

Monitoring der Verstädterung im Großraum Istanbul mit den Methoden der Fernerkundung und der Versuch einer räumlich-statistischen Modellierung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie

der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Roman Radberger

geboren in Hamm/Westf.

Göttingen, im Juli 2001

D 7

- | | |
|--------------------|-------------------------|
| 1. Berichtstatter: | Prof. Dr. A. Akça |
| 2. Berichtstatter: | Prof. Dr. J. Saborowski |

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Juli 2001

Meinem Großvater

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen eines deutsch-türkischen Forschungsprojektes während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Georg-August-Universität Göttingen angefertigt. Dem Projektleiter und meinem Doktorvater, Herrn Professor Akça, danke ich für die Betreuung und gute Zusammenarbeit. Bei aller gewährten Freiheit hat er es stets verstanden, mich in kritischen Phasen zu leiten und zu ermutigen und hat seine Fürsorge nicht nur auf den fachlichen Bereich beschränkt. Herzlichen Dank auch an Herrn Professor Saborowski für die zielgerichtete und professionelle Begutachtung meiner Arbeit.

Besonderer Dank gilt Frau Diplom-Statistikerin Almuth Wameling vom Institut für Forstliche Biometrie und Informatik für ihre Hilfe bei der Umsetzung meiner Fragestellungen in die statistische Programmierung und die sonstige statistische Beratung.

Nicol, wenn ich beim Korrekturlesen damals nur halb so gut gewesen wäre wie Du ! Danke. Und für alles andere.

Herrn Professor von Gadow und den Kolleginnen und Kollegen am Institut möchte ich dafür danken, daß sie mir bei tausenderlei kleinen und größeren Problemen geholfen und mir den Rücken frei gehalten haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre umfassende Förderung des Projektes sowie unseren türkischen Partnern, Frau Doktor Hülya Yildirim und Herrn Professor Mehmet Özel. Teşekkür ederim!

Göttingen, im Juli 2001

Roman Radberger

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Begriffsbestimmungen	5
2.1 Istanbul: Stadt und Provinz	5
2.2 Stadt und Verstädterung	7
2.3 Landbedeckung und Landnutzung	9
3 Bisherige Untersuchungen	11
3.1 Die Verstädterung des Großraumes Istanbul	11
3.11 Das Bevölkerungswachstum Istanbuls	11
3.12 „Push“- und „Pull“-Faktoren der Migration	13
3.13 „Gecekondu“ – eine neue Form der Wohnraumbeschaffung	15
3.2 Monitoring von Verstädterung und Landnutzungsänderung mit den Methoden der Fernerkundung	18
3.3 Modellierung der Landnutzungsänderung	23
3.31 Markow-Modelle der Landnutzung	24
3.32 Regressionsmodelle der Landnutzung	25
3.33 Weitere Modelle der Landnutzung	27
4 Das Untersuchungsgebiet	31
4.1 Die Kocaeli-Halbinsel	31
4.11 Naturräumliche Gegebenheiten	32
4.12 Landnutzung	34
4.2 Das Modellierungsgebiet	35
5 Untersuchungsmaterial und -methoden	37
5.1 Satellitendaten	37
5.2 Luftbilder	40
5.3 Weitere Geodaten	41
5.31 Topographische Karten	41
5.32 Digitale Geländemodelle	41
5.4 Luftbildauswertung	42
5.41 Georeferenzierung der Luftbilder	42
5.42 Herstellung der Referenzkarte	43
5.5 Satellitenbildauswertung	45
5.51 Georeferenzierung der Satellitendaten	45
5.52 Multitemporale Satellitenbildauswertung	46
5.521 Histogrammstreckung unter Verwendung von „lookup-tables“ (LUT-Stretch)	48

5.522 Radiometrische Angleichung der multitemporalen Aufnahmen durch einfache Histogrammanpassung	49
5.523 Tasseled Cap (TC)-Transformation	50
5.524 RGB-Clustering	52
5.525 Visuelle Interpretation und Rekodierung	53
5.53 Kartierung der übrigen Landnutzungen	53
5.6 Genauigkeitsschätzung der Satellitenbilddauswertung	54
5.61 Genauigkeitsmaße	55
5.611 Produzentengenauigkeit	55
5.612 Nutzergenauigkeit	55
5.613 Gesamt-Kappa	55
5.614 Klassenweise bestimmtes Kappa	56
5.7 Räumlich-statistische Modellierung	56
5.71 Diskriminanzanalyse	57
5.72 Nichtparametrische Diskriminanzanalyse mit fünf nächsten Nachbarn	57
5.73 Hypothesentest und Validierung des Modells	58
6 Ergebnisse	59
6.1 Luftbilddauswertung	59
6.2 Satellitenbilddauswertung	64
6.21 Radiometrische Anpassung ohne vorhergehende Kontrastverstärkung (Variante 1)	66
6.22 Radiometrische Anpassung mit vorhergehender Kontrastverstärkung (Variante 2)	67
6.221 Ergebnis der Kontrastverstärkung durch LUT-Stretch	67
6.222 Ergebnis der Histogrammanpassung	70
6.23 Histogrammanpassung mit anschließender Kontrastverstärkung (Variante 3)	72
6.24 Ergebnis der Tasseled Cap-Transformation	73
6.241 Tasseled Cap-Transformation mit den Ergebnisbildern der Variante 1	74
6.242 Tasseled Cap-Transformation mit den Ergebnisbildern der Variante 2	75
6.25 RGB-Clustering	75
6.26 Rekodierung und Nachbearbeitung	77
6.27 Genauigkeitsschätzung für die Landnutzungskartierung des Jahres 1994	78
6.3 Die Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen von 1994 bis 1998	80
6.4 Räumlich-statistische Modellierung	81
6.41 Das empirische, räumlich-statistische Modell für die Halbinsel Kocaeli	81
6.42 Ermittlung der Prognosegenauigkeit der nichtparametrischen Diskriminanzanalyse durch Kreuzvalidierung	85
6.43 Untersuchung der Einflußstärke einzelner Variablen	86
7 Diskussion	91
8 Zusammenfassung	99

9 Literatur	105
10 Anhang	115

1 Einleitung

Prognosen des weltweiten Bevölkerungswachstums im allgemeinen und des Wachstums der städtischen Bevölkerung im besonderen sind stets mit großen Unsicherheiten behaftet. Gleichwohl sind sie notwendig, um wenigstens eine Vorstellung von den Größenordnungen des zukünftigen Wandels zu gewinnen. Das Wachstum der Städte ist der größte Einzelfaktor, der die Entwicklung der Welt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts beeinflussen wird (BERNSTEIN 1996). Von besonderer Bedeutung sind dabei die städtischen Siedlungen in den Schwellenländern, welche für den Großteil der weltweiten Verstädterung verantwortlich sein werden. Diese Entwicklung mit ihren Chancen und Risiken bildet auch den thematischen Hintergrund zu der vorliegenden Arbeit, weshalb zu Beginn einige Zahlen genannt werden sollen.

Mitte der neunziger Jahre lebten schätzungsweise 2,6 Mrd. Menschen in Städten. Etwa 34 % davon lebten in den weniger entwickelten Ländern. Bis 2030 wird praktisch eine Verdoppelung der Stadtbevölkerung auf 5,1 Mrd. erwartet, wovon dann über 80 % auf die Entwicklungs- und Schwellenländer entfallen werden (UNITED NATIONS 1998). Gleichzeitig wird in wenigen Jahren zum ersten Mal in der Geschichte der Anteil der Stadtbewohner an der Weltbevölkerung ebenso groß sein wie der Anteil der Landbewohner. Im Jahre 2030 werden es mehr als drei Fünftel sein. Daraus folgt, daß die Stadtbevölkerung – trotz seit Anfang der achtziger Jahre sinkender Wachstumsrate – bei weitem schneller wächst als die Weltbevölkerung insgesamt und daß die Entwicklungs- und Schwellenländer den weitaus größten Anteil an dieser Entwicklung haben werden. Dort wird ein immer stärkerer Zustrom der Landbevölkerung beobachtet, die sich bessere Arbeitsmöglichkeiten und einen höheren Lebensstandard verspricht (WOLFF 1990). Nicht von ungefähr fanden als Veranstaltungen der Vereinten Nationen die „International Conference on Population and Development“ in Kairo (1994) und die „Conference on Human Settlements“ in Istanbul (1996) statt.

Die Türkei steht beispielhaft für die Entwicklung in den Schwellenländern und die damit verbundenen Probleme. Bei den folgenden Zahlen (STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) ist zu berücksichtigen, daß sie für ein so dynamisches Land wie die Türkei nicht die neuesten Trends aufzeigen können. Da das Statistische Bundesamt die Reihe „Länderberichte“ jedoch eingestellt hat und die türkischen Originalquellen neuesten Datums nicht verfügbar waren, sollen die Zahlen an dieser Stelle trotzdem verwendet werden, um einen Eindruck von der Entwicklung zu vermitteln.

- Zwischen 1965 und 1985 hat sich die Zahl der Städte mit mehr als 100 000 Einwohnern von 14 auf 35 erhöht.
- In der Größenklasse der Städte mit über 250 000 Einwohnern stieg die Bevölkerung im selben Zeitraum von 3,4 auf 12,8 Mio.
- Der Anteil der Stadtbevölkerung stieg von 24 % im Jahre 1950 auf 38,5 % im Jahre 1970 und erreichte im Jahre 1990 59 %.

Der angedeutete Wandel vollzieht sich jedoch nicht im gesamten Land, sondern hauptsächlich in einigen Ballungsräumen im Marmaragebiet, entlang der Ägäis und um die Hauptstadt Ankara herum. Weitere Schwerpunktgebiete der Verstädterung liegen in den Provinzen Adana und Gaziantep im Südosten des Landes. Die Ballungsräume sind zugleich Schwerpunkte der industriellen Produktion. So wuchs die Bevölkerung der Provinz Istanbul im Zeitraum von 1985 bis 1990 mehr als dreimal so schnell wie die Bevölkerung des ganzen Landes. Ihre Einwohnerdichte lag 1990 bei 1 280 Einwohnern pro km² gegenüber dem landesweiten Durchschnitt von 73 Einwohnern pro km² (DEVLET ISTATISTIK ENSTITÜSÜ 1998 I). Darin zeigt die Türkei eine Gemeinsamkeit mit Ländern der dritten Welt, wonach neben einem unausgeglichene raum-zeitlichen Ausbreitungsmuster der Ballungsräume die unangefochtene Führungsrolle einer einzigen Stadt kennzeichnend ist (VAN DER MERWE 1989). So befanden sich im Jahre 1990 45 % aller Industriearbeitsplätze im Großraum Istanbul (RITTER & RICHTER 1990). Eine weitere Gemeinsamkeit mit den Stadtentwicklungen der dritten Welt und gleichzeitig eine Ursache sozialer Spannungen ist das unregelmäßige Aufeinandertreffen von Ortsansässigen und Zuwanderern aus verschiedenen Bevölkerungsgruppen. Inzwischen stammt ein beträchtlicher Teil der Zuwanderer aus den süd-östlichen Gebieten des Landes, die in den achtziger und neunziger Jahren vor den Unruhen in ihren Heimatprovinzen geflohen waren (AKKAYA et al. 1998).

Wenn die Verstädterung auch häufig eine Begleiterscheinung der Industrialisierung ist und damit als ein Motor der Modernisierung eines Landes angesehen werden kann (STEWIG 1998), so sind die mit einem unregelmäßigen Wachstum verbundenen Risiken doch unübersehbar. Ein großer Teil der Zuwanderer sowie die bereits ansässige Bevölkerung – soweit sie zu den unteren Einkommensgruppen in der jeweiligen Region zählt – lebt ohne gesicherten Zugang zu sauberem Trinkwasser, Elektrizität und angemessener Gesundheitsversorgung (SANRI 1983). Daraus ergeben sich Beeinträchtigungen der Gesundheit und der Lebensqualität, die mit wissenschaftlichen Methoden noch relativ leicht erfaßt werden können. Viel schwieriger ist es,

die Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes durch Umweltverschmutzung und Ressourcenverbrauch zu beurteilen.

Die Auswirkungen einer ungesteuerten und ungebremsten Verstädterung gehen weit über den lokalen Betrachtungsmaßstab hinaus, denn die Flächen für die Versorgung eines Ballungsraumes mit Nahrungsmitteln, Brennstoff, Trinkwasser und anderen lebensnotwendigen Ressourcen können ein Vielfachtes seiner eigentlichen Größe ausmachen. So hat GIRARDET (1995) versucht, den weltweiten „footprint“ Londons zu erfassen und dabei festgestellt, daß dieser eine Fläche von der Größe Englands besitzt.

In diesem Zusammenhang kommt den Planern und politischen Entscheidungsträgern auf der Ebene der Kommunen, Bezirke oder Provinzen entscheidende Bedeutung bei der Steuerung des Wachstums urban-industrieller Zentren zu. Ziel muß es sein, der ortsansässigen Bevölkerung die Chance auf ein Mindestmaß an Lebensqualität einzuräumen. Gleichzeitig dürfen die schädigenden Auswirkungen des städtischen Wachstums auf das Umland und die leicht zu verbreitenden Medien Wasser und Luft kritische Schwellenwerte nicht überschreiten (CHAIBVA 1995).

Vor diesem Hintergrund stellt die Entwicklung und Erprobung wissenschaftlicher Methoden zur Erfassung der Veränderungsdynamik von Landbedeckung und Landnutzung und der sie bestimmenden geophysischen und sozioökonomischen Parameter im Bereich der Geowissenschaften eine der dringendsten Forschungsaufgaben für die kommenden Jahre dar (TURNER II 1995). Dies soll an einem Beispiel deutlich werden: Die urbanen Ballungsräume stellen enorme Quellen für die Ozonschicht schädigende und den Treibhauseffekt beschleunigende Gase und andere Luftverunreinigungen dar (CUBASCH & KASANG 2000, MATSON & OJIMA 1990). Auf diese Weise wird die Verstädterung Teil des komplexen Problems der Klimaveränderung. Für eine Schätzung der Verschiebung der weltweiten Kohlenstoffbilanz ist es daher notwendig, die Größe der urban-industriell genutzten Fläche möglichst aktuell und genau zu bestimmen.

In diesem Zusammenhang wurde am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde an der Universität Göttingen in Kooperation mit dem Marmara Research Centre in Gebze/Türkei die Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen auf der Kocaeli-Halbinsel für den Zeitraum von 1994 bis 1998 untersucht. Die vorliegende Dissertation beruht auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens. Es wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch eine umfangreiche Sachmittelbeihilfe gefördert (Aktenzeichen Ak 9/9-1 und Ak 9/9-2).

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Teile: Zunächst wird die Veränderung der Landschaft mit Hilfe der Fernerkundung ermittelt, um anschließend diese Beobachtung zusammen mit weiteren Daten einer räumlich-statistischen Auswertung zuzuführen. Es wird der Versuch unternommen, das räumliche Verteilungsmuster der Veränderung durch topographische und topologische Größen zu erklären und schließlich – im statistischen Sinne – zu prognostizieren. Die demographischen und ökonomischen Einflüsse wurden bei der Gesamtbewertung des Verstädterungsprozesses berücksichtigt, jedoch wurden sie bei der statistischen Programmierung nicht als Variablen verwendet. Der Grund dafür liegt in der mangelnden Lokalisierbarkeit von Wirtschafts- und Bevölkerungsdaten für ein räumlich hoch aufgelöstes Modell.

2 Begriffsbestimmungen

2.1 Istanbul: Stadt und Provinz

Das Staatsgebiet der Türkei (779 452 km²) unterteilt sich administrativ in 73 Provinzen, (türk. sing. „il“), denen jeweils ein Provinzgouverneur (türk. „vali“) vorsteht. Unterhalb der Provinzebene gibt es Kreise (türk. sing. „ilçe“) und Amtsbezirke (türk. sing. „bucak“). Die Provinzen tragen ihren Namen für gewöhnlich nach der größten Stadt, welche zugleich das Verwaltungszentrum stellt. Sie unterscheiden sich erheblich in ihrer naturräumlichen Ausstattung, Bevölkerung und Wirtschaftsleistung. Wenn in dieser Arbeit der Name Istanbul verwendet wird, so wird bei jeder Nennung deutlich gemacht, ob es sich dabei um die Stadt selbst oder die gleichnamige Provinz handelt.

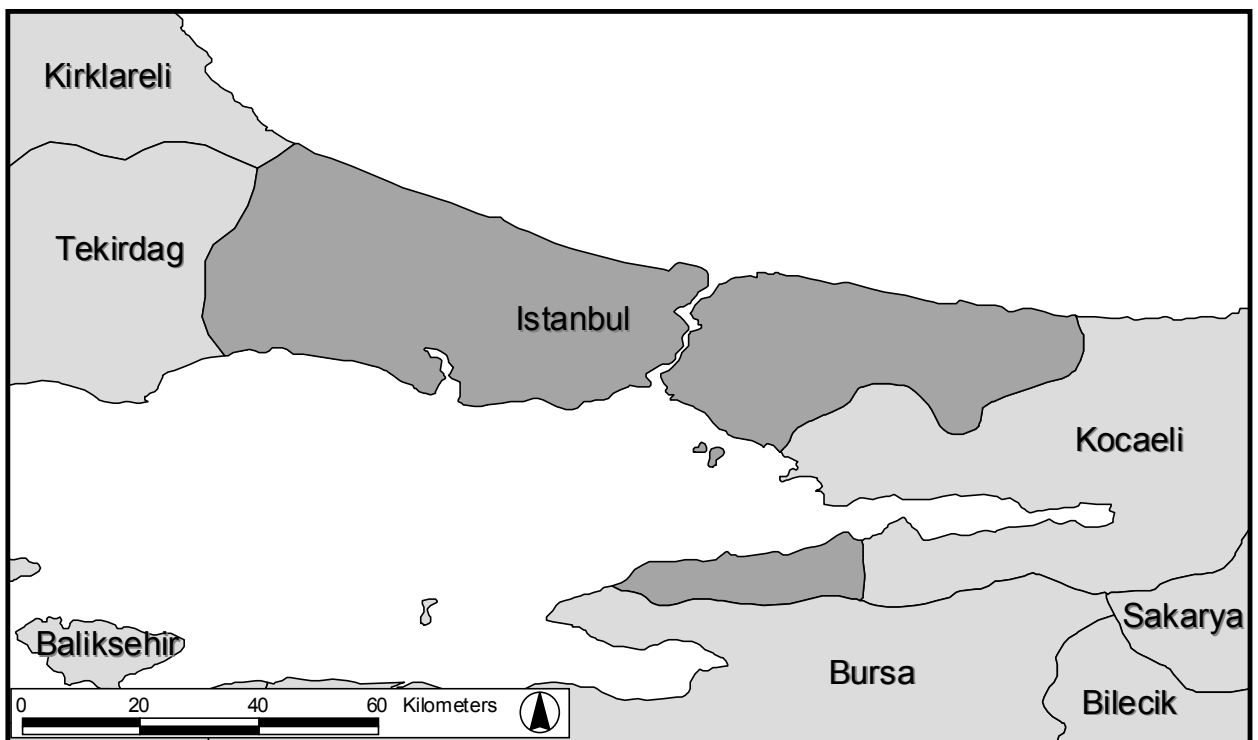


Abbildung 2-1: Die Provinz Istanbul mit den Nachbarprovinzen

Die Provinz Istanbul liegt im äußersten Nordwesten der Türkei, im sogenannten Marmaragebiet. Sie erstreckt sich beiderseits des Bosphorus, und hat eine Fläche von 5 712 km² (DEVLET İSTATİSTİK ENSTİTÜSÜ 1998), wobei der größere Teil auf die europäische Seite entfällt (Abbildung 2-1). Im Jahre 1990 existierten innerhalb der Provinz Istanbul 25 Kreise, nach neuesten Angaben sind es 32. Diese Zunahme ist das Ergebnis einer Gebietsreform vom 1. September 1996, um die administrativen Probleme besser in den Griff zu bekommen (DEVLET

ISTATISTIK ENSTITÜSÜ 2000). Unterhalb der Kreisebene existieren seitdem 221 Dörfer und Amtsbezirke, wobei jede Siedlung mit weniger als 2 000 gezählten Einwohnern als Dorf gilt.

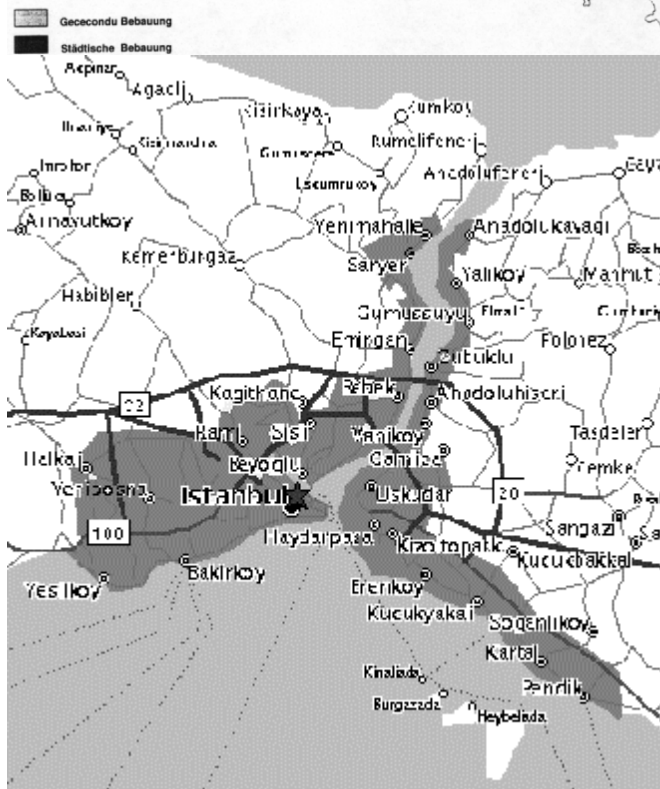
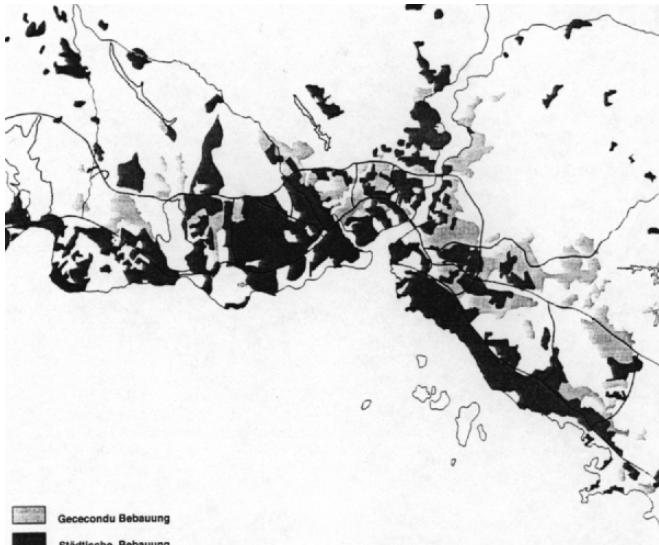


Abbildung 2-2: Wie groß ist die Stadt Istanbul?

Oben: Kartierung von Volker Martin, Berlin (aus MARTIN & FROSCHAUER 1998).

Unten: Ausschnitt aus einem Straßenatlas (© 1998 GeoSystems Global Corp., © 1998 AND Mapping B.V.)

Die Flächengröße des Stadtgebiets von Istanbul ist anhand der amtlichen Statistik nur sehr schwer zu bestimmen. Hinsichtlich der bebauten Fläche finden sich sehr unterschiedliche Darstellungen (vgl. Abbildung 2-2). Einige der aufgeführten Provinzkreise sind flächenmäßig identisch mit den gleichnamigen Stadtteilen während andere weit in das Hinterland ausgreifen und zur Bestimmung der Stadtfläche ungeeignet sind. Sichere Angaben können nur über die Kreise Bakirköy, Eminönü, Beşiktaş, Şişli, Fatih, Zeytinburnu und Beyoğlu auf der Westseite und Kadiköy und Üsküdar auf der Ostseite gemacht werden, die sämtlich zu den Zentralgemeinden zählen und deren Gesamtfläche 275 km² beträgt.

In demographischer Hinsicht erübrigt sich eine strenge Trennung zwischen Stadt und Provinz weitgehend, da der Verstädterungsgrad (d. i. der Anteil der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung) der Provinz Istanbul im Jahre 1997 92,7 % betrug (DEVLET ISTATISTIK ENSTITÜSÜ 2000). Es kann also gesagt werden, daß unter dem Gesichtspunkt der Bevölkerungsverteilung Stadt und Provinz praktisch identisch sind, eine Ansicht, die auch RITTER & RICHTER (1990) vertreten.

2.2 Stadt und Verstädterung

Stadt und Land sind zwei nicht voneinander zu trennende, sich ergänzende Siedlungstypen, deren Beziehungen zueinander ständig zunehmen. Während früher städtische und ländliche Lebensweise einander gegenübergestellt wurden, so ist aus diesem Gegensatz in den westlichen Industrienationen ein vielfältig verflochtenes Stadt-Land-Kontinuum geworden. Bei dieser mit dem Wandel von der Agrar- zur Industriegesellschaft einher gehenden Überformung des ländlichen Raumes gilt es, zwischen „Verstädterung“ im engeren Sinne und „Urbanisierung“ zu unterscheiden. Verstädterung meint dabei die Vermehrung, Ausdehnung oder Vergrößerung von Städten nach Zahl, Fläche oder Bewohnern, und zwar sowohl absolut, als auch im Verhältnis zur ländlichen Bevölkerung bzw. zu den nicht-städtischen Siedlungen. Urbanisierung bedeutet demgegenüber auch die Ausbreitung und Verstärkung städtischer Lebens-, Wirtschafts- und Verhaltensweisen bzw. bezieht sich bei eingeschränkter Begriffsdefinition ausschließlich darauf (BÄHR 1992).

Als hinderlich für internationale Vergleiche erweisen sich die unterschiedlichen Definitionen des Begriffes „Stadt“. Am häufigsten wird dabei mit einer Mindesteinwohnerzahl gearbeitet. Diese reicht von 200 Einwohnern (Dänemark und Island) über Werte zwischen 2 000 und 5 000 Einwohnern (Bundesrepublik Deutschland und Argentinien 2 000, USA und Venezuela 2 500, Österreich und Sambia 5 000) bis 10 000 Einwohnern (Schweiz, Malaysia, Portugal). In der Türkei werden nach dem Dorfgesetz aus dem Jahre 1924 Siedlungen mit weniger als 2 000 Einwohnern als Dorf (türk. „köy“), solche mit 2 000 bis 20 000 Einwohnern als Provinzstadt (türk. „kasaba“) und Siedlungen mit mehr als 20 000 Einwohnern als Stadt (türk. „şehir“) bezeichnet. Siedlungen mit mehr als 10 000 Einwohnern werden als „städtische Eigenschaften tragende Zentren“ angesehen, weshalb dieser Schwellenwert in geographischen Arbeiten gebräuchlich ist (SANRI 1983, RITTER & RICHTER 1990).

Das letztgenannte Kriterium deutet bereits an, daß Städte neben ihrer Einwohnerzahl auch dadurch gekennzeichnet werden, daß sie für ihre Bewohner und das Umland bestimmte Leistungen bereitstellen (Energie- und Wasserversorgung, Transportsysteme, Verwaltungsleistungen). Dazu gehört auch das Vorhandensein von Gemeinschaftseinrichtungen (Sportanlagen, Parks, Krankenhäuser, Höhere Schulen). Ferner weisen Städte eine bestimmte Struktur auf, die sich u. a. in einer Trennung von Stadtteilen nach funktionalen Gesichtspunkten äußert (Wohn- und Geschäftsviertel, Gewerbegebiete).

Sobald Städte eine kritische Größe überschritten haben, kommt es infolge der flächenhaften Ausdehnung und funktionellen Verflechtung mit dem Umland zu erheblichen Abgrenzungsschwierigkeiten. Man spricht dann von „Agglomerationen“ als Zusammenballungen von Siedlungsbereichen, deren Größe sich nicht mehr nach administrativen Gesichtspunkten, sondern anhand der Pendlerbewegungen definieren läßt. Die Zentralgemeinden solcher Agglomerationen haben üblicherweise eine Größe von mehr als einer Million Einwohner und werden als Metropolen bezeichnet. Sie sind häufig von „Trabanten“ oder Satellitenstädten umgeben, die in ihrer wirtschaftlichen Ausrichtung komplett von der Metropole vereinnahmt werden und in ihrer Bevölkerungsentwicklung bald höhere Wachstumsraten als die Zentralstadt verzeichnen. Die Einheit von Metropole, verstärktem Umland und Trabant(en) wird dann als Metropolitanraum (engl. „metropolitan area“) bezeichnet.

Gemäß dieser Definition stellt die Stadt Istanbul eine Metropole in einer Agglomeration dar, deren Einflußbereich (Metropolitan Area) über die Grenzen der gleichnamigen Provinz hinaus in die Nachbarprovinz Kocaeli reicht. So wird die Stadt Gebze bei den Planungen des im Jahre 1966 gegründeten Flächennutzungsplan-Büros Istanbul (BINBP) berücksichtigt, obwohl sie in der Provinz Kocaeli liegt. Bei Betrachtung dieses Gebietes als Metropolitan Area muß jedoch die Einschränkung gemacht werden, daß die in den voll entwickelten Metropolitan Areas des Westens vollzogene Aussiedlung von Teilen der Bevölkerung in das Umland und die Verlagerung von Funktionen und Diensten auf die Trabanten im Falle Istanbuls nicht stattgefunden hat. Diese Gemeinden – 1980 gab es in der Metropolitan Area bereits 18 Städte mit mehr als 20 000 Einwohnern (SANRI 1983) – dienen hauptsächlich als Industriestandorte und „Aufnahmelager“ für Immigranten. Aufgrund mangelnder Planung wurden sie nicht mit den nötigen Finanzmitteln ausgestattet, um städtische Funktionen und Dienste in angemessener Weise anbieten zu können. Es sind über weite Strecken Agglomerationen ohne innere Struktur, und leiten ihren Stadtcharakter allein aus der Zahl ihrer Einwohner ab, deren Lebensqualität erheblich darunter leidet. Das enorme Bevölkerungswachstum der Randgemeinden ist also – anders als in einer vollentwickelten Metropolitan Area – weniger auf eine Aussiedlungstendenz zurückzuführen als vielmehr auf die Immigranten, für die in den Zentralgemeinden kein weiterer Wohnraum geschaffen werden kann. Wegen der von westlichen Metropolitan Areas abweichenden Entwicklung wird in dieser Arbeit statt dessen der Begriff „Großraum“ verwendet.

2.3 Landbedeckung und Landnutzung

In Anlehnung an KÜCHLER (1967) wird versucht, möglichst streng zwischen den vielfältigen Formen der Landbedeckung durch Vegetation und künstliche Oberflächen einerseits und der assoziierten Nutzung andererseits zu trennen. Die Nutzung orientiert sich hierbei an der Landbedeckung: Alle künstlichen Oberflächen, z. B. Asphalt oder Beton, ferner alle Verkehrswege und Bebauungsstrukturen werden bei der Auswertung der Fernerkundungsdaten der Mischklasse „Urban-industrielle Nutzung“ zugeschlagen. Durch den Begriff soll zum Ausdruck kommen, daß keine weitere Trennung zwischen Wohnbauflächen und Gewerbeflächen vorgenommen wird. Alle Ackerflächen, Wiesen und Brachen werden in die Nutzungsklasse „Landwirtschaft“ eingeordnet. Wiesen und Brachflächen werden auch dann dieser Klasse zugeschlagen, wenn eine landwirtschaftliche Nutzung durch Viehweide im Einzelfall nicht sicher nachgewiesen ist.

Nach dem türkischen Forstgesetz sind alle Flächen als Wald zu bezeichnen, die entweder mit Waldbäumen bestanden sind oder mit Gewächsen, die als Begleitflora der Waldbestände gelten. Damit fallen solche Flächen automatisch in die Zuständigkeit der staatlichen Forstverwaltung, weshalb bei der Klassifizierung für alle Waldflächen die Nutzungsklasse „Forstwirtschaft“ unterstellt wird. Wenn die lokale Bevölkerung den Wald doch einmal für den (illegalen) Vieheintrieb nutzen sollte – also Landwirtschaft betreibt – so wird dies im Rahmen der Untersuchung vernachlässigt.

Die zum Ömerli-Stausee gehörende Wasserfläche wurde bei der Untersuchung der Landnutzungsänderung nicht berücksichtigt. Demzufolge findet auch die Nutzungsklasse „Wasserwirtschaft“ bei der Veränderungsanalyse keine Verwendung.

3 Bisherige Untersuchungen

Die vorliegende Arbeit berührt sehr unterschiedliche Themenkreise aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen. Zunächst handelt es sich um das Monitoring von Landschaftsveränderungen mit den Methoden der Fernerkundung. Unter diese sehr allgemeine Kategorie fallen unzählige Veröffentlichungen z. B. zu forst- und agrarwissenschaftlichen sowie landschaftsökologischen Fragestellungen, Habitatuntersuchungen und Analysen von Stoffkreisläufen. Daher ist es notwendig, eine strenge Auswahl von Veröffentlichungen zur multitemporalen Anwendung der Fernerkundung für die Untersuchungen von Stadtlandschaften zu treffen.

Ein weiteres Thema dieser Arbeit ist die räumliche Modellierung von Landschaftsveränderungen. Hier werden Arbeiten sowohl mit urbanem als auch mit einem allgemeiner gefaßten, landschaftlichen Bezug angeführt werden.

Neben den eher naturwissenschaftlich orientierten Themen bestehen zahlreiche Bezüge zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsgeographie. Eine grundlegende Einführung kann an dieser Stelle nicht erfolgen, weshalb eine Beschränkung auf Veröffentlichungen mit besonderem Bezug zum Untersuchungsgebiet und zum zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommen wird.

