Schwellwerten oder Klassifikationsparameter bedingen, muss der Nutzer umfangreiches Wissen zur Software besitzen, um diese Anpassungen gezielt umsetzen zu können. Ziel muss es daher sein, die Struktur der Klassifikationsparameter weiter zu simplifizieren, um die Anwendung einfacher und schneller zu gestalten.

Wie oben dargelegt, ist die Übertragung mancher Methoden auf Grund raumspezifischer Merkmale nicht immer möglich. So sind beispielsweise die entwickelten Dachtypisierungen nicht auf die homogene Dachstruktur in Hyderabad übertragbar. Dies erfordert eine Anpassung oder Neuentwicklung von Methoden, die sich aus den raumspezifischen Gegebenheiten ergeben.

Ein großes Potential verspricht die angedeutete Korrelation physischer Stadtstrukturen mit sozioökonomischen Parametern der Bevölkerung. Die großflächige Analyse im gesamten Stadtgebiet verspricht nicht nur größere Unterschiede in der urbanen Morphologie, sondern

auch die Erfassung verschiedenster Bevölkerungsschichten. Dieses Potential impliziert bereits einen Mehrwert durch eine interdisziplinäre Herangehensweise. So erscheint im konkreten Beispiel die synergetische Analyse des urbanen Raumes durch Sozialgeographie, Ökonomie und Fernerkundung sinnvoll.

Das Potential integrierter Ansätze belegt auch der interdisziplinäre Ansatz dieser Dissertation. Die wissenschaftlichen Disziplinen Fernerkundung und Bauingenieurwesen synergetisch zu nutzen, erzielte dabei einen deutlichen Mehrwert, Gebäudevulnerabilität flächendeckend quantitativ errechnen zu können. Die vielfältigen Perspektiven und Indikatoren im Forschungsfeld der Risiko-, Gefahren- und Vulnerabilitätsabschätzung bedingen geradezu eine wesentliche Ausweitung integrierender Ansätze und Methoden.

So ist die logische Konsequenz, die fernerkundlichen Analysen und Resultate zur räumlichen Vulnerabilität der urbanen Morphologie mit seismologischen Messungen und der Modellierung der räumlichen Verteilung von Bodenbeschleunigungen zu verknüpfen. Damit ermöglicht man die Simulation realer Szenarien in Abhängigkeit von der Lage (ZSCHAU ET AL. 2002). Ebenso ist die Integration aktueller fernerkundlicher Datensätze und daraus abgeleiteter Informationen in andere Forschungsdisziplinen sowie zuständigen Behörden viel versprechend. So lassen sich Synergien der Fernerkundung mit Stadt- und Regionalplanung, Verkehrsplanung, Ökonomie, oder Hydrologie erwarten.

Abschließend sei betont, dass die Analyse des Potentials der Fernerkundung zur Abschätzung von Risiko und Vulnerabilität im urbanen Raum prototypisch eine Vielzahl von Methoden und Resultaten aufzeigt. Gerade für Stadtverwaltungen ist eine operationalisierte Kette der Methoden zur Reproduktion der Ergebnisse für die Detektion und Analyse gewollter und ungewollter Veränderungen von zentralem Interesse.

„Whatever happens, I can always take a walk along the Bosphorus“  
(PAMUK, 2005).



# Anhang A

## Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (1991): *Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. ISBN 3534198786, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ALPAR, B., GAZIOGLU, C., ALTINOK, Y., YOEL, Z., DENGIZ, S. (2004): *Tsunami hazard assessment in Istanbul using by high resolution satellite data (Ikonos) and DTM*. XXth Congress of the ISPRS, Istanbul.
- ALTAN, O., KEMPER, G., PATIKOVA, A., LAVALLE, C. (2001): *Monitoring land-use change of the city of greater Istanbul*. In: Regensburger Geographische Schriften 35. Regensburg.
- ALTINKOK, Y., TINTI, S., ALPAR, B., YALCINER, A.C., ERSOY, S., BORTOLUCCI, E., ARMIGLIATO, A. (2001): *The Tsunami of August 17, 1999 in Izmit Bay, Turkey*. Natural Hazards 24: 133-146. Kluwer Academic Publishers.
- ANAS, A., ARNOTT, R., SMALL, K. (1998): *Urban Spatial Structure*. Journal of Economic Literature, American Economic Association, vol. 36(3), pages 1426-1464.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC) (1997): *40-Report: Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings*. Redwood City: California, USA.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC) (2006): *13-1 Report: Commentary on the use of ATC 13 Earthquake Damage Evaluation data for portable maximum loss studies of California buildings*. Redwood City: California, USA.
- AYDINOGLU, N., ERDIK, M. (2002): *Earthquake Performance and Vulnerability in Turkey*, Departement of Earthquake Engineering, Kandilli Observatory an Earthquake Research Institute, Bogazici University.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): *Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. Angewandte geographische Informationsverarbeitung XII: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, S.12-23.
- BACHMANN, H. (2002): *Erdbebensicherung von Bauwerken*. Birkhäuser, ISBN 3-7643-6941-8.
- BAILLARD, C., MAITRE, H. (1999): *3-D Reconstruction of urban scenes from aerial stereo imagery: a focusing strategy*. In: Computer Vision and Image Understanding, Vol. 76, No. 3, S. 244-258.
- BAKIR, P., BODUROGLU, H. (2002): *Earthquake Risk and Hazard Mitigation in Turkey*. In: Earthquake Spectra, Vol.18, Issue 3, S. 427-447.

- BARNESLEY, M. & BARR, S. (1997): *A graph based structural pattern recognition system to infer urban land-use from fine spatial resolution land-cover data*. In: Computers, Environment and Urban Systems, 21(3/4), S. 209-225.
- BARR, S., BARNESLEY, M., STEEL, A. (2004): *On the separability of urban land-use categories in fine spatial scale land cover data using structural pattern recognition*. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 31, S. 397-418.
- BATTY, M. & HOWES, D. (2001): *Predicting temporal patterns in urban development from remote imagery*. In: J. P. DONNAY, M. J. BARNESLEY AND P.A. LONGLEY (Hrsg.), *Remote Sensing and urban analysis*. S. 185-204. London. Taylor and Francis.
- BAUDOT, Y. (2000): *Geographical analysis of the population of fast-growing cities in the third world*. In: J. P. DONNAY, M. J. BARNESLEY AND P.A. LONGLEY (Hrsg.), *Remote Sensing and urban analysis*. S. 229-246. London. Taylor and Francis.
- BAUER T., STEINNOCHER K. (2001): *Per parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique*. In: GeoBIT/GIS 6(2001), pp. 24-27
- BAYHAN, I. (1993): *Städtebau und Stadtplanung in der Türkei – kritische Reflexionen*. In: ARSLAN, R., SCHAFFER, F. & KLINGSHIRN, U.: *Angewandte Stadtforschung in der Türkei*. Augsburg. Angewandte Sozialgeographie 30: S. 11-27.
- BAYAN-LEVENT, T. (2003): *Globalization and Development Strategies for Istanbul: Regional Policies and great urban Transformation Projects*. 39<sup>th</sup> ISoCaRP Congress 2003.
- BENZ, U., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I., HEYENEN., M. (2004): *Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 58, S. 239-258.
- BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P.K., HOKE, J. H. (2003): *MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual*. Air Force Research Lab., Hanscom AFB, MA.
- BIRKMANN, J. (2006): *Measuring Vulnerability to Natural hazards – Towards Disaster Resilient Societies*. New York, United Nations University. S. 524.
- BISCHOF, H., SCHNEIDER, W., PRINZ, A. (1992): *Multispectral classification of Landsat-images using neural networks*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, Issue 3. S. 482-490.
- BJORGO, E. (2000): *Using very spatial resolution multispectral satellite sensor imagery to monitor refugee camps*. In: International Journal of Remote Sensing, Taylor and Francis, vol. 21, no. 3, S. 611-616.
- BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, I. und WISNER, B. (1994): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. London: Routledge. S. 320.
- BLASCHKE, T., LANG, S., LORUP, E., STROBL, J. und ZEIL, P. (2000): *Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications*. Environmental Information for Planning, Politics and the Public. A. Cremers and K. Greve. Marburg, Metropolis-Verlag. Volume II.
- BOHLE H.-G. (2001): *Vulnerability and Criticality: Perspectives from Social Geography*. IHDP Update 2/2001, Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change: S. 1-7.
- BOLLIN, C., HIDAJAT, R. (2006): *Community-based risk index: Pilot implementation in Indonesia*. In: BIRKMANN, J. (2006): *Measuring Vulnerability to Natural hazards – Towards Disaster Resilient Societies*. New York, United Nations University. S. 524.
- BOMMER, J., SPENCE, R., ERDIK, M., TABUCHI, S., AYDINOGLU, N., BOOTH, E., DEL RE, D., PETERKEN, O. (2002): *Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance*. In: Journal of Seismology, vol. 6. S. 431-446.
- BOTHE, H. (1993): *Fuzzy Logic – Einführung in Theorie und Anwendung*. Berlin, S. 226.
- BRIUGLIO, L. (2003): *Methodological and Practical Considerations for Constructing Socio-Economic Indicators to Evaluate Disaster Risk*. Institute of Environmental Studies, University of Columbia,



- Manizalez, Colombia. Programme on Information and Indicators for Risk Management. IADB-ECLAC-IDEA.
- BROOKS, N. (2003): *Vulnerability, Risk and Adaption: A conceptual framework*. Working Paper 38. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, UK. S. 1-20.
- BRONGER, D. (1996): *Megastädte*. In: Geographische Rundschau 48: S. 74-81.
- BURGESS, E.W. (1925): *The growth of the city. An introduction to a research project*. In: PARK, R.E. (Hrsg.): *The City*. Chicago, S. 47-61.
- CALISKAN, S. (2006): *Assessment of earthquake vulnerability indicators through remote sensing in Istanbul test-site*. Master thesis, S. 90., Technical University Munich.
- CARDONA, O. D. (2004b): *The need of rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management*. In: BANKOFF, G., FRERKS, G., HILHORST, D., (Hrsg.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, London: Earthscan, Kapitel 3.
- CARLEER, A., DEBEIR, O., WOLFF, E. (2004): *Comparison of high spatial resolution satellite image segmentations*. Proceedings of SPIE Image and Signal Processing for Remote Sensing IX, Vol. 5238, ed. Lorenzo Buzzone, S. 532-542.
- CHEN, N., HELIGMAN, L. (1994): *Growth of the World's Megalopolises*. In: FUCHS, R. J. ET AL. (Hrsg.): *Megacity growth and the future*. Tokyo. S. 17-31.
- CONGALTON R., G. (1991): *A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37, S. 35-46.
- CORREIRA, F., SANTOS, M., und RODRIGUES, R. (1987): *Engineering Risk in Regional Drought Studies*. In L. DUCKSTEIN AND E.J. PLATE, (Hrsg.), *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, Dordrecht/Boston: Martinus Nijhoff, S. 61-86.
- CORRELL, R., CRAMER, W., und SCHELLNHUBER, H.-J. (2001): *Potsdam sustainability days*. Symposium on "Methods and Models of Vulnerability Research, Analysis and Assessment".
- CROWLEY, H., PINHO, R., BOMMER, J. (2004): *A Probabilistic Displacement-based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation*. In: *Bulletin of Earthquake Engineering* 2. S. 173-219.
- CUTTER, S., L. (1996): *Vulnerability in environmental hazards*. Progress in Human Geography 20, S. 529-539.
- CUTTER, S. L., BORUFF, B. J. und SHIRLEY, L. W. (2003): *Social vulnerability to environmental hazards*. In: *Social Science Quarterly* 84(2), S. 242-261.
- CHENG, F., THIEL, K.H. (1995): *Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT-image – Part 1. Test of forty-two buildings*. In: *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 19, No. 3, S. 409-415.
- DALVI, M. Q. (1978): *Behavioural modelling, accessibility, mobility and need: concepts and measurement*. In D.A. HENSHER AND P.R. STOPHER, (Hrsg.), *Behavioural Travel Modelling*. London: Croom Helm.
- DAVIDSON, R. (1997): *An urban earthquake disaster risk index*. PhD Thesis, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- DAVIS, I. (1994): *Assessing community vulnerability in UK IDNDR, Medicine in the International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR) Research Preparedness and Response for Sudden Impact Disasters in the 1990s*. UK, IDNDR Committee, London, S.11-13.
- DECH, S. W. (1997): *Anwendung der Satellitenfernerkundung. Von der geowissenschaftlichen Forschung zum operationellen Einsatz*. DLR-Forschungsbericht 97(52), Köln, Habilitationsschrift zur Erlangung der Venia Legendi für Geographie an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Würzburg, S. 319.
- DECH, S. W. (2005): *The Earth Surface*. In: FEUERBACH, B. AND STOEWER (Hrsg.): *Utilization of Space*, Springer-Verlag, Hamburg. S. 51-90.

- DILLEY, M. (2006): *Disaster risk hot spots: A project summary*. In: BIRKMANN, J. (2006): *Measuring Vulnerability to Natural hazards – Towards Disaster Resilient Societies*. New York, United Nations University. S. 182-188.
- DÖKMECI, V., BERKÖZ, L. (1994): *Transformation of Istanbul from a monocentric to a polycentric city*. In: *European Planning Studies*, Vol. 2, Issue 2. S. 193-205.
- DONNAY J., BARNESLEY M, LONGLEY P. (2001): *Remote sensing and urban analysis*. Taylor and Francis: London, S. 229-246.
- ERDIK, M. (2001): *Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes*. In: *Structural control for civil and infrastructure engineering*, Ed. By F. CASCIATI, G. MAGONETTE, World Scientific.
- ERDIK, M. (2002): *Earthquake risk assessment for Istanbul Metropolitan area. The American Red Cross – Turkish Red Crescent*. Department of Earthquake Engineering, Bogazici University Istanbul, S. 352.
- ERDIK, M. (2004): *Earthquake Masterplan for Istanbul. Metropolitan Municipality of Istanbul*. Prepared by Bogazici, Istanbul Technical, Middle East Technical and Yildiz Technical Universities.
- ESCH, T. (2006): *Automatisierte Analyse von Siedlungsflächen auf der Basis höchstauflösender Radardaten*. Bayerische Julius-Maximilian Universität. Dissertation. S. 202.
- ESCH, T., ROTH, A. and DECH, S. W. (2005): *Robust approach towards an automated detection of built-up areas from high resolution radar imagery*. In: *Proceedings of the ISPRS WG VII/1 "Human Settlement and Impact Analysis", 3<sup>rd</sup> International Symposium on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2005) and 5<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing on Urban Areas (URS 2005)*. Tempe, AZ, USA. CD-ROM.
- EUROCODE 8 (2004): *Teil 1 (DIN EN 1998-1): Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkung und Regeln für Hochbauten*. Deutsche Fassung.
- FARR, T., ROSEN, P., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. and ALSDORF, D. (2007): *The Shuttle Radar Topography Mission*. In: *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004, S. 33.
- FLÜCHTER, W. (1997): *Tokyo quo vadis? Chancen und Grenzen metropolitanen Wachstums*. In: APEL, U., HOLZAPFEL, J. UND PÖRTNER P. (Hrsg.): *Beiträge zum 8. deutschsprachigen Japanologentag München 1996*, München: Japan-Zentrum der Ludwig-Maximilians-Universität 1997. CD ROM, S. 522-548. Duisburger Arbeitspapiere Ostasienwissenschaften 15.
- FOODY G. (2002): *Status of land cover classification accuracy assessment*. In: *Remote Sensing of Environment* 80, S. 185 – 201.
- FREEMAN, S. A. (2004): *Review of the development of the capacity spectrum method*. *Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 438, Vol. 41, No. 1, 2004.
- FRICK, A. (2006): *Urban monitoring with Quickbird imagery through a knowledge-based extraction of indices*. In: *Fifth German Turkish Joint Geodetic Days. Proceedings on CD-ROM*. Berlin.
- FUCHS, R., BRENNAN, E., CHAMIE, J., UITTO, J. (1994): *Megacity growth and the future*. United Nations University Press, Tokyo.
- FÜSSEL, H. M. (2005): *Vulnerability in climate change research: A comprehensive conceptual framework*. University of California, International and Area Studies – Breslauer Symposium No. 6.
- GALLOPIN, G. (1997): *Indicators and their use: Information and decision-making. Part One: Introduction*. In: B. MOLDAN AND S. BILLHARZ, (Hrsg.), *Sustainability Indicators: Report of the Project on Indicators of Sustainable Development*, SCOPE Scientific Committee on Problems of the Environment, New York: John Wiley.
- GAMBA, P., HOUSHMAND, B., SACCANI, M. (2000): *Detection and extraction of buildings from interferometric SAR data*. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, S. 611-618.
- GREEN, C. (2004): *The evaluation of vulnerability to flooding*. *Disaster Prevention and Management* 13(4). S. 323-329.

- GRODECKI, J. (2001): *Ikonos stereo feature extraction – RPC approach*. In: Proceedings of the ASPRS Annual Conference, St.Louis, USA.
- GULKAN, P. & SOZEN, M. (1999): *Procedure for Determining Seismic Vulnerability of Building Structures*. In: Structural Journal, Vol. 96. Issue 3, S. 336-342.
- HAHN, H., VILLAGRAN DE LEON, J. (2003): *Component III: Indicators and other disaster risk management instruments for communities and local governments*. Studie der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Inter-American Development Bank. S. 34.
- HALL, P. (1966): *The World Cities*. London: Weidenfeld and Nicholson.
- HALL, P., PFEIFFER, U. (2000): *Urban Future 21: A global agenda for twenty-first century cities*. Spon Press, ISBN-10: 0415240751. S. 352.
- HARALICK, R., SHAPIRO, L. (1993): *Computer and Robot vision*. Addison Wesley. Publ.Company (MA), Bd.I+II.
- HARRIS, C., ULLMAN, E. (1945): *The nature of cities*. Annals of the American Academy of Political Science, 242, S. 7-17.
- HARTL, P., CHENG, F. (1995): *Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT-image – Part 2: test of a complete city*. In: International Journal of Remote Sensing. Vol. 16, No. 15, S. 2829-2842.
- HEIDEN, U. (2004): *Analyse hyperspektraler Flugzeugscannerdaten zur ökologischen charakterisierung städtischer Biotope*. Dissertation. Technische Universität Berlin, S. 138.
- HEINRICHS, D., KABISCH, S. (2006): *Risikolebensraum Megacity*. Mitteilungen der HGF. GAIA 15/2. S. 157-160.
- HENDERSON, F., XIA, Z. (1998): *Radar applications in urban analysis, settlement detection and population analysis*. In: HENDERSON, F. AND LEWIS, A. (Hrsg.): Principles and Applications of Imaging Radar, Kapitel 15, New York, S. 733-768.
- HEROLD, M. (2002a): *The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses*. In: Environment and Planning A, Vol. 34, S. 1443-1458.
- HEROLD, M. (2002b): *Object-oriented mapping and analysis of urban land use/cover using IKONOS data*. In: Proceedings of 22<sup>nd</sup> EARSEL Symposium "Geoinformation for European-wide integration", Prague, June 2002.
- HEROLD, M., NOAH, C., GOLDSTEIN, C., CLARKE, K. (2003): *The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling*. In: Remote Sensing of Environment 86. pp. 286-302.
- HILDEBRANDT, G. (1996): *Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Wichmann. S. 676. Heidelberg.
- HOFFMEYER-ZLOTNIK, J. (2000): *Das "Wohnquartier" als Hintergrundmerkmal zur Erklärung von Umfragdaten*. Festschrift für Max Kaase. Mannheim: ZUMA 2000, S. 232, ISBN 3-924220-20-4. MOHLER, P. & P. LUETTINGER (Hrsg.).
- HOFMANN, P. (2001): *Detecting urban features from IKONOS data using an object-oriented approach*. In: Proceedings of the First Annual Conference of the Remote Sensing & Phtogrammetry Society. 12-14 September 2001. S. 28-33.
- HOFMEISTER, B. (1994): *Stadtgeographie*. Westermann – Das geographische Seminar, Braunschweig.
- HOFMEISTER, B. (2004): *The study of urban form in Germany*. Urban Morphology, vol 8.(1), S. 3-12.
- HORLICK-JONES, T. (1995): *Urban Disasters and Megacities in a Risk Society*. In: GeoJournal 37.3., S. 329-334.
- HOYT H. (1939): *The structure and growth of residential neighbourhoods in American cities*. Washington D.C. Federal Housing Administration.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: Impacts, Adaption, and Vulnerability*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. ISBN 0 521 80768 9.

- IRVIN, B.R., MCKEOWN, D.M. (1989): *Methods for exploiting the relationship between buildings and their shadows in aerial imagery*. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 19, S. 1564-1575.
- KARATHANASSI, V., IOSSIFIDIS, C. and ROKOS, D. (2000): *A texture-based classification method for classifying built-areas according to their density*. International Journal of Remote Sensing, 2000, Vol. 21, No. 9, S. 1807-1823.
- KAKHANDIKI, A. (1998): *Risk Time Charts: A framework to measure the time variation of earthquake disaster risk*. PhD Thesis, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- KASS, S. (2007): *Analyse eines urbanen Raumes mit hoch aufgelösten Fernerkundungsdaten zur Abschätzung von physischer Vulnerabilität*. Diplomarbeit, S.133. Universität Innsbruck.
- KEINER, M., SCHMID, W. (2003): *Urbanisierungstendenzen in Entwicklungsländern*. DISP 155, S. 49-56.
- KELLY, C. (1995): *Assessing Disaster Needs in Megacities: Perspectives from Developing Countries*. In: GeoJournal 37.3. S. 381-385.
- KEMPER, G., CELIKOYAN, T., ALTAN, O., LAVALLE, C., DEMICHELLI, L. (2002): *Results of the Project Monitoring Land-Use Dynamics for Istanbul 1945-2000*, Proceedings for the 3<sup>rd</sup> International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, Vol. 2, S. 567-574.
- KNÖPFLE, W., STRUNZ, G., ROTH, A. (1998): *Mosaicking of digital elevation models derived by SAR Interferometry*. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 4, S. 306 – 313.
- KÖTTER, T. (2004): *Risks and opportunities of urbanisation and megacities*. In: FIG Working Week, Athen, Griechenland. S. 9.
- KRAAS, F. (2007): *Megacities and Global Change in East, Southeast and South Asia*. ASIEN 103, S. 9-22.
- KRAAS, F., COY, M. (2003): *Probleme der Urbanisierung in den Entwicklungsländern*. Petermanns Geographische Mitteilungen 147 (1). S. 32-41.
- KRAUSS, T., REINARTZ, P., LEHNER, M., SCHROEDER, M., STILLA, U. (2005): *DEM Generation from very high resolution stereo data in urban areas*. In: Proceedings of the ISPRS WG VII/1 "Human Settlement and Impact Analysis", 3<sup>rd</sup> International Symposium on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2005) and 5<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing on Urban Areas (URS 2005). Tempe, AZ, USA. CD-ROM.
- KRUSE, F. A., BOARDMAN, J. W., LEFKO, A. B., YOUNG, J. M., KIERYN-YOUNG, K. S., COCKS, T. D., JENSSEN, R., COCKS, P. A. (2000): *HyMap: An australian hyperspectral sensor solving global problems – results from USA HyMap data acquisition*. In: Proceedings of 10<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference in Adelaide, Australia, CD-ROM.
- KUNDAK, S., TÜRKÖGLÜ, H. (2005): *Assessment of Seismic Risk in Istanbul*. 45<sup>th</sup> European Congress of the European Regional Science Association: Land use and Water Management in a sustainable network society. Amsterdam, Netherlands.
- KWARTENG, A., CHAVEZ, P. (1998): *Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data*. In: International Journal of Remote Sensing, 19(9). S. 1651-1662.
- LAVALLE, C., DEMICHELLI, L., TURCHINI, M., CASALS-CARRASCO, P., NIEDERHUBER, M. (2001): *Monitoring megacities: the MURBANDY/MOLAND approach*. In: Development in Practice, Vol. 11, Issue 2 & 3, S. 350-357.
- LEWIS, J. (1999): *Development in disaster prone places: Studies of Vulnerability*. London: Intermediate Technology Publications.
- LILLESAND T. M. & KIEFER, R. (2000): *Remote Sensing and Image Interpretation*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.