3.1 Die Verstädterung des Großraumes Istanbul

3.1.1 Das Bevölkerungswachstum Istanbuls

Trotz der Verlegung des Regierungssitzes und der Erhebung von Ankara zur Hauptstadt durch Mustafa Kemal, genannt „Atatürk“, im Jahre 1923 blieb Istanbul auch weiterhin das kulturelle und wirtschaftliche Zentrum des Landes. Die herausgehobene Bedeutung erklärt sich durch Istanbuls Brückenlage sowohl zwischen Asien und Europa als auch zwischen Mittel- und Schwarzem Meer (HÖHFELD 1995). Mit dem Bau der beiden Bosphorusbrücken in den Jahren 1973 („Atatürk Köprüsü“) und 1988 („Fatih Köprüsü“) nahm die wirtschaftliche und bevölkerungsmäßige Entwicklung der Stadt erst recht einen stürmischen Verlauf (Tabelle 3-1). Der verbesserte Zugang zu den Märkten und der erleichterte Transport von Gütern wurde weiterhin durch den Ausbau der Autobahn E5 („Ankara asfaltı“) gewährleistet, welche Istanbul via Izmit (Kocaeli) mit Ankara und dem anatolischen Inland verbindet. Entlang dieser Straße siedelten sich in der Folgezeit zahlreiche Gewerbebetriebe an, so daß von einer „Entwicklungssachse Istanbul-Izmit“ gesprochen werden kann (SEYREK 1982). Die Ausweisung großer Gewerbeflächen entlang der Ausfallstraßen ist seit 1980 gängige Praxis und entspricht

dem Bemühen der Stadtplanung, den historischen Innenstadtraum zu entlasten und einen weiteren Attraktivitätsverlust dieses touristisch bedeutsamen Bereiches zu verhindern (HELLER & GERDES 1991). Daneben findet auch eine planlose Dispersion von Wohnbauten in bisher unerschlossene Gebiete statt (MARTIN & FROSCHAUER 1998). Auf diese Weise haben sich in den letzten 25 Jahren das Erscheinungsbild und die Struktur Istanbuls grundlegend gewandelt (LEITNER 1981, DALAN 1989).

Tabelle 3-1: Einwohnerzahlen für das Untersuchungsgebiet und die Türkei

Jahr	Provinz Istanbul	Bezirk Istanbul	Provinz Kocaeli	Türkei insgesamt
1970	3 019 032	2 132 200	385 408	35 605 000
1975	3 904 588	2 547 400	477 736	40 347 000
1980	4 741 890	2 772 700	596 899	44 737 000
1985	5 842 985	5 476 000	742 245	50 664 000
1990¹⁾	7 309 190	6 753 929	936 163	56 473 000
1995²⁾	9 017 400	–	1 163 900	62 072 000
2000²⁾	11 280 200	–	1 468 000	67 704 000

Quellen: Statistisches Bundesamt (1994), Devlet İstatistik Enstitüsü (1998 I, 1998 II)

¹⁾ Für das Jahr 1990 weichen die Angaben des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (1994) und des DEVLET İSTATİSTİK ENSTITÜSÜ (1998 I, 1998 II) voneinander ab; den türkischen Originalquellen wird hier der Vorzug gegeben.

²⁾ Schätzungen des DEVLET İSTATİSTİK ENSTITÜSÜ (1998 I, 1998 II) für die Provinzen und Bezirke, bzw. der Weltbank für die Türkei insgesamt (zitiert in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994).

Die Entwicklung der Stadt soll durch einige Zahlen verdeutlicht werden. Vorausgeschickt sei die Bemerkung, daß alle Zahlen in den Tabellenwerken nicht darüber hinweg täuschen können, daß die wahre Größe Istanbuls – wirtschaftlich, räumlich, vor allem aber hinsichtlich der Einwohnerzahl – allenfalls eine Schätzung darstellt (YERASIMOS 1997). Ursache dafür sind zum einen die sich verändernden Grenzen der Gebietskörperschaften, auf welchen wiederum die amtliche Statistik beruht, zum anderen die von Zensus zu Zensus wechselnden Erhebungsmethoden.

Zum Zeitpunkt der Volkszählung im Jahre 1990 betrug die Einwohnerzahl von Istanbul (Stadtgebiet) 6,62 Mio. Gegenüber dem Jahre 1985 würde dies einen Anstieg um 20,9 % in nur fünf Jahren bedeuten! Damit stieg die Bevölkerungsdichte der Provinz Istanbul im selben Zeitraum von 1045 auf 1329 Einwohner pro km² (STATISTISCHES BUNDESAMT 1994). Bei Verwendung solcher Zahlen ist jedoch Vorsicht geboten, denn die achtziger Jahre waren durch Eingemeindungen gekennzeichnet, um die administrativen Grenzen und damit die Kompetenzen des BINBP an das Wachstum der Stadt anzupassen (vgl. HÖHFELD 1995).

Der Anteil der Stadt an der gesamten türkischen Bevölkerung belief sich damit auf 11,7 % (1990), bei Berücksichtigung der Provinz Istanbul mit 7,43 Mio. Einwohnern sogar auf 13,2 %. Wegen der im Vergleich zum gesamten Land dreimal höheren Wachstumsrate dürfte sich dieser Anteil inzwischen noch wesentlich erhöht haben. Es herrscht allgemeine Übereinstimmung darin, daß der Hauptgrund für dieses enorme Wachstum in der Zuwanderung von Landflüchtlingen liegt (AKKAYA et al. 1998, TOEPFER 1989). Interessant ist die Anmerkung von HÖHFELD (1995), die auf Istanbul gezielte Arbeitsmigration sei ein altes Phänomen, welches man bereits im 18. Jahrhundert erfolglos bekämpft habe.

3.12 „Push“- und „Pull“-Faktoren der Migration

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 (WOLFF 1990, UHLMANN 1988). Der Länderbericht Türkei (STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) gibt die Situation anschaulich wieder: Zusammen mit den hohen Geburtenziffern leistete das traditionelle Erbrecht mit dem Prinzip der Realteilung beim Tod des Grundstückseigentümers der Zersplitterung landwirtschaftlichen Besitzes weiteren Vorschub. So wird der Anteil der Betriebe von weniger als drei Hektar Größe an der Gesamtzahl der landwirtschaftlichen Betriebe für das Jahr 1970 mit über 57 % angegeben, während ihr Anteil an der Betriebsfläche damals lediglich 16,2 % betrug.

Neuere Zahlen für das Jahr 1980 sind wegen abweichender Erhebungsmethoden der türkischen Agrarzense nur bedingt mit früheren Angaben vergleichbar. Danach vereinigten im Jahre 1980 Großbetriebe mit mehr als 20 ha fast 35 % der gesamten Betriebsfläche auf sich. Weiterhin soll im Zeitraum von 1970 bis 1980 der Anteil der im Pachtverhältnis auf Natural- oder Geldbasis bewirtschafteten Betriebe von 14,2 auf 20 % gestiegen sein. Diese Zahlen deuten ein weiteres Merkmal der türkischen Agrarstruktur an, wonach in landwirtschaftlichen Schwerpunktgebieten im Südosten des Landes geradezu feudalistische Besitzverhältnisse herrschen. Einflußreiche Großgrundbesitzer (türk. „Aga“) herrschen dort über das bewässerte Ackerland und ein Heer von besitzlosen Landarbeitern und deren Familien (UHLMANN 1988). Die Armut der ländlichen Bevölkerung dürfte gerade in diesen Gebieten besonders groß sein. Welcher Art die Arbeitsverhältnisse auf dem Lande sind, wird durch folgende Zahlen deutlich: Zwar waren 1990 45 % aller Arbeitnehmer in der Land- und Forstwirtschaft und in der Fischerei tätig, doch ihr Anteil an den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten betrug lediglich 1,7 % (STATISTISCHES BUNDESAMT 1994).

Drastisch verschärft wird die latente Arbeitslosigkeit in den ländlichen Gebieten durch eine in den siebziger Jahren begonnene Mechanisierungswelle (ULUSOY 1987). Sie zeigt sich in einem angestiegenen Bestand an Schleppern, Sprühgeräten, Motorpumpen und Dreschmaschinen. SCHIRMER (1977) hat mit Hilfe von Umfragemethoden detailliert dargestellt, wie die Beweggründe für eine Wanderung unter den freigesetzten Arbeitskräften gelagert sind.

Danach steht an erster Stelle der Wunsch nach einem Arbeitsplatz unter jenen, die in ihrer Heimat arbeitslos geworden waren, gefolgt von dem Wunsch nach einem höheren Einkommen unter denjenigen, die auch in der Heimat eine bezahlte Beschäftigung hatten. An dritter Stelle in der Rangliste der Wanderungsgründe stehen „familiäre Gründe“. Dahinter verbergen sich Eltern, die zu ihren Kindern ziehen wollen oder umgekehrt, Ehepartner, die mit zeitlichem Abstand in die Stadt gezogen waren, und türkische Immigranten aus Jugoslawien und Bulgarien, bei denen der – oft noch in der Türkei geborene – Vater und Haushaltsvorstand bestimmt hatte, den Wohnsitz in die Türkei zurückzuverlegen. So trägt einer der Stadtteile auf der Istanbuler Westseite den Namen „Yeni Bosnia“ („Neues Bosnien“).

Unter den jungen Zuwanderern wird auch der Hoffnung auf eine Aus- und Weiterbildung (Schule, Fachschule) Ausdruck gegeben. Charakteristisch ist in allen Fällen, daß Informationen, die durch bereits in der Stadt lebende Verwandte und Freunde gewonnen wurden, für die Wanderungsentscheidung die größte Rolle spielen.

Faßt man die bisherigen Informationen dieses Abschnittes zusammen, so ergibt sich ein unklares Bild bei der Bewertung der Verstädterung in der Türkei: Nach STEWIG (1998) ist dieser Prozeß eine Folge des Aufbruchs in die Industriegesellschaft und damit Vorreiter einer Modernisierung des Landes nach westlichem Muster. AKKAYA et al. (1998) und SANRI (1983) argumentieren dagegen, daß der Verstädterungsprozeß in der Türkei einer Industrialisierung vorausseilt und belegen dies mit dem unterproportionalen Wachstum der Beschäftigtenzahlen in der verarbeitenden Industrie. Einigkeit herrscht lediglich darüber, daß, solange die räumlichen Disparitäten innerhalb des Landes bestehen bleiben, die türkische Binnenmigration unverändert anhalten wird (TOEPFER 1989).

BERNSTEIN (1996) vermutet in seiner weltweiten Betrachtung des Phänomens der Verstädterung durch Binnenmigration (d. h. Wanderungsbewegungen innerhalb der Staatsgrenzen), daß die traditionellen „Pull“-Faktoren der Städte gegenüber den von den ländlichen Gebieten ausgehenden „Push“-Faktoren an Bedeutung verlieren. Anders formuliert: Die Unerträglichkeit der Lebensumstände auf dem Land und nicht etwa die neugewonnene Attraktivität der

Großstädte stellt die treibende Kraft der Binnenmigration dar. Die Anzeichen mehren sich, daß dies auch auf die Türkei zutrifft. Damit verdüstert sich das Zukunftsbild des Landes erheblich.

3.13 „Gecekondus“ – eine neue Form der Wohnraumbeschaffung

Die Immigranten finden ihre neue Heimat häufig in einer für die Türkei typischen Klasse von Siedlungen, den „Gecekondus“ (wörtl. Übersetzung: „über Nacht gelandet“). Die „Gecekondus“-Siedlungen können sich nach Art der Entstehung, dem Erscheinungsbild und der Bebauungsstruktur erheblich unterscheiden, dennoch sind zwei Kriterien bei der Begriffsbestimmung maßgeblich (GÖRGÜLÜ 1993):

1. „Gecekondus“ sind auf Grund und Boden erbaut, der sich nicht im Eigentum der Bauherren befindet.
2. „Gecekondus“ werden ohne gültige Baugenehmigung errichtet.

In der geschichtlichen Entwicklung der „Gecekondus“ können im wesentlichen zwei Stadien unterschieden werden:

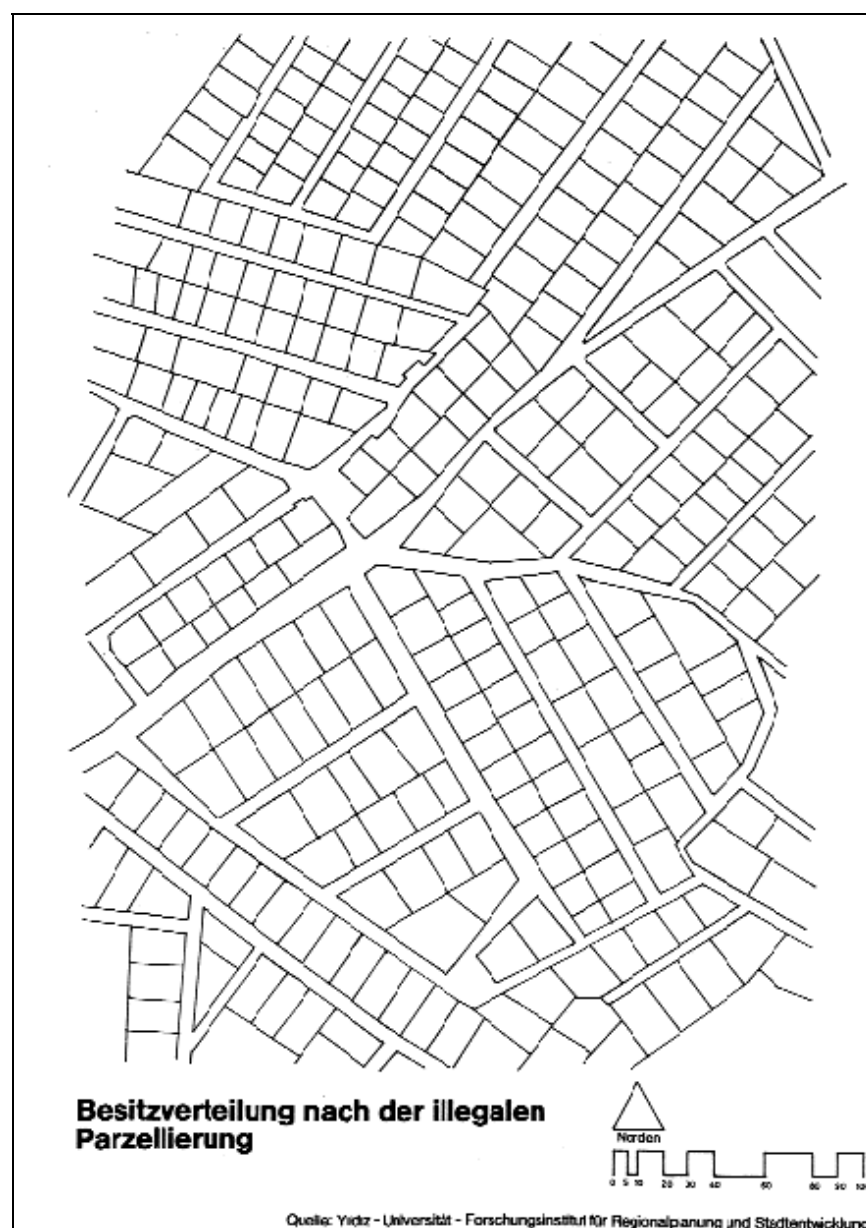
Als die ersten „Gecekondus“-Viertel in den vierziger Jahren entstanden, handelte es sich um Ansammlungen sehr einfacher Häuser („Blechedachviertel“). Sie wurden von den Einwanderern auf fremdem, zumeist kommunalem Grund und Boden als Unterkunft für die Anfangszeit errichtet, und zwar in aller Eile und Heimlichkeit. Anfangs wiesen diese klassischen „Gecekondus“ dörfliche Strukturen auf. Hierin zeigte sich der Versuch, angesichts einer ungewissen Zukunft im Niemandsland an der Peripherie der großen Stadt möglichst viel von den überkommenen Lebensgewohnheiten beizubehalten (HÖHFELD 1984). Noch heute finden sich in denjenigen „Gecekondus“, die seitdem nicht wesentlich verdichtet wurden, ausgedehnte Freiflächen für Viehweide, Hühnerhaltung und die Anlage von Hausgärten.

Vorausschauende Bauherren hatten bereits bei der Anlage ihrer Häuser darauf geachtet, ein oder gar mehrere Geschosse aufstocken zu können, denn der stetige Bedarf nach Wohnraum durch die neuen Zuwanderer ließ den Wert der Häuser erheblich ansteigen. Für die ursprünglichen Bauherren begann der gesellschaftliche Aufstieg mit dem Verkauf oder der Vermietung ihres Wohnraums. Der Zustand der Illegalität wurde durch diesen Vorgang nicht aufgehoben, da zuvor kein Eigentum an dem Grund und Boden erworben worden war und auch weiterhin kein Eintrag ins Grundbuch erfolgte.

Viele ältere „Gecekondus“ haben sich inzwischen zu Vororten mit einem städtischen Erscheinungsbild und ausgeprägter Viertelstruktur weiterentwickelt. Dafür sind u. a. folgende

Merkmale kennzeichnend: Eine hohe Verdichtung mit mehrstöckigen Wohnbauten, Anschluß an die kommunale Infrastruktur (Wasser, Kanalisation, Strom) und Herausbildung eines gut organisierten Einzelhandels mit Geschäften für Möbel, Eisenwaren, Haushaltswaren, Textilien und Lebensmittel im Zentrum des Viertels. Der Dienstleistungssektor wird z. B. durch Autowerkstätten, Handwerksbetriebe für Sanitär- und Elektroinstallation und Wäschereien vertreten. Nicht zu vergessen sind auch die zahllosen kleinen Moscheen, deren Minarette die Hausdächer dort, wo die Verdichtung noch nicht so weit fortgeschritten ist, überragen, und jeweils das religiöse Zentrum des Viertels markieren.

Angesichts dieser Vorgänge stellt sich die Frage, warum die ersten „Gecekondus“ nicht schon in der Anfangsphase den Bulldozern zum Opfer fielen. Zunächst berufen sich die Besitzer auf altes



osmanisches Recht, wonach ein Haus, das provisorisch errichtet wurde, nicht abgerissen werden darf (BAYHAN 1993). Hierbei handelt es sich um eine de facto-Amnestie aus humanitären Gründen. Der langfristige Erhalt der Siedlungen dagegen wird durch ein sehr günstiges Zusammentreffen zweier Interessenlagen gesichert: In den „Gecekondus“ bilden sich häufig Bürger-initiativen, die gerade Wahlkampfzeiten zu nutzen wissen, um für ihre Wohnstätten Bestandsgarantien zu erlangen, während die auf Stimmen angewiesenen Politiker diesem Drängen

Abbildung 3-1: Parzellierungsplan einer „Hisseli Ifraz“ im Stadtteil Pendik (aus GÖRGÜLÜ 1993)

nur allzu gern nachgeben. Auf diese Weise wurden bisher fast alle „Gecekondus“ nachträglich legalisiert (SCHAFFER 1993).

Doch die Zeiten illegaler Landnahmen durch ganze Gruppen von Bauernfamilien sind längst vorbei. Für die unkontrollierte Verstädterung des Großraumes Istanbul und anderer Ballungsgebiete wird inzwischen eine neue Form von „Gecekondu“ verantwortlich gemacht. Dabei handelt es sich um planmäßige Neubausiedlungen, die auf legal erworbenem Grund und Boden aber ohne eine gültige Baugenehmigung errichtet werden. Die häufigsten Bezeichnung dafür lauten „Hisseli Ifraz“ (Parzellierung mit Anteilsschein) oder „Özel Ifraz“ (Private Parzellierung). Andere Bezeichnungen sind „Özel Parsel“ (Private Parzelle) oder „Yari Gecekondu“ (Semi-„Gecekondu“). Dieses Modell der Wohnraumbeschaffung funktioniert derart, daß ein größeres Grundstück von einer Privatperson (Immobilienhändler, Bodenspekulant) erworben wird, um es den Interessenten in Parzellen aufgeteilt zum Kauf anzubieten (Abbildung 3-1). Je nach der Anzahl der Interessenten wird das Grundstück in kleine und kleinste Bebauungseinheiten aufgeteilt, wobei im Falle besonders starker Nachfrage das Los über die Zuteilung der Parzellen entscheidet. Später erfolgt der Eintrag in das Grundbuch, gefördert durch den Einfluß der Interessengruppen und durch die Geldmittel der Spekulanten.

Häufig werden die so erworbenen Grundstücke nicht sofort bebaut, sondern dienen den Käufern als soziale Absicherung für die Zukunft. So gründet sich der Name „Hisseli Ifraz“ auf die Praxis, daß selbst für kleinste Parzellen Anteilscheine ausgegeben werden, die von mehreren Familien gekauft werden. Sie sind somit Anteilseigner bzw. Aktionäre an einem Baugrundstück, welches nach einer Wertsteigerung gewinnbringend verkauft werden kann (GÖRGÜLÜ 1993, YERASIMOS 1997); sie sind selbst zu Spekulanten geworden.

Die Widerrechtlichkeit des geschilderten Vorgangs ergibt sich aus der Tatsache, daß für die parzellierten Gebiete entweder (noch) kein Flächennutzungsplan besteht, oder daß laut Flächennutzungsplan keine Wohnbebauung vorgesehen ist. Da die Behörden bei der Parzellierung nicht beteiligt werden, kann auch kein Bebauungsplan aufgestellt werden. Die fehlende Planung zeigt sich später in der Bebauungsstruktur: Da bei den Verkäufen allein die Gewinnmaximierung eine Rolle spielt, entsteht eine hochgradig verdichtete Bebauung mit mehrstöckigen Wohnhäusern, ohne die vorgeschriebenen Gebäudeabstände einzuhalten. Nach der behördlichen Erfassung der Neubaugebiete, die manchmal erst Jahre später erfolgt, versuchen nachträgliche Bebauungspläne die größten Mängel zu beheben. Trotzdem bleibt das Straßennetz

häufig ineffizient und es können keine Flächen für Gemeinschaftseinrichtungen wie z. B. Parkanlagen oder Spielplätze freigemacht werden (SANRI 1983).

3.2 Monitoring von Verstädterung und Landnutzungsänderung mit den Methoden der Fernerkundung

Zu Beginn sei eine Veröffentlichung angesprochen, die als Pilotstudie zu der vorliegenden Arbeit gelten kann (YILDIRIM et al. 1996). Darin wurde die Veränderung der Landnutzung in der Umgebung der Stadt Gebze (vgl. Kap. 4.2) untersucht. Als Datengrundlage dienten SPOT-Aufnahmen aus den Jahren 1986 und 1993. Beide Szenen wurden einer überwachten, multispektralen Klassifizierung unterzogen. Für den Untersuchungszeitraum ist eine dramatische Zunahme von Industrie- und Siedlungsflächen zu verzeichnen, und zwar vorzugsweise auf Kosten der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Landnutzungsänderung ist klar zu erkennen, daß vor allem die neuen Industrieansiedlungen hauptsächlich entlang der Hauptverkehrsadern entstehen. Diese Beobachtung ist eine der Grundlagen für das in der vorliegenden Arbeit entwickelte räumlich-statistische Modell.

CZERANKA (1992) berichtet über die retrospektive Erfassung der bebauten Fläche von Groß-Kairo für die Jahre 1979, 1982 und 1988 und bedient sich dabei des Vergleichs klassifizierter Landsat TM- und MSS-Bilder. Unter den vielfältigen Problemen einer ungezügelten Verstädterung betont sie vor allem den Verlust landwirtschaftlicher Nutzfläche, welche in einem Land wie Ägypten besonders knapp ist. YAFANG et al. (1992) verwenden dagegen eine Ratiokanalmethode zur Erfassung der Ausbreitung der Stadt Hangzhou für die Jahre 1980, 1984 und 1988. QUARMBIE & CUSHNIE (1989) untersuchen mit Hilfe von SPOT-Daten das Wachstum von Wohngebieten im Südosten Englands und sehen ihre Arbeit als einen Beitrag zur Erhaltung und Entwicklung von Grüngürteln und Naherholungsflächen. Eine weitere Anwendung von SPOT-Daten findet sich bei GAO & SKILLKORN (1998) für die Umgebung von Auckland in Neuseeland. Sie untersuchen die Eignung dieser Satellitendaten für eine detaillierte, multitemporale Erfassung der Landbedeckung, müssen aber zu dem Schluß kommen, daß ihre Ergebnisse aufgrund von Fehlklassifizierungen den allgemeinen Verstädterungstrend für das Untersuchungsgebiet nicht bestätigen können.

Mit der Ausbreitung von Wohnbauflächen an der Peripherie der Stadt Denver, Colorado, beschäftigen sich JENSEN & TOLL (1982). Die wegen der mit hohem Grünanteil ausgestatteten Flächen äußerst schwierige Erfassung von Einfamilienhaussiedlungen versuchen sie mit Hilfe von Texturparametern zu verbessern (vgl. Kap. 5.52).

Einen Vergleich zwischen verschiedenen Verfahren zur Beobachtung der Verstädterung im Großraum Toronto liefert MARTIN (1989). Als Datenmaterial verwendet er Landsat MSS-Bilder aus den Jahren 1974, 1978 und 1981. Als Methoden der Veränderungsanalyse verwendet er

1. einen Klassifikationsvergleich,
2. eine visuelle Interpretation des zusammengesetzten, multitemporalen Datensatzes,
3. eine überwachte Klassifizierung des zusammengesetzten, multitemporalen Datensatzes,
4. eine Hauptkomponentenanalyse des zusammengesetzten, multitemporalen Datensatzes.

Er kommt zu dem Schluß, daß der Vergleich der überwachten Einzelbildklassifikationen die höchste Genauigkeit bei der Erfassung der Landschaftsveränderung liefert, gefolgt von der Hauptkomponentenanalyse des multitemporalen Datensatzes. Die übrigen beiden Verfahren scheitern an der vom Autor gesetzten Schwelle von 85 % Klassifizierungsgenauigkeit für die veränderten Flächen.

Für den langen Zeitraum von 26 Jahren liegt eine Untersuchung zur Verstädterung des Großraumes Atlanta vor (LO & YANG 2000). Die Autoren verwenden sechs Landsat TM- und MSS-Aufnahmen zwischen 1973 und 1997, die sie für eine multitemporale Einzelbildklassifikation nutzen. Die Untersuchung ist Teil des von der NASA finanzierten Projektes ATLANTA (ATlanta Land Use ANalysis: Temperature and Air Quality), welches auf den Zusammenhang zwischen der Zunahme versiegelter Flächen und der Aufheizung des Mikro- und Mesoklimas zielt. Eine wichtige Feststellung der Untersuchung ist der Verlust an Waldflächen durch die Zunahme städtischer Aggregationen entlang der Hauptverkehrsadern.

Daß die Erfassung der Dynamik städtischer Geosysteme auch für ein so sorgfältig beplantes und mit terrestrischen Methoden detailliert kartiertes Land wie die Bundesrepublik Deutschland von großem Interesse ist, beweisen die Veröffentlichungen der letzten Jahre. JACOBS & STIES (1995) führen eine Analyse der Nutzungsänderung im Oberrheintalgraben durch. Sie stützen sich auf eine multitemporale, überwachte Maximum Likelihood-Klassifikation von Landsat TM-Daten, ohne allerdings Referenzdaten zur Beurteilung der Fehlklassifikationen heranzuziehen.

Einen vergleichenden Überblick zur Verstädterung ostdeutscher Ballungsräume geben EINIG et al. (1997). Als Datengrundlage verwenden sie die seit 1996 für Ostdeutschland flächendeckend vorliegenden CORINE (COordination of INFORMATION on the ENVIRONMENT) Land Cover-Daten. Dabei handelt es sich um thematische Karten der Landbedeckung, die durch visuelle Interpretation und Delinierung von Landsat TM- und MSS-Daten gewonnen wurden (vgl.

HEYMANN 1994). Für den Raum Dresden liegt von MEINEL et al. (1996) eine Untersuchung zur Flächennutzungsänderung vor. Die Autoren testen mehrere Monitoringverfahren (Einzelbildklassifikation, visuelle Interpretation, Differenz der Vegetationsindizes), und vergleichen deren Erkennungsleistung anhand von Referenzflächen sowie die Ergebnisse insgesamt mit denen der amtlichen Flächenstatistik. Demnach liegen die visuelle Interpretation und die digitale Klassifikation hinsichtlich der durchschnittlichen Erfassungsgenauigkeit gleichauf. Allerdings fällt bei Neubaugebieten die als verändert erkannte Fläche bei der visuellen Interpretation um den Faktor Zehn kleiner aus als bei der digitalen Klassifikation. Die Erfassungsgenauigkeit bei Verwendung der Vegetationsindizes ist insgesamt als unzureichend zu bezeichnen. Eine weitere Beschränkung dieses Verfahrens liegt darin, daß wegen der fehlenden thematischen Information in der Veränderungskarte daraus keine Bilanz zur Nutzungsänderung abgeleitet werden kann. Beim Vergleich der Klassifikationsergebnisse mit den amtlichen Daten zur Bodennutzung sehen die Autoren zwei wesentliche Vorteile der Fernerkundung: Erstens stehen die amtlichen Daten i. d. R. mit einem zeitlichen Verzug von 1,5 bis 5,5 Jahren zur Verfügung und zweitens werden in den aus dem Liegenschaftskataster hochgerechneten Daten die Flurstücke in ihrer Gänze der jeweils vorherrschenden Nutzungsart zugeteilt.

Eine weitere Untersuchung zur peri-urbanen Flächennutzungsänderung in Ostdeutschland wurde von HEINZ (1996) im Raum Leipzig für die Zeit zwischen 1992 und 1994 mittels Klassifikationsvergleich von Landsat TM-Daten durchgeführt.

SCHÖPPER et al. (2000) berichten über die Verstädterung des Ruhrgebietes für den Zeitraum von 1952 bis 1998 unter Verwendung von historischen Luftbildern und Satellitenaufnahmen. Auch sie führen keine digitale Klassifizierung durch, sondern delinieren die Grenzen der Landbedeckung anhand der MURBANDY-Nomenklatur (**M**onitoring **U**rban **D**ynamics). Bei dieser Nomenklatur handelt es sich um das oben erwähnte CORINE Land Cover Klassifizierungsschema, welches für den bebauten Bereich verfeinert wurde (vierstellige statt dreistellige Codes, vgl. Tabelle 5-5). Den Ergebnissen zufolge wurden in der Periode von 1952 bis 1969 viele landwirtschaftlich genutzte Flächen mit neuen Industrie- und Gewerbeansiedlungen bebaut. In diese Zeit fielen der allgemeine Wirtschaftsaufschwung („Nachkriegswunder“) und der Höhepunkt der Kohle- und Stahlerzeugung im Ruhrgebiet. Die Zeit zwischen 1969 und 1987 war durch eine zunehmende Verdichtung im Wohnbaubereich sowie durch die Ansiedlung von Dienstleistern und nichtverarbeitenden Betrieben auf landwirtschaftlichen Flächen gekennzeichnet. Die Zeit von 1987 bis 1998 wies eine geringere Dynamik auf, mit einem Rückgang industrieller Produktionsstätten zugunsten von Gewerbe- und

Dienstleistungsbetrieben. Interessant ist die in den ersten beiden Untersuchungsperioden ausgeprägte Zunahme von Waldflächen und Naherholungsgebieten. Insgesamt stellt die Landwirtschaft als den großen Verlierer bei der Veränderung der Flächennutzung dar.

Es ist verschiedentlich der Vorschlag gemacht worden, die Beobachtung der Verstädterung im peri-urbanen Raum mit den Methoden der Fernerkundung als Grundlage eines operationalen Monitoringsystems zu nutzen (SIEBERT 1990, STRATHMANN 1986). In der Tat erscheint angesichts der Größenverhältnisse eine Nutzung der Fernerkundung sinnvoll, wenn man flächendeckende Daten für ganze Landschaftsräume mit vertretbaren Kosten erheben will (AKÇA 1989, AKÇA 2001, AKÇA & RADBERGER 2000). Bei der Durchsicht der bisherigen Arbeiten entsteht allerdings der Eindruck, daß sich die Nutzung der Fernerkundung zur Bewältigung dieser Aufgabe noch immer im experimentellen Stadium befindet, denn die vorgestellten Untersuchungsergebnisse sind sämtlich aus Forschungsprojekten hervorgegangen, bei denen der zeitliche und technische Aufwand für die Kartierung zu hoch ist, um von Entscheidungsträgern und Planern vor Ort genutzt werden zu können. Einen Hinweis auf die technischen Herausforderungen bei der Auswertung liefert die Tatsache, daß einige der erwähnten Autoren sich neben der Veränderungsanalyse die Entwicklung neuer Bildverarbeitungstechniken zum Ziel gesetzt haben (JENSEN & TOLL 1982, JACOBS & STIES 1995), während andere zwar konventionelle Methoden verwenden, zugleich aber die grundsätzliche Eignung gängiger Satellitendaten für die Überwachung peri-urbaner Räume testen wollen (GAO & SKILLKORN 1998, QUARMBY & CUSHNIE 1989).

Angesichts dieser Problematik ist die Entwicklung praxistauglicher, operationaler Methoden zur Überwachung von Landschaftsveränderungen auf der Basis kommerzieller GIS- und Fernerkundungs-Software zu einem eigenen Forschungsgebiet geworden. Beispielhaft dafür ist das im Auftrag der NASA durchgeführte **Earth Observations Commercial Applications Program** (EOCAP). Im Rahmen dieses Projektes berichten GREEN et al. (1994) über die Veränderung der Vegetationsdichte von 1988 bis 1991 im Portland Metropolitan District und deren Erfassung mit Hilfe der Bildsubtraktion von Landsat TM-Daten.

Interessant ist in diesem Zusammenhang noch die Untersuchung von JORDAN & LINDER (1993), die über ein Forschungsprojekt zur Erfassung und Fortschreibung der Landnutzung berichten, in welchem ausschließlich die einfachen Aufnahmesysteme KB-Spiegelreflexkamera, Standbild-Videokamera und Super-VHS-Videokamera mit Framegrabber-Software verwendet wurden. Die Aufnahmen mit KB-Spiegelreflexkamera und Standbild-Videokamera wurden von Ultraleichtflugzeugen aus gemacht. Trotz dieser strikten Begrenzung des technischen Aufwandes

empfehlen die Autoren für Deutschland einen Einsatz der Fernerkundung erst ab einer Mindestgröße der Untersuchungsfläche von 50 km². Für das außereuropäische Ausland dagegen sehen sie die beschriebenen Verfahren aufgrund der mangelnden Zugänglichkeit vieler Flächen als Mittel der Wahl an.