- LO, C. P. (2001): *Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data*. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, No. 67, S. 1037-1047.
- LU, D. und WENG, Q. (2004): *Spectral Mixture Analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery*. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 70, No. 9, pp. 1053-1062.
- LUCKMANN, A., GREY, W. (2003): *Urban building height variance from multibaseline ERS Coherence*. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 9.
- MAKTAV, D., ERBEK, F. (2005): *Analysis of urban growth using multi-temporal satellite data in Istanbul, Turkey*. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, Issue 4, S. 797-810.
- MALING D., H. (1989): *Measurement from maps*. Oxford: Pergamon.
- MARSCHALK, U., ROTH, A., EINEDER, M., SUCHANDT, S. (2004): *Comparison of DEMs derived from SRTM/X- and C-Band*. In: Proceedings of the IGARSS 2004, Anchorage, USA.
- MARTIN, V. & FROSCHAUER, E. (1998): *Tausend Häuser in einer Nacht*. In: StadtBauwelt (139): S. 2022-2027.
- MAS, J.-F. (1999): *Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques*. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, No. 1, S. 139-152.
- MASEK, J., LINDSAY, F., and GOWARD, S. (2000): *Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations*. In: International Journal of Remote Sensing, 21(18). S. 3473-3486.
- MASSALABI, A., DONG-CHEN, H. E., BENIE, G. B. and BEAUDRY, E. (2004): *Detecting information under and from shadow in panchromatic Ikonos images of the city Sherbrooke*. In: Geoscience and remote sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004, IEEE International, vol. 3, S. 2000-2003.
- MATHER, P. M. (2004): *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. Third Edition John Wiley. S. 292.
- MEINEL G. & NEUBERT, M. (2004): *A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data*. In: Proceedings of ISPRS 2004 Annual Conference, Istanbul, Turkey. July 19-23. CD-ROM.
- MERTINS, G. (1992): *Urbanisierung, Metropolisierung und Megacities. Ursachen der Stadtexplosion in der Dritten Welt*. In: Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen (Hrsg.): Mega-Städte – Zeitbombe mit globalen Folgen?, Bonn: S. 7-21.
- MESEV, V., GORTE B., LONGLEY, P. (2000): *Modified maximum-likelihood classification algorithms and their application to urban remote sensing*. In: DONNAY J., BARNSLEY M, LONGLEY P. *Remote sensing and urban analysis*, Taylor and Francis: London, S. 229-246.
- MITCHELL, J. (1999): *Megacities and natural disasters: a comparative analysis*. In: GeoJournal 49: S. 137-142. Kluwer Academic Publishers.
- MOUDON, A. (1997): *Urban morphology as an emerging interdisciplinary field*. In: Urban morphology, 1, S. 3-10.
- MÜLLER, F. P., KEINTZEL, E. (1984): *Erdbebensicherung von Hochbauten*. Ernst&Sohn, 1984, ISBN 3-433-00986-4, 2. Auflage.
- MÜLLER, A., RICHTER, R., HABERMAYER, M., MEHL, H., DECH, S., KAUFMANN, H., SEGL, K., HASCHBERGER, P. AND STROBL, P. (2003): *ARES: A new reflective /emissive Imaging Spectrometer for Terrestrial Applications*. In: DLR-DFD [Hrsg.]: 20. DFD-Nutzerseminar, 06.-08.10.2003, Neustrelitz, CD-ROM.
- MÜLLER, M., SEGL, K., HEIDEN, U. & KAUFMANN H. (2006): *Potential of high-resolution satellite data in the context of vulnerability of buildings*. In: Natural Hazards, vol. 38. S. 247-258.
- MÜNICH, J. C., TAUBENBÖCK, H., STEMPNIEWSKI, L., DECH, S., ROTH, A. (2006): *Remote Sensing and Engineering: An interdisciplinary approach to assess vulnerability in urban areas*. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Genf, Schweiz, Paper number: 1412.

- PAMUK, O. (2005): *Istanbul – Memories of a city*. Faber and Faber Limited, S.348.
- PAMUK, O. (2007): *Mein Istanbul*. Sueddeutsche Zeitung, 12. Februar, 2007.
- PARKER, D. (1995): *Disaster Vulnerability of Megacities: An Expanding Problem that requires rethinking and innovative responses*. In: GeoJournal 37.3. S. 295-301.
- PARKER, D., EVANS, T. & MERETSKY, V. (2001): *Measuring emergent properties of agent-based land use/land cover models using spatial metrics*. Seventh annual Conference of the International Society for Computational Economics.
- PARSONS, T. (2004): *Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey*. Journal of Geophysical Research. Vol. 109. B05304.
- PEDUZZI P. (2006): *The Disaster Risk Index: Overview of a quantitative approach*. In BIRKMANN, J. (2006): *Measuring Vulnerability to Natural hazards – Towards Disaster Resilient Societies*. New York, United Nations University. S. 524.
- PELLING, M. (2003): *The Vulnerability of Cities – Natural Disasters and Social Resilience*. S. 212. Earthscan Publications Ltd., ISBN 1 85383 830 6, London.
- PELLING, M. (2006) *Review of global risk index projects: Conclusions for sub-national and local approaches*. In: BIRKMANN, J. (2006): *Measuring Vulnerability to Natural hazards – Towards Disaster Resilient Societies*. New York, United Nations University. S. 524.
- PENGLER, I. (2007): *Stadtstrukturtypenkartierung mit Methoden der Fernerkundung am Beispiel der Stadt Hyderabad (Indien)*. Diplomarbeit, S.141. Fachhochschule München – Fachbereich Geoinformationswesen.
- PERRY, C. R. und LAUTENSCHLAGER, L. F. (1984): *Functional equivalence of spectral vegetation indices*. In: Remote Sensing of Environment, 14, S. 169-182.
- PHINN, S., STANFORD, M., SCARTH, P., MURRAY, A., SHY, P. (2002): *Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques*. In: International Journal of Remote Sensing, 23(20). S. 4131-4153.
- QUARANTELLI, E. (1991): *Urban vulnerability to disasters in developing countries: Managing risks*. Worldbank. Washington D. C.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., BAMLER, R. (2002): *The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, S. 241-262.
- RADBERGER, R. (2001): *Monitoring der Verstädterung im Großraum Istanbul mit den Methoden der Fernerkundung und der Versuch einer räumlich-statistischen Modellierung*. Dissertation, S. 141. Universität Göttingen.
- RASHED, T., WEEKS, J. (2003a): *Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas*. International Journal of Geographical Information Science. Vol 17, No. 6, S. 547-576.
- RASHED, T. (2003b): *Measuring the environmental context of social vulnerability to urban earthquake hazards: An integrative remote sensing and GIS approach*. Dissertation. S. 320. San Diego State University.
- RICHARDS, J. A., JIA, X. (1999): *Remote Sensing Digital Analysis – An Introduction*. Third Edition. Springer. S. 464.
- RICHTER, R. (1996): *A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm*. In: International Journal of Remote Sensing, 1996, Vol. 17, No. 6, S. 1201 – 1214.
- ROBINSON, P., WOODARD, J., VARNADO, S. (1998): *Critical Infrastructure: Interlinked and Vulnerable*. In: Issues in Science and Technology, University of Texas, Dallas.
- ROTH, A., HOFFMANN, J. AND ESCH, T. (2005): *TerraSAR-X: How can high resolution SAR data support the observation of urban areas?* In: Proceedings of URBAN 2005 & URS 2005, March 14-16, Tempe, AZ, USA, CD-ROM.

- SAVITZKY A. und GOLAY M. (1964): *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. In: Anal. Chem., Vol. 36, N. 8, S. 1627-1639.
- SCHAFFER, F. (1993): *Türkisch-Thrakien und Istanbul: Neue Perspektiven für die Stadt- und Regionalentwicklung*. In: ARSLAN, R., SCHAFFER, F. & KLINGSHIRN, U.: *Angewandte Stadtforschung in der Türkei*. Ausburg. *Angewandte Sozialgeographie* 30: S. 29-48.
- SCHIEVE, J. (2002): *Segmentation of high-resolution remotely sensed data – concepts, applications and problems*. Symposium on geospatial theory, Processings and applications, Ottawa, 2002.
- SCHNEIDERBAUER, S. und EHRLICH, D. (2004): *Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards: A Review of Definitions, Concepts and Data*. Brussels: European Commission – Joint Research Centre (EC-JRC).
- SCHOWENGERDT, R. (1997): *Remote Sensing – Models and Methods for Image Processing*. Second Edition. S. 522, Academic Press, San Diego.
- SHETTIGARA, V. K., SUMERLING, G. M. (1998): *Height Determination of extended objects using shadows in SPOT images*. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. vol. 64, No.1, January 1998, S. 35-44.
- SINGH, A. (1989): *Digital change detection techniques using remotely-sensed data*. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, S. 989-1003.
- SMALL, C. (2003): *High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance*. In: *Remote Sensing of Environment* 88. S. 170-186.
- SMALL, C. (2007): *Comparative Analysis of Urban Vegetation Scale and Abundance*. Urban Remote Sensing Joint Event. Paris, 2007. S. 10.
- SMITS, P.C., DELLEPIANE, S. G., & SCHOWENGERDT, R. A. (1999): *Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and proposal for a cost-based approach*. *International Journal of Remote Sensing*, 20, S. 1461-1486.
- STEINNOCHER, K. (1997): *Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbildern*. In: DOLLINGER F. UND STROBL, J.: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX*, Salzburger Geographische Materialien, Heft 26. Selbstverlage.
- STOLZ, R. (1998): *Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten*. *Münchener Geographische Abhandlungen*, Reihe B. Geobuch Verlag, München. S. 177.
- STOW, D. A., TINNEY, L. R., and ESTES, J. E. (1980): *Deriving land use/land cover change statistics from Landsat: a study of prime agriculture land*. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium of Remote Sensing of Environment*. Vol. 2 (Environmental Institute of Michigan), San Jose, Costa Rica, 23 -30, April 1980, S. 1227-1237.
- SUTTON, P. (1997): *Modelling population density with night-time satellite imagery and GIS*. In: *Computers, Environment and Urban Systems*. vol. 21, no. 3, S. 227-244.
- TIMMERMANN, P. (1981): *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society*, No. 1 in *Environmental Monograph*. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- TORRENS, P. M., ALBERTO, M. (2000): *Measuring sprawl*. Center for Advanced Spatial Analysis, ISSN: 1467-1298. In: Association of Collegiate Schools in Planning Conference, November 2000, Atlanta, USA.
- TOUTIN, T. (2004): *Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-a, IKONOS II, and QuickBird*. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 42, Issue 10, S. 2121-2129.
- UNESCO (1973): *Annual Summary of Information on Natural Disasters*, Paris, Unesco.
- UITTO, J. (1998): *The geography of disaster vulnerability in megacities*. *Applied Geography* 18(1), S. 7-16.
- UNITED NATIONS (1991): *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects, and Options: a Manual for Policy Makers and Planners*. New York: UNDRP (United Nations Disaster Relief Organization).
- UNITED NATIONS (2001): *World Urbanization Prospects - The 2001 revision*. New York.