Je nach der Dynamik der zu beobachtenden Prozesse und dem Auswertungsmaßstab gilt es, zwischen Satellitenbildern und großmaßstäbigen Daten flugzeuggetragener Sensoren zu wählen. So kommen BRAUN et al. (1997) in ihrer Arbeit zur Integration von Fernerkundung und GIS zum Zwecke der Hochwassermodellierung zu dem Ergebnis, daß satellitengestützte Fernerkundung für klein- bis mittelmaßstäbige Ansätze zur besseren Erfassung von Niederschlagsverteilung, Transpiration und Interzeption beitragen kann, während für den kommunalen Hochwasserschutz hochauflösende Daten flugzeuggetragener Sensoren (Luftbilder) unverzichtbar sind. Eine ähnliche Aufteilung der Anwendungsbereiche zwischen Satelliten- und Luftbild scheint es für die regionale Modellierung von Erdbebenrisiken zu geben (ERDIK & SWIFT-AVCI 1997).

Hinsichtlich des verwendeten Datenmaterials und der Analysemethoden lassen sich folgende Feststellungen treffen:

- Trotz neuer technischer Entwicklungen auf dem Bereich der Fernerkundungssensoren erfreuen sich die von Landsat TM und SPOT XS bzw. SPOT Pan gelieferten Daten der größten Beliebtheit für das Monitoring städtischer Geosysteme. Gründe dafür sind u. a. die verhältnismäßig günstigen Preise und die über Jahre hinweg konstant hohe Qualität der sehr zahlreichen Bilddaten, welche retrospektive Betrachtungen bis in die achtziger Jahre erlauben.
- Neben der digitalen Klassifizierung spielt auch die visuelle Interpretation von Satellitenbildern eine wichtige Rolle für das Monitoring der Verstädterungsdynamik (EINIG et al. 1997, MEINEL et al. 1996, SCHÖPPER et al. 2000). Ein Vergleich beider Verfahren wird von RÖSSEL (1999) bei ihrer Evaluierung von CORINE Land Cover vorgenommen. Sie kommt zu dem Schluß, daß dieses Verfahren die gleiche Kartierungsgenauigkeit zu liefern vermag wie eine digitale Klassifizierung, bemängelt aber unsystematische Verzerrungen aufgrund der technischen Handhabung der benutzten Interpretationsfolien.
- Technische Schwierigkeiten bei der Auswertung von Landsat TM- und SPOT-Daten für urbane Räume führen zu einer verstärkten Suche nach Sensoralternativen (JENSEN & COWEN 1999, HEPNER et al. 1998). Neuerdings gibt es Ansätze, die Erfassungsgenauigkeit durch die Nutzung von Sekundärinformation zu erhöhen (VÖGTLE & SCHILLING 1995, HARRIS & VENTURA 1995).

Besonders interessant erscheint der in England erprobte Ansatz, das Satellitenbild anhand von Volkszählungsergebnissen zu stratifizieren (MESEV 1998, MESEV et al. 1998). Die Hilfsdaten stammen aus den sogenannten „census tracts“. Dabei handelt es sich um Karten der Erhebungsbezirke, für die z. B. die Einwohnerdichte bekannt ist. Innerhalb der einzelnen Straten kann damit die anschließende Maximum Likelihood-Klassifizierung durch a priori-Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten urbaner Landbedeckungsklassen modifiziert werden.

3.3 Modellierung der Landnutzungsänderung

Eine frühere Taxonomie von Modellen der Landschaftsveränderung stammt von BAKER (1989). Er richtet sich dabei hauptsächlich nach dem Aggregationsniveau bei der Behandlung räumlicher Prozesse:

- Aggregierte Landschaftsmodelle („whole landscape models“): Sie beschreiben die Veränderung eines Wertes – z. B. Zerschneidungsindex – summarisch für einen ganzen Landschaftsausschnitt.
- Verteilungsmodelle („distributional landscape models“): Sie liefern Häufigkeitsverteilungen klassifizierter Merkmalsausprägungen – z. B. Flächenanteile von Landnutzungsklassen – innerhalb eines Landschaftsausschnittes.
- Räumliche Modelle („spatial landscape models“): Sie modellieren die Lokalisation und Konfiguration – z. B. Karte der Landbedeckung – für einen Landschaftsausschnitt.

Stärkere Verbreitung hat die Einteilung von Modellen zur Landnutzungsänderung nach LAMBIN (1994) gefunden. Er gibt einen umfassenden Überblick über Methoden zur Modellierung von Entwaldungsprozessen, deren Anwendungsbereich auf Modelle zur allgemeinen Landnutzungsänderung erweitert werden kann. Danach stehen für Modellierungen empirische, mechanistische (funktionale) und dynamische (System-) Modelle zur Verfügung. Aufbauend auf dieser Klassifizierung nimmt der Autor weitere Unterteilungen sowohl unter modelltechnischen als auch inhaltlichen Gesichtspunkten vor. So werden zur Gruppe der empirischen Modelle Markow-Ketten, logistische Modelle, Regressionsmodelle und räumlich-statistische Modelle gezählt. Letztere verwenden andere als die zuvor genannten mathematischen Verfahren. Als typische Vertreter mechanistischer Modellansätze werden Modelle des Bevölkerungswachstums, ökonomische Modelle und Modelle peri-urbaner Landnutzungsänderungen genannt. Systemmodelle werden schließlich als mathematische Beschreibungen komplexer, zusammenhängender Prozesse definiert.

Gegen diese Einteilung spricht die Tatsache, daß Regressionsmodelle auch logistische Funktionen beinhalten können und daß etliche der im Kapitel über „spatial, statistical models“ zitierten Anwendungen entweder Markow-Ketten verwenden (MILLER et al. 1978) oder einen regressionstechnischen Ansatz verfolgen (LIU et al. 1993, GASTELLU-ETCHEGORRY & SINULINGGA 1988, LUDEKE et al. 1990). Der Autor selbst räumt unter Verweis auf ELSTON & BUCKLAND (1993) ein, daß auch die Parameter der mechanistischen Modelle aus empirischen Untersuchungen stammen und durch empirische Vergleiche auf ihre Gültigkeit überprüft werden, also „quasi-empirischen“ Charakter besitzen (vgl. LAMBIN 1994 S. 22, GADOW 1997). Offensichtlich gibt es so viele Überschneidungen zwischen den Modellgruppen, daß eine derart strenge Trennung kaum sinnvoll erscheint. Deshalb sollen an dieser Stelle die Anwendungen lediglich getrennt nach Markow-Modellen, Regressionsmodellen und Modellen mit einem weiteren, sich von den vorherigen Methoden unterscheidenden statistischen Ansatz präsentiert werden.

3.31 Markow-Modelle der Landnutzung

Unter einer Markow-Kette versteht man ein mathematisches Modell zur Beschreibung einer räumlichen oder zeitlichen Abfolge von Zustandsveränderungen. Hierbei muß die Art der Zustandsänderung bestimmte Eigenschaften aufweisen. Kern der Theorie ist die Wahrscheinlichkeit P_{ij} für den Übergang von Zustand i in den Zustand j innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls, wobei i und j entweder Lokalitäten zur Modellierung räumlicher Diffusionsprozesse darstellen können oder Landnutzungs-, bzw. Landbedeckungsklassen zur Modellierung von Landschaftsveränderungen. Nach BELL & HINOJOSA (1977) bedeutet die Markow-Eigenschaft einer Fläche, daß die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Landnutzung zu einem Zeitpunkt bei gegebenen Landnutzungen zu früheren Zeitpunkten allein von der jüngsten Landnutzung abhängt und weniger von weiter zurückliegenden Landnutzungen: „The conditional probability of land use at any time, given all previous uses at earlier times, depends at most upon the most recent use and not upon earlier ones“. Eine Markow-Kette entsteht, wenn sich innerhalb einer Reihe von (jüngsten) Zeitintervallen die Übergangswahrscheinlichkeiten als stationär erwiesen haben (d. h. P_{ij} ist zeitunabhängig). Sobald diese Bedingung erfüllt ist, kann mit den Übergangswahrscheinlichkeiten eine prognostische Modellierung durchgeführt werden.

HATHOUT (1988) unterscheidet in seiner Studie zur Landnutzungsänderung in der Umgebung von Winnipeg zwischen einem rein statistischen Ansatz, der allein auf der Berechnung der Netto-Flächenverluste und der Netto-Flächengewinne für die einzelnen Landnutzungsklassen beruht,

und einem raumbezogenen Ansatz auf fernerkundlich-kartographischer Basis, welcher neben den reinen Flächengrößen auch die räumlichen Verschiebungen berücksichtigt. Er kommt zu dem Schluß, daß bei der nicht raumbezogenen Analyse wichtige Änderungen unerkannt bleiben, wenn sie nicht zur Änderung der Netto-Flächengrößen beitragen. Abschließend führt der Autor eine prognostische Modellierung mit Hilfe der Markow-Methode durch. Dieselbe Methode verwenden BELL (1974) und MILLER et al. (1978) in ihrer Studie zur Dynamik des Brandrodungs-Wanderfeldbaus.

Bei ihrer Beurteilung von Markow-Ketten für die Modellierung von Landschaftsveränderungen stellen SKLAR & COSTANZA (1991) fest, daß die Modellierung mit Markow-Ketten eine räumlich-explizite Prognose der Landschaftsveränderung nicht zuläßt. Die Ursache ist darin zu sehen, daß das reine Markow-Modell ein Verteilungsmodell ohne expliziten Raumbezug darstellt. Damit läßt es auch das Problem der räumlichen Autokorrelation außer acht (NIPPER & STREIT 1978). TURNER (1987) hat versucht, räumliche Abhängigkeiten durch die Definition von Nachbarschaftsbeziehungen zu berücksichtigen. In einem rasterbasierten Ansatz wurde dabei die Wahrscheinlichkeit des Klassenübergangs einer Fläche durch die Klassenzugehörigkeit der vier, bzw. acht nächsten Nachbarn gewichtet.

3.32 Regressionsmodelle der Landnutzung

LIU et al. (1993) untersuchen die Abhängigkeit der Entwaldungsrate auf den Philippinen von der Entfernung der Waldflächen zu Straßen, der Straßendichte und dem Umfang/Fläche-Verhältnis unter Verwendung von linearen und nicht-linearen Einfachregressionen. Dabei stellen sie eine enge Beziehung zur Erschließung der Flächen durch den Straßenbau fest.

GASTELLU-ETCHEGORRY & SINULINGGA (1988) stellen ebenfalls eine Reihe linearer Einfachregressionen auf und berücksichtigen dabei eine Fülle von topographischen, geomorphologischen, meteorologischen, bodenkundlichen und sozioökonomischen Größen bei einer geringen räumlichen Auflösung der Elementarflächen von 1x1 km.

MERTENS & LAMBIN (1997) untersuchen die Abhängigkeit des Grades der Entwaldung, bzw. der Walddegradierung im südlichen Kamerun ausschließlich vom Grad der Zugänglichkeit. Sie verwenden dafür die Nähe zur nächsten Straße und zur nächsten Stadt, die Waldflächenfragmentierung und die Nähe zur nächsten Wald/Nichtwaldgrenze. Die flächendeckenden Daten für die Analyse gewinnen sie aus multitemporalen Landsat TM-Bildern und Luftbildaufnahmen. Die Autoren berechnen univariate Regressionsmodelle (linear und nicht-linear) für jede der erklärenden Variablen. Neu ist in diesem Zusammenhang der Versuch,

anhand bestimmter geometrischer Entwaldungsmuster das Untersuchungsgebiet in Flächen aufzuteilen, welche hinsichtlich der dort wirkenden Entwaldungsmechanismen in sich homogen sind. Auf der Grundlage der empirischen Befunde scheiden die Autoren Risikozonen zukünftiger Entwaldung aus.

CHOMITZ & GRAY (1995) präsentieren ein multinomiales Logit-Modell der Landnutzung und Entwaldung in Belize. Auch sie berücksichtigen eine Vielzahl von geophysischen und ökonomisch relevanten Variablen zu Bodenfruchtbarkeit und -bearbeitbarkeit, Wasserhaushalt, Bodenproduktivität für alternative Feldfrüchte, aktuelle Landbedeckung, Geomorphologie und Entfernung zur nächsten Straße. Durch Netzwerkanalyse ermitteln sie außerdem die Reiseentfernung und die Reisezeit zum nächsten Markt. Sie schließen aus ihren Ergebnissen, daß die Entfernung zur nächsten Straße, die Reisezeit auf der Straße zum nächsten Markt und die ackerbauliche Kapazität die Hauptrolle bei der Flächenumwandlung spielen.

NELSON & HELLERSTEIN (1997) verwenden das gleiche ökonomische Modell, betonen aber den fernerkundlichen Aspekt stärker, indem sie erstens einige Variablen durch die Auswertung von Satellitendaten gewinnen und zweitens die Satellitenkarten für die räumliche Prognose nutzen.

SANDOVAL VASQUEZ (2001) verfolgt einen methodisch ähnlichen Ansatz bei umgekehrter Fragestellung. Ihm geht es darum, unter welchen Voraussetzungen in einem bestimmten Gebiet Mittelchiles landwirtschaftlich genutzte Flächen in Plantagen umgewandelt werden. Seinen Ergebnissen zufolge bestimmen die Parzellengröße, die aktuelle Landnutzung (Weide) und die potentielle Landnutzungsklasse (eine Art Kapazitätsschätzung) über die Nutzungsänderung von Flächen. Auch er verwendet ein Logit-Modell und als einziger der bisher genannten Autoren testet er seine Hypothesen mit einer Kreuzvalidierung.

ZERDA (1998) hat in seiner Arbeit u. a. die Abhängigkeit der Lage von Brandflächen im „Gran Chaco“ Argentiniens von den Entfernungen dieser Flächen zu Straßen, Rinderweiden und Dörfern mittels univariater, nichtlinearer Regressionsmodelle untersucht. Er erhält jeweils eine besonders straffe Beziehung zu den Entfernungen von Straßen ($R^2 = 0,96$) und Dörfern ($R^2 = 0,94$). Die betroffenen Flächen gehören allesamt zu Kategorien mit einer eingeschränkten ackerbaulichen Nutzbarkeit.

Daß Modelle zur Landnutzungsänderung nicht auf den außereuropäischen, bzw. tropischen Raum beschränkt sind, beweist die Arbeit von KÄCHELE & DABBERT (1995 I, 1995 II). Sie modellieren die Produktionsentscheidung landwirtschaftlicher Betriebe in Nordostdeutschland in Abhängigkeit von der Entwicklung innerbetrieblicher Kostenstrukturen und einem Wandel der

EU-Agrarpolitik und den damit verbundenen Subventionen. Sie kommen zu dem Ergebnis, daß landwirtschaftliche Betriebe sehr flexibel auf sich ändernde Rahmenbedingungen reagieren, indem sie die Anteilsflächen bestimmter Feldfrüchte gegenüber Weideflächen verändern oder indem sie sich generell gegen eine landwirtschaftliche Produktion entscheiden. Für diesen, unter bestimmten Rahmenbedingungen großflächig eintretenden Fall sprechen die Autoren neben der Branche vor allem den Agroforstsystemen eine zunehmende Bedeutung zu. Darunter werden für den deutschen Raum in erster Linie Plantagen für die Biomasseproduktion (Energiegewinnung) und Streuobstanbau verstanden (DABBERT 1995).

Einen ähnlichen Anwendungsbezug hat die umweltökonomische Arbeit von BATEMAN & LOVETT (1992). Für 240 walisische Farmen prognostizieren sie in Abhängigkeit von deren naturräumlicher Ausstattung den monetären Wert von Erholungsleistungen und Holzproduktion und vergleichen diese mit dem Produktionswert herkömmlicher Weidewirtschaft. Zunächst stratifizieren die Autoren ihre Population nach dem Vorhandensein einer Milchquote. Anschließend entwickeln sie ein mehrstufiges Modell linearer Einfachregressionen, welches sie mit Hilfe von Bestimmtheitsmaßen und t-Tests validieren.

3.33 Weitere Modelle der Landnutzung

Eine Anwendung der linearen Diskriminanzanalyse des Städtewachstums finden wir bei KING (1967). Für die Periode von 1951 bis 1961 unterteilt er die Städte der kanadischen Provinzen Quebec und Ontario in jeweils zwei Gruppen: Städte mit – im Vergleich zum landesweiten Durchschnitt – stärkerem und solche mit schwächerem Bevölkerungswachstum bzw. absolutem Bevölkerungsrückgang. Für die Analyse verwendet er insgesamt 24 Variablen mit sozialem, ökonomischem, demographischem und geographischem Bezug. Zu den Variablen der letztgenannten Kategorie gehören die Entfernung zur nächsten Metropole und die Anzahl benachbarter Städte innerhalb eines Radius von 50 Meilen. Der Autor stellt fest, daß die strukturbedingten Unterschiede zwischen den beiden Provinzen den Einfluß der erklärenden Variablen überlagern. Innerhalb des Diskriminanzraumes kommt dieser Effekt dadurch zum Ausdruck, daß die Abstände der Klassenmitten bei einer Einteilung nach dem Bevölkerungszuwachs größer sind als bei einer Einteilung nach der Zugehörigkeit zu den beiden Provinzen.

SKLAR et al. (1985) dürfen als Verfechter räumlich expliziter, dynamischer Landschaftsmodelle gelten, ein Thema, mit dem sie sich seitdem beschäftigen (SKLAR & COSTANZA 1991, COSTANZA & RUTH 1998). Für eine Marschregion an der Südküste Louisianas lösen sie die Landschaft in ein

System quadratischer Rasterzellen auf, die untereinander Wasser, Salz und Sedimente austauschen. Die Austauschprozesse werden durch mathematische Gleichungen repräsentiert, deren Parameter nicht auf empirischen Versuchen beruhen. Die Autoren zeigen, wie Änderungen des Wasserregimes in den einzelnen Zellen eine Sukzession verschiedener Habitats auslösen können.

Bei einer zusammenfassenden Würdigung der angesprochenen Beispiele zur Modellierung von Landschaftsveränderungen läßt sich feststellen:

- Der Trend geht eindeutig zu räumlich expliziten Veränderungsmodellen im Gegensatz zu solchen Modellen, die das Untersuchungsgebiet nur summarisch beschreiben bzw. reine Häufigkeitsverteilungen von Landnutzungsklassen liefern (Markow-Modelle).
- Bei allen räumlich expliziten Modellen stellen Fernerkundungsdaten sowie thematische und topographische Karten eine entscheidende Grundlage des Untersuchungsmaterials dar. Gerade die Fernerkundung hat sich zu einem integralen Bestandteil der quantitativen landschaftsökologischen Forschung entwickelt (QUATTROCHI & PELLETIER 1990).
- Trotz der aufkommenden dynamischen Systemmodelle liegen Regressionsmodelle in der Gunst der Anwender vorn. Zu diesem Schluß kommen auch KAIMOWITZ & ANGELSEN (1998) in ihrer Übersicht zu ökonomischen Modellen der tropischen Entwaldung.

Bei der Analyse der Landnutzungsänderung mit empirischen Modellen im allgemeinen und Regressionsmodellen im besonderen tauchen einige modelltheoretische Probleme auf, die es wert sind, an dieser Stelle angeführt zu werden. Bei einer räumlichen oder zeitlichen Extrapolation der Modellergebnisse wird vorausgesetzt, daß die beobachteten Wirkungszusammenhänge – d.h. die Zusammensetzung der erklärenden Variablen und ihre Wirkungsstärke, bzw. -richtung auf die erklärte Variable – konstant bleiben. Die Übertragung der Modellergebnisse auf andere Gebiete oder weit in der Zukunft liegende Zeitpunkte erweist sich damit als fragwürdig (LAMBIN 1997). Allenfalls für die nähere Zukunft des selben Untersuchungsgebietes erscheinen Voraussagen plausibel. Deshalb eignen sich empirische Modelle in erster Linie zur Klärung der Frage nach dem „Warum?“ der Landnutzungsänderung.

Ein weiteres Problem entsteht, wenn eine Vielzahl von Variablen durch ebenso viele univariate Regressionsmodelle berücksichtigt werden soll (vgl. LIU et al. 1993, GASTELLU-ETCHEGORRY & SINULINGGA 1988, MERTENS & LAMBIN 1997). Eine wechselseitige Abhängigkeit der erklärenden Variablen ist zumindest in einigen Fällen sehr wahrscheinlich und müßte durch multivariate Regressionsmodelle berücksichtigt werden. Dabei wird häufig die schrittweise

Variablenauswahl verwendet, welche die Korrelationen unter den erklärenden Variablen mit Hilfe partieller Regressionen berechnet (BAHRENBURG et al. 1992).

Eine Schwäche der erwähnten statistischen Verfahren besteht auch darin, daß sie die Beobachtungen als voneinander unabhängig betrachten und eine räumliche Autokorrelation nicht von vornherein berücksichtigen. Häufig wird deshalb versucht, Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Raumeinheiten zu definieren, um die Schätzungen zu gewichten (vgl. TURNER 1987, CHOMITZ & GRAY 1995).

4 Das Untersuchungsgebiet

4.1 Die Kocaeli-Halbinsel

Die Kocaeli-Halbinsel liegt im Nordwesten der Türkei, umschlossen vom Schwarzen Meer im Norden und vom Marmara Meer und dem Golf von Izmit im Süden. Die westliche Begrenzung stellt der Bosphorus dar, auf dessen gegenüberliegender Seite sich die Halbinsel Catalca befindet (Abbildung 4-1). Letztere gehört zum europäischen Landesteil der Türkei (Thrakien). Nach Osten hin öffnet sich das anatolische Festland. Die größte Ost-West-Ausdehnung der Kocaeli-Halbinsel beträgt etwa 85 km, in Nord-Süd-Richtung beläuft sich die Entfernung von Küste zu Küste auf der Höhe von Gebze auf etwa 47 km.

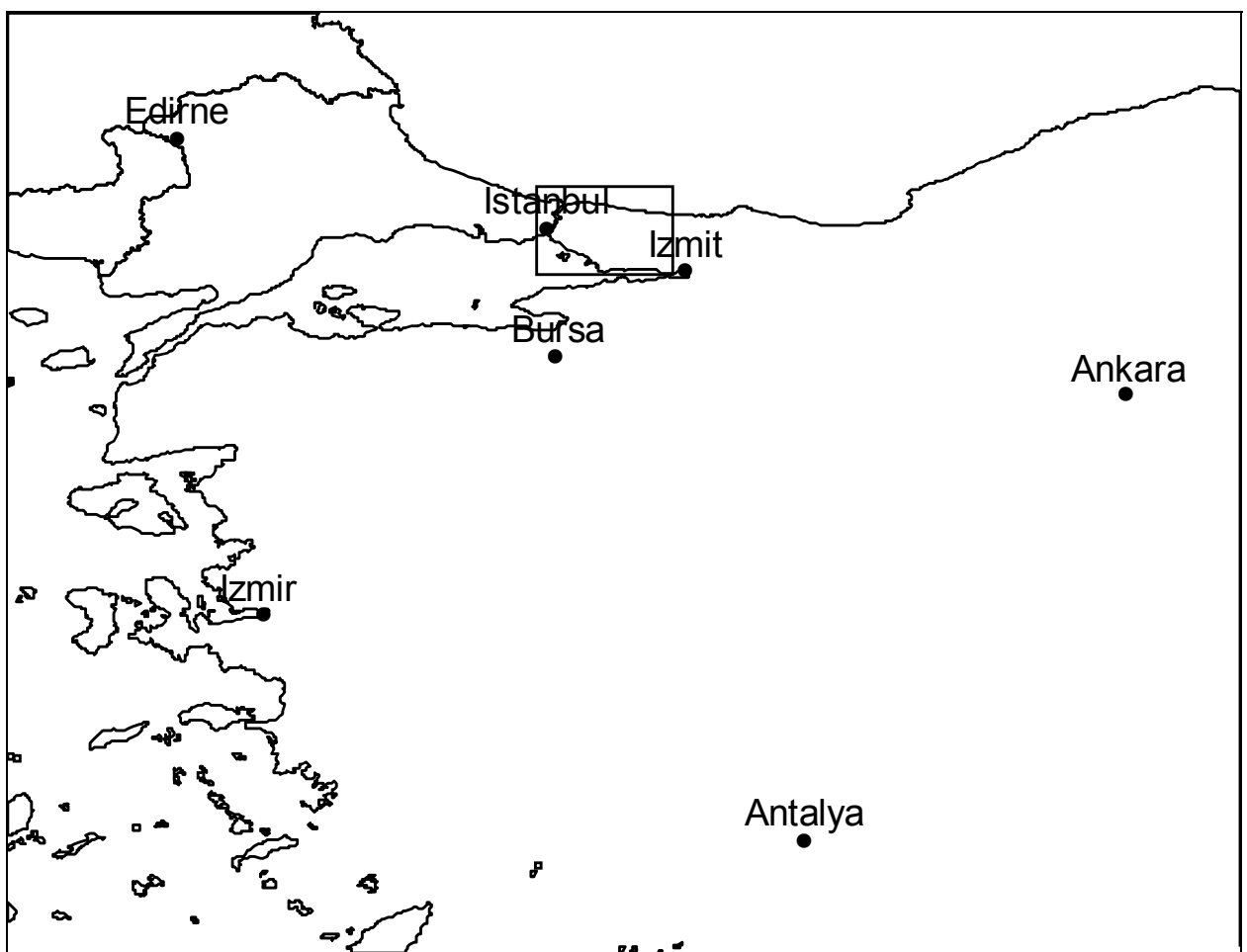


Abbildung 4-1: Lage der Kocaeli-Halbinsel

Da die Halbinsel sich - bezogen auf die Flugrichtung des Landsat 5 - am rechten Rand der für diese Arbeit verfügbaren Satellitenaufzeichnungen befindet, umfaßt das eigentliche Untersuchungsgebiet nicht ihre gesamte Fläche. Vielmehr erstreckt es sich vom Bosphorus aus 68 km nach Osten, der Rest der Halbinsel an der Grenze zu Anatolien befindet sich im benachbarten Flugstreifen. Damit beträgt die Fläche des Untersuchungsgebietes 270 579 ha oder

2 706 km². Für dieses Gebiet wurde die Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen zwischen 1994 und 1998 erfaßt (Abbildung 4-2).

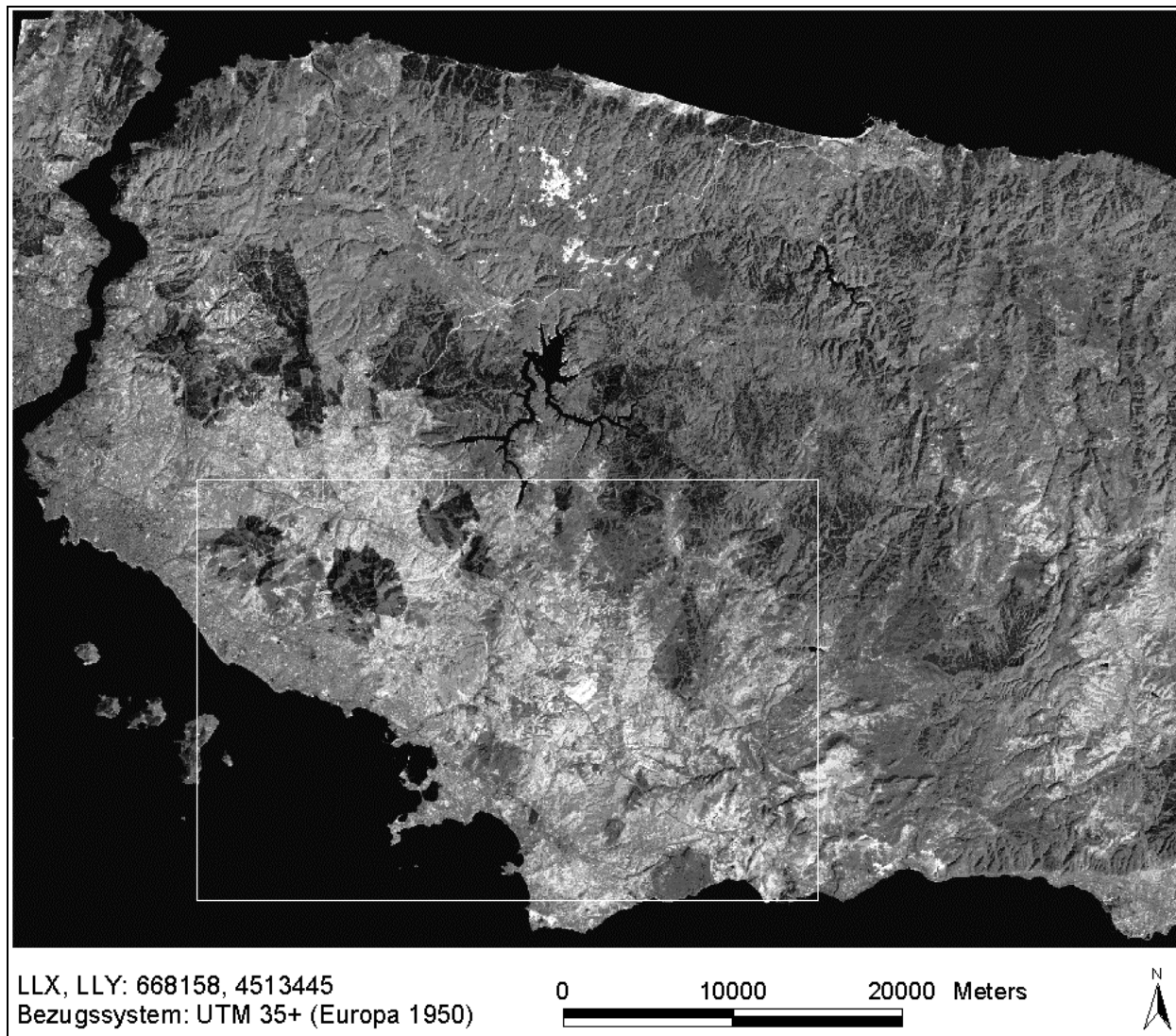


Abbildung 4-2: Satellitenaufnahme der Kocaeli-Halbinsel vom 28.09.1994. Der weiße Rahmen kennzeichnet die Ausdehnung des Modellierungsgebietes

4.11 Naturräumliche Gegebenheiten

Gemäß der naturräumlichen Ausstattung wird die Türkei in sieben Großräume gegliedert (EROL 1983), deren Abgrenzung zusätzlich unter politischen Gesichtspunkten erfolgt. Die Kocaeli-Halbinsel gehört zum Marmara-Gebiet (türk. „Marmara Bölgesi“). Es wird geprägt durch die ost-westlich streichenden Ausläufer des nordanatolischen Randgebirges (Pontus), deren höchste Erhebungen im Bereich der Halbinsel eine Höhe von 535 m über dem Meer erreichen. Das Gelände steigt vom Meeresspiegel rasch an und formt hauptsächlich eine wellige Ebene, aus der sich Hügelketten mit zum Teil steilen Flanken erheben.

Der Jahresgang der Temperatur ist als ausgeglichen zu bezeichnen, die mittlere Monatstemperatur beträgt 13,9 °C, bei einem Minimalwert von 5,5 °C im Januar und einem Maximalwert von 22,9 °C im August. Die jährliche Niederschlagssumme beträgt im langjährigen Mittel 689,1 mm (DIVAN 1998). Auch im Sommer kommt es i. d. R. nicht zu ausgedehnten Trockenphasen. Damit gehört die Kocaeli-Halbinsel in das Vegetationsgebiet der mäßig winterharten (mild temperierten) Trockenwälder (LOUIS 1939), wobei in den höheren Lagen wegen der reichhaltigeren Niederschläge auch von mäßig winterharten (mild temperierten) Feuchtwäldern gesprochen wird.