- UNITED NATIONS (2003): *World Urbanization Prospects - The 2003 revision*. New York.
- UNITED NATIONS Development Programme (UNDP) (2004): *Reducing Disaster Risk – A challenge for development – A Global Report*. ISBN 92-1-126160-0. New York, USA.
- UNITED NATIONS/ISDR (International Strategy for Disaster Reduction) (2004): *Living with Risk: A global Review of Disaster Reduction Initiatives*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland: UN Publications.
- VAN DER SANDE, C., DE JONG, S., DE ROO, A. (2003): *A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4. S. 217-229.
- VAN DILLEN, S. (2004): *Different choices: assessing vulnerability in South Indian village*. Studien zur geographischen Entwicklungsforschung, Band 29, Saarbrücken: Verlag für Entwicklungspolitik.
- VOIGT, S., KEMPER, T., RIEDLINGER, T., KIEFL, R., SCHOLTE, K., and MEHL, H. (2007): *Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support*. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 6. S. 1520-1528.
- WARD, D., PHINN, S., und MURRAY, A. (2000): *Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data*. In: The Professional Geographer, Vol. 52, Issue 3, S. 371-386.
- WHITE, P., PELLING, M., SEN, K., SEDDON, D., RUSSELL, S., and FEW, R. (2005): *Disaster Risk Reduction*. A development Concern. DFID.
- WISNER, B. (2003): *Disaster Risk Reduction in Megacities: Making the Most of Human and Social Capital*. In: KREIMER, A., ARNOLD, M. AND CARLIN, A. (Hrsg.), Making Cities Safer: The Future of Disaster Risk. Washington D.C.: The World Bank.
- WLODARCZYK D. (2005): *Structural Analysis of urban space in residential areas*. In: Methodologies in Housing Research, Newcastle upon Tyne, The Urban International Press.
- WOLF, K. (1990): *Der Verstädterungsprozess in Indien unter besonderer Berücksichtigung der Großstadtentwicklung*. Dissertation. Berlin. S. 165.
- YAGER, R. (1987): *Fuzzy sets and applications*. selected papers by L. Zadeh, New York.
- ZADEH, L.A. (1978): *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, Nr. 1, S. 3- 28.
- ZENEB (Zentrum für Naturrisiken und Entwicklung Bonn/Bayreuth) (2002): *Bericht zum deutschen Beitrag für den World Vulnerability Report des United Nations Development Programme*.
- ZHENKURI, M., REDMOND, R. (1995): *Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data*. PE & RS – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol 61, no.4, S. 435-439.
- ZSCHAU, J., ISIKARA, M., ERGÜNAY, O, YALCIN, M. N., ERDIK, M. (2002): *Towards an earthquake early warning system for the megacity Istanbul*. In: Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction, edited by J.ZSCHAU AND A.KÜPPERS, S. 433-440, Springer.



# Anhang B

## Internetverzeichnis

- ALWANG, J. SIEGEL, P. and JORGENSEN, S. (2001): *Vulnerability: A view from different disciplines*. Social Protection discussion paper No. 115, The World Bank, Social Protection Unit, Human Development Network. Abrufbar unter: <http://www1.worldbank.org/sp/>
- CANNON, T., TWIGG J., ROWELL, J. (2003): *Social Vulnerability: Sustainable Livelihoods and Disasters*. Report to DFID Conflict and Humanitarian Assistance Department (CHAD) and Sustainable Livelihoods Support Office. Abrufbar unter: [http://www.benfieldhrc.org/disaster\\_studies/projects/soc\\_vuln\\_sust\\_live.pdf](http://www.benfieldhrc.org/disaster_studies/projects/soc_vuln_sust_live.pdf)
- CIRACI, H., KUNDAK, S. (2000): *Changing urban pattern of Istanbul: From monocentric to polycentric structure*. In 40th Congress of the European Regional Science Association, Barcelona. Abrufbar unter: <http://ideas.repec.org/s/wiw/wiwsa8.html> .
- CUMORAH PROJECT INTERNATIONAL LDS DATABASE: <http://www.cumorah.com> . Stand: 05.11.2007.
- DEFINIENS (2007): *eCognition software*. Abrufbar unter: <http://www.definiens.com> .
- DIGITAL GLOBE (2007): *Wordview I & II*. Abrufbar unter: <http://digitalglobe.com>
- DKKV – DEUTSCHE KOMITEE KATASTROPHENVORSORGE E. V. (2002): *Lessons learned – Hochwasservorsorge in Deutschland: Kurzfassung für die Versicherungswirtschaft*. Abrufbar unter: <http://www.dkkv.org/DE/publications/schriftenreihe.asp?h=5> .
- FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY) (2007): *HAZUS – Hazards United States*. Abrufbar unter: [www.fema.gov/plan/prevent/hazus/](http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/)
- GEOEYE (2007): *Quickbird*. Abrufbar unter <http://www.geoeye.com> .
- GITEWS – *Deutsch-Indonesisches Tsunami Frühwarnsystem*. Homepage: [www.gitews.de](http://www.gitews.de) Stand: 28.04.2008.
- JPL (2007): *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Abrufbar unter: <http://asterweb.jpl.nasa.gov>
- LAST-MILE – *Tsunami Frühwarn- und Evakuierungsinformationssystem*. Homepage: [www.last-mile-evacuation.de](http://www.last-mile-evacuation.de) . Stand: 28.04.2008.
- METROPOLITAN MUNICIPALITY OF ISTANBUL (MMI) (2006): *Homepage*. <http://www.ibb.gov.tr/en-US/AnaSayfa/> . Stand: 05.11.2007.

MÜNCHNER RÜCK (2005): *Megastädte – Megarisiken. Trends und Herausforderungen für Versicherung und Risikomanagement*. Abrufbar unter: [www.munichre.com/publications/302-04270\\_de.pdf](http://www.munichre.com/publications/302-04270_de.pdf)

NRSA (2007): *Data Reservoir for Planet Earth*. Abrufbar unter: <http://.nrsea.gov.in>

SPACE IMAGING (2007): *IKONOS*. Abrufbar unter <http://www.geoeye.com/products/imagery/ikonos/default.htm>

SPOT IMAGE (2007): *SPOT Products and Services*.  
Abrufbar unter: [http://www.spotimage.fr/html/167\\_171.php](http://www.spotimage.fr/html/167_171.php)

TURKSTAT (2007): Statistikamt der Türkei. Abrufbar unter: <http://www.turkstat.gov.tr/> Stand: 05.11.2007.

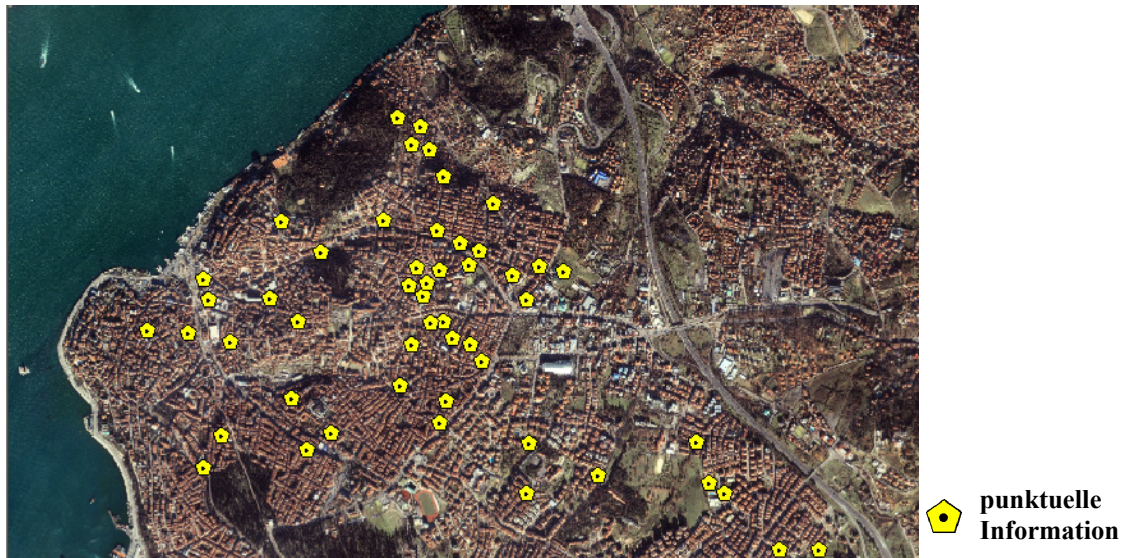
USGS (2007): *Landsat Web Site*. Abrufbar unter: <http://landsat.usgs.gov>

# Anhang C

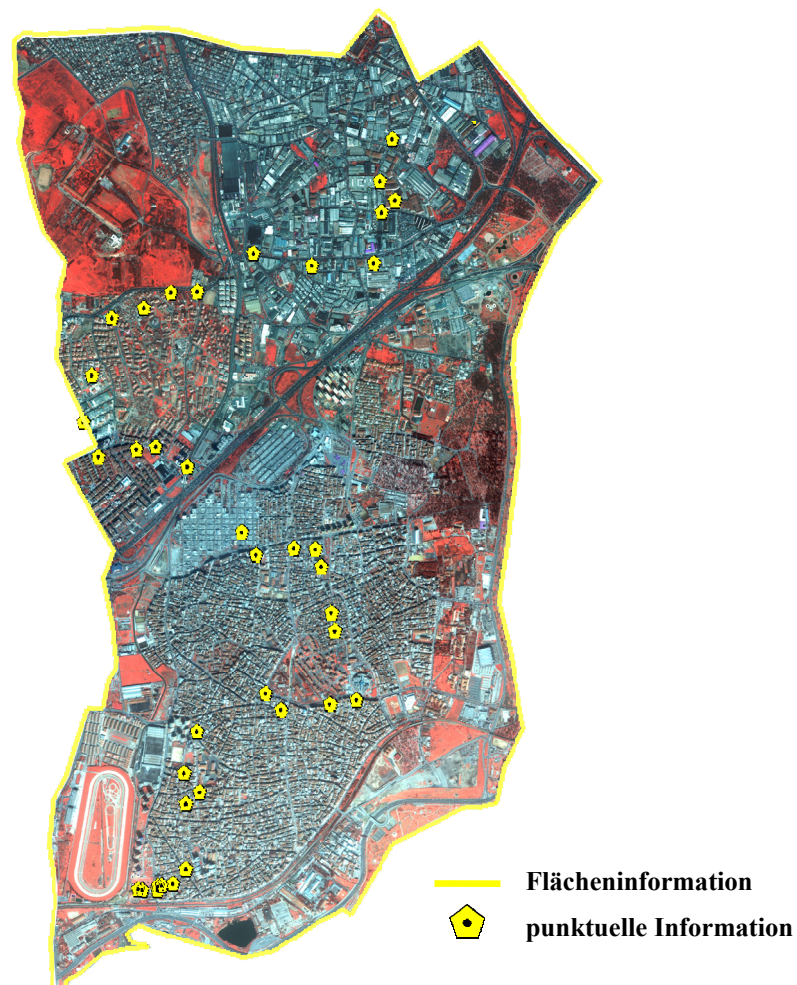
## Daten



C-1: IKONOS Daten vom 20.12.2003, Stadtviertel Üsküdar, Istanbul



C-2: Räumliche Referenzierung der mittels Fragebogen erhobenen Bevölkerungsdaten in Üsküdar, Istanbul



C-3: Räumliche Referenzierung der mittels Fragebogen erhobenen Bevölkerungsdaten in Zeytinburnu, Istanbul

## Questionnaire

### Objective:

The questionnaire will be done in different neighborhoods of Istanbul. It aims to get information about demographic, economic, social, cultural and political data of the inhabitants in different urban areas. These findings will be used to combine field work data with remote sensing results.

### Explanation to the Interviewee

*This questionnaire is done to analyze the structure of the district, and this data will be used for findings related to probable disaster.*

Questionnaire			
Name	Place		Date
	Street:		
	District:		
Information on Building	Floors	Material	Function of the Building
Information on the interviewee			
Age:	<input type="checkbox"/> Female	<input type="checkbox"/> Male	
<b>Demographic and Social Structure</b>			
1) How many people are there in your family?			
2) How many of them are	<input type="checkbox"/> Children... <input type="checkbox"/> Woman.... <input type="checkbox"/> Elderly.... <input type="checkbox"/> Disabled People.....(In case there are)		
3) Is the population of this building increasing or decreasing? How many in numbers.	<input type="checkbox"/> Increasing..... <input type="checkbox"/> Decreasing .....		
4) How many people are living in your house?	During day?		
	During night?		
5) If earthquake occurs, do you know what to do?	During?		After?
6) Do you have any kind of emergency preparations in case of disaster?	<input type="checkbox"/> Yes (What)		
	<input type="checkbox"/> No		
7) Do you know emergency phones?	<input type="checkbox"/> Yes (Which)		
	<input type="checkbox"/> No		

<b>Economic Structure</b>	
8) What is your profession?	
9) Where are you working? (which district)	
10) What is your yearly income?	<input type="checkbox"/> < 488 YTL <input type="checkbox"/> 488 -550 YTL <input type="checkbox"/> 550-750 YTL <input type="checkbox"/> > 750
11) What kind of settlement are you living in?	<input type="checkbox"/> Apartment (developed by entrepreneur) <input type="checkbox"/> Cooperative House <input type="checkbox"/> Private House <input type="checkbox"/> Gecekonu Other (specify).....
12) What is the ownership of the settlement you live in?	<input type="checkbox"/> Owner <input type="checkbox"/> Rent <input type="checkbox"/> Lojman Other (specify)
13) How much do you pay for your house? (Rent amount, land value)	
14) When was this apartment/house built?	
15) For what kind of activities are you using this building?	<input type="checkbox"/> Residential <input type="checkbox"/> Commercial <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Other (specify).....
16) Do you have any vehicle?	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes (specify) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto</li> <li>• Mini bus</li> <li>• Motorcycle, etc</li> </ul> Other
17) What kind of communication devices do you have?	<input type="checkbox"/> Cable-Phone <input type="checkbox"/> Mobile-Phone <input type="checkbox"/> Television <input type="checkbox"/> Radio <input type="checkbox"/> Internet <input type="checkbox"/> Other (specify)....
18) Do you have any insurance?	<input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes (Specify) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Health</li> <li>• House</li> </ul> Other (Specify).....
Further Comments and additional information	

C-4: Fragebogen zur Ermittlung demographischer, sozialer und ökonomischer Daten der Bevölkerung

# Anhang D

## Resultate der Übertragung entwickelter Methoden

Übertragung der Methode zur Landbedeckungsklassifikation für Padang, Indonesien

		Klassifikation									
	Klasse	Häuser	Straße	Wald	Wiese	Boden	Schatten	Wasser	Acker	Total	Nutzer*
Realität	Häuser	264	20	0	0	0	13	0	3	300	88,00%
	Strassen	24	221	0	0	19	0	4	22	300	73,67%
	Wald	3	0	261	2	11	0	0	24	300	87,00%
	Wiese	9	0	16	255	14	0	1	5	300	85,00%
	Boden	51	0	3	0	213	16	0	17	300	71,00%
	Schatten	7	2	9	0	0	81	0	1	100	81,00%
	Wasser	0	0	0	0	0	2	97	1	100	97,00%
	Acker	6	0	1	12	45	0	0	236	300	78,67%
	Total	364	243	290	269	302	102	102	309	2000	
	<b>Hersteller**</b>	82,41%	81,00%	96,67%	89,67%	99,34%	98,04%	98,04%	97,09%		<b>81,45 %</b>

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden

\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tabelle D-1: Genauigkeitsabschätzung der urbanen Klassifikation Padang, Indonesien