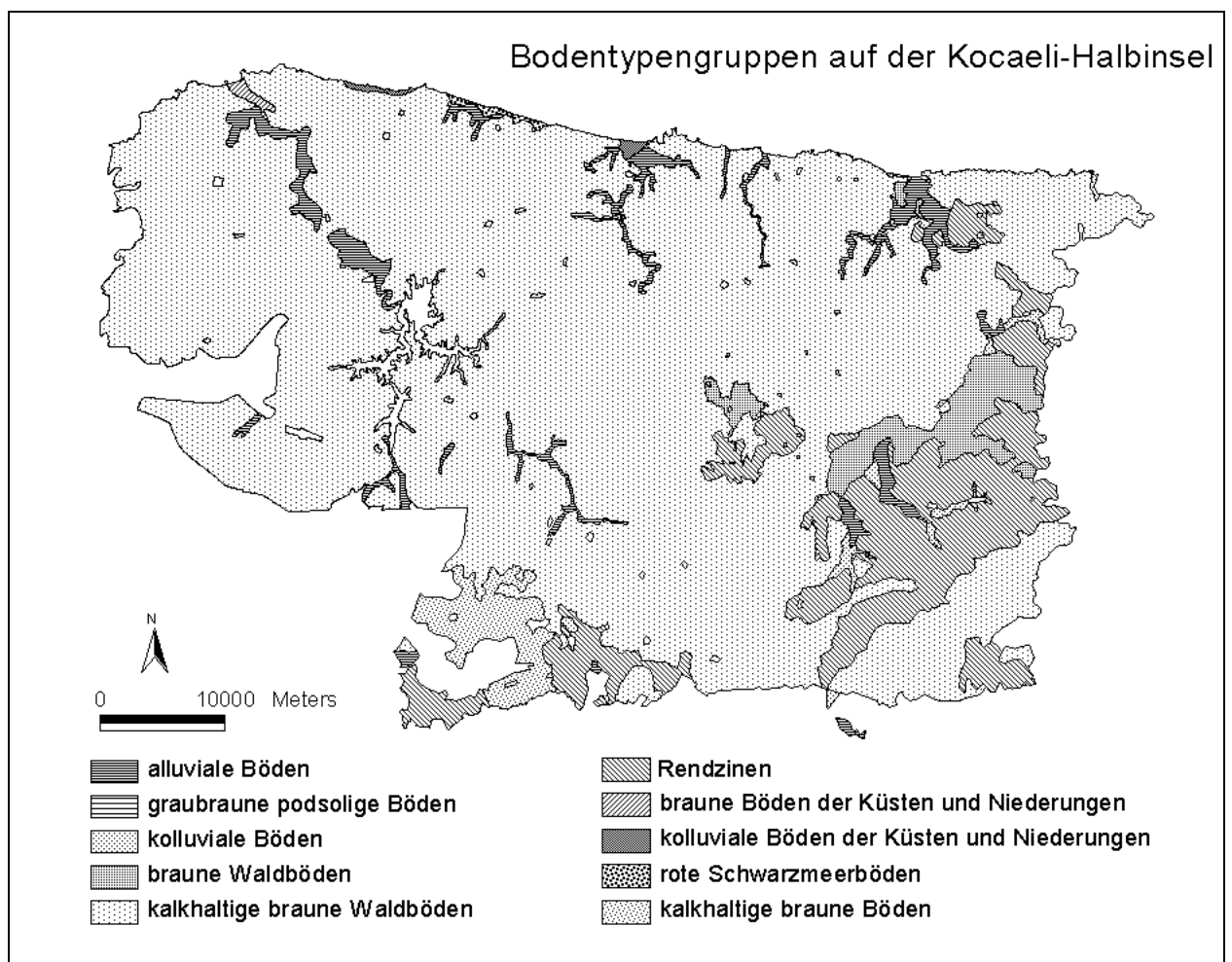


Abbildung 4-3: Einteilung der Böden in Bodentypengruppen (nach KÖY HİZMETLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ 1987)

Bei den Böden handelt es sich um sogenannte „kalkhaltige braune Waldböden“ (türk. „Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları“), die wohl am ehesten mit unseren Braun- oder Parabraunerden vergleichbar sind (Abbildung 4-3). Die Böden sind zumeist flachgründig und wegen ihrer Textur äußerst anfällig gegen Wassererosion. Der Großteil der Halbinsel wird deshalb bei der Kartierung der „land use capability“ nach der Methode von KLINGEBIEL & MONTGOMERY (1961) in die Kategorien V und VI mit Risikofaktor „es“ (erosion/shalowness) eingestuft (KÖY

HIZMETLERI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ 1987). Dies würde nach US-amerikanischen Standards den Ackerbau grundsätzlich ausschließen und eine Nutzung lediglich für Viehweide und Forstwirtschaft zulassen. Der im Untersuchungsgebiet getätigte Anbau von Feldfrüchten muß demnach auf etlichen Flächen als mit einem hohen Risiko behaftet angesehen werden (Abbildung 4-4).

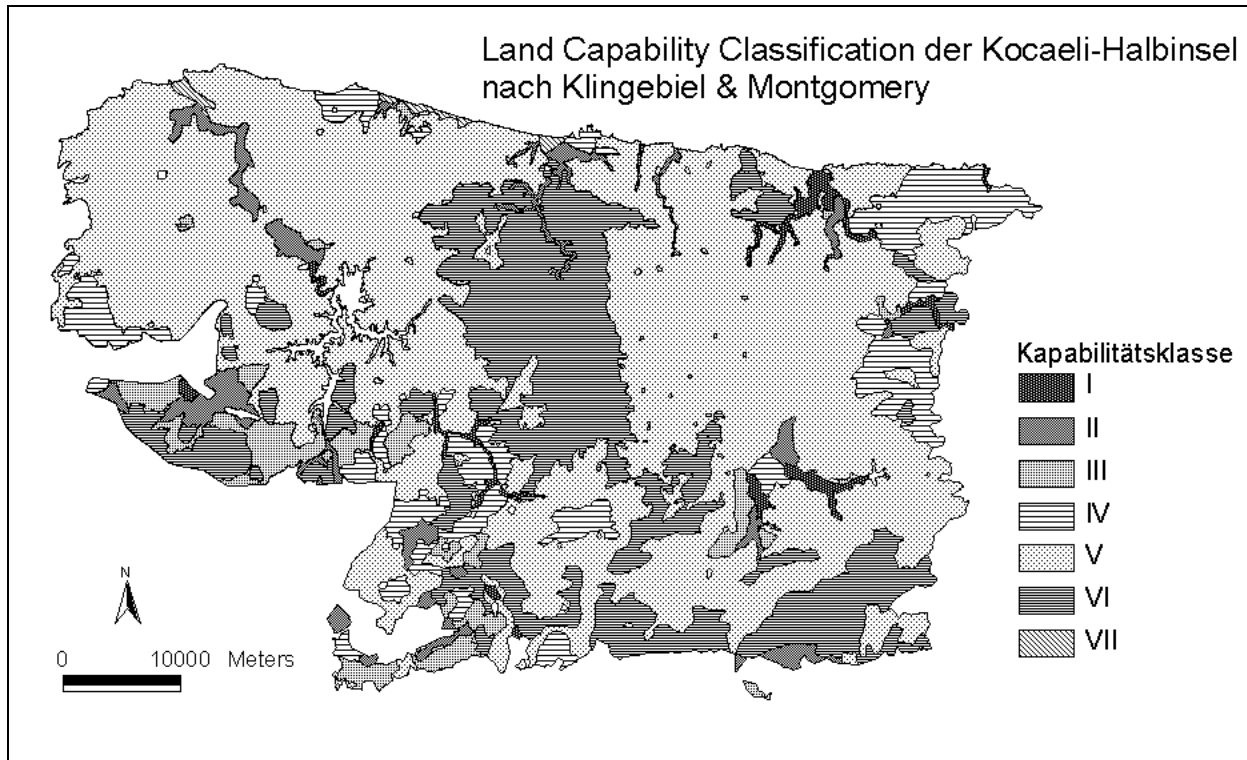


Abbildung 4-4: Landwirtschaftliche Nutzungskapazität (nach KÖY HIZMETLERI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ 1987)

4.12 Landnutzung

Außerhalb der Siedlungsflächen werden die Ebenen für Ackerbau und Viehhaltung (Schafe, Rinder) benutzt. Der Schwerpunkt der landwirtschaftlichen Nutzung liegt in der südlichen Hälfte des Untersuchungsgebietes, zwischen dem urbanen Ballungsraum an der Küste und den größtenteils bewaldeten Hügeln im Norden. Weiterhin sind im Tal von Ömerli im Zentrum der Halbinsel und in der Umgebung des Küstenortes Şile am Schwarzen Meer größere, zusammenhängende Weideflächen zu finden. Am Rande der Siedlungen liegen zahlreiche Wiesen, auf denen noch Reste alter Olivenhaine und Obstplantagen zu finden sind. So war z. B. die Gegend um Darica, am Golf von Izmit gelegen, früher berühmt für ihre Kirschen.

Die Forstwirtschaft hat mit über 60 % mehr als den doppelten Flächenanteil wie die Landwirtschaft (vgl. Kap. 6.3). Im Norden und im Zentrum der Kocaeli-Halbinsel befinden sich ausgedehnte Niederwälder aus Eiche. In der Umgebung von Şile kommen auch Niederwälder aus

Kastanie vor. In jüngerer Zeit nehmen Aufforstungen mit *Pinus halepensis* und – in kleinerem Umfang – *Pinus radiata* immer größere Flächen ein. Diese Bestände sind selten älter als 15 Jahre. Meist handelt es sich um degradierte Waldflächen, die ehemals mit strauchiger Vegetation bedeckt waren. In dieser Gegend können im wesentlichen zwei Formen dieser Gebüsch unterschieden werden: Eine Variante der im Mittelmeerraum sehr verbreiteten und durch Lorus-Arten geprägten Macchie (türk. „Maki“), sowie eine z. T. kaum kniehohe, schütterere Gebüschform, die in ihrer Erscheinung an Heide erinnert, ohne daß es floristische Übereinstimmungen gäbe. Vielmehr besteht diese Form der Landbedeckung aus hartlaubigen, häufig dornenbewehrten Sträuchern, und wird türkisch als „Funda“ bezeichnet. Beide Vegetationsformen bilden das Ende einer langen Geschichte der Übernutzung von Waldflächen, wie sie im Altsiedelraum des Mittelmeeres mit seiner jahrtausendealten Kulturgeschichte typisch ist. Der Verbreitungsschwerpunkt der Maki und Funda befindet sich im südlichen Teil der Halbinsel, als Übergangszone zwischen der land- und der forstwirtschaftlichen Nutzung. Vieheintrieb mit Ziegen und (illegale) Brennholzgewinnung spielen auf diesen Flächen eine große Rolle.

Auf die Bedeutung der urban-industriellen Nutzung wurde bereits in Kap. 3.1 eingegangen. Sie nimmt inzwischen fast 15 % des Untersuchungsgebietes ein. Entlang des Bosphorus und des Marmarameeres erstrecken sich ausgedehnte Werftanlagen, zusammenhängende Industriekomplexe finden sich außer an der Küste auf speziell dafür ausgewiesenen Flächen im Innern der Halbinsel (HELLER & GERDES 1991). In direkter Nachbarschaft dazu sind ausgedehnte „Gecekondus“ entstanden, die weit ins Hinterland ausgreifen.

4.2 Das Modellierungsgebiet

Die räumlich-statistische Modellierung umfaßt nicht die gesamte Halbinsel, sondern beschränkt sich auf ein ca. 36,5 x 24,5 km großes Gebiet zwischen den Städten Gebze und Sultanbeyli. Die Gründe für diese Einschränkung sind zum einen die begrenzte Verfügbarkeit von Daten zur Geländemorphologie in Form eines digitalen Geländemodells und zum anderen die Tatsache, daß die Landschaftsveränderung hauptsächlich in diesem Raum beobachtet wurde. Von Nordwesten her breiten sich die Vororte von Istanbul in das Modellierungsgebiet aus. Im Süden, am Golf von Izmit, liegt die Stadt Gebze (Abbildung 4-5).

Drei Hauptverkehrsadern durchziehen das Untersuchungsgebiet: Entlang der Küste verläuft die Europastraße *E5* welche Istanbul mit Ankara verbindet. Das Zentrum wird von Nordwesten nach Südosten von der Transeuropäischen Magistrale (kurz: „TEM“) durchschnitten, einer

Umgehungsstraße, die sich im Südosten des Gebietes mit der *E5* schneidet. Drittens besteht eine Querverbindung zwischen diesen beiden Straßen im Distrikt Kartal.

Wald ist in diesem Gebiet auf auf die steileren Hanglagen und Hügelkuppen beschränkt und besteht zumeist aus Kiefernauaufforstungen, durchsetzt mit Macchie und Funda. Der Rest der Fläche wird durch intensive landwirtschaftliche Nutzung mit Ackerbau und Viehweide geprägt.

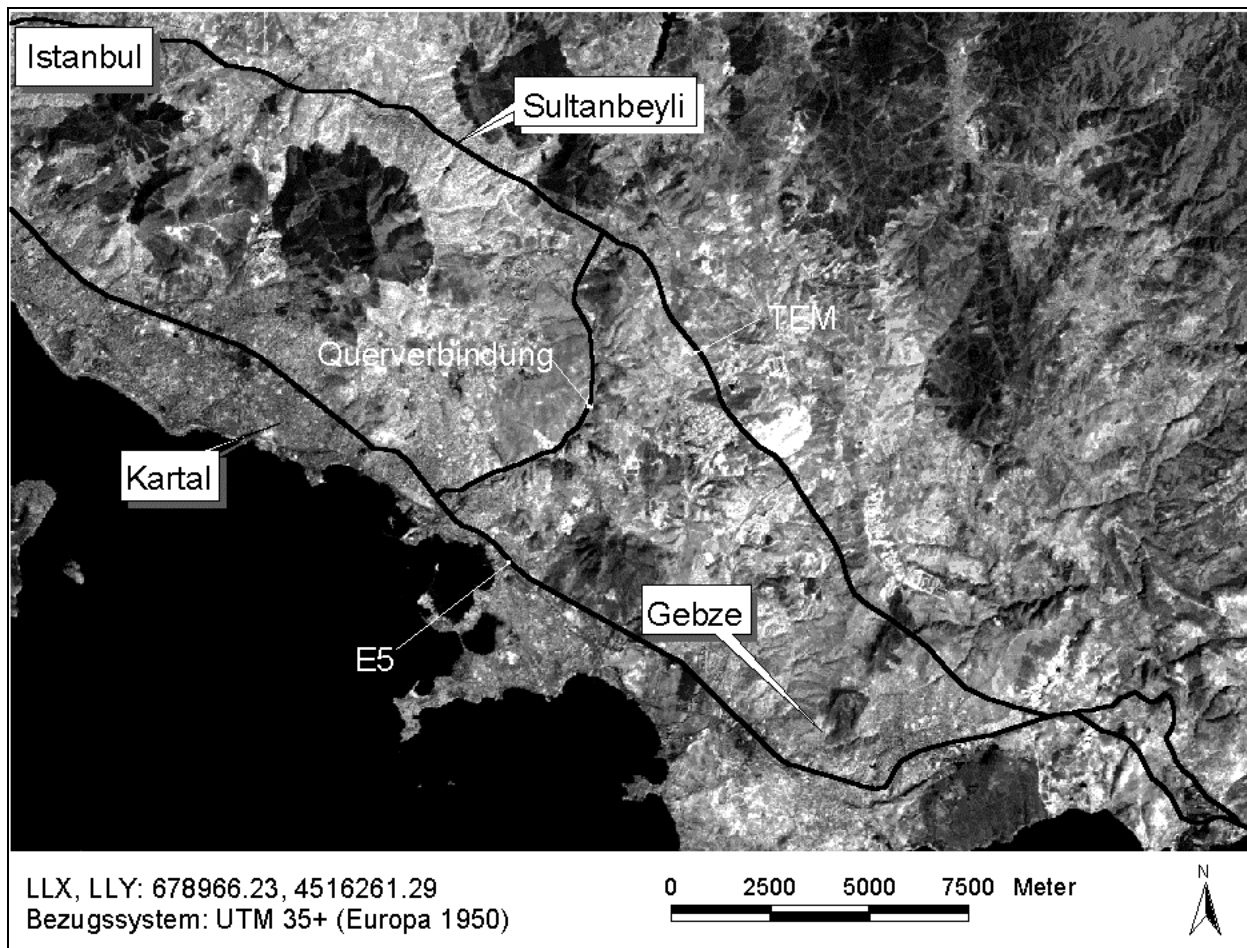


Abbildung 4-5: Übersicht über das Modellierungsgebiet im Jahre 1994 mit der Lage der Hauptverkehrsadern

5 Untersuchungsmaterial und -methoden

5.1 Satellitendaten

Die heute am Markt verfügbaren Aufzeichnungen satellitengetragener Sensoren können anhand ihrer Unterschiede hinsichtlich der spektralen, geometrischen, radiometrischen und temporalen Auflösung charakterisiert werden. Tabelle 5-1 enthält diese wichtigen Kennzahlen für die derzeit gängigen optischen Sensoren, deren Aufzeichnungen für die vorliegende Untersuchung in Frage kamen.

Unter technischen Gesichtspunkten hängt die Wahl der Datenquelle in erster Linie von folgenden Faktoren ab:

- Größe des Untersuchungsgebietes,
- Anzahl und räumliche Aggregation der anvisierten Landbedeckungs- und Landnutzungsklassen,
- Länge der Untersuchungsperiode(n),
- Anforderungen an die Genauigkeit bei thematischen Kartierungen.

Für Auswertungen zu Landnutzungsänderung dürfte die zeitliche Auflösung der modernen satellitengetragenen Sensoren ausreichend sein. Bei Berücksichtigung der Operationalität spielen zusätzlich auch Preise, Liefermöglichkeiten und die Verfügbarkeit bereits existierender Bilddaten eine Rolle.

Bei der Größe des Untersuchungsgebietes läßt sich der Auswertungsmaßstab als „regional“ bezeichnen. Im Zusammenhang mit der zu erwartenden räumlichen Verzahnung der Landnutzungsformen wären Daten der Sensoren SPOT HRV, Landsat TM und IRS LISS in Frage gekommen. Daten des neuen, hochauflösenden IKONOS II standen zu Beginn des Forschungsvorhabens noch nicht zur Verfügung und hätten im Rahmen der bewilligten Mittel auch aus Kostengründen nicht beschafft werden können. Da im Archiv des Marmara Research Centre bereits eine qualitativ hochwertige, wolkenfreie Aufnahme des Thematic Mapper auf Landsat 5 vom 28. September 1994 vorlag, sollte diese den Beginn der Untersuchungsperiode markieren. Es wurde entschieden, eine weitere Aufnahme desselben Sensors aus dem gleichen Zeitraum des Jahres 1998 zu beschaffen (Tabelle 5-2). Aus der Datenbank des italienischen Distributors EURIMAGE wurde anhand von Quicklooks eine nahezu wolkenfreie Szene vom 9.

Oktober 1998 ausgewählt. Eine ausführliche Beschreibung von Aufbau und Arbeitsweise des TM-Sensors findet sich in EHRHARDT (1990).

Tabelle 5-1: Wichtige Merkmale satellitengetragener, optischer Sensoren

Kanal	Spektralbereich [μm]	geometr. Auflösung [m]	radiometr. Auflösung [bit]	zeitliche Auflösung [Tage]	Flughöhe [km]	Off-Nadir möglich?
Multispectral Scanner (MSS) auf ERTS 1, 2 und Landsat 3 bis 5						
1	0,50 - 0,60	79	8	18	917	nein
2	0,60 - 0,70					
3	0,70 - 0,80					
4	0,80 - 1,10					
5	10,40 - 12,60	240				
Thematic Mapper (TM) auf Landsat 4 und 5						
1	0,45 - 0,52	30	8	16	705	nein
2	0,52 - 0,60					
3	0,63 - 0,69					
4	0,76 - 0,90					
5	1,55 - 1,75					
6	10,40 - 12,50	120				
7	2,08 - 2,35	30				
Enhanced Thematic Mapper (ETM+) auf Landsat 7						
1-5 und 7 wie TM						
6	10,40 - 12,50	60				
Pan	0,52 - 0,90	15				
LISS III auf IRS-1D						
2	0,52 - 0,59	23	7	24	816	ja
3	0,62 - 0,68	23				
4	0,77 - 0,86	23				
5	15,50 - 17,00	70				
High Resolution Visible Sensor System (HRV) auf Spot 4						
1	0,50 - 0,59	20	8	variabel	832	ja
2	0,61 - 0,68					
3	0,79 - 0,89					
4	1,58 - 1,75					
Pan	0,61 - 0,68	10				
IKONOS II						
1	0,45 - 0,52	4	11	variabel	681	ja
2	0,52 - 0,60					
3	0,63 - 0,69					
4	0,76 - 0,90					
Pan	0,45 - 0,90	1				

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-2: Technische Daten zu den verwendeten Satellitenaufnahmen

	Aufnahme 1994	Aufnahme 1998
Mission / Sensor	Landsat 5 / TM	Landsat 5 / TM
Vorverarbeitungs-Level	B	B
Aufnahmedatum / Aufnahmezeit	28.09.1994 / 08:01:47	09.10.1998 / 08:24:26
Empfangsstation	Fucino	Fucino
geogr. Breite/Länge des Aufnahmezentrums	41,02° O / 28,78° N	41,00° O / 28,86° N
Resampling-Algorithmus	Nächster Nachbar	Kubische Faltung
Sonnenhöhe	39,8°	38,7°
Sonnen-Azimuth	141,7°	151,7°
Wolkenbedeckung über dem Untersuchungsgebiet	0 %	0 %

Bei einer Qualitätsüberprüfung der Satellitendaten wurde festgestellt, daß die 94er Szene eine Zeilenverdoppelung in regelmäßigen Abständen aufwies. Ursache dafür ist die Vorverarbeitung der Rohdaten, die Maßstabsunterschiede zwischen X- und Y-Richtung der zu liefernden Rasterbilder ausgleichen soll (EHRHARDT 1990). Dazu werden die Aufnahmen durch eine Erhöhung der Zeilenanzahl (Resampling) in Y-Richtung gestreckt. Bei Landsat 5 TM-Daten wird dazu häufig das Nächster-Nachbar-Verfahren verwendet. Weil dieses Verfahren im Gegensatz zur Kubischen Faltung während des Resamplings keine neuen Pixelwerte erzeugt, wird der Effekt der Bildstreckung durch periodische Zeilenverdoppelung sichtbar.

Als ein weiterer geometrischer Bildfehler wurden sogenannte verdoppelte Kolonnen festgestellt. Auch dies ist ein Resultat der Datenvorverarbeitung, diesmal zur Korrektur von Panorama- und Erdkrümmungsverzerrungen (DARVISHSEFAT 1995). Dabei werden für einen Scanstreifen von jeweils 16 Zeilen Breite spaltenweise neue Pixel eingeschoben. Dieser Effekt soll mit zunehmendem Abstand von der Nadirlinie häufiger werden, was aber im Falle der vorliegenden TM-Szene nicht nachgewiesen werden konnte, da diese Bildbereiche durch kontrastarme Meeresoberflächen (Schwarzmeer und Marmara-Meer) eingenommen wurden.

Sowohl Zeilen- als auch Kolonnenverdoppelung bedeuten eine erhöhte Redundanz im Datensatz und beinhalten keine objektspezifische Information. Während die Kolonnenverdopplung nur sehr schwer zu korrigieren ist, wurden die verdoppelten Zeilen in der 94er Szene zunächst entfernt. Bei einer Gegenüberstellung mit der Satellitenaufnahme von 1998 zeigte sich jedoch eine so große Abweichung in der Bildgeometrie, daß für die weitere Datenverarbeitung auf diese

geometrische Korrektur verzichtet und statt dessen lieber das Originalbild für die Untersuchung herangezogen wurde.

Hinzu kommt, daß im Rahmen der thematischen Bildauswertung ursprünglich an eine konventionelle Klassifizierung anhand spektraler Merkmale gedacht worden war. Bei der zuvor notwendigen Georeferenzierung erhält für gewöhnlich das Nächster-Nachbar-Verfahren den Vorzug vor anderen Resampling-Verfahren, da es keine neuen, in der ursprünglichen Szene nicht vorhandenen Pixelwerte erzeugt (LILLESAND & KIEFER 1994). Ein Resampling mit dem Nächster-Nachbar-Verfahren hätte aber auf jeden Fall zu einer Verdoppelung einzelner Bildpixel geführt. Damit wäre der auf die Verringerung der Redundanz zielende Effekt der vorangegangenen Entfernung doppelter Bildzeilen zunichte gemacht worden.

5.2 Luftbilder

Die Aussagekraft einer thematischen Kartierung mit Hilfe von Satellitendaten steigt erheblich, wenn man detaillierte Angaben zu ihrer Zuverlässigkeit machen kann. Dies gilt um so mehr, wenn die Daten Eingang in eine räumlich-statistische Auswertung finden sollen. Daher wurden 26 panchromatische Schwarz-Weiß-Luftbilder im Maßstab 1:35 000 verwendet, um eine Referenzkarte der Landnutzung herzustellen (engl.: „ground truth“). Die Eignung von Luftbilddaten besonders im peri-urbanen Raum zur Landschaftskartierung mit einem hohen Grad an geometrischer und thematischer Genauigkeit wurde bereits in mehreren Untersuchungen nachgewiesen, wobei eine aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Referenzkarte niemals mit der Realität verwechselt werden darf (HATHOUT 1988, LO & SHIPMAN 1990).

Die Luftbilder stammen aus zwei Befliegungen vom November 1993 und Februar 1994 im Auftrag der „Generalkommandantur für Kartographie“ (türk. „Harita Genel Komutanlığı“). Somit konnten sie als Grundlage einer Referenzkarte für den Anfang der Untersuchungsperiode gelten. Die Bilder wurden von der Generalkommandantur vom Positiv mit einer Auflösung von 28 μ gescannt. Bei einem Bildmaßstab von 1:35 000 ergibt sich daraus rechnerisch eine geometrische Auflösung von 0,98 Metern.

Zusammen mit den Luftbildern wurden von der Generalkommandantur Paßpunkte geliefert, deren Lage- und Koordinatengenauigkeit mit einem Meter angegeben wurde. Diese Angaben können nicht weiter überprüft werden, weshalb sie im Rahmen der Untersuchung als gegeben betrachtet werden.

5.3 Weitere Geodaten

5.31 Topographische Karten

Zur Georeferenzierung des Satellitenbildes von 1994 und zur allgemeinen Orientierung wurden topographische Karten im Maßstab 1:25 000 (TK 25) verwendet. Als Landeskoordinatensystem gilt in der Türkei einheitlich das UTM-Gitter mit dem geodätischen Datum „Europa 1950“.

5.32 Digitale Geländemodelle

Die Generalkommandantur für Kartographie stellt u. a. digitale Geländemodelle im Rasterformat auf der Grundlage der türkischen TK 25 her. Die Höhenlinien dieser Karten mit einer Schrittweite von 10 Höhenmetern werden digitalisiert und in ARC/INFO-kompatible Rasterdaten (ARCGRID) umgewandelt. Die geometrische (horizontale) Auflösung dieser digitalen Geländemodelle beträgt 20 Meter.

Tabelle 5-3: UTM-Blattnummern der verwendeten Geländemodelle

UTM Blattnummer	UTM Blattnummer
f23c3	g23a1
f23c4	g23a2
g22a2	g23a3
g22a3	g23a4
g22b1	g23b1
g22b2	g23b2
g22b3	g23b3

16 solcher Geländemodelle, von denen jedes dem Blattschnitt einer TK 25 entspricht, wurden im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um durch Mosaikierung ein Geländemodell im IMAGINE-Format für den größten Teil der Kocaeli-Halbinsel zu erstellen (Tabelle 5-3 und Abbildung 5-1). Da die Geländedaten bereits auf das Landeskoordinatensystem bezogen waren, brauchte keine weitere Georeferenzierung vorgenommen zu werden.

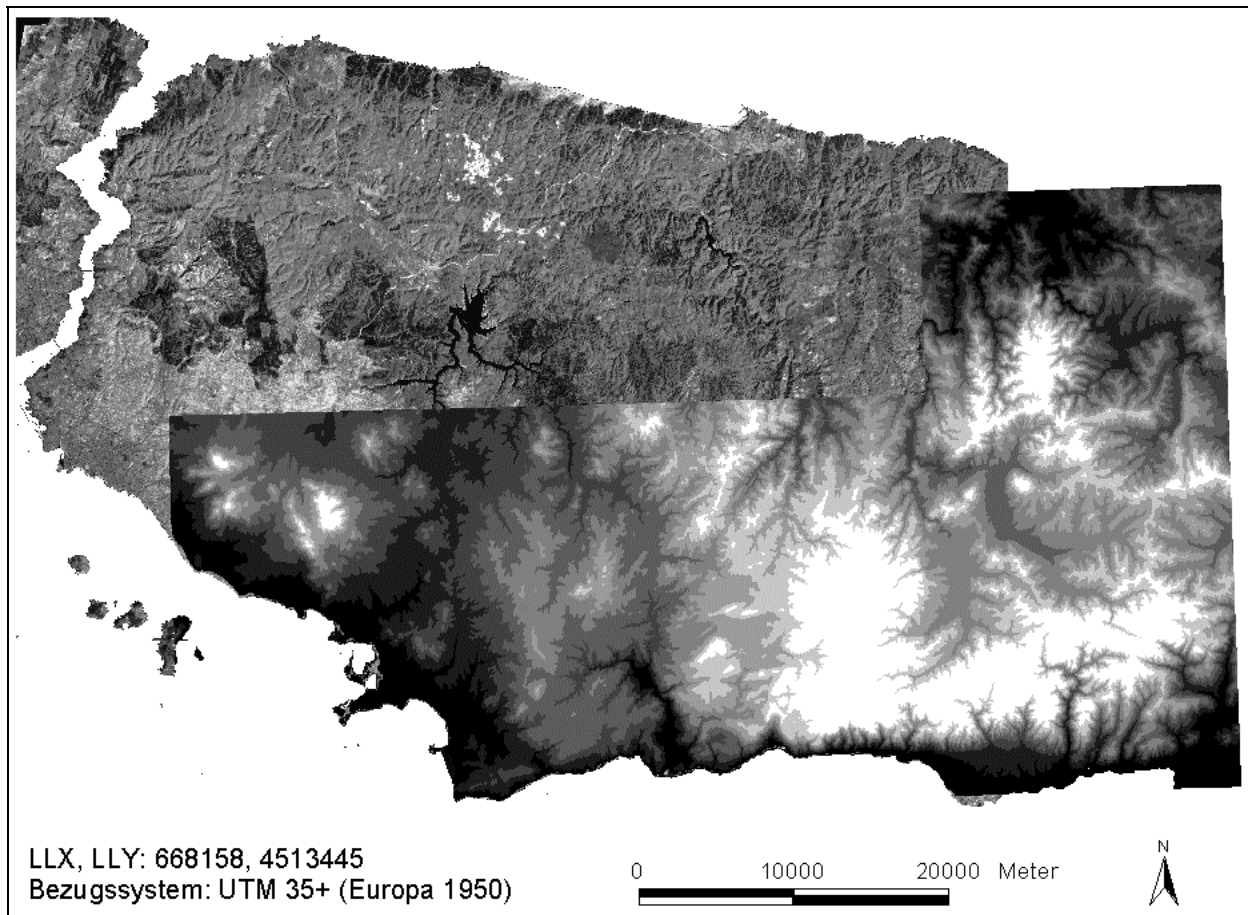


Abbildung 5-1: Lage des mosaikierten Geländemodells in Bezug zur Satellitenaufnahme von 1994

5.4 Luftbildauswertung

5.41 Georeferenzierung der Luftbilder

Die Luftbilder wurden komplett digital-photogrammetrisch ausgewertet. Dafür wurden sie zunächst zu Triangulationsblöcken zusammengefaßt. Die Blöcke wurden nach den Ortschaften „Ömerli“, „Balica“, „Gebze“ und „Şile“ benannt. Die Triangulation wurde mit dem als Bündelblockausgleich bekannten Verfahren durchgeführt (KRAUS 1997). Während die Bearbeitung des Blockes „Ömerli“ am institutseigenen Softplotter erfolgte, wurden die übrigen Blöcke in der Türkei ausgewertet. Lediglich die Auswertungsergebnisse (Karten) konnten nach Deutschland gebracht werden. Da alle verwendeten Paßpunkte mit derselben Lage- und Koordinatengenauigkeit angegeben worden waren und alle Bilder dieselbe Qualität besaßen, soll der Block „Ömerli“ beispielhaft für die durch die Aerotriangulation erzielte geometrische Genauigkeit der späteren Auswertungen sein (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Lagefehler der Paßpunktkoordinaten für den Block „Ömerli“ nach dem Bündelblockausgleich

Fehlermaß	X	Y	Z
Mittelwert der Residuen	1,022	0,988	2,766
Mittl. quadrat. Fehler der Koordinatenschätzung	1,196	1,168	3,055

5.42 Herstellung der Referenzkarte

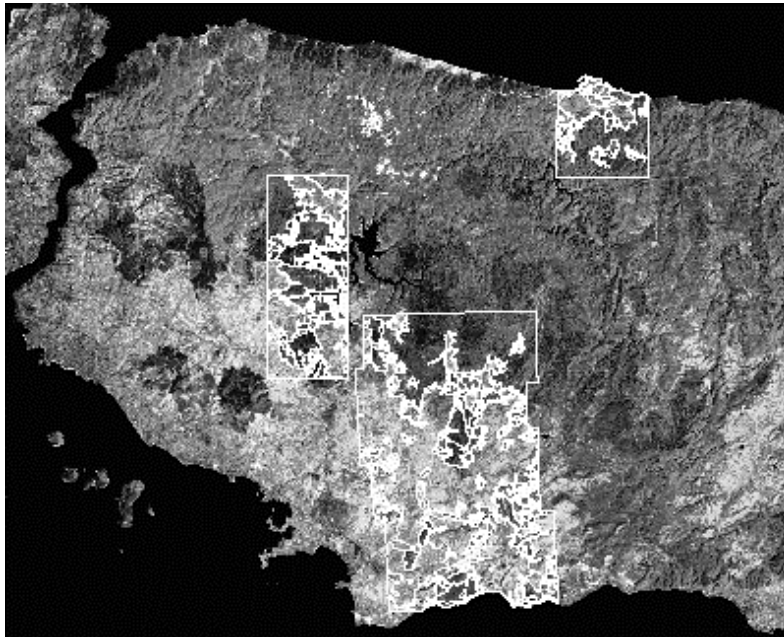


Abbildung 5-2: Lage und Ausdehnung der Referenzkarte

Die Luftbildkartierung erfolgte für den Block „Ömerli“ stereoskopisch. Für die Blöcke „Balica“, „Gebze“ und „Şile“ wurden digitale Orthophotos erzeugt und monoskopisch ausgewertet. Die auf diese Weise kartierte Fläche betrug 566 km² (Abbildung 5-2). Zur Erfassung der Landbedeckung wurde die dreizifferige, europäische CORINE-Nomenklatur verwendet (HEYMANN 1994). Obwohl dieses

Klassifikationsschema ursprünglich für die Interpretation und Delinierung von Landbedeckungen aus Satellitenbildern entwickelt worden war, erwies es sich als differenziert genug, um solche mittel- bis kleinmaßstäbigen Luftbilder auszuwerten. Für die Auswertung mittel- bis großmaßstäbiger Luftbilder wird zur Zeit eine erweiterte, vierzifferige Nomenklatur entwickelt (NAPOLITANO 2000). Nach der Kartierung wurden die Landbedeckungsklassen den entsprechenden Nutzungsklassen zugeordnet (Tabelle 5-5). Die Referenzkarte lag zunächst im Vektorformat vor und wurde dann – vorgegeben durch die geometrische Auflösung der Satellitenbilder – in eine Rasterkarte mit einer geometrischen Auflösung von 30x30 m umgewandelt.