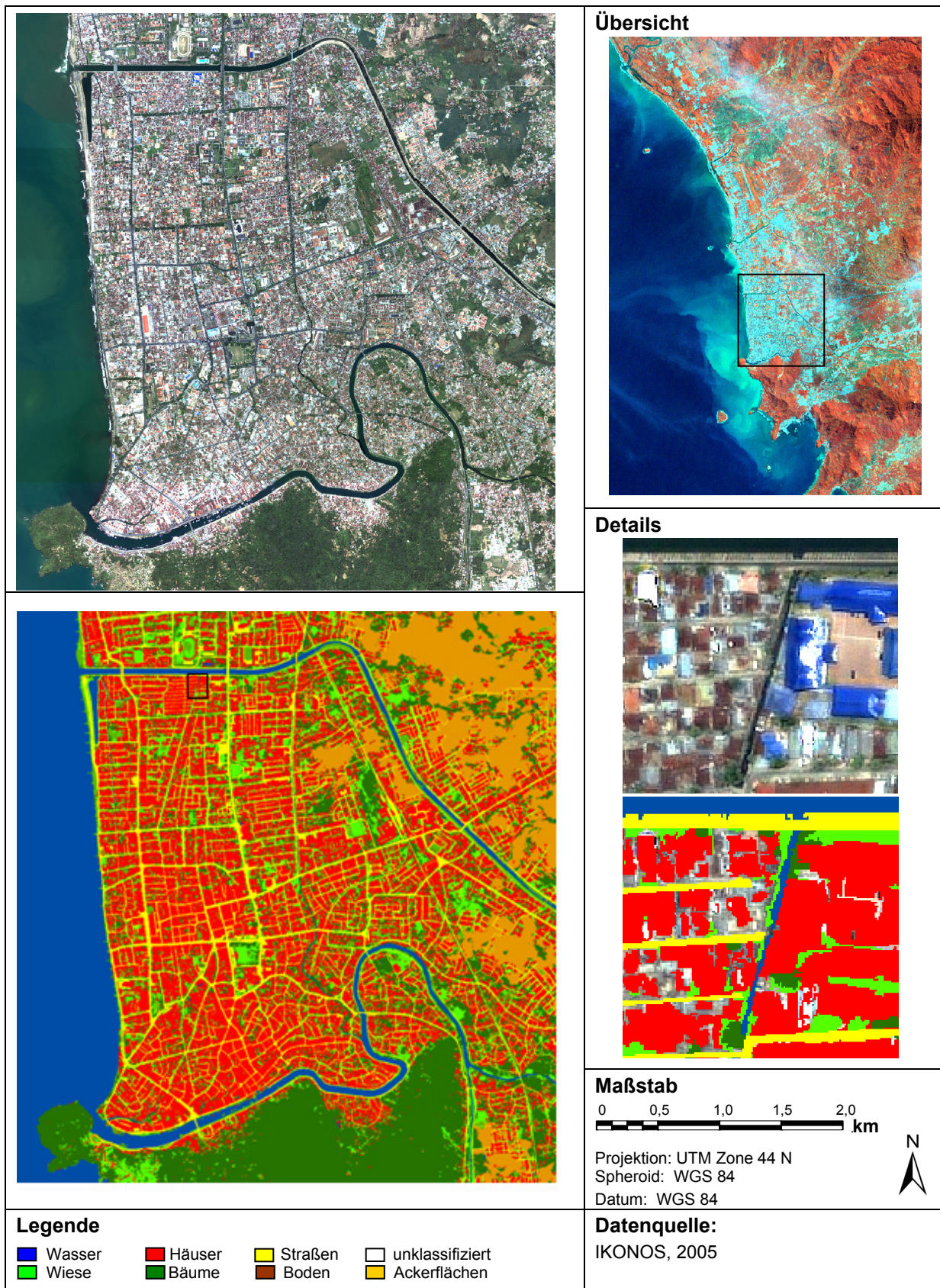


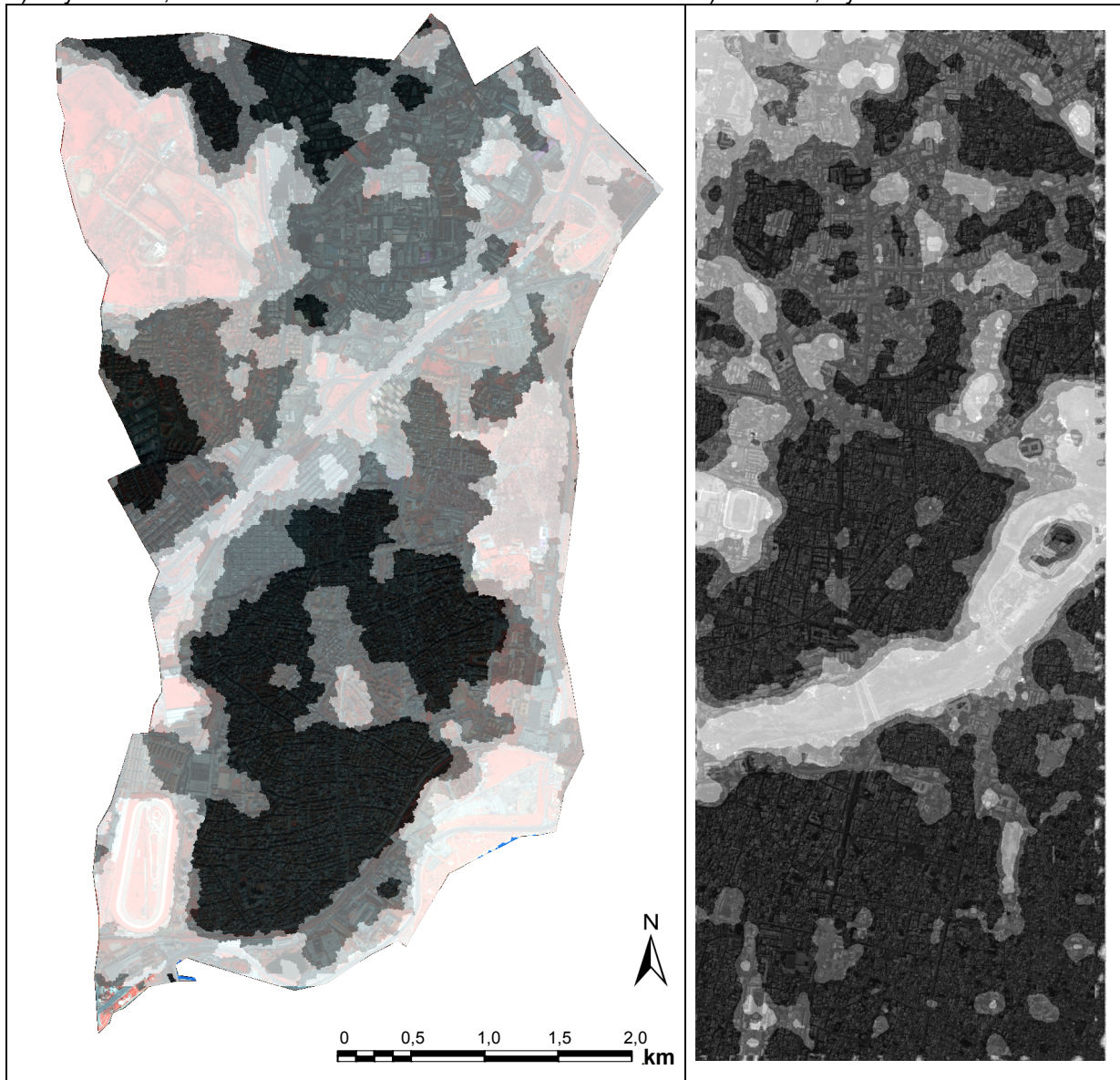
Abb. D-1: Übertragung der objektorientierten Klassifikationsmethode auf IKONOS Daten für Padang in Indonesien



### Übertragung der Methode zur automatisierten Ableitung der Gebäudedichte

a) Zeytinburnu, Istanbul

b) Zentrum, Hyderabad



Gebäudedichteklassen:  hoch verdichtet  mittel verdichtet  gering verdichtet  Freifläche

Abb. D-2: Übertragung der Gebäudedichteklassifikation auf Zeytinburnu, Istanbul und das Zentrum Hyderabads

## Übertragung der Methode zur automatisierten Ableitung der Gebäudehöhe

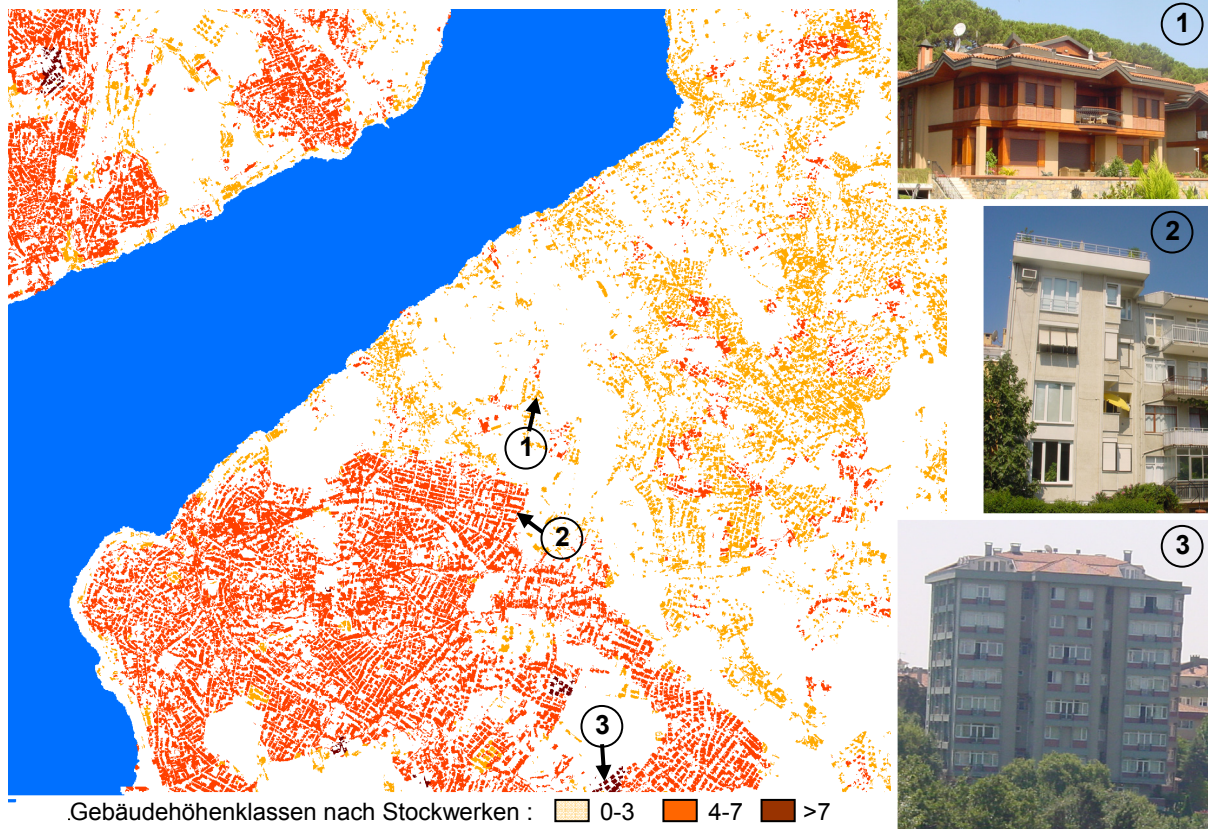


Abb. D-3: Gebäudehöhenklassifikation in Üsküdar, Istanbul

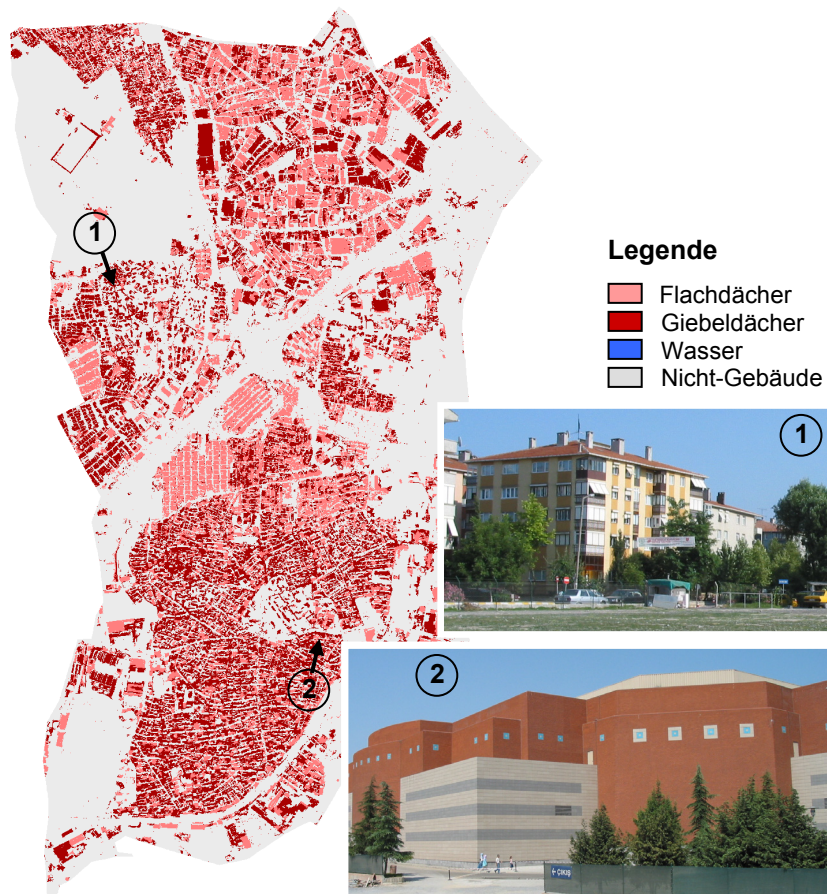


Abb. D-4: Dachtypenklassifikation für den Stadtteil Zeytinburnu, Istanbul

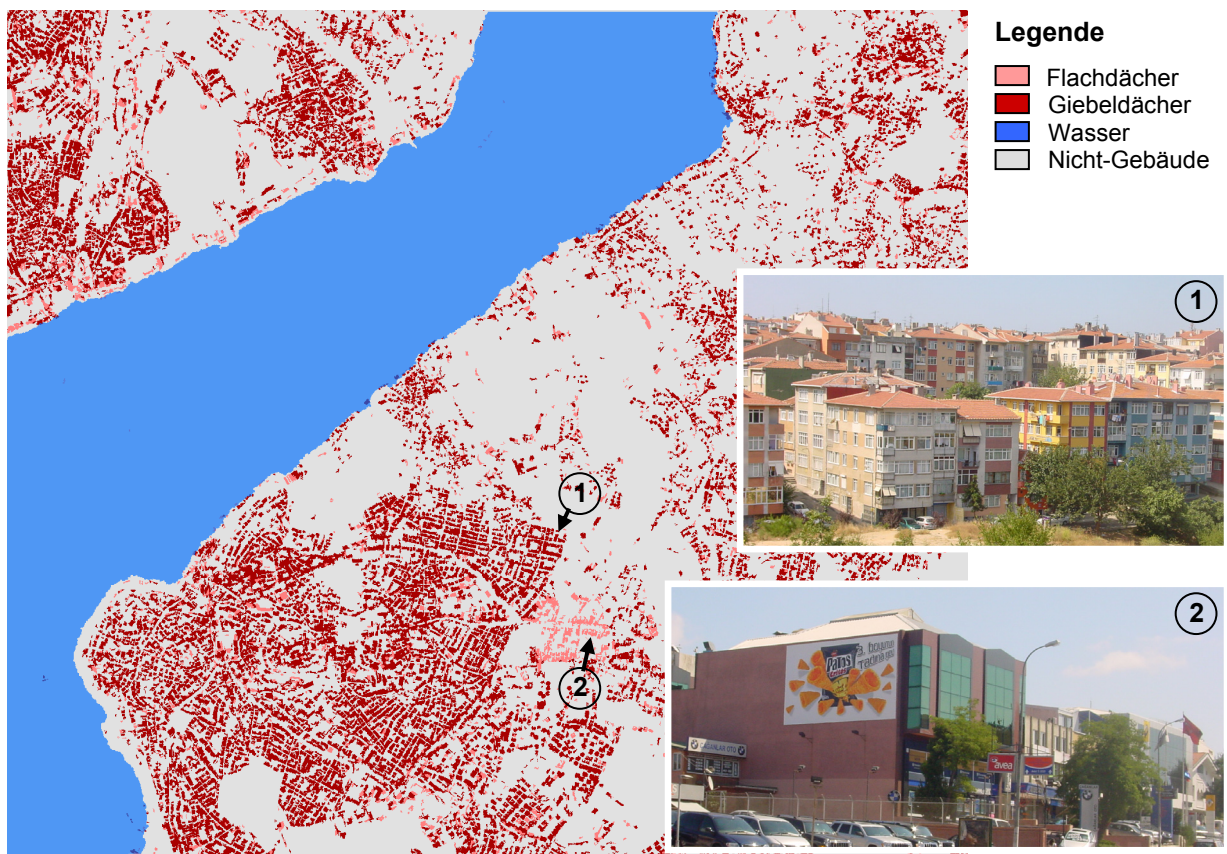


Abb. D-5: Dachtypenklassifikation für den Stadtteile Üsküdar, Istanbul

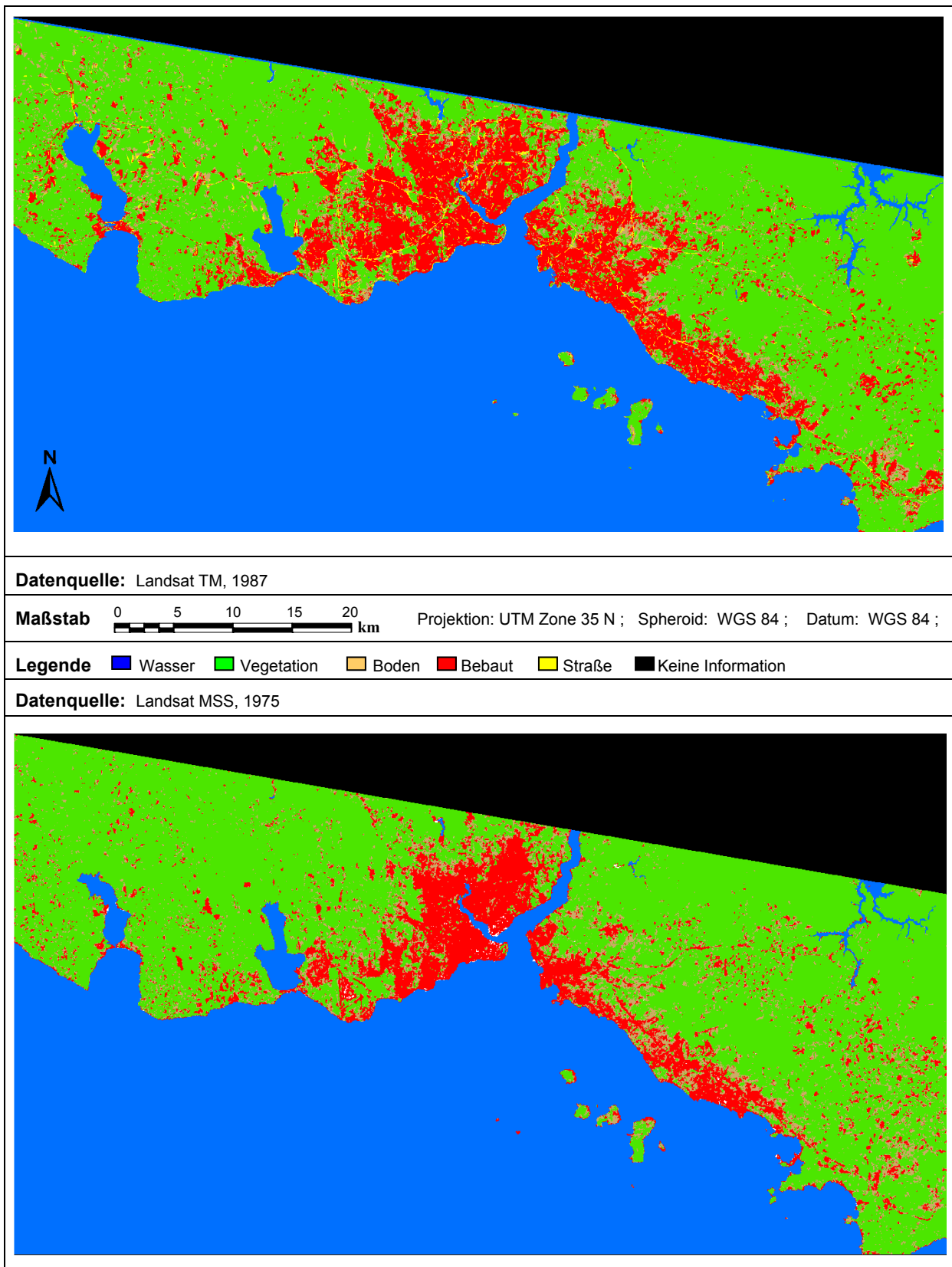


Abb. D-6: Landbedeckungsklassifikationen Istanbuls aus Landsat Daten der Jahre 1987 und 1975