Tabelle 5-5: Rekodierung der CORINE Landcover-Klassen zu Landnutzungsklassen

CORINE Landcover	Landnutzungs-klasse
111 durchgängig städtische Prägung 112 nicht durchgängig städtische Prägung 121 Industrie/Gewerbeflächen 122 Straßen/Eisenbahnen u. funktionell zugeordnete Flächen 123 Hafengebiete 131 Bodenabbauflächen 133 Baustellen 142 Sport- und Freizeitflächen	Urban-industrielle Nutzung
211 nicht bewässertes Ackerland 231 Weiden 241 einjähr. Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen 242 komplexe Parzellenstruktur 243 landwirtschaftl. genutztes Land mit natürl. Vegetation	Landwirtschaft
311 Laubwald 312 Nadelwald 313 Mischwald 323 Hartlaubbewuchs 331 Strände, Dünen, Sandflächen 332 Felsflächen ohne Vegetation 324 Wald/Strauch Übergangsstadien	Forstwirtschaft
521 Wasserflächen	Wasserwirtschaft

Quelle: verändert nach HEYMANN (1994)

5.5 Satellitenbildauswertung

5.5.1 Georeferenzierung der Satellitendaten

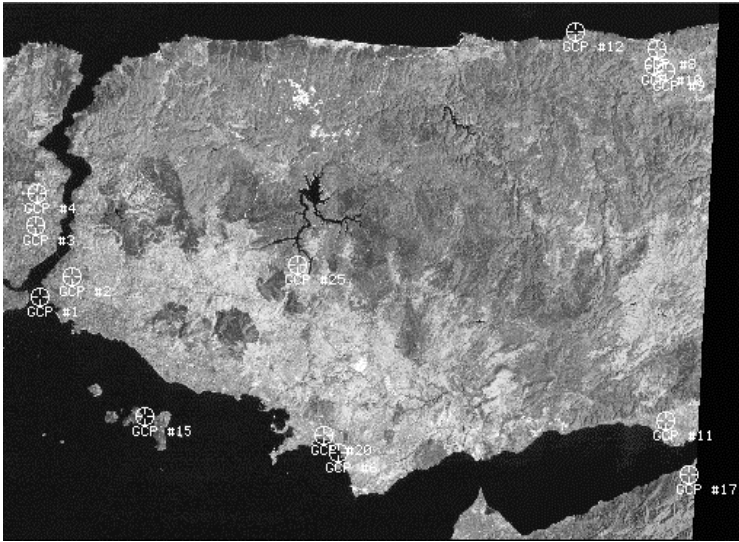


Abbildung 5-3: Lage der 14 Paßpunkte für die Georeferenzierung der 94er Szene

Zunächst wurde die Satellitenaufnahme aus dem Jahre 1994 mit Hilfe von 14 Paßpunkten georeferenziert, deren Koordinaten aus den TK 25 stammten (Abbildung 5-3). Als besonderes Problem wirkte hier die begrenzte Verfügbarkeit von Geodaten für bestimmte Gebiete der Türkei. Im Falle der Halbinsel Kocaeli liegt nordöstlich des Stadtgebietes von Istanbul ein großes Truppenübungsgebiet, so daß von diesem Gebiet weder topographische Karten noch Geodaten anderer Art verfügbar waren. Weiterhin war es schwierig, im Innern der Halbinsel geeignete Landmarken zu finden, die sowohl auf dem Satellitenbild als auch auf den TK 25 eindeutig identifizierbar waren.

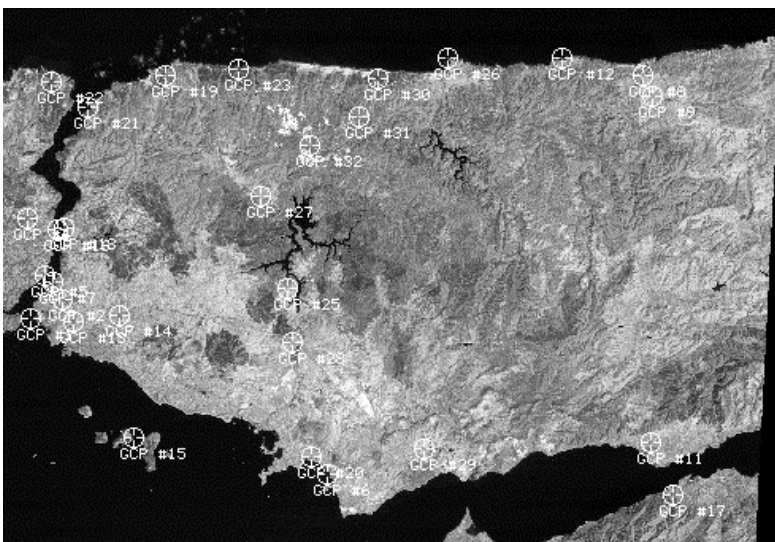


Abbildung 5-4: Lage der 29 Paßpunkte für die Georeferenzierung der 98er Szene

Da eine möglichst hohe geometrische Übereinstimmung der multitemporalen Fernerkundungsdaten für eine Veränderungsanalyse von großer Bedeutung ist, wurde die Aufnahme von 1998 auf die 94er Szene resampelt, statt sie separat anhand der Karten zu georeferenzieren. Dabei wurden insgesamt 29 Paßpunkte verwendet (Abbildung 5-4).

In beiden Fällen wurde eine polynomiale Transformation zweiten Grades verwendet und der mittlere quadratische Restfehler an den Paßpunkten (RMSE) betrug jeweils weniger als 0,5

Pixel. Zusätzlich wurde die geometrische Übereinstimmung visuell kontrolliert, indem der Verlauf der Küstenlinien und der markanten Verkehrswege verglichen wurde.

5.52 Multitemporale Satellitenbilddauswertung

Die Methoden zur multitemporalen Auswertung von Satellitenaufnahmen lassen sich im wesentlichen in zwei Gruppen unterteilen: In Klassifikationsvergleiche (engl. „post classification comparison“) einerseits und in die zahlreichen Varianten der sogenannten „digital change detection“ i. e. S. andererseits (SINGH 1989, YAFANG et al. 1992, CZERANKA 1992, SOHL 1999, GREEN et al. 1994). Während Klassifikationsvergleiche die unabhängig voneinander gewonnenen Ergebnisse der thematischen Bilddauswertung multitemporaler Fernerkundungsaufzeichnungen untersuchen, verwenden die Methoden aus der Gruppe der „digital change detection“ einen Datensatz, der mehrere oder gar alle multitemporalen Aufnahmen des Untersuchungsgebietes beinhaltet. Dieser Datensatz kann mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung wie Bildtransformation (z. B. Hauptkomponentenanalyse) und algebraischen Operationen, wie etwa Ratiokanalbildung und Bildsubtraktion, ausgewertet werden (ZERDA 1998, QUARMBY & CUSHNIE 1989). Beide Formen der multitemporalen Satellitenbilddauswertung haben ihre Vor- und Nachteile.

Der Klassifikationsvergleich ist technisch einfach zu handhaben und liefert eine Veränderungsmatrix, die für jede Elementarfläche (Pixel) den Klassenübergang zeigt. Der Verwendung parametrischer Klassifizierungsalgorithmen wie z. B. Maximum Likelihood liegt jedoch die Annahme zugrunde, die Pixelwerte der Musterklassen seien normalverteilt (LANDGREBE 2000). Diese Annahme kann häufig nicht bestätigt werden (TREITZ et al. 1992). In diesem Fall steigt das Risiko für Fehlklassifizierungen und eine hinreichende thematische Genauigkeit ist nur schwer zu gewährleisten. Weiterhin pflanzen sich Kartierungsfehler für jeden der Aufnahmezeitpunkte in die Veränderungsanalyse fort.

Die Klassifizierung anhand von Texturmerkmalen zur Verbesserung der Klassifizierungsgenauigkeit ist von zahlreichen Autoren mit vielversprechenden Ergebnissen durchgeführt worden (JENSEN & TROLL 1982, SCHMIDT & STOYE 1990, PALUBINSKAS et al. 1985, PYKA & STEINOCHER 1994, FOODY & COX 1994, BARNSLEY & BARR 1996, GONG & HOWARTH 1992). Jedoch hängt die Anwendbarkeit einer solchen Methode von der Kombination der spektralen und geometrischen Auflösung des Sensors mit der Größe und Aggregation der Objektklassen im Untersuchungsgebiet ab.

Der größte Nachteil der „digital change detection“ i. e. S. besteht darin, daß umfangreiche radiometrische Korrekturen an den Eingangsdaten erforderlich sind. Für eine korrekte Anpassung werden dabei auch Daten benötigt, die den Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Aufnahme beschreiben. Darüber hinaus wird in der Veränderungskarte der Klassenübergang der einzelnen Pixel nicht dargestellt. Vielmehr muß der Bearbeiter diese häufig sehr schwierige Aufgabe im Anschluß an den Bildverarbeitungsprozeß übernehmen (JENSEN 1996, SOHL 1999).

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die als Klassifikationsvergleich bezeichnet werden kann, ohne jedoch auf einen parametrischen Klassifikator zu setzen (RADBERGER 2000). Um einen Überblick zu gewinnen, sollen die einzelnen Schritte an dieser Stelle kurz genannt werden, um sie in den folgenden Abschnitten näher zu erläutern:

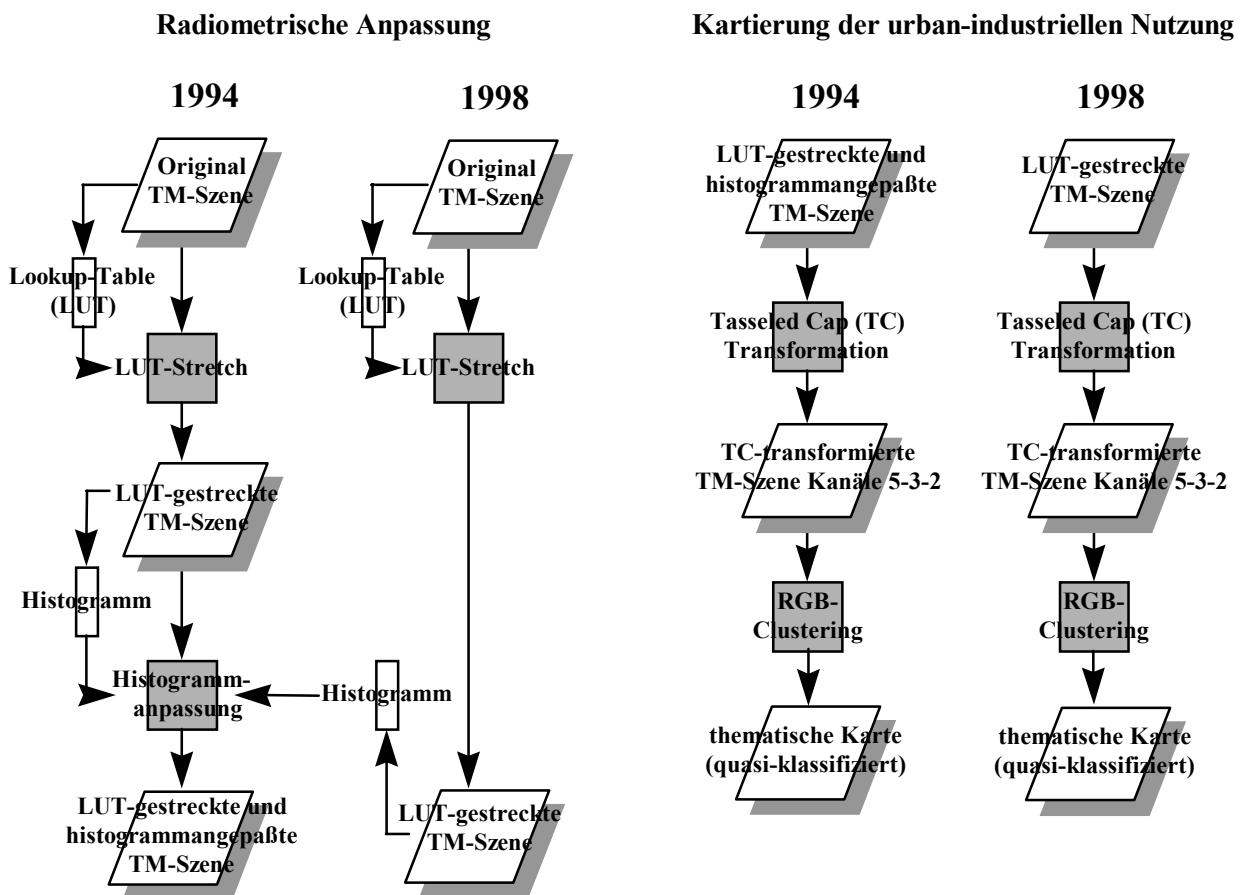


Abbildung 5-5: Schema der multitemporalen Satellitenbildauswertung

Zuerst wird eine Histogrammstreckung für beide Datensätze durchgeführt, gefolgt von einer radiometrischen Angleichung des einen Datensatzes an den anderen durch einfache Histogrammanpassung. Im nächsten Schritt wird die visuelle Unterscheidbarkeit von vegetationsgeprägten Flächen einerseits und vegetationsfreien, urban-industriell genutzten

Flächen andererseits optimiert, indem für jeden Datensatz eine Tasseled Cap (TC)-Transformation durchgeführt wird, um daraus ein Kanaltriolett mit einer geeigneten Farbkomposite auszuwählen. Die visuell erfassbare Information der beiden Kanaltrioletts wird anschließend mittels Clustering im RGB-Farbraum jeweils zu einem einzigen, thematischen Layer zusammengefaßt (Abbildung 5-5). Dieser Prozeß ist äquivalent mit einer unüberwachten Klassifizierung zur Erstellung einer thematischen Karte.

Gestützt durch die Luftbildinformation und die terrestrisch gewonnenen Erfahrungen werden bestimmte Farbwerte des Clusterbildes zu einer einzigen Klasse rekodiert, um eine Karte der räumlichen Verteilung urban-industriell genutzter Flächen am Anfang und Ende der Untersuchungsperiode zu erstellen.

Aufgrund der radiometrischen Anpassung der beiden Satellitenaufnahmen im Vorfeld der TC-Transformation und der anschließend identischen Weiterverarbeitung kann davon ausgegangen werden, daß sich die Genauigkeit der thematischen Bildauswertung für das Jahr 1998 in einem ähnlichen Rahmen bewegt wie für das Jahr 1994. Dies ist ein entscheidender Vorteil wenn anhand von multitemporalen Fernerkundungsaufzeichnungen eine Veränderungsanalyse durchgeführt werden soll, ohne daß eine Referenzkarte für jeden der Aufnahmezeitpunkte vorliegt.

5.521 Histogrammstreckung unter Verwendung von „lookup-tables“ (LUT-Stretch)

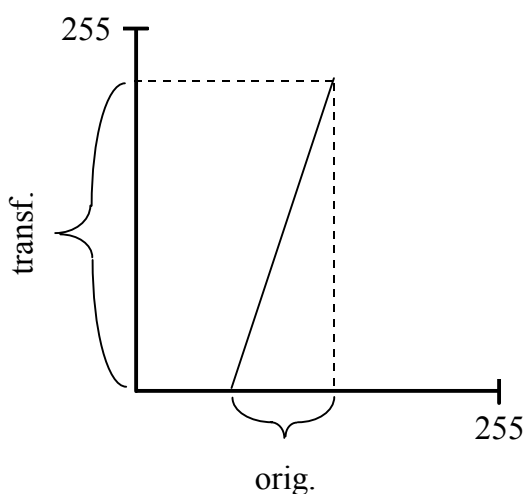


Abbildung 5-6: Prinzip der Histogrammstreckung durch eine Transformationsfunktion

Normalerweise nehmen die Pixelwerte des Kanals einer multispektralen Satellitenaufnahme nur einen mehr oder weniger großen Teil des zur Verfügung stehenden Spektrums von 256 verschiedenen, ganzzahligen Werten ein. Dies gilt auch für die Daten des Landsat TM, die im 8-bit-Format übertragen werden. Die Folge ist eine dunkle und kontrastarme Wiedergabe der Landoberfläche, welche die visuelle Interpretation erschwert (Abbildung 6-10). Deshalb verfügen viele Bildverarbeitungsprogramme über Möglichkeiten, die Histogramme der angezeigten Kanäle mit Hilfe

einer Transformation so zu strecken, daß der zur Verfügung stehende Datenraum von 0 bis 255 optimal genutzt wird (LILLESAND & KIEFER 1994) (Abbildung 5-6).

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Bildverarbeitungsprogramm und Raster-GIS Erdas IMAGINE v8.2 verwendet dazu sogenannte „lookup-tables“. Diese bestehen aus 256 Zeilen und zwei Spalten: In der linken Spalte stehen die originalen, in der rechten die transformierten Werte. Bei jedem Aufruf einer Bilddatei wird automatisch eine solche Kontrastverstärkung anhand der „lookup-tables“, ein sogenannter „LUT-Stretch“, durchgeführt (ERDAS 1997). Der Betrachter sieht dann nicht die Originaldaten, sondern nur die transformierten Werte. Dieser Vorgang ist temporär und manipuliert nicht die ursprünglichen Pixelwerte. Jedoch lassen sich die „lookup-tables“ nutzen, um aus den Originaldaten neue Bilder zu errechnen, wobei die originalen gegen die transformierten Werte ausgetauscht werden. Davon wird auch im Rahmen dieser Arbeit Gebrauch gemacht, weil dadurch der Effekt der anschließend vorzunehmenden Bildverarbeitungsschritte deutlicher erkennbar wird. Insbesondere kann mit dieser anfänglichen Maßnahme die visuelle Unterscheidbarkeit der Objektklassen nach der TC-Transformation entscheidend verbessert werden.

5.522 Radiometrische Angleichung der multitemporalen Aufnahmen durch einfache Histogrammanpassung

Diese Form der radiometrischen Korrektur wird aus zwei Gründen durchgeführt: Zum einen wird der visuelle Vergleich der beiden Satellitenszenen im Hinblick auf die Landschaftsveränderung erleichtert, zum anderen kann durch diese Maßnahme das RGB-Clustering im Anschluß an die TC-Transformation mit ähnlichen Ergebnissen durchgeführt werden. Ziel ist es, den Kartierungsfehler für das Ende der Untersuchungsperiode im selben Rahmen zu halten wie für den Anfang, wobei gesicherte Aussagen über Art und Umfang der Fehlklassifizierungen mangels Referenzkarte nur für das Jahr 1994 möglich sind. Dies ist für eine Veränderungsanalyse mittels Klassifikationsvergleich von großer Bedeutung, wenn die beobachteten Veränderungen plausibel sein sollen.

Für eine einfache (näherungsweise) Histogrammanpassung von Satellitenaufnahmen zur Vorbereitung der Veränderungsanalyse ist es vorteilhaft, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Zunächst sollten die Daten vom gleichen Sensor stammen, also die gleiche geometrische und radiometrische Auflösung besitzen (JENSEN 1996). Land- und Wasserflächen sollten etwa die gleichen Flächenanteile besitzen und die Flächenanteile der Landbedeckungen sollten einander ähnlich sein. Zur Minimierung phänologischer Einflüsse ist es weiterhin vorteilhaft, wenn die Aufnahmen aus der gleichen Jahreszeit stammen, am besten aus der gleichen Kalenderwoche. Dies ist besonders bei Acker- und Waldflächen von großer Bedeutung,

da diese Landbedeckungen innerhalb des Jahresverlaufs starken Veränderungen unterworfen sind. Weiterhin sollten vergleichbare atmosphärische Bedingungen zu den Aufnahmezeitpunkten herrschen, denn Sonnenzeit, Wolkenbedeckung, der Gehalt an Wasserdampf und Staub und andere Faktoren beeinflussen in hohem Maße das von der Erdoberfläche ausgehende Signal (ITTEN et al. 1992). Sobald eine der genannten Voraussetzungen nicht mehr erfüllt ist, sind umfangreichere, radiometrische Korrekturen erforderlich, die häufig nicht das gewünschte Ergebnis erzielen.

Da die 98er Aufnahme bei der visuellen Beurteilung einen etwas besseren Eindruck hinterließ und die Histogramme der einzelnen Kanäle glatter waren, wurde die frühere Satellitenaufnahme daran angeglichen. Die Anpassung der Histogramme erfolgte mittels einer linearen Transformation.

5.523 Tasseled Cap (TC)-Transformation

Die Pixelwerte einer Multispektralaufnahme mit n Kanälen formen einen abstrakten, n -dimensionalen Merkmalsraum (engl. „feature space“). Im Falle eines dreikanaligen Bildes entsteht auf diese Weise ein Würfel, dessen Kanten als „Datenachsen“ bezeichnet werden können und mit jeweils einem der drei Kanäle korrespondieren. Die Skala entlang jeder dieser Datenachsen ist abhängig von der radiometrischen Auflösung. Wenn die Daten im 8 Bit-Format vorliegen, reicht jede der Skalen von 0 bis 255.

Wenn alle möglichen Kombinationen von Pixelwerten dieselbe Wahrscheinlichkeit hätten, so wäre der Würfel gleichmäßig – wie mit einem Gas – ausgefüllt. Tatsächlich aber finden sich Kombinationen von Pixelwerten, die eine höhere Wahrscheinlichkeit haben als andere. Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, daß die vom Sensor reflektierte Strahlung direkt mit bestimmten physikalischen Eigenschaften der beobachteten Objekte zusammenhängt. Das wohl bekannteste Beispiel dürfte das Reflektionsverhalten bestimmter Pflanzenarten sein (HILDEBRANDT 1996). Obwohl jede Pflanzenart ihr eigenes, spezifisches Reflektionsverhalten aufweisen mag, so zeigt die grüne, stoffwechselfreibende Vegetation insgesamt ein Reflektionsverhalten, das sich deutlich von demjenigen unterscheidet, das wir beispielsweise bei künstlichen, versiegelten Oberflächen finden. So lassen sich die Objekte hinsichtlich ihrer Reflektionseigenschaften für elektromagnetische Strahlung zu Objektklassen zusammenfassen, die ihrerseits charakteristische Muster innerhalb des Merkmalsraumes abbilden. Diese Muster werden auch „Datenstrukturen“ genannt.

KAUTH & THOMAS (1976) haben in Landsat MSS-Daten charakteristische Datenstrukturen entdeckt, die auf Oberflächeneigenschaften zurückgehen, welche ihrerseits maßgeblich durch die Abundanz grüner Vegetation bestimmt werden. Daraus haben sie eine lineare Transformation entwickelt, welche die Achsen des Merkmalsraumes so orientiert, daß ein optimale visuelle Interpretation der „features“ ermöglicht wird. Der Vorgang ist im Prinzip mit der Hauptkomponententransformation vergleichbar. Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt darin, daß die Translokation und Rotation der Merkmalsraumachsen sich bei der TC-Transformation nicht nach der Varianz allgemein, sondern nach den Varianzen entlang bestimmter Datenstrukturen richtet. Die Neuausrichtung der Achsen hat die Entstehung synthetischer Kanäle zur Folge, die als *Soil Brightness Index*, *Green Vegetation Index*, *Yellow Stuff Index* und *Non-Such Index* bezeichnet werden.

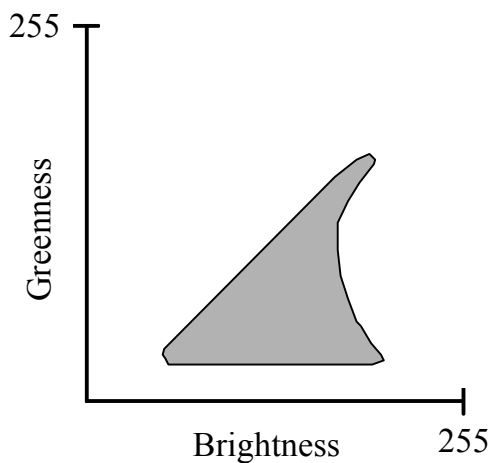


Abbildung 5-7: Typische Datenstruktur nach der TC-Transformation

CRIST & CICONE (1984) haben das Konzept für Landsat TM-Daten weiterentwickelt. Sie bezeichnen die neuen Kanäle als Komponenten und nennen sie *Brightness*, *Greenness*, *Wetness*, *Haze*, *Fifth* und *Sixth*. Der Name der Transformation geht darauf zurück, daß die Pixelwerte im zweidimensionalen Merkmalsraum aus *Brightness* und *Greenness* eine Datenstruktur in Form einer Zupfmütze bilden (Abbildung 5-7). Ihren Hauptanwendungsbereich haben vor allem die ersten beiden TC-Komponenten in der landwirtschaftlichen Forschung in den USA (JENSEN 1996).

Tabelle 5-6: Koeffizienten der Tasseled Cap-Transformation mit Landsat TM-Daten

	Konst.	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6	TM 7
Brightness	10.3695	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.0000	0.1706
Greenness	-0.7310	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7221	0.0733	0.0000	-0.1648
Wetness	-3.3828	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	0.0000	-0.4186
Haze	0.7879	0.8461	-0.0731	-0.4640	-0.0032	-0.0492	0.0000	0.0119
Fifth	-2.4750	0.0549	-0.0232	0.0339	-0.1937	0.4162	0.0000	-0.7823
Sixth	-0.0336	0.1186	-0.8069	0.4094	0.0571	-0.0228	0.0000	-0.0220

Die TC-Transformation hat den Vorteil, ausschließlich sensorabhängig zu sein. Das bedeutet, daß die in der Transformationsfunktion verwendeten Koeffizienten konstant sind, solange die Eingangsbilder vom selben Sensor stammen (CRIST & KAUTH 1986). Tabelle 5-6 enthält die für beide Bilder verwendeten Koeffizienten, wobei der Wert 0 für den TM-Kanal 6 (thermales

Infrarot) bedeutet, daß dieser wegen seiner geringen räumlichen Auflösung als einziger keine Verwendung findet.

In dieser Arbeit wurde eine RGB-Farbkomposite aus *Fifth*, *Wetness* und *Greenness* verwendet, die eine optimale visuelle Unterscheidbarkeit zwischen den urban-industriell genutzten Flächen und dem Umland ermöglicht (Abbildung 5-8). Diese Fähigkeit der TC-Transformation beruht darauf, daß einige ihrer Komponenten in Kombination miteinander als Vegetationsindex fungieren. Der Vorteil gegenüber einem eindimensionalen Index wie etwa dem NDVI besteht in der besseren Differenzierung zwischen den verschiedenen Effekten der Vegetationsbedeckung auf die Reflektionseigenschaften der Landoberfläche.

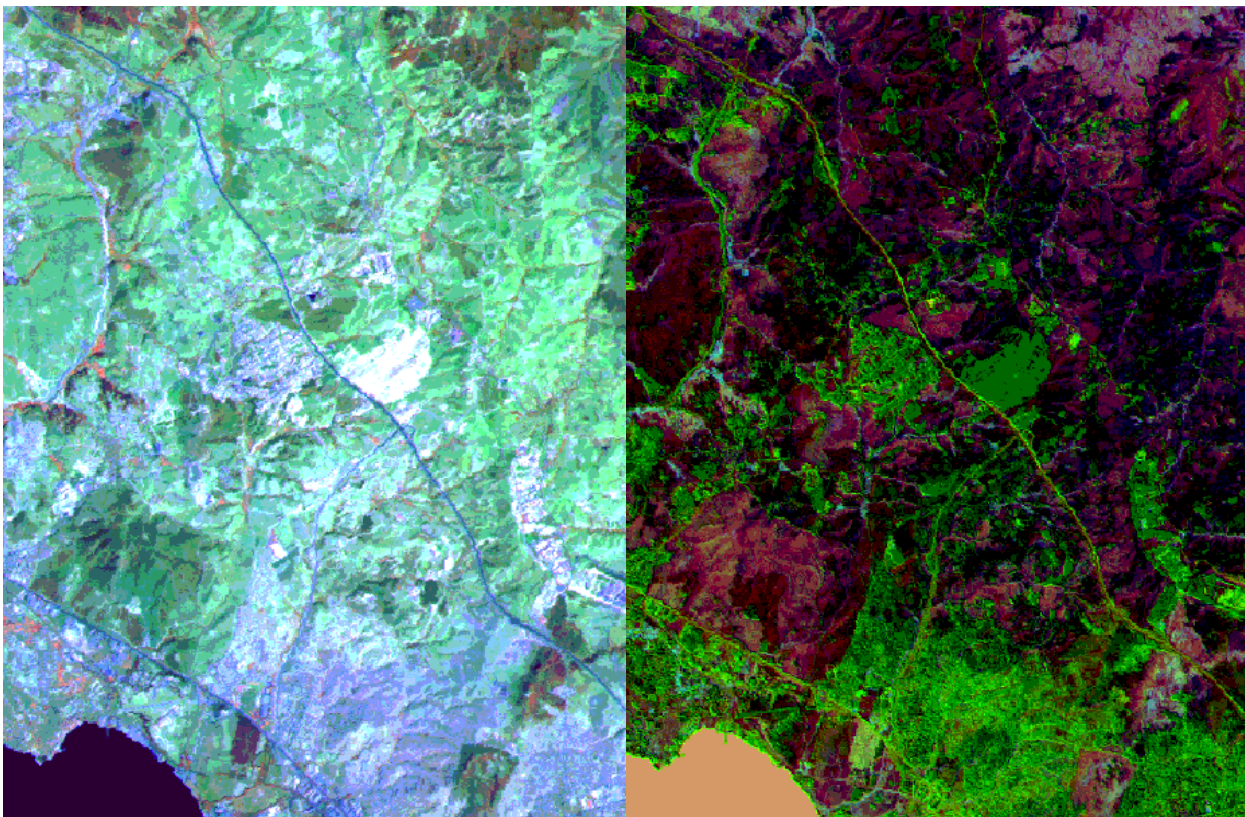


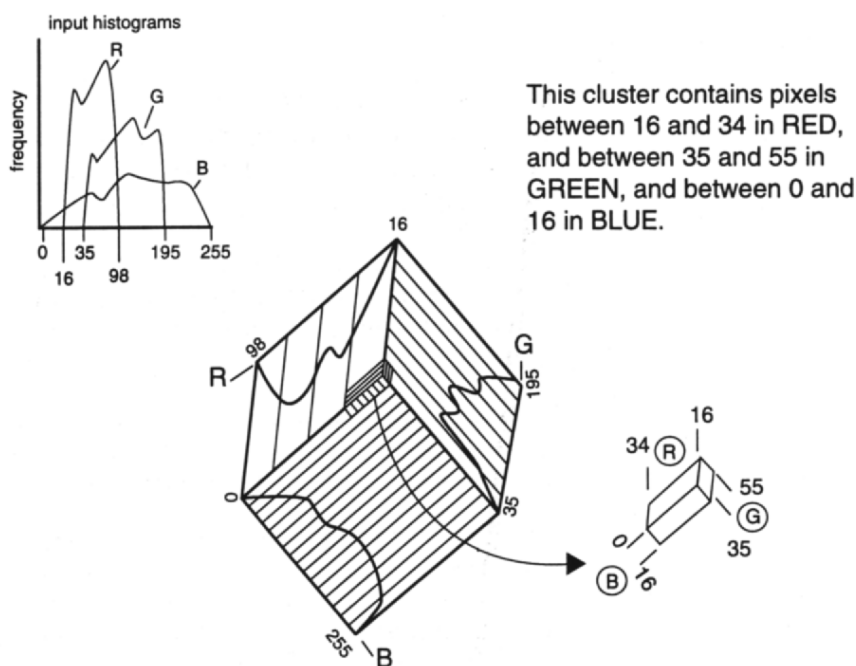
Abbildung 5-8: Originalszene TM 4-5-3 (links) und TC-transformierte Szene 5-3-2 (rechts)

5.524 RGB-Clustering

Als eine Methode zur Datenkompression ist das RGB-Clustering sehr geeignet, den visuell interpretierbaren Bildinhalt einer Dreikanal-Farbkomposite in einer einkanaligen Darstellung zusammenzufassen (ERDAS 1997). Die Farbinformation wird dabei näherungsweise in einer Farbentabelle gespeichert, die für jeden Grauwert eine RGB-Farbmischung enthält. Ein gewisser Informationsverlust ist wie bei allen Klassifizierungen unvermeidlich, denn während eine Dreikanal-Farbkomposite eine Farbtiefe von 24 Bit erzeugt, enthält das klassifizierte, einkanalige

Bild eine Farbtiefe von nur noch 8 Bit. In der Regel ist die Verringerung der Farbtiefe allerdings kein Problem, da das Auge bei einer Farbtiefe von mehr als 8 Bit kaum noch zu differenzieren vermag.

Entlang der Daten-achsen des dreidimensionalen Merkmalsraumes können äquidistante Klasseneinteilungen vorgenommen werden; die Anzahl der Klassen ist frei wählbar. Auf diese Weise entstehen quader-förmige Cluster, denen jedes Pixel anhand seiner Position im



Merkmalsraum zugeordnet werden kann (Abbildung 5-9). Der Vorgang ist im Prinzip der selbe wie bei einer unüberwachten Klassifizierung. Daher kann das Ergebnis als eine thematische Karte betrachtet werden, sobald der Auswerter bestimmten Pixelwerten einen Bedeutungsinhalt zuweist.

Abbildung 5-9: Prinzip des RGB-Clustering (aus ERDAS 1997)

5.525 Visuelle Interpretation und Rekodierung

Die im Untersuchungsgebiet terrestrisch gewonnenen Erfahrungen und vor allem die Luftbildinformation ermöglichen die Zuordnung bestimmter RGB-Farb-/Pixelwerte in den Ergebnisbildern des RGB-Clustering zur urban-industriellen Nutzungsklasse. Diese Pixelwerte werden zu einem einzigen rekodiert, um so eine binäre Karte der räumlichen Verteilung urban-industriell genutzter Flächen für jeden der beiden Aufnahmezeitpunkte zu erhalten.

5.53 Kartierung der übrigen Landnutzungen

Die Nutzungsklasse „Forstwirtschaft“ wurde durch Schwellenwertklassifizierung im TM-Kanal 2 (sichtbares Grün) kartiert. Dazu wurden die georeferenzierten, nicht kontrastverstärkten Originalbilder verwendet. Alle Flächen, die weder in die Klasse “Forstwirtschaft“ noch in die

Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ fielen, gehörten der Definition zufolge automatisch in die Klasse „Landwirtschaft“.

5.6 Genauigkeitsschätzung der Satellitenbilddauswertung

Die Genauigkeitsschätzung muß heute als ein wesentlicher Bestandteil der thematischen Bildauswertung verstanden werden. Die Veröffentlichung einer einzelnen Zahl (z. B. „Klassifizierungsgenauigkeit“ 89 %) oder von Fehlermatrizen, die auf den Trainingsflächen der überwachten Klassifizierung beruhen, gilt als nicht mehr ausreichend für die Beurteilung der Güte einer Klassifizierung. Nach CAMPBELL (1987) lassen sich unabhängige Testflächen für die Kreuzvalidierung auch ohne Referenzkarte finden. Als optimales Verfahren wird derzeit der Vergleich der thematischen Satellitenbilddauswertung mit unabhängigen Kontrollflächen auf Stichprobenbasis angesehen (JENSEN 1996).

Das Problem bei Rasterdaten besteht in der enormen Größe der Grundgesamtheit (Anzahl der Pixel), so daß die konventionelle Stichprobentheorie schnell an ihre Grenzen stößt. Für die vorliegende Referenzkarte hätte eine Stichprobe von z. B. 5 % die Überprüfung von fast 28 000 Pixeln bedeutet. Es gilt also, einen Kompromiß zwischen den Anforderungen der Fehlerstatistik einerseits und der Praktikabilität des Verfahrens andererseits zu finden. CONGALTON (1991) schlägt eine Faustformel vor, wonach wenigstens 50 Pixel für jede Landnutzungs-klasse in der Fehlermatrix auftauchen sollten. Bei sehr großen Flächen oder einer großen Zahl von Klassen kann diese Zahl auf 75 bis 100 vergrößert werden. Diese Zahlen sind jedoch nicht aus mathematischen Berechnungen hervorgegangen, sondern beruhen rein auf Erfahrungswerten. Ein weiterer Vorschlag von FITZPATRICK-LINS (1981) besteht darin, die Anzahl der Stichproben pro Klasse nach Flächengröße, Inhomogenität und thematischer Bedeutung zu wählen.

Für die vorliegende Arbeit wurden nur die Blöcke „Gebze“, „Balica“ und „Ömerli“ für die Genauigkeitsschätzung herangezogen, weil der Block „Şile“ keine ausreichend große Fläche der Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ aufwies. Die Rasterkarten der drei Blöcke wurden zu einer einzigen zusammengefaßt. Aus der Landnutzungskarte für 1994, die aus der Satellitenbilddauswertung hervorgegangen war, wurde ein flächengleicher Ausschnitt gewählt. Auf der Referenzkarte wurde eine nach dem prozentualen Flächenanteil der Landnutzungs-klassen stratifizierte Zufallsstichprobe von 400 Pixeln festgelegt. Damit sollte sichergestellt werden, daß keine der Klassen zufällig unterrepräsentiert wurde. Um der besonderen Bedeutung der Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ gerecht zu werden, wurden 50 zusätzliche Stichprobenpunkte, wiederum zufallsverteilt, ausschließlich in diese Flächen gelegt.

5.61 Genauigkeitsmaße

Aus den Fehlermatrizen lassen sich verschiedene Maße ableiten, welche die erzielte prozentuale Genauigkeit angeben. Üblich sind hier die klassenweise bestimmte Nutzergenauigkeit, Produzentengenauigkeit und die Kappa-Werte. Letztere stellen Genauigkeitsmaße dar, die um die stets vorhandene Zufallsübereinstimmung bereinigt werden (STORY & CONGALTON 1986).

5.611 Produzentengenauigkeit

Für den Kartenhersteller ist von Interesse, wie genau die Klasse i erfaßt werden konnte (Gleichung 5-1). Die Produzentengenauigkeit P_i sinkt, je mehr Pixel, die in Wahrheit zur Klasse i gehören, nicht als solche erkannt wurden. Es handelt sich also um einen Fehler des Ausschlusses (Fehler 2. Art, engl. „ommission error“). Eine geringe Produzentengenauigkeit P_i ist demnach ein Maß für die Unterrepräsentierung der Klasse i .

Prozentuale Produzentengenauigkeit (nach CONGALTON 1991)

$$P_i = \frac{\text{Anzahl richtig klassifizierter Pixel der Klasse } i}{\text{Anzahl Pixel der Klasse } i \text{ in der Referenz}} \times 100 \quad \text{(Gleichung 5-1)}$$

5.612 Nutzergenauigkeit

Der Kartenbenutzer interessiert sich dafür, wie zuverlässig seine Karte in der Darstellung von Flächen als zur Klasse i gehörig ist. Die Nutzergenauigkeit U_i sinkt, je mehr Pixel in die Klasse i eingeordnet wurden, obwohl sie in Wahrheit zu einer anderen Klasse gehören. Es handelt sich also um einen Fehler des Einschusses (Fehler 1. Art, engl. „commission error“). Demnach ist eine geringe Nutzergenauigkeit U_i gleichbedeutend mit einer Überrepräsentierung der Klasse i (Gleichung 5-2).

Prozentuale Nutzergenauigkeit (nach CONGALTON 1991)

$$U_i = \frac{\text{Anzahl richtig klassifizierter Pixel der Klasse } i}{\text{Anzahl Pixel der Klasse } i \text{ in der Klassifizierung}} \times 100 \quad \text{(Gleichung 5-2)}$$

5.613 Gesamt-Kappa

Unabhängig von der wahren räumlichen Verteilung der Klassen ließe sich auch mit einer rein zufälligen Klassifizierung eine bestimmte Genauigkeit erzielen. Diese ist ein Teil der oben genannten Genauigkeitsmaße und verzerrt diese daher. Ein um die Zufallsübereinstimmung (engl. „chance agreement“) bereinigtes Genauigkeitsmaß stellt der Kappa-Koeffizient K dar. Er wurde ursprünglich von COHEN (1960) zur Auswertung von allgemeinen Kontingenzmatrizen

entwickelt. Seine Anwendung in der Fernerkundung geht auf die Arbeit von CONGALTON & MEAD (1983) zurück (Gleichung 5-3). Der für Kappa mögliche Wert liegt zwischen Null und Eins. Nach Multiplikation mit 100 gibt er den Prozentsatz der Fehler an, welche die vorliegende Klassifizierung im Vergleich zu einer rein zufälligen Klassifizierung vermeidet.

Berechnung des Kappa-Wertes (nach CONGALTON & MEAD 1983)

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 \times \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad \text{(Gleichung 5-3)}$$

N = Anzahl der Beobachtungen (Pixel in der Stichprobe)

r = Anzahl der Klassen

wobei

x_{ii} = Anzahl richtig klassifizierter Pixel der Klasse i

x_{i+} = Anzahl Pixel der Klasse i in der Klassifikation (Zeilensumme für Klasse i)

x_{+i} = Anzahl Pixel der Klasse i in der Referenz (Spaltensumme für Klasse i)

5.614 Klassenweise bestimmtes Kappa

Neben einer summarischen Betrachtung der Übereinstimmung zwischen Referenzkarte und Klassifikation lassen sich um die Zufallsübereinstimmung bereinigte Genauigkeiten auch für die einzelnen Klassen feststellen (ROSENFELD & FITZPATRICK-LINS 1986). Diese bedingten Kappa-Werte K_i lassen sich nach Gleichung 5-4 bestimmen:

Klassenweise bestimmtes Kappa (nach ROSENFELD & FITZPATRICK-LINS 1986)

$$K_i = \frac{Nx_{ii} - x_{i+}x_{+i}}{Nx_{i+} - x_{i+}x_{+i}} \quad \text{(Gleichung 5-4)}$$

N = Anzahl der Beobachtungen (Pixel in der Stichprobe)

x_{ii} = Anzahl richtig klassifizierter Pixel der Klasse i

wobei

x_{i+} = Anzahl Pixel der Klasse i in der Klassifikation (Zeilensumme für Klasse i)

x_{+i} = Anzahl Pixel der Klasse i in der Referenz (Spaltensumme für Klasse i)

5.7 Räumlich-statistische Modellierung

In dieser Studie wurde ein empirisches Modell auf der Grundlage der nichtparametrischen Diskriminanzanalyse entwickelt. Im Gegensatz zu parametrischen Verfahren hat diese Methode den Vorteil, nicht verteilungsgebunden zu sein. Der Nachteil des nichtparametrischen Verfahrens besteht darin, daß es keine Diskriminanzfunktion liefert, deren Koeffizienten ähnlich wie bei

einer Regressionsgleichung Rückschlüsse auf Wirkungsstärke und -richtung der Einflußgrößen zulassen.

5.71 Diskriminanzanalyse

Die (lineare) Diskriminanzanalyse geht auf R.A. FISHER (1936) zurück, der sie als Methode zur Klassifizierung von Schädelserien entwickelte. Nach ERB (1990) ist sie eine Methode zur Untersuchung von Gruppen-, bzw. Klassenunterschieden. Sie wird häufig angewendet, um Gruppenunterschiede zu erklären oder um eine vorgenommene Einteilung (Klassifizierung) auf Verbesserungsmöglichkeiten hin zu überprüfen. In dieser Hinsicht ist sie in erster Linie ein schließendes, weniger ein exploratives Verfahren der multivariaten Statistik, und daher deutlich von der Clusteranalyse abzugrenzen: Mit der Clusteranalyse werden Klassen erzeugt, dagegen werden mit der Diskriminanzanalyse bereits bestehende Klassen untersucht (BAHRENBERG et al. 1992). Bei einer kombinierten Anwendung von Clusteranalyse und nachgeschalteter Diskriminanzanalyse wird deutlich, daß die beiden Verfahren zwar komplementär zueinander sind, sich aber zugleich sinnvoll ergänzen können.

Weiterhin ermöglicht es die Diskriminanzanalyse, eine Beobachtung (Raumeinheit), deren Klassenzugehörigkeit nicht bekannt ist, anhand ihrer Merkmalsausprägungen einzuordnen (FLURY & RIEDWYL 1983). Dies ist der explorative Aspekt des Verfahrens und läßt es für bestimmte Anwendungen mit anderen Klassifizierungsverfahren konkurrieren. Im Unterschied zur Clusteranalyse ist es zu Trainingszwecken allerdings notwendig, die Klassenzugehörigkeit anderer Beobachtungen derselben Grundgesamtheit zu kennen.

In der vorliegenden Arbeit wurde von beiden Anwendungsmöglichkeiten der Diskriminanzanalyse Gebrauch gemacht: Zunächst wurde sie zur Überprüfung der Hypothese eingesetzt, daß sich das räumliche Muster der Landnutzungsänderung im Untersuchungsgebiet auf bestimmte topographische und topologische Einflußgrößen zurückführen läßt. Im Zuge der Validierung des Modells wurde die Diskriminanzanalyse als Verfahren zur Klassifizierung von Raumeinheiten mit unbekannter Gruppenzugehörigkeit eingesetzt.

5.72 Nichtparametrische Diskriminanzanalyse mit fünf nächsten Nachbarn

Bei einem statistischen Modell mit einer erklärten und n erklärenden Variablen spannen die erklärenden Variablen einen n -dimensionalen Diskriminanzraum auf, in dem jedes Pixel eine durch die Merkmalsausprägung definierte Position hat. Anhand der quadrierten euklidischen

Distanzen berechnet die hier verwendete Variante der nichtparametrischen Diskriminanzanalyse zunächst für jedes Pixel die fünf nächsten Nachbarn innerhalb des Diskriminanzraums.

Schätzung der Klassenzugehörigkeit mit fünf nächsten Nachbarn (nach SAS INSTITUTE 1989)

$$\Pr(j|X) = m_j(X) * \text{Prior}_j / \text{Sum}_k (m_k(X) * \text{Prior}_k), \quad \text{(Gleichung 5-5)}$$

wobei

$m_j(X)$ = Anzahl der Beobachtungen in Klasse j innerhalb der 5 nächsten Nachbarn von X

Prior_j = a priori - Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit von X zur Klasse j

Die Klassenzugehörigkeit jedes Pixels wird geschätzt, indem dieses der Klasse mit der größten gewichteten Häufigkeit unter den fünf nächsten Nachbarn zugeordnet wird (Gleichung 5-5). Durch den Vergleich der geschätzten mit den tatsächlichen Klassenzugehörigkeiten kann geprüft werden, inwieweit sich die erklärenden Variablen für eine hinreichend zuverlässige Klassifizierung eignen (SAS INSTITUTE 1989).

5.73 Hypothesentest und Validierung des Modells

Mit Hilfe der Kreuzvalidierung ist es möglich, für ein statistisches Modell nicht nur die getroffenen Annahmen über den Wirkungszusammenhang zwischen den Variablen zu überprüfen, sondern auch die prognostischen Fähigkeiten des Modells zu testen (ELSTON & BUCKLAND 1993). Grundlage dafür sind ein Kalibrierungsset (Trainingsgebiet) und ein Validierungsset (Testgebiet), die sich nicht überschneiden dürfen. Dazu werden alle Pixel des Modellierungsgebietes mit einer Zufallszahl zwischen Null und Eins versehen. Im ersten Durchgang werden alle Pixel mit einem Zufallswert $\leq 0,5$ zum Trainingsgebiet erklärt, alle Pixel mit einem Zufallswert $> 0,5$ zum Testgebiet.

Die Diskriminanzanalyse für die fünf nächsten Nachbarn wird auf dem Trainingsgebiet durchgeführt und mit ihr die Klassenzugehörigkeit aller Pixel des Testgebietes vorhergesagt. Im zweiten Durchgang werden Trainings- und Testgebiet vertauscht: Pixel mit einem Zufallswert $> 0,5$ gehören zum Trainingsgebiet, während Pixel mit einem Zufallswert $\leq 0,5$ das Testgebiet bilden. Das Ergebnis der Modellierung läßt sich in kartographischer Form darstellen, wozu die ASCII-Datensätze wieder in eine Rasterkarte zurückverwandelt werden (Abbildung 6-17).

6 Ergebnisse

6.1 Luftbildauswertung

Zwar ist die Verwendung von Luftbildern zur Gewinnung von Referenzkarten weit verbreitet, vom Prinzip her ist dieses Vorgehen jedoch nicht unproblematisch (LO & SHIPMAN 1990). Zunächst hat jeder Auswerter einen gewissen Spielraum bei der Erfassung der Objektgeometrie und der Objekteigenschaften. Seitens des Datenmaterials wird die zu erwartende Genauigkeit wesentlich von der Filmart (CIR, Farbe oder Schwarzweiß), von der Bildqualität und vom Bildmaßstab bestimmt. Bei digitalen Luftbildern kommen noch die Scanauflösung und die Qualität des Scanners hinzu.

In der vorliegenden Arbeit wurden digitale, kleinmaßstäbige Schwarzweiß-Luftbilder mit einer geometrischen Auflösung von ca. einem Meter verwendet. Daraus ergeben sich bei der Vegetationsansprache hohe Anforderungen bei der Interpretation. Insbesondere die korrekte Unterscheidung zwischen jüngeren Kiefernauflorungen einerseits und Wald/Strauch-Übergangsstadien andererseits kann nicht überall sichergestellt werden, da in diesen Übergangsstadien auch Waldbäume in stärkerem Maße auftreten. Umgekehrt sind die Aufforstungsflächen mehr oder weniger stark mit Sträuchern und Gräsern durchsetzt.

Es erwies sich in diesem Zusammenhang als äußerst günstig, daß die ersten Luftbilder stereoskopisch ausgewertet werden konnten. Neben Grauton und Textur können dabei auch die Höhe der Pflanzenbestände in die Interpretation einbezogen werden, um sich selbst für die folgenden, monoskopischen Auswertungen zu kalibrieren. Außerdem erscheinen Auflösung und Detailschärfe bei der stereoskopischen Auswertung höher als bei der Auswertung von Orthophotos mit der rechnerisch gleichen geometrischen Auflösung.

Die Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald erweist sich stellenweise ebenfalls als schwierig. Dies hat mehrere Ursachen: Der im Untersuchungsgebiet vorkommende Hochwald besteht i. d. R. entweder aus Eichenniederwald oder aus Aufforstungen mit *Pinus halepensis*. Besonders in jüngeren Bestandesaltern weisen die Kronen dieser Kiefernart im Luftbild rundliche, laubbaumartige Proportionen auf. Hinzu kommt, daß es sich um Winterbefliegungen für Vermessungszwecke handelt, die Eichen im Untersuchungsgebiet ihr Laub zu dieser Jahreszeit jedoch nicht etwa abwerfen, sondern die verfärbten, toten Blätter bis zum erneuten Austrieb an den Zweigen behalten. Farbtöne in Braun, Rot und Orange können jedoch bei Schwarzweißaufnahmen in Form von dunklen Grautönen abgebildet werden, die denen von Nadelwald sehr ähnlich sind. Dies gilt besonders auf Schatthängen. Solange Laub- und

Nadelwald direkt aneinander grenzen ist eine Unterscheidung gut möglich. Dagegen sind isolierte Feldgehölze und uferbegleitende Baumreihen schwierig zu klassifizieren.

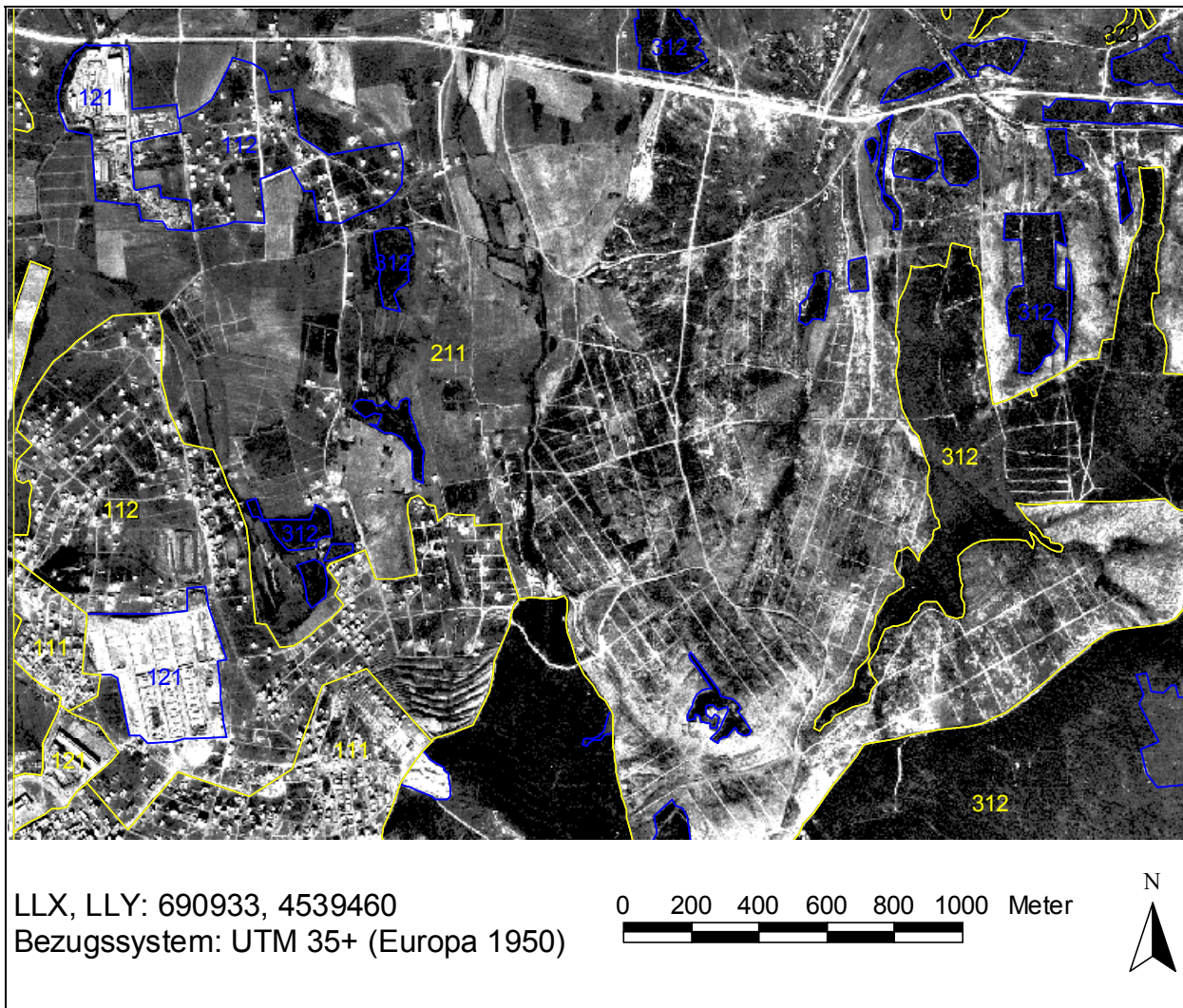


Abbildung 6-1: Orthophoto des nördlichen Ortsrandes von Sultanbeyli mit Delinierung der Landbedeckung. Die blau umgrenzten Flächen waren kleiner als 25 ha und wurden entsprechend der CORINE-Methodik eliminiert.

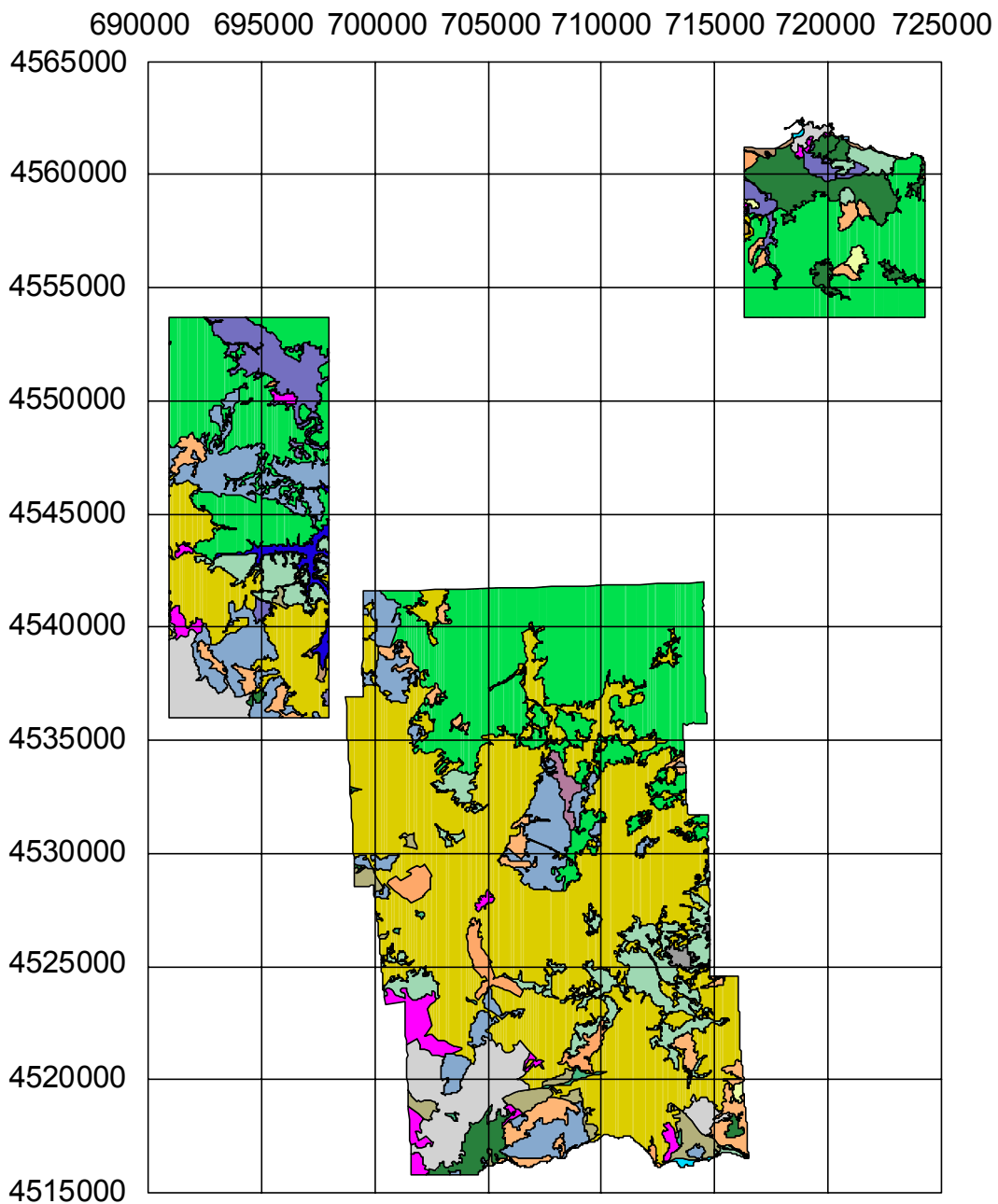
Charakteristisch für das Untersuchungsgebiet sind fließende Übergänge zwischen Flächen mit nicht durchgängig städtischer Prägung (CORINE Land Cover 112), Flächen mit durchgängig städtischer Prägung (CORINE Land Cover 111) und Brach- und Weideflächen (CORINE Land Cover 243 und 231). Im Rahmen dieser Arbeit sind alle Flächen als „112“ klassifiziert worden, auf denen sich Häuser in einem deutlich erkennbaren, räumlichen Zusammenhang befinden, auch wenn zwischen den Gebäuden größere Brachen oder Grünflächen liegen (Abbildung 6-1). Diese Konvention wurde getroffen, weil sie einer plausiblen Definition von „Siedlung“ am ehesten entspricht, auch wenn die auf spektrale Merkmale setzende Satellitenbilddauswertung diese dünn bebauten Randbereiche mit großer Wahrscheinlichkeit nicht als solche erkennen konnte. Zugleich ist die Vorgehensweise mit der Zielsetzung von CORINE kompatibel, weil eine

Erfassung einzelner Gebäude oder kleinerer Ansammlungen derselben nicht vorgesehen ist (Mindestfläche 25 ha). Bei der Bewertung der Genauigkeitsschätzung sind die genannten Punkte zu berücksichtigen.

In Abbildung 6-1 fällt in der Bildmitte eine große Fläche auf, die als „211“ (nicht bewässertes Ackerland) klassifiziert wurde, obwohl sie deutliche Spuren einer Parzellierung und Wegebau aufwies. Es dürfte sich um ein ehemals landwirtschaftlich genutztes Gebiet handeln, in welchem zum Zeitpunkt der Luftbildbefliegung ein „Gecekundu“ der zweiten Generation hätte entstehen sollen („Hisseli Ifraz“, vgl. Kap. 3.13). Bei einer Geländebegehung 1998 waren jedoch keinerlei Spuren einer Bautätigkeit mehr zu entdecken und das Land war teilweise wieder in landwirtschaftliche Nutzung übergegangen. Eine Nachfrage vor Ort blieb ergebnislos. Auch auf dem Satellitenbild von 1994, welches ein dreiviertel Jahr später als das Luftbild entstanden war, waren keinerlei spektrale Signaturen zu finden, die auf eine Bautätigkeit hingedeutet hätten. Letztlich haben wir es also mit einer ungeklärten Situation und einer möglichen Diskrepanz zwischen tatsächlicher und geplanter Nutzung zu tun, so daß eine Kartierung dieses Gebietes als Baustelle nicht sinnvoll schien. Eine solche Klassifizierung hätte zwar dem Eindruck des Luftbildes entsprochen, hätte aber einen Zustand wiedergegeben, der für die fragliche Fläche nicht repräsentativ erscheint.

Im Hinblick auf Fehlklassifizierungen ist generell zu sagen, daß eine Überprüfung aller fraglichen Flächen durch Geländebegehung nicht möglich war. Statt dessen sind später durch Mustervergleich auch solche Flächen reklassifiziert worden, die entweder nicht zugänglich waren, oder die nicht in Augenschein genommen werden konnten, weil es den zeitlichen Rahmen der Arbeit gesprengt hätte. Zur weiteren Absicherung wurden bei der Geländebegehung Landschaftsfotos gemacht, deren Aufnahmeort und -richtung vermerkt wurden.

Abbildung 6-2 zeigt eine Vektorkarte, in welcher die Landbedeckung den CORINE-Klassen entsprechend wiedergegeben wird (vgl. Kap. 5.4). Abbildung 6-3 zeigt das Ergebnis der Rekodierung der Landbedeckung zur Landnutzung gemäß Tabelle 5-5. Diese Karte stellt im Rahmen der Genauigkeitsschätzung der Satellitenbildauswertung die Referenz dar. Für die praktische Umsetzung wurde die Vektorkarte (Abbildung 6-2) in eine Rasterkarte mit einer geometrischen Auflösung von 30x30 Metern konvertiert. Die Rasterkarte hat eine Fläche von 56 637 ha.



Bezugssystem: UTM 35+ (Europa 1950)



CORINE Landcover-Codes



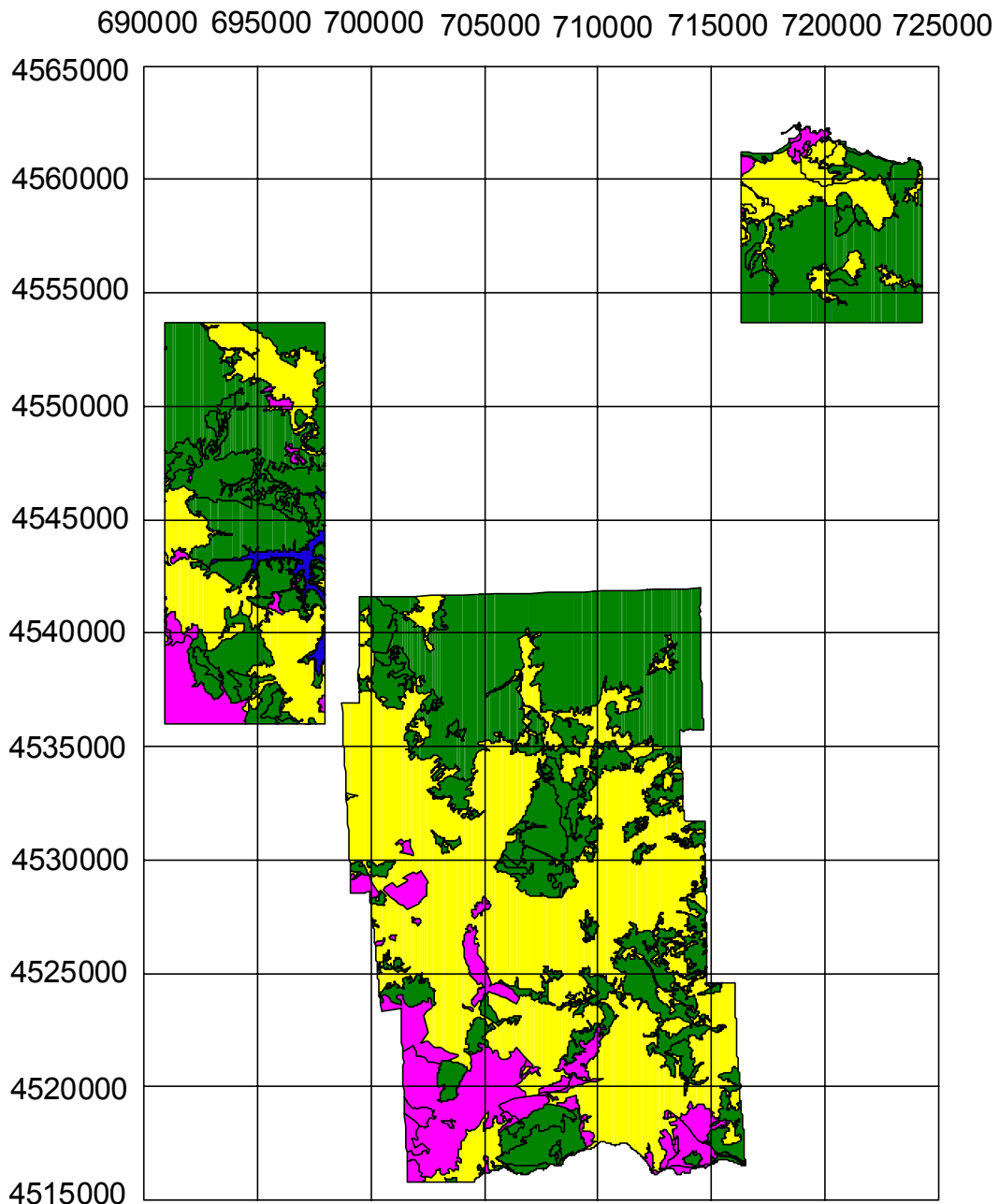
 111	 142	 311
 112	 211	 312
 121	 231	 313
 122	 241	 323
 123	 242	 324
 131	 243	 331
 133	 244	 332
		 512

Abbildung 6-2: Luftbildkartierung der Landbedeckung nach CORINE-Nomenklatur



Bezugssystem: UTM 35+ (Europa 1950)



Landnutzungsklasse

- Urban-industrielle Nutzung
- Landwirtschaftliche Nutzung
- Forstwirtschaftliche Nutzung
- Wasserwirtschaftliche Nutzung

Abbildung 6-3: Landnutzungskartierung durch Rekodierung der Landbedeckungsklassen

6.2 Satellitenbildauswertung

Wie bereits in Kapitel 6.5 angesprochen, lauten die Ziele der durchzuführenden Bildverarbeitungsschritte wie folgt: Die Farbwiedergabe identischer Landoberflächen soll so weit wie möglich vereinheitlicht werden, um die multitemporalen Aufnahmen auf gleiche Weise weiterverarbeiten zu können. Dadurch sollen die Kartierungsfehler für die Jahre 1994 und 1998 im selben Rahmen gehalten werden. Weiterhin sollen die Ergebnisbilder der TC-Transformation die Abgrenzung urban-industriell genutzter Flächen gegen das Umland mit größtmöglicher Deutlichkeit erkennen lassen.

Im Rahmen der Arbeit wurden drei Varianten daraufhin getestet, inwieweit sie die Zielsetzungen erfüllen:

1. Radiometrische Anpassung ohne vorhergehende Kontrastverstärkung
2. Radiometrische Anpassung mit vorhergehender Kontrastverstärkung
3. Radiometrische Anpassung mit anschließender Kontrastverstärkung

Zuvor wurde anhand von UTM-Koordinaten ein identischer Bildausschnitt aus beiden Aufnahmen hergestellt und alle Wasserflächen maskiert, indem der Pixelwert dort auf den Wert Null gesetzt wurde. Diese Maskierung erfolgte durch eine Schwellenwertklassifizierung im TM-Kanal 4 (nahes Infrarot). Dadurch sollte vermieden werden, daß die für die Analyse unerheblichen Wasserflächen mit ihrem Beitrag zu den Grauwertstatistiken die Ergebnisse der Bildverarbeitung beeinflussen. Bei der Berechnung aller Statistiken wurde der Wert Null als Hintergrundwert betrachtet und nicht berücksichtigt.