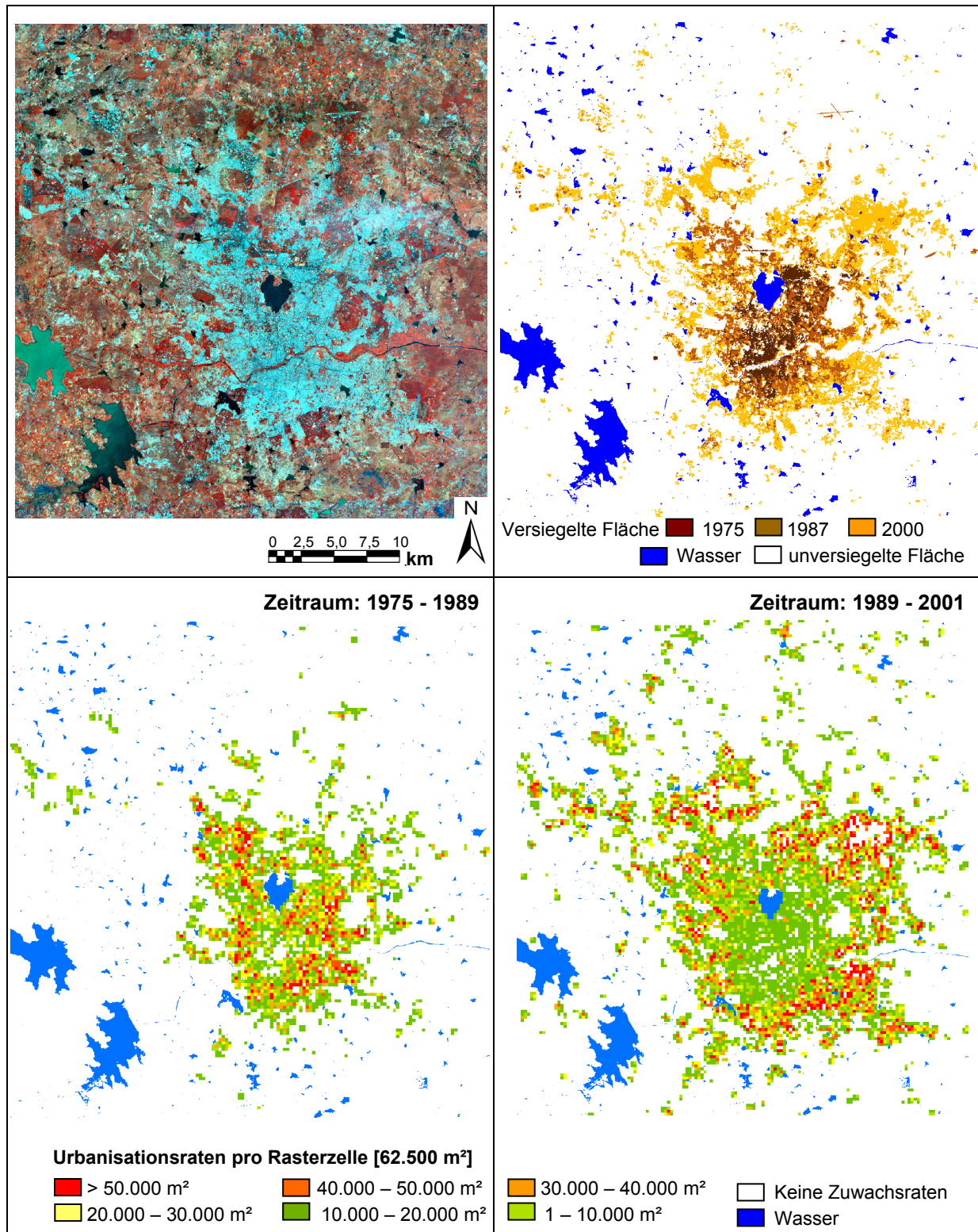


Abb. D-7: Änderungsdetektion und Urbanisationsraten in Hyderabad seit 1975

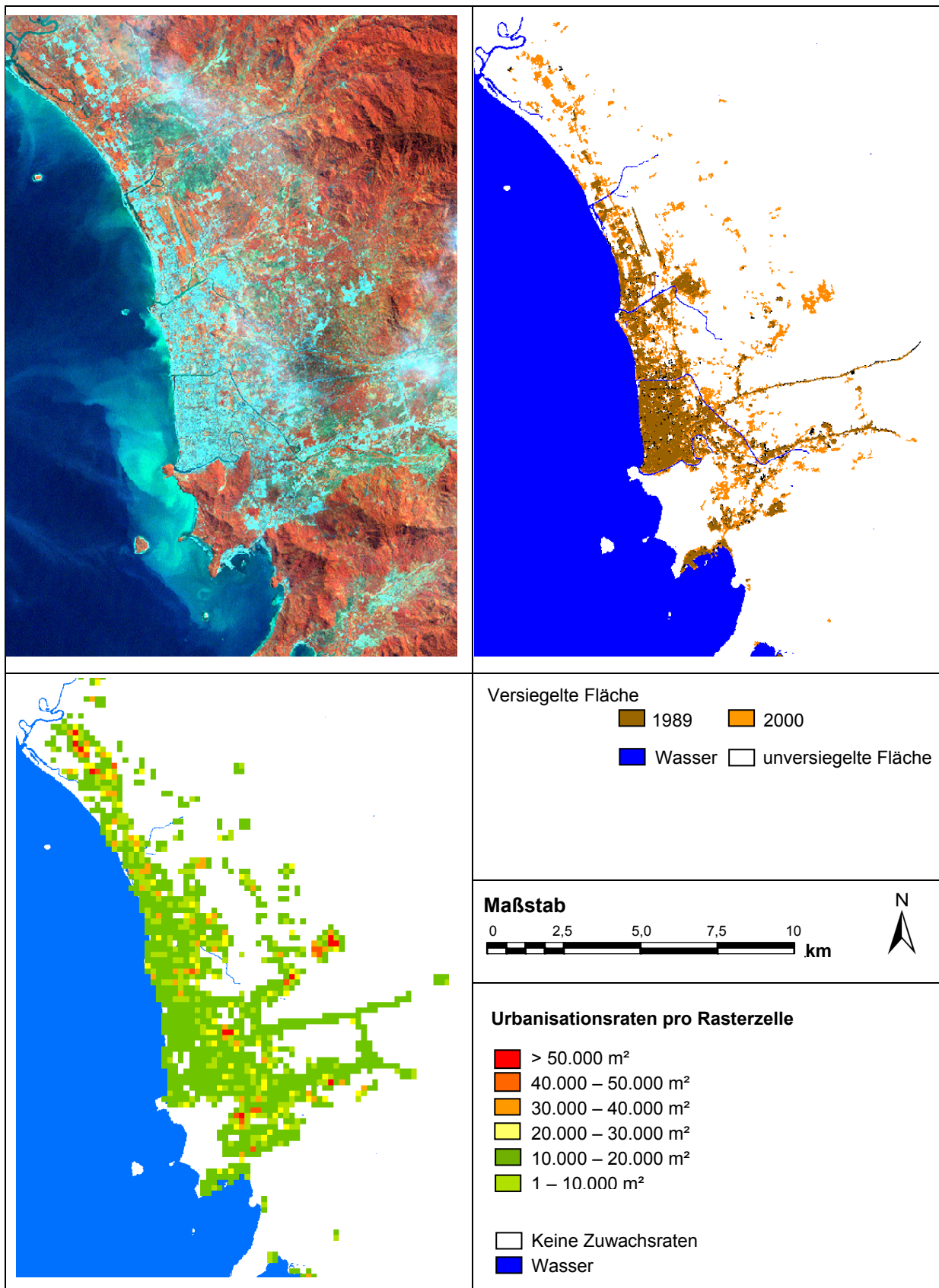


Abb. D-8: Änderungsdetektion und Urbanisationsraten in Padang seit 1989

Klasse	Landsat ETM 2001		Landsat TM 1989		Landsat MSS 1975	
	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*
Siedlung	90,83 %	90,00 %	87,68 %	89,00 %	83,74 %	87,00 %
Vegetation	86,41 %	89,00 %	91,49 %	86,00 %	90,10 %	92,00 %
Boden	76,83 %	78,22 %	77,42 %	81,00 %	69,34 %	77,00 %
Wasser	100,00 %	91,00 %	100,00 %	88,00 %	100,00 %	93,00 %
<b>Gesamt</b>	<b>88,75</b>		<b>89,75</b>		<b>87,25 %</b>	

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden  
 \* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. D-2: Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen in Hyderabad

Klasse	Landsat ETM 2001		Landsat TM 1989	
	Hersteller**	Nutzer*	Hersteller**	Nutzer*
Siedlung	90,83 %	90,00 %	87,68 %	89,00 %
Vegetation	86,41 %	89,00 %	91,49 %	86,00 %
Boden	76,83 %	78,22 %	77,42 %	81,00 %
Wasser	100,00 %	91,00 %	100,00 %	88,00 %
<b>Gesamt</b>	<b>88,75</b>		<b>89,75</b>	

\*\* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse insgesamt zugewiesen wurden  
 \* Anzahl korrekt klassifizierter Referenzpunkte dividiert durch die Summe aller Referenzpunkte, die der betrachteten Klasse eigentlich angehören

Tab. D-3: Thematische Güte der Landbedeckungsklassifikation der Landsat Aufnahmen in Padang

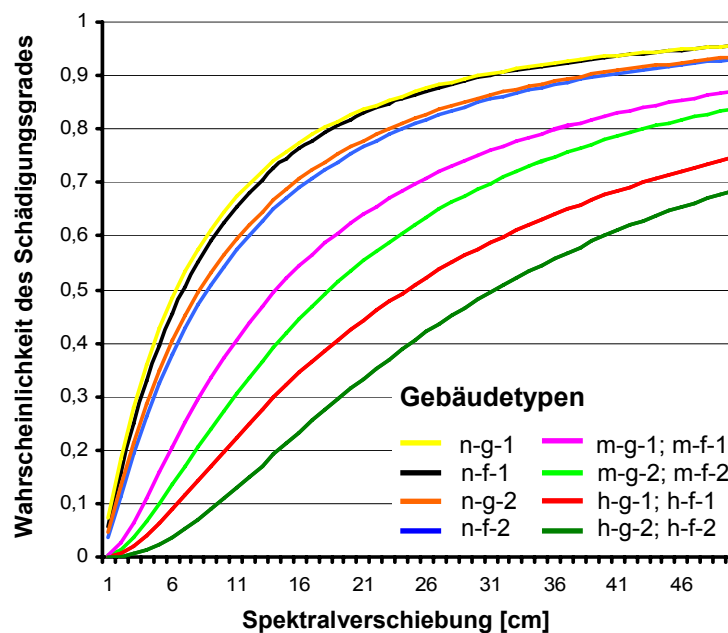


Abb. D-9: Finale Fragilitätskurven für aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Gebäudetypen

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die von mir eingereichte Dissertation zum Thema „Vulnerabilitätsabschätzung der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul mit Methoden der Fernerkundung“ selbständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur und sonstigen Quellen angefertigt wurde. Indirekt übernommene Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

---

München, den 05.11.2007



# Curriculum Vitae

**Hannes Taubenböck**

geb.: 05.10.1977, Simbach/Inn, Deutschland

## Ausbildung

- 1989 - 1997 Tassilo Gymnasium Simbach/Inn;  
Abschluss: Abitur
- 1999 – 2004 Studium der Geographie mit den Nebenfächern Fernerkundung, Raumplanung und Geoinformatik (zusätzliches Nebenfach bis Vordiplom: Physik) an der Ludwig-Maximilians-Universität München
- Diplomarbeit: Evaluierung von Standort-Informationssystemen für Industrie- und Handelskammern unter Einbeziehung von GIS Technologie und GeoWebServices*
- Abschluss: Diplom

## Beruflicher Werdegang

- 2005 - 2007 Doktorand am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen
- Thema: Vulnerabilitätsabschätzung der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul mit Methoden der Fernerkundung*
- Promotionsbegleitende Tätigkeiten:
- Projektassistenz und Projektakquisition
  - Betreuung von Diplomarbeiten und Praktika
  - Fachvorträge bei Lehrveranstaltungen und wissenschaftlichen Konferenzen
- Seit 09/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Würzburg / Lehrstuhl für Fernerkundung in Kooperation mit dem DLR-DFD im Projekt „Last Mile - Evacuation“: Tsunami Frühwarn- und Evakuierungsinformationssystem für Indonesien

## Weitere praktische Erfahrungen

- 1997 – 1998 Zivildienst an der psychosomatischen Klinik in Simbach/Inn
- 2001 Praktikum bei Vista – Geowissenschaftliche Fernerkundung
- 2001 – 2002 Hilfwissenschaftler beim Ground Truth Center Oberbayern
- 2002 Praktikum bei der Abteilung Stadt- und Regionalplanung (Sachgebiet Regionales) der Stadt München
- 2003 – 2004 Hilfwissenschaftler am Lehrstuhl für Stadtraum und Stadtentwicklung, TUM
- 2003 – 2004 Hilfwissenschaftler am Fachgebiet Geoinformationssysteme, TUM
- 2004 Diplomarbeit in Kooperation mit der Industrie- und Handelskammer München

## Internationale Erfahrungen

- 1999 Büroassistenz im Hotel Impala Island Inn in Ocean City, New Jersey, USA
- 2002 Praktikum bei Crowther, Campbell & Associates – Environmental Consulting Company in Kapstadt, Südafrika
- 2004 Entwicklungshelfer in Had Yai/Thailand
- 2005/2006 Forschungsaufenthalte im Rahmen der Dissertation in Istanbul, Türkei zur wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit lokalen Institutionen sowie Feldarbeit

## Sonstiges

- PC Microsoft Office, ArcGIS, Erdas Imagine, eCognition, IDL/Envi, Photoshop
- Sprachen Deutsch, Englisch, Spanisch (Grundlagen)

## Publikationen

### Zeitschriftenbeiträge:

- 2006 TAUBENBÖCK, H., HABERMEYER, M., ROTH, A. and DECH, S.: "Automated allocation of highly-structured urban areas in homogeneous zones from remote sensing data by Savitzky-Golay Filtering and curve sketching". In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Volume 3, Issue 4, pp. 532-536. ISSN 1545-598X.
- 2005 TAUBENBÖCK, H., SCHILCHER, M.: „Standort-Informationen-Systeme– Anforderungen, Potentiale, Visionen“, zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4, S.235-238, Wißner-Verlag, Augsburg, ISSN 1618-8950.

### Buchbeiträge:

- 2007 TAUBENBÖCK, H., ROTH, A., DECH, S.: "Linking structural urban characteristics derived from high resolution satellite data to population distribution". In: COORS, V., ET AL.: Urban and Regional Data Management, Taylor & Francis Group. London. ISBN 978-0-415-44059-2. S. 35-46.

### Konferenzbeiträge:

- 2007 TAUBENBÖCK, H., ROTH, A.: "A transferable and stable classification approach in various urban areas and various high resolution sensors". In: Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France. S. 7.
- TAUBENBÖCK, H., PENGLER, I., SCHWAIGER, B., CYPRA, S., HIETE, M., ROTH, A.: "A multi-scale urban analysis of the Hyderabad Metropolitan area using remote sensing and GIS". In: Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France. S.6.
- TAUBENBÖCK, H., ROTH, A. and DECH, S.: "Vulnerability assessment using remote sensing: The earthquake prone megacity Istanbul, Turkey". International Symposium on Remote Sensing and Environment, San Jose, Costa Rica. pp.5.
- KASS, S., POST, J., TAUBENBÖCK, H., ROTH, A., STRUNZ, G., STÖTTER, J., MARDIATNO, D., ISMAIL, F. A., ANWAR, H. Z.: "Automated assessment of building vulnerability with high resolution IKONOS data for Padang, Indonesia". The International Symposium on Disaster in Indonesia: Problems and solutions. Padang, July 2007.
- 2006 TAUBENBÖCK, H., ESCH, T., ROTH, A.: "An urban classification approach based on an object-oriented analysis of high resolution satellite imagery for a spatial structuring within urban areas", In: The European Association of Remote Sensing Laboratories and the Humboldt-University zu Berlin. First Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Urban Remote Sensing "Challenges and Solutions". S.8.
- CALISKAN, S., TAUBENBÖCK, H., HINZ, S., ROTH, A.: "Earthquake vulnerability indicators and vulnerability assessment using remote sensing, Istanbul", In: The European Association of Remote Sensing Laboratories and the Humboldt-University zu Berlin [Hrsg.]: First Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Urban Remote Sensing "Challenges and Solutions". S.6.
- TAUBENBÖCK, H., ROTH, A.: "Assessment of urban location factors with remote sensing", In: Urban Data Management Symposium, 25<sup>th</sup> Urban Data Management Symposium, Aalborg, Denmark. S.10.
- TAUBENBÖCK, H., KEMPER, T., ROTH, A., VOIGT, S.: "Assessing vulnerability in Istanbul: An example to support disaster management with remote sensing at ZKI-DLR". In: German Turkish Joint Geodetic Days, Fifth International Symposium. ISBN 3-9809030-4-4. Technical University Berlin. S.9.
- MÜNICH, J., TAUBENBÖCK, H., STEMPNIIEWSKI, L., DECH, S., ROTH, A.: "Remote sensing and engineering: An interdisciplinary approach to assess vulnerability in urban areas", In: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, Switzerland. S.10.

### Sonstiges:

- 2004 TAUBENBÖCK H.: „Evaluierung von Standort-Informationen-Systemen für Industrie- und Handelskammern unter Einbeziehung von GIS Technologie und GeoWebServices“, Diplomarbeit, S. 144, CD-ROM. Technische Universität München.

## Auszeichnungen

Beste Präsentation und bester Artikel beim International Symposium on Remote Sensing and Environment (ISRSE), San Jose, Costa Rica; 2007.

Auszeichnung als eines der 15 besten Paper auf dem Urban Data Management Symposium, Stuttgart; 2007.