Nach der Georeferenzierung und der Wahl eines identischen Bildausschnittes für beide Satellitenaufnahmen wurden die beschreibenden Statistiken und die Histogramme der einzelnen Kanäle miteinander verglichen. Die Grauwerte werden in den folgenden Abschnitten als „DN“ (engl.: „digital numbers“) bezeichnet. Tabelle 6-1 enthält die Lage- und Streuungsmaße der Histogramme beider Satellitenaufnahmen vor der radiometrischen Anpassung. Bei Betrachtung der Histogramme der 94er und 98er Satellitenszene (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5) fallen mehrere Dinge ins Auge: Die Häufigkeitsverteilungen sind sich der Form nach für jeden Kanal sehr ähnlich. Die Wölbung in den Infrarot-Kanälen 4 und 5 ist erheblich geringer als in den Kanälen 1 bis 3. Zugleich weist das Histogramm für den Kanal 4 eine geringe Schiefe auf, welche in den Kanälen 1 bis 3 sehr ausgeprägt ist. Diese generellen Charakteristika sind für Landsat TM-Aufnahmen typisch (vgl. JENSEN 1996).

Tabelle 6-1: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme beider Satellitenaufnahmen

Kanal	1994er TM-Szene					1998er TM-Szene				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	12	255	28,2	23	12,4	38	242	53,8	50	10,5
2	42	255	58,7	54	10,6	12	118	23,2	21	6,8
3	14	232	25,9	23	7,3	10	146	24,3	20	10,8
4	8	215	49,6	48	10,9	13	140	49,1	48	10,3
5	5	255	62,8	58	22,3	3	255	57,6	56	18,1
7	3	255	28,2	23	15,2	1	235	23,6	20	11,7

Die Histogramme der 94er Szene erscheinen sehr viel „unruhiger“ als die der 98er Szene. Die Ursache könnte in den unterschiedlichen Resamplingverfahren liegen, die im Zuge der Datenvorverarbeitung verwendet worden sind (vgl. Kap. 5.1): Das Nächster-Nachbar-Verfahren führt mit seiner Pixelverdoppelung auch zu einer Verdoppelung bestimmter DN, wodurch die auffälligen „Spitzen“ zustande kommen. Demgegenüber scheint die Kubische Faltung einen glättenden Einfluß auf die Histogramme zu besitzen.

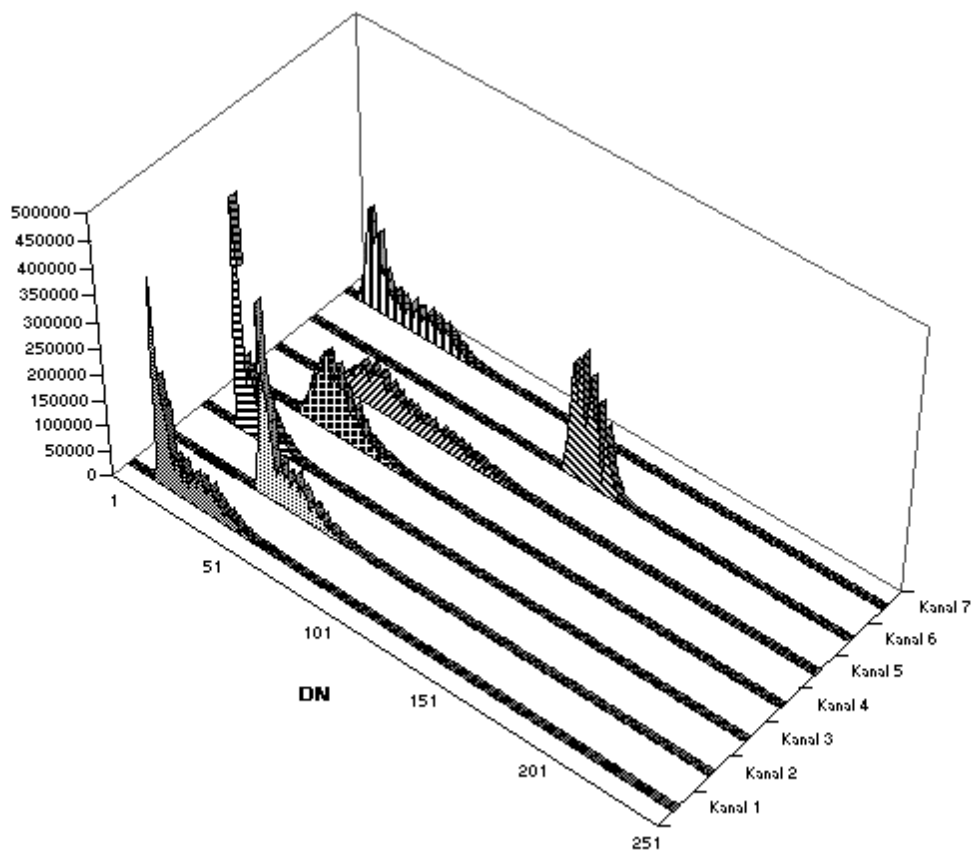


Abbildung 6-4: Histogramme der TM-Szene von 1994

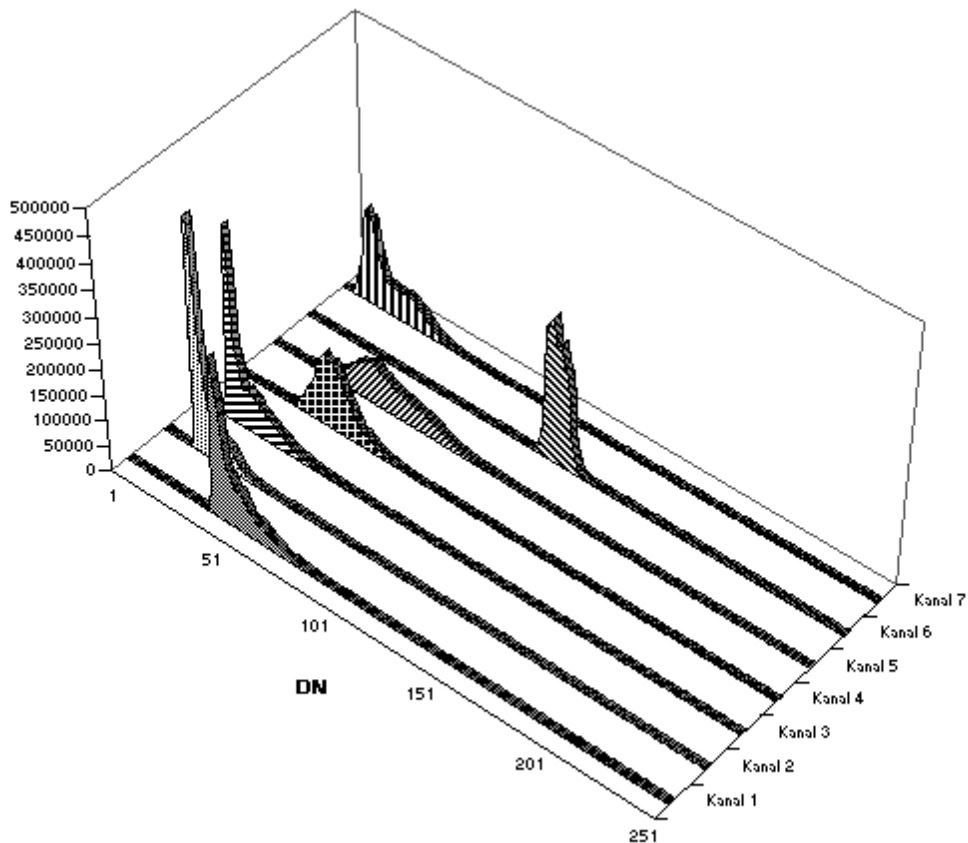


Abbildung 6-5: Histogramme der TM-Szene von 1998

6.21 Radiometrische Anpassung ohne vorhergehende Kontrastverstärkung (Variante 1)

Da alle Voraussetzungen gegeben waren, wurde zunächst eine einfache Histogrammanpassung durchgeführt. Das Ergebnis wird beim Vergleich der Tabelle 6-1 (rechte Hälfte) mit Tabelle 6-2 deutlich, wonach sich tatsächlich eine äußerst gute Übereinstimmung hinsichtlich der Lage- und Streuungsmaße zeigt. Der Effekt der Histogrammanpassung wird vor allem im Kanal 2 deutlich: Der Wertebereich hat sich nach links verlagert (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-6).

Tabelle 6-2: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme der 94er Szene nach der Histogrammanpassung

Kanal	1994er TM-Szene nach der Histogrammanpassung				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	42	242	53,7	50	10,6
2	15	118	23,2	20	6,8
3	12	146	24,3	20	10,8
4	13	140	49,1	48	10,4
5	7	255	57,6	55	18,1
7	4	230	23,6	20	11,7

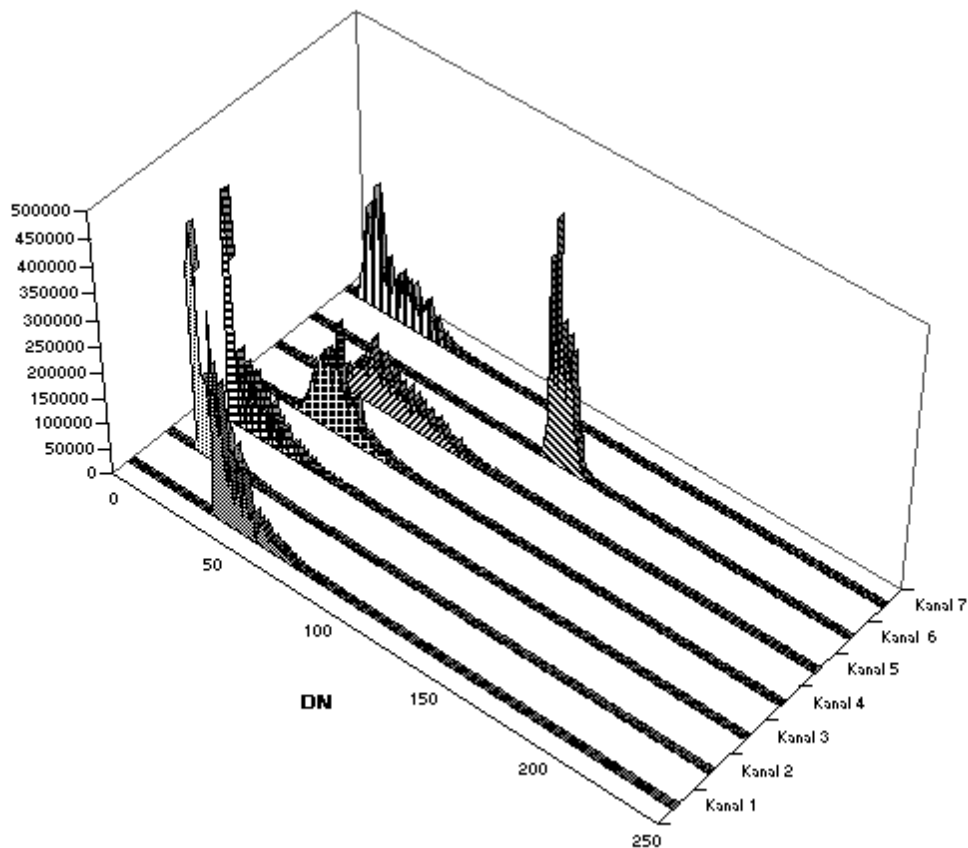


Abbildung 6-6: Histogramme der TM-Szene von 1994 nach der Histogrammanpassung

6.22 Radiometrische Anpassung mit vorhergehender Kontrastverstärkung (Variante 2)

6.221 Ergebnis der Kontrastverstärkung durch LUT-Stretch

Die Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 zeigen die statistischen Kennwerte nach der Kontrastverstärkung und enthalten wegen der besseren Vergleichbarkeit jeweils auf der linken Seite noch einmal die gleichen Kennwerte der Originalbilder. Daraus sind für die Originaldaten große Differenzen zwischen den Minima und Maxima der Pixelwerte (DNmin und DNmax) abzulesen. Die geringen Standardabweichungen sind jedoch ein Zeichen dafür, daß nur ein kleiner Teil des zur Verfügung stehenden Datenraumes genutzt wird (vgl. auch Tabelle 6-1). Die Werte für die Lage- und Streuungsmaße spiegeln sich auch in den Histogrammen wider (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). In Verbindung mit der Tatsache, daß die jeweiligen Mittelwerte nahe am DNmin liegen, ergibt sich für beide Aufnahmen eine dunkle und kontrastarme Darstellung der Erdoberfläche für jeden der Kanäle (Abbildung 6-10). Diese Beschreibung trifft auch auf das Ergebnisbild des vorhergehenden Abschnittes zu, wenn dieses ohne die sonst automatisch erfolgende Kontrastverstärkung am Bildschirm betrachtet wird.

Nach der Durchführung des LUT-Stretch sind die jeweiligen Differenzen zwischen den DNmin und DNmax weiter vergrößert worden (Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4, jeweils rechte Hälfte). Entscheidend sind jedoch die erheblich höheren Standardabweichungen, die eine bessere Ausnutzung der 256 zur Verfügung stehenden DN des 8 Bit-Formats bedeuten. Eine Ausnahme bildet der Kanal 2 der 94er Szene. Hier war die Software nicht in der Lage, das Histogramm korrekt zu strecken.

Als ein weiteres Resultat haben sich die Mittelwerte nach rechts verlagert, so daß von einer geringeren Schiefe gesprochen werden kann. Noch immer zeigen sich beim Vergleich der beiden Satellitenszenen erhebliche Unterschiede bezüglich der Mittelwerte und Standardabweichungen.

Tabelle 6-3: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme der 94er Satellitenaufnahme vor und nach der Kontrastverstärkung

Kanal	1994er TM-Szene vor dem LUT-Stretch					1994er TM-Szene nach dem LUT-Stretch				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	12	255	28,2	23	12,4	6	255	98,5	68	71,1
2	42	255	58,7	54	10,6	73	255	90,9	91	4,7
3	14	232	25,9	23	7,3	9	255	110,0	85	62,1
4	8	215	49,6	48	10,9	6	255	128,8	125	56,3
5	5	255	62,8	58	22,3	3	255	126,4	113	60,9
7	3	255	28,2	23	15,2	5	255	114,0	91	67,5

Tabelle 6-4: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme der 98er Satellitenaufnahme vor und nach der Kontrastverstärkung

Kanal	1998er TM-Szene vor dem LUT-Stretch					1998er TM-Szene nach dem LUT-Stretch				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	38	242	53,8	50	10,5	7	255	105,6	83	61,1
2	12	118	23,2	21	6,8	10	255	111,0	92	58,8
3	10	146	24,3	20	10,8	7	255	98,3	71	66,5
4	13	140	49,1	48	10,3	6	255	129,2	121	55,9
5	3	255	57,6	56	18,1	3	255	128,7	122	58,7
7	1	235	23,6	20	11,7	5	255	121,6	103	60,4

Da die statistische Masse nach der Histogrammstreckung auf einen größeren Wertebereich verteilt werden muß, haben die Histogramme von nun an ein säulenartiges Aussehen (Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8).

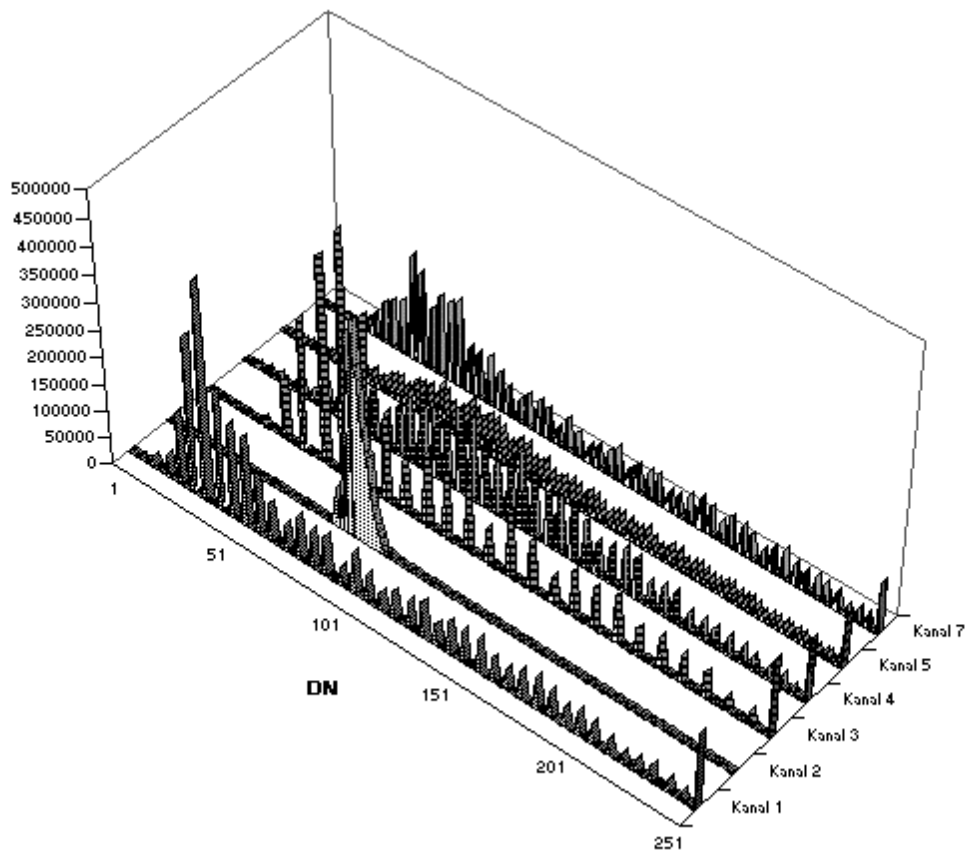


Abbildung 6-7: Histogramme der TM-Szene von 1994 nach dem LUT-Stretch

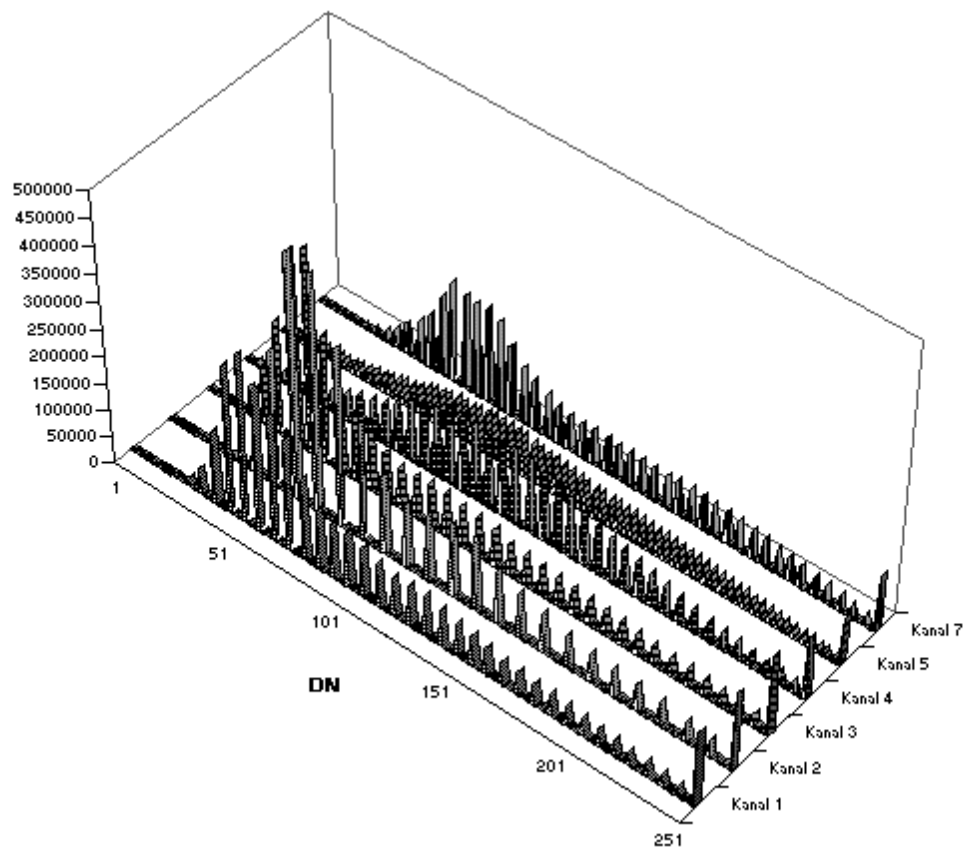


Abbildung 6-8: Histogramme der TM-Szene von 1998 nach dem LUT-Stretch

6.222 Ergebnis der Histogrammanpassung

Nach der Anpassung der Histogramme der 94er an die 98er Szene haben sich Mittelwerte und Standardabweichungen einander weitgehend angeglichen (Tabelle 6-5), wenn auch die absoluten Differenzen der Lage- und Streuungsmaße bei der Histogrammanpassung ohne vorhergehenden LUT-Stretch geringer sind (Tabelle 6-1, rechte Seite und Tabelle 6-2). Die Pixelwerte des Kanals 2 zeigen jetzt eine ähnliche Verteilung wie in den anderen Kanälen (Abbildung 6-9).

Tabelle 6-5: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme der kontrastverstärkten 94er Satellitenaufnahme nach Histogrammanpassung im Vergleich mit der TM-Szene von 1998

Kanal	1994er TM-Szene nach LUT-Stretch und Histogrammanpassung					1998er TM-Szene nach dem LUT-Stretch				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	28	255	105,3	83	61,4	7	255	105,6	83	61,1
2	31	255	111,2	82	59,3	10	255	111,0	92	58,8
3	14	255	98,1	71	66,5	7	255	98,3	71	66,5
4	6	255	128,9	127	56,1	6	255	129,2	121	55,9
5	3	255	128,7	122	58,6	3	255	128,7	122	58,7
7	16	255	121,3	103	60,4	5	255	121,6	103	60,4

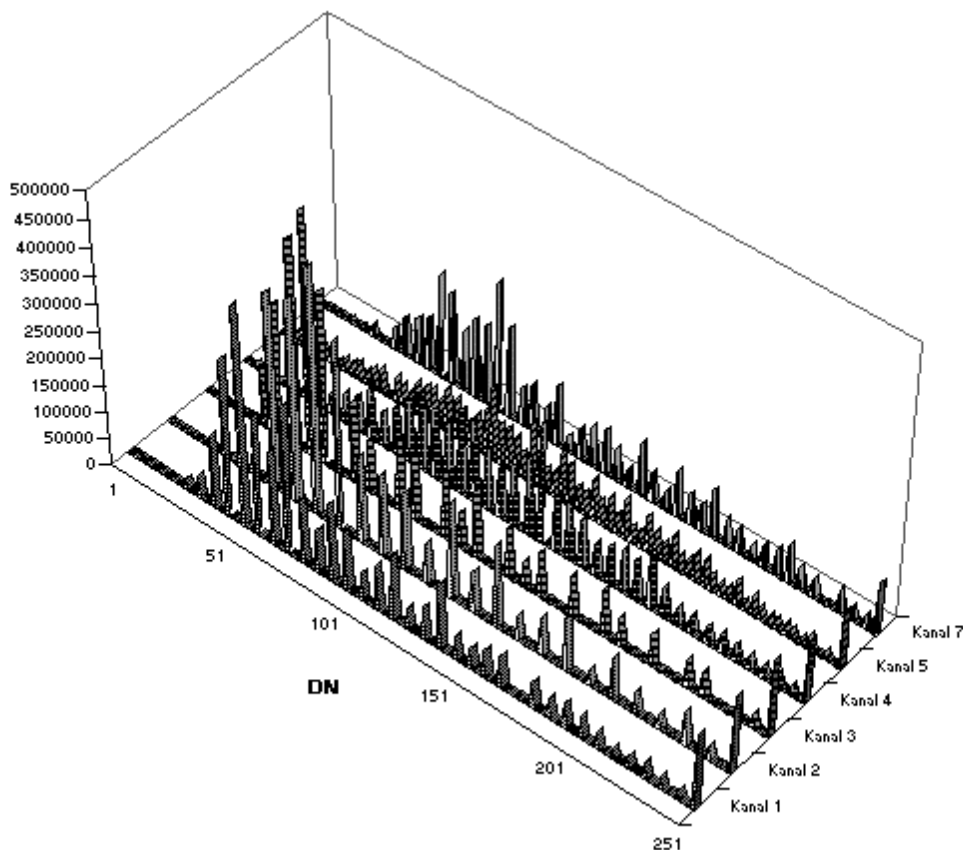


Abbildung 6-9: Histogramme der TM-Szene von 1994 nach LUT-Stretch und Histogrammanpassung

1994

1998

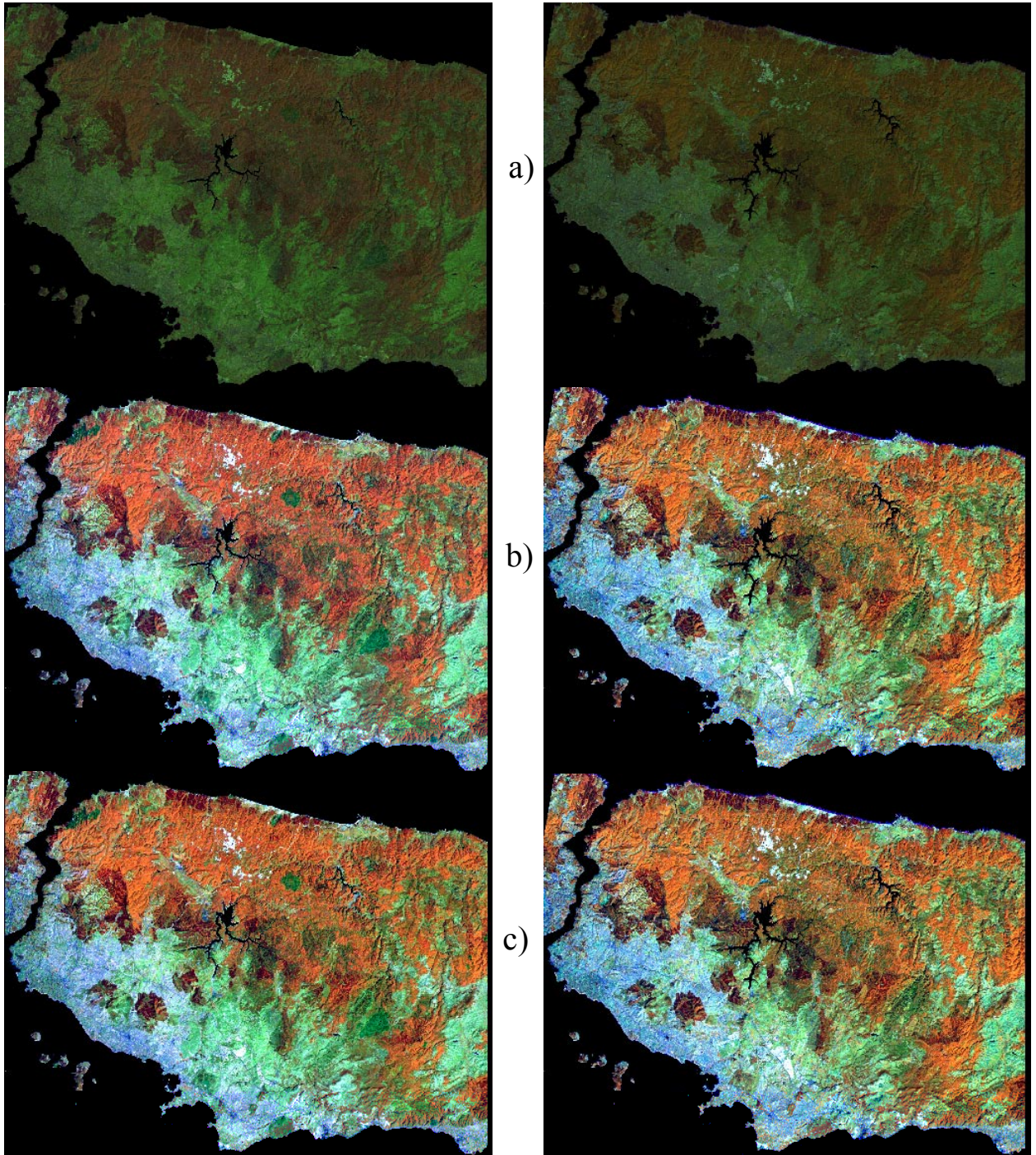


Abbildung 6-10: Effekt von Kontrastverstärkung und Histogrammanpassung. a) Originalbilder, b) nach Kontrastverstärkung, c) nach Histogrammanpassung

Den Effekt dieser zwei aufeinander folgenden Bildverarbeitungsschritte auf die graphische Darstellung verdeutlicht Abbildung 6-10: Während die Ausgangsbilder dunkel und kontrastarm erscheinen und eine visuelle Interpretation erschweren, sind die durch Histogrammstreckung kontrastverstärkten Bilder bereits wesentlich leichter visuell auszuwerten. Beim Vergleich der kontrastverstärkten Bilder von 1994 und 1998 fällt sofort auf, daß die Waldflächen in einem

anderen Rot-/Orangeton wiedergegeben werden (Abbildung 6-10, Mitte). Auch die grünen Farbtöne der Acker- und Weideflächen sind unterschiedlich, sie erscheinen auf der 94er Szene insgesamt etwas blasser. Erst die nachfolgende Histogrammanpassung führt zu einer Vereinheitlichung in der Farbwiedergabe. (Abbildung 6-10, unten)

6.23 Histogrammanpassung mit anschließender Kontrastverstärkung (Variante 3)

Als letzte Variante wurde geprüft, wie sich die Ergebnisbilder verhalten, wenn nach der einfachen Histogrammanpassung (Kap. 6.21) eine getrennte Kontrastverstärkung für beide Bilder durchgeführt wird. Wie aus Tabelle 6-6 abzulesen ist, hat die Kontraststreckung den Effekt der vorangegangenen Histogrammanpassung weitgehend zunichte gemacht. Sowohl die Lage- als auch die Streuungsmaße zeigen deutliche Unterschiede. Beim Vergleich von Abbildung 6-11 mit den anderen Histogrammen ist die unterschiedliche Skalierung der Y-Achse (Maximum 1 400 000) zu beachten. Dadurch kann das Histogramm für den Kanal 2 wegen der darin gleichmäßig verteilten, geringen Häufigkeiten nicht dargestellt werden.

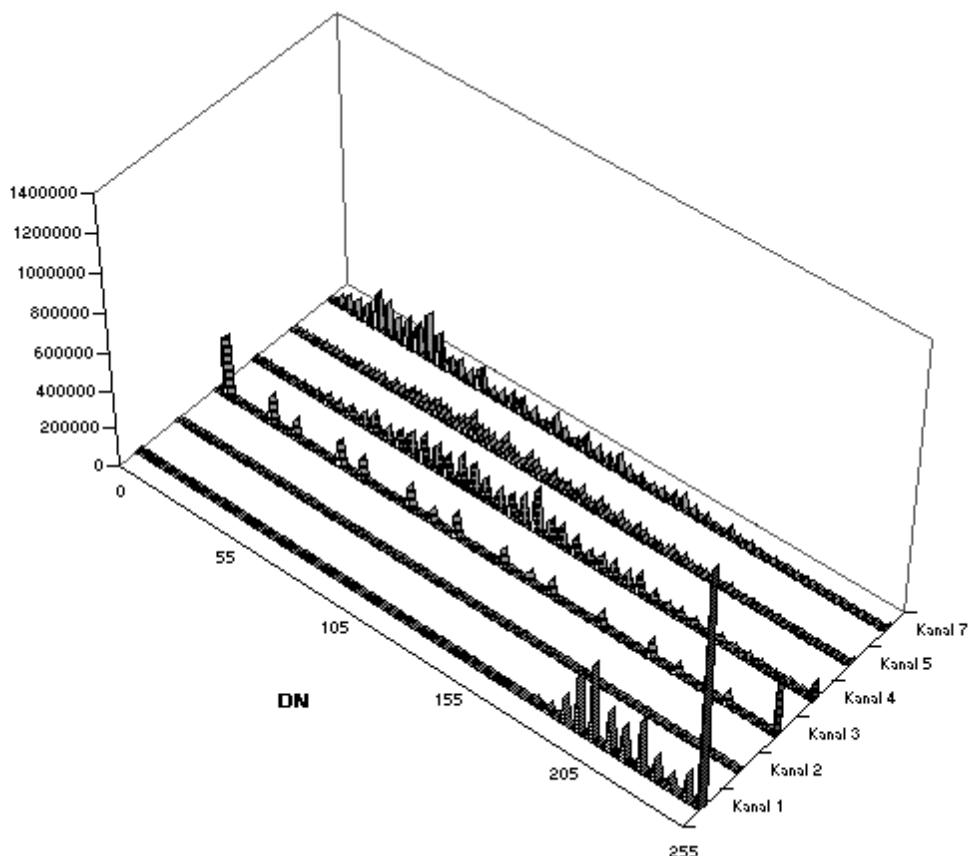


Abbildung 6-11: Histogramme der 94er Satellitenaufnahme nach Histogrammanpassung und anschließender Kontrastverstärkung

Tabelle 6-6: Lage- und Streuungsmaße der Histogramme der 94er Satellitenaufnahme nach Histogrammanpassung und Kontrastverstärkung im Vergleich mit der TM-Szene von 1998

Kanal	1994er TM-Szene nach Histogrammanpassung und LUT-Stretch					1998er TM-Szene nach dem LUT-Stretch				
	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.	DN min	DN max	Mittelwert	Median	Std.-abw.
1	185	255	233,0	236	21,5	7	255	105,6	83	61,1
2	7	255	66,7	51	63,2	10	255	111,0	92	58,8
3	11	255	119,3	106	85,4	7	255	98,3	71	66,5
4	6	255	126,1	125	53,4	6	255	129,2	121	55,9
5	6	255	113,0	105	49,4	3	255	128,7	122	58,7
7	10	255	85,1	67	55,3	5	255	121,6	103	60,4

Gemessen an den Zielvorgaben können nur die ersten beiden Varianten vielversprechende Ergebnisse liefern, während die Histogrammanpassung mit anschließender Kontrastverstärkung nicht in der Lage ist, die beiden Satellitenaufnahmen radiometrisch hinreichend einander anzugleichen.

6.24 Ergebnis der Tasseled Cap-Transformation

Es soll nun geprüft werden, inwieweit die radiometrisch einander angeglichenen Satellitenaufnahmen der Variante 1 und Variante 2 die zweite Zielvorgabe erfüllen, nämlich durch eine gleichartige lineare Transformation die urban-industriell genutzten Flächen möglichst deutlich vom Umland abzugrenzen. Da von den in Kapitel 6.2 getesteten Varianten nur die ersten beiden die Anforderungen an die radiometrische Anpassung erfüllen, werden deren Ergebnisbilder jeweils mit einer TC-Transformation behandelt. Die Ergebnisse werden visuell beurteilt. Dabei wird während der Betrachtung die automatische Kontrastverstärkung durch LUT-Stretch genutzt, welche die verwendete Software beim Aufruf von Rasterbildern automatisch durchführt.

Aus den synthetischen Kanälen (TC-Komponenten) wird eine Dreikanal-Farbkomposite ausgewählt, welche bei der visuellen Unterscheidung zwischen den bebauten Flächen und dem Umland eine möglichst geringe Verwechslungsgefahr gewährleisten soll. Die Auswahl erfolgt nach dem „trial and error“-Verfahren, in welchem zahlreiche Kompositen visuell überprüft werden. In jedem Falle wird darauf geachtet, daß die Farbkompositen die TC-Komponenten *Wetness* und *Greenness* enthalten, da diese in kombinierter Form als Vegetationsindizes eine gute Abgrenzung der bebauten Flächen erwarten lassen. Die erzielte graphische Darstellung soll einerseits kontrastreich sein, andererseits sollen die urban-industriell genutzten Flächen eine genügende Homogenität aufweisen, also möglichst wenig „Fremdpixel“ einschließen.

6.241 Tasseled Cap-Transformation mit den Ergebnisbildern der Variante 1

Die gewählte Farbkomposite *Fifth, Wetness, Greenness* läßt die urban-industriell genutzten Flächen in einem kräftigen Neongrün für den Großteil der versiegelten Flächen erscheinen. Bei genauerem Hinsehen ergibt sich jedoch eine farbliche Überschneidung zwischen den großen Baustellen nördlich von Gebze und vegetationsarmen, landwirtschaftlich genutzten Flächen.

In Abbildung 6-12 markieren die gelben Kreise solche urban-industriell genutzten Flächen, die in den gleichen Farbtönen von Dunkelviolett bis Schwarz wiedergegeben werden wie ein Teil der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein Clustering im RGB-Farbraum würde in diesen Fällen unweigerlich zu einer hohen Zahl von Fehlklassifizierungen führen. Auch die farbliche Zuordnung der großen Abbaugebiete nördlich des Stausees unterscheidet sich deutlich von der Darstellungsweise der anderen Industrieflächen (Abbildung 6-12).

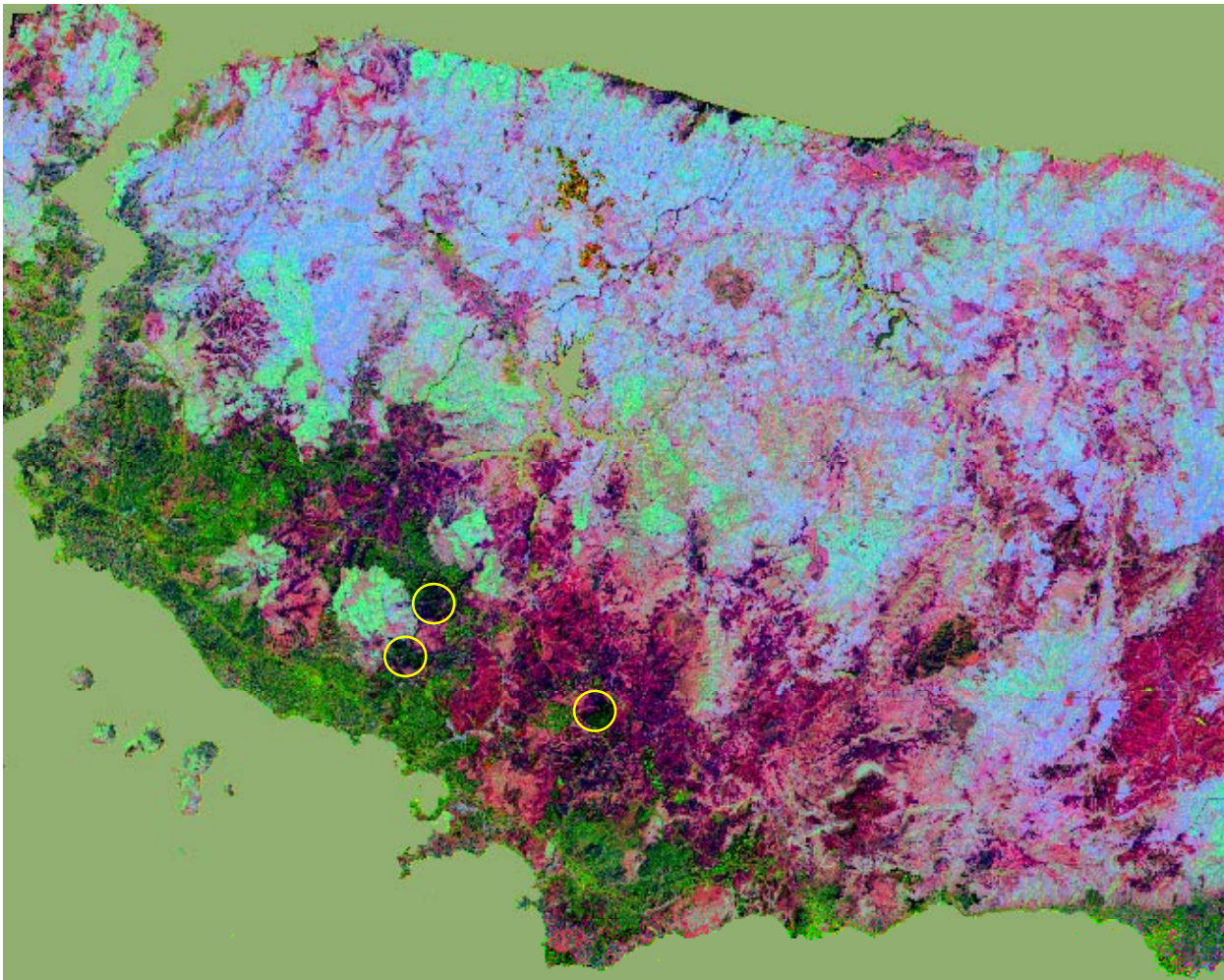


Abbildung 6-12: TC-Farbkomposite 5-3-2 der TM-Szene von 1994 nach Histogrammanpassung

6.242 Tasseled Cap-Transformation mit den Ergebnisbildern der Variante 2

Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen erscheinen jetzt alle urban-industriell genutzten Flächen einheitlich in kräftigen Grüntönen. Die Abbauflächen nördlich des Stausees werden in derselben Farbe wie die ebenfalls durch nackten Mineralboden und anstehendes Gestein dominierten Großbaustellen präsentiert. Insgesamt ist die farbliche Abgrenzung der urban-industriell genutzten Flächen deutlich schärfer als bei den TC-transformierten Bildern, die aus den nicht kontrastverstärkten Satellitenaufnahmen hervorgegangen sind. Eine Zuordnung der Landnutzung zu den einzelnen Farbtönen kann hier mit größerer Sicherheit erfolgen (Abbildung 6-13). Aus diesem Grund werden die Ergebnisbilder der TC-Transformation aus den kontrastverstärkten Eingangsbildern für die anschließende Rekodierung verwendet.

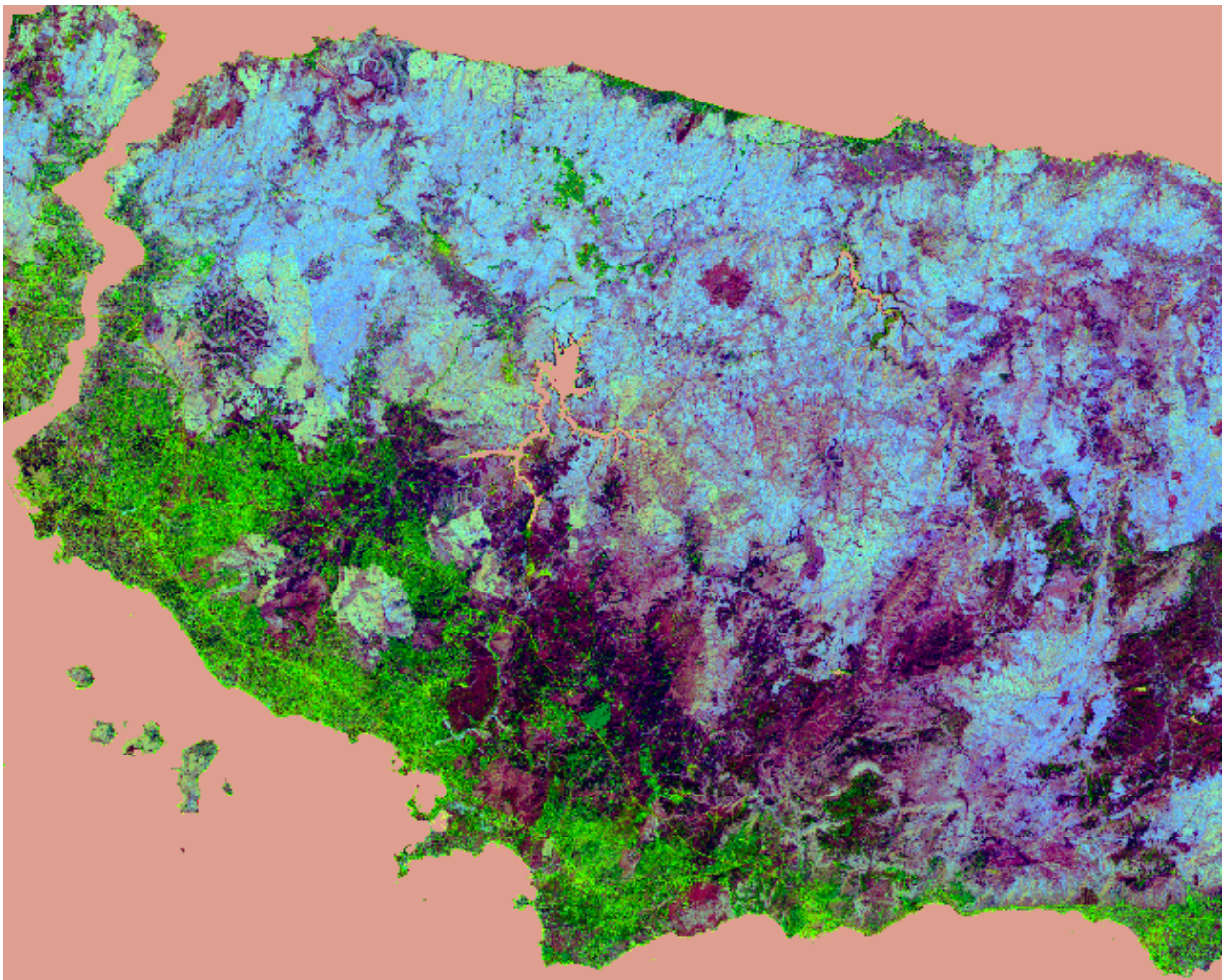


Abbildung 6-13: TC-Farbkomposite 5-3-2 der TM-Szene von 1994 nach Kontrastverstärkung und Histogrammanpassung

6.25 RGB-Clustering

Wie bereits in Kapitel 6.524 erwähnt wurde, ist das Clustering im RGB-Farbraum vergleichbar mit einer unüberwachten Klassifizierung. Im vorliegenden Fall entspricht die Datenachse „Rot“

der TC-Komponente *Fifth*, die Datenachse „Grün“ der TC-Komponente *Wetness* und die Datenachse „Blau“ der TC-Komponente *Greenness*. Entlang der drei Achsen werden sechs (*Wetness*, *Greenness*), bzw. sieben (*Fifth*) äquidistante Klasseneinteilungen vorgenommen. Daraus ergibt sich ein Maximum von 252 möglichen Pixelwerten und damit eine sehr gute Ausnutzung des Datenformats von 8 Bit.

Um die gute visuelle Interpretierbarkeit der durch automatischen LUT-Stretch kontrastverstärkten TC-Farbkompositen zu erhalten, wurden bei der unüberwachten Klassifizierung im RGB-Farbraum nicht alle Pixelwerte der Eingangsbilder berücksichtigt. Vielmehr wurde nur diejenige statistische Masse ausgewählt, die innerhalb der zweifachen Standardabweichung links und rechts des arithmetischen Mittelwertes liegt. Daraus erklärt sich der andere Farbton des Hintergrundes (Abbildung 6-14).

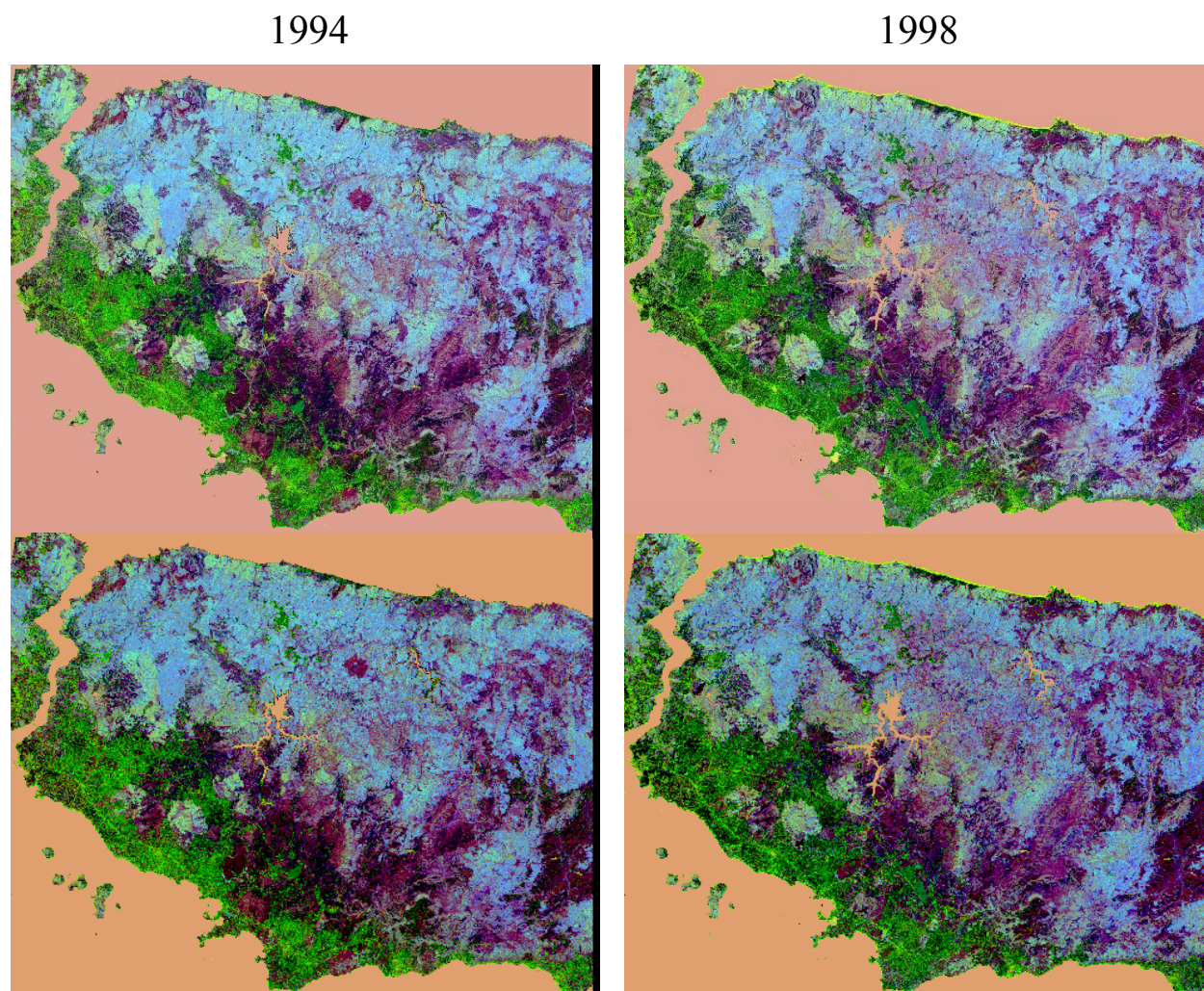


Abbildung 6-14: TC-Farbkompositen 5-3-2 der Jahre 1994 und 1998 (oben) und Ergebnis des RGB-Clustering (unten)

6.26 Rekodierung und Nachbearbeitung

Eine eingehende Untersuchung der Ergebnisbilder des RGB-Clustering ergab, daß in beiden Bildern die urban-industrielle Nutzung mit den dazu gehörigen Farben weitgehend durch die gleichen Pixelwerte repräsentiert wird. Dabei handelt es sich um Pixelwerte aus einer Zahlenreihe, deren Elemente ein Vielfaches von Sechs darstellen, also 6, 12, 18, 24, usw. Dieses Phänomen ist auf die äquidistante Klassenteilung entlang der Datenachsen im Zuge des RGB-Clustering zurückzuführen. Da auch Ausnahmen von dieser Regel vorkommen, erfolgt die Veränderungsanalyse an dieser Stelle nicht durch eine einfache Bildsubtraktion.

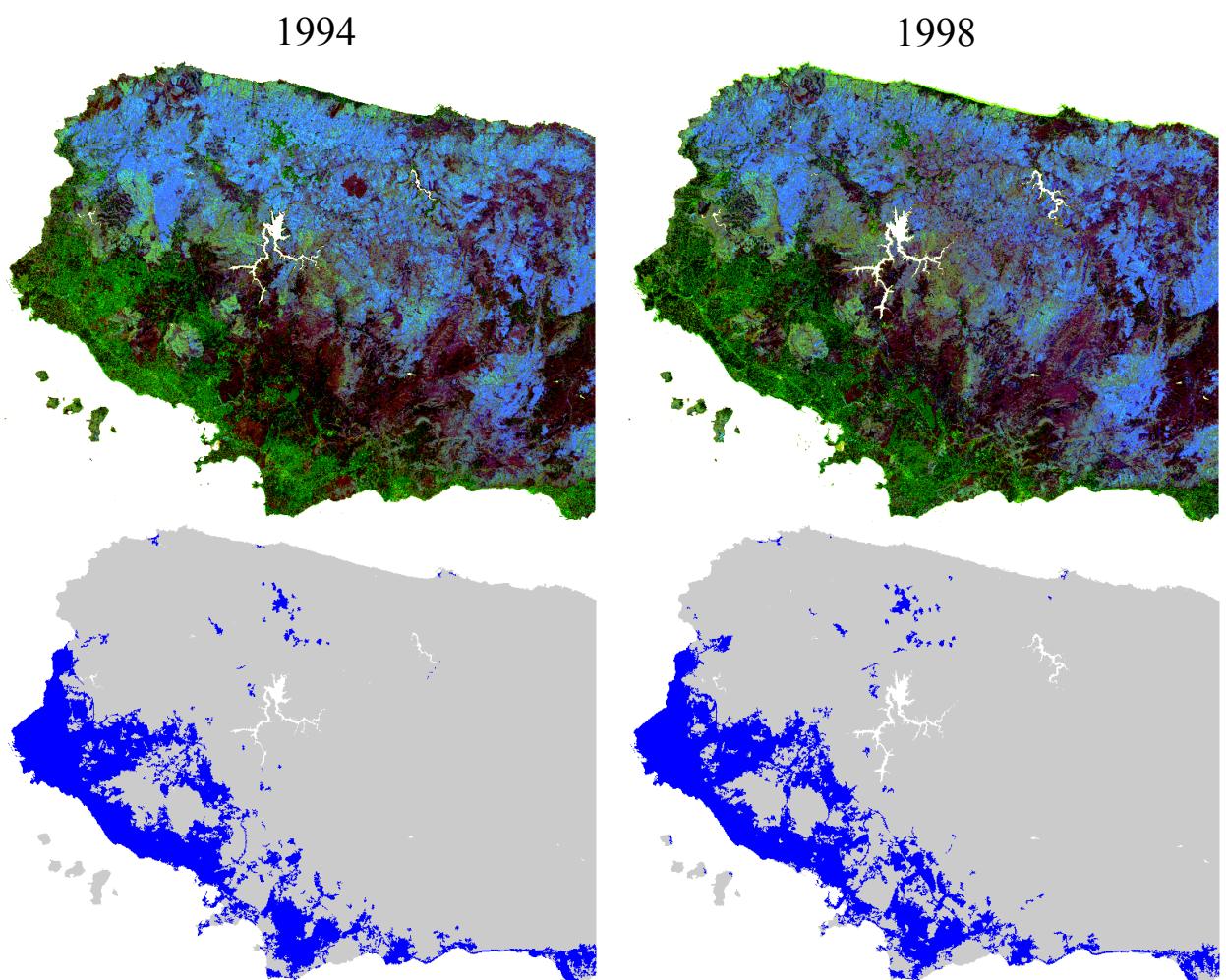


Abbildung 6-15: TC-Farbkomposite und binäre Karten der urban-industriell genutzter Flächen für die Jahre 1994 (links) und 1998 (rechts)

Zur Reduzierung des „Salz-und-Pfeffer-Effekts“ wurden die klassifizierten Bilder zur Glättung der Ergebnisse mit einem räumlichen 3x3 Majority-Filter behandelt, um anschließend alle fraglichen Pixelwerte zu einem einzigen zu rekodieren. Dadurch entstanden binäre Karten der urban-industriellen Nutzung für den Anfang und das Ende der Untersuchungsperiode (Abbildung 6-15). Weil diese Karten noch immer stark fragmentiert sind, wurde eine Testserie zur

Elimination von Kleinflächen mit Größen zwischen 25 und 100 Pixeln durchgeführt. Für jeden Test wurde eine Überprüfung der Nutzer- und Produzentengenauigkeit anhand der Referenzkarte vorgenommen. Sie ergab, daß die höchsten Nutzer- und Produzentengenauigkeiten der Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ erreicht werden, wenn zusammenhängende Kleinflächen (engl. „clumps“) von weniger als 100 Pixeln eliminiert werden. Die Eliminierung noch größerer Fragmente wurde wegen einer zu starken Generalisierung des Bildinhaltes abgelehnt.

6.27 Genauigkeitsschätzung für die Landnutzungskartierung des Jahres 1994

Die Nutzer- und Produzentengenauigkeit der Landnutzungskartierung liegt für jede der Klassen deutlich über 80 % (Tabelle 6-7). Bei der Evaluierung der Fehlermatrix wurde besonders darauf geachtet, daß Nutzer- und Produzentengenauigkeiten der Klassen ausgewogen sind, d. h. daß sie sich auf einem ähnlich hohen Niveau bewegen. Ein Ungleichgewicht in dieser Hinsicht würde eine systematische Unterrepräsentierung der einen und eine Überrepräsentierung einer anderen Klasse bedeuten.

Die mit dem TC-RGB-Cluster-Verfahren erzielten Ergebnisse wurden mit einer Landnutzungskartierung durch eine parametrische Maximum Likelihood (ML)-Klassifikation verglichen. Diese Klassifizierungsmethode wird in vielen Untersuchungen angewendet und ist entsprechend gut dokumentiert (LANDGREBE 2000, SWAIN & DAVIS 1978, FOODY et al. 1992). Daher wurde die Klassifizierung mit dem ML-Algorithmus in einfacher Form als Vergleichsmaßstab für die Effizienz des hier vorgestellten Verfahrens gewählt. Grundlage war die georeferenzierte, radiometrisch nicht weiter bearbeitete Satellitenszene von 1994. Die Trainingsflächen zur Auswahl der Musterklassen wurden mit Hilfe der Luftbilder und der Geländekenntnisse ausgewählt.

Die Trennbarkeit der Klassen wurde mit Hilfe des „Transformierten Divergenz-Index“ (TD) beurteilt (SWAIN & DAVIS 1978). Er dient u. a. dazu, aus allen für die Klassifizierung zur Verfügung stehenden Kanälen diejenigen auszuwählen, welche die beste Trennbarkeit zwischen den Klassen gewährleisten. Der TD hat für den Bearbeiter im Gegensatz zur einfachen Divergenz den Vorteil, nur Werte zwischen 0 und 2 000 annehmen zu können. Werte größer als 1 900 bedeuten eine sehr gute Trennbarkeit, Werte zwischen 1 700 und 1 900 gelten als akzeptabel und Werte unter 1 700 bedeuten eine schlechte Klassentrennbarkeit (JENSEN 1996). Zur Beurteilung der Homogenität innerhalb einer Klasse wurden zunächst die Trainingsflächen selbst klassifiziert und die entsprechenden Fehlermatrizen ausgewertet.

Für die ML-Klassifizierung wurden die Kanäle 1 bis 5 und 7 verwendet. Dabei waren ursprünglich mehrere Spektralklassen für jede Landnutzung ausgewiesen und anschließend zusammengefaßt worden.

Tabelle 6-7: Durch Vergleich mit der Referenzkarte ermittelte Kartierungsgenauigkeiten der Satellitenbilddauswertung für das Jahr 1994

Genauigkeitsmaß	Maximum Likelihood	TC-RGB-Cluster
Produzentengenauigkeit Landwirtschaft	64,42%	81,82%
Nutzergenauigkeit Landwirtschaft	88,16%	85,00%
Produzentengenauigkeit Forstwirtschaft	81,71%	88,37%
Nutzergenauigkeit Forstwirtschaft	89,94%	87,86%
Produzentengenauigkeit Urban-industrielle Nutzung	97,01%	86,81%
Nutzergenauigkeit Urban-industrielle Nutzung	46,76%	81,44%
Gesamtgenauigkeit	76,00%	85,33%
Kappa-Koeffizient Landwirtschaft	0,78	0,74
Kappa-Koeffizient Forstwirtschaft	0,84	0,80
Kappa-Koeffizient Urban-industrielle Nutzung	0,37	0,77
Gesamt-Kappa	0,64	0,77

Ein Grund für die deutlich schlechteren Ergebnisse der ML-Klassifizierung kann erstens darin liegen, daß es wegen der mangelnden Homogenität der Trainingsflächen im Bereich der Siedlungen zu einer größeren Überschneidung der Musterklassen im Merkmalsraum kommt. Darauf deutet insbesondere das Ungleichgewicht zwischen der niedrigen Nutzergenauigkeit und der hohen Produzentengenauigkeit für die Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ hin. Demnach ist die Klasse „Urban-industrielle Nutzung“ auf Kosten der Klasse „Landwirtschaft“ überschätzt worden. Dazu paßt auch die recht geringe Produzentengenauigkeit der Klasse „Landwirtschaft“.

Ein weiterer Grund kann in der Jahreszeit begründet liegen, zu der die Aufnahme gemacht wurde. Ende September sind im Untersuchungsgebiet die meisten Felder bereits abgeerntet und die Spektralsignatur des nackten Bodens überwiegt diejenige des frisch eingesäten Wintergetreides. Ein weiterer Faktor, der die Kartierung im Randbereich bebauter Flächen so schwierig macht, ist die kleinräumige Verzahnung von Häusergruppen, aktiven und aufgelassenen (und damit wiederbegrünt) Baustellen und Wiesenflächen in direkter Nachbarschaft zu den Siedlungen.

6.3 Die Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen von 1994 bis 1998

Die Flächenstatistiken für 1994 und 1998 zeigen, daß die urban-industriell genutzten Flächen um etwa 3 500 ha zugenommen haben. Dies entspricht einem Wachstum von knapp 10 % innerhalb des vierjährigen Zeitraums (Tabelle 6-9). Es wurden fast ausschließlich landwirtschaftlich genutzte Flächen umgewandelt, während die forstwirtschaftlichen Flächen praktisch unverändert geblieben sind (Tabelle 6-8).

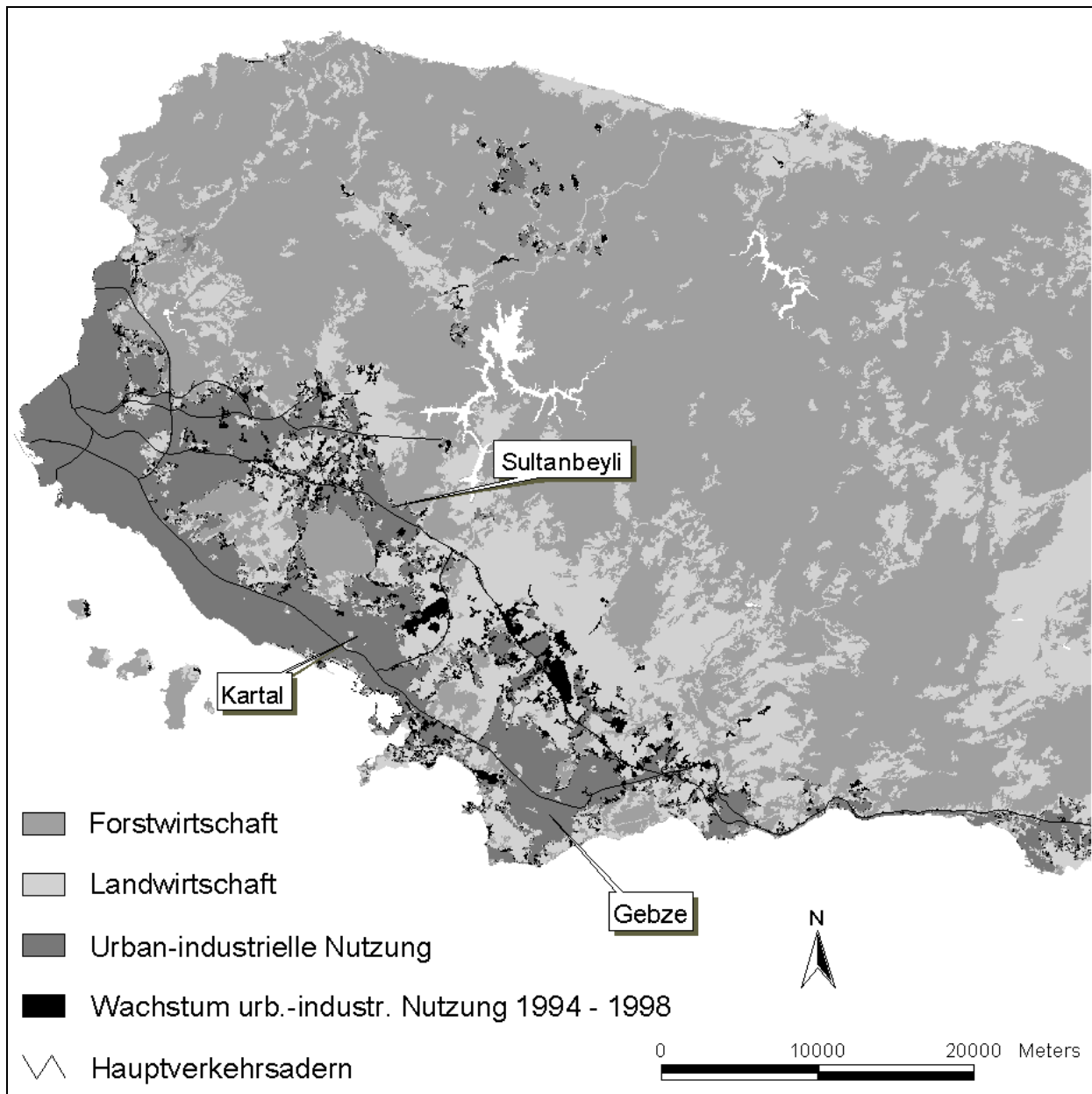


Abbildung 6-16: Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen auf der Kocaeli-Halbinsel von 1994 bis 1998

Abbildung 6-16 zeigt eine Karte der umgewandelten Flächen für den Zeitraum 1994 bis 1998. Hierbei ist zu beachten, daß ausschließlich die Umwandlung von land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung in urban-industrielle Nutzung betrachtet wird. Jede andere Form der

Landnutzungsänderung wird hier nicht berücksichtigt. Bei eingehender Betrachtung der Karte fallen zwei große, zusammenhängende Komplexe nördlich von Gebze bzw. nordöstlich von Kartal ins Auge. Dabei handelt es sich um Baustellen für industrielle und gewerbliche Anlagen, die Teil eines großen Gewerbeparks sein werden. Im Gegensatz dazu dürfte es sich bei den in direkter Nachbarschaft zu den Ortschaften Kartal, Sultanbeyli und Gebze hinzugekommenen Flächen um illegale Siedlungen handeln. Dort, wo die Waldgrenze direkt neben bebauten Flächen liegt, scheint sie äußerst stabil gegen eine räumliche Verschiebung zu sein.

Tabelle 6-8: Flächenanteile der einzelnen Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche

Landnutzungsklasse	1994		1998	
	Größe [ha]	Flächenanteil	Größe [ha]	Flächenanteil
Landwirtschaft	65849,0	24,3%	62728,8	23,2%
Forstwirtschaft	168091,7	62,2%	167925,8	62,0%
Urban-Industriell	36638,1	13,5%	40158,3	14,8%
Sa.	270578,7	100,0%	270812,9	100,0%

Tabelle 6-9: Absolute und prozentuale Flächenänderung für die einzelnen Landnutzungsklassen

Landnutzungsklasse	Flächenänderung 1994 bis 1998 [ha]	Fläche 1998 im Vergleich zu 1994 (100 %)
Landwirtschaft	-3120,1	95,3
Forstwirtschaft	-165,9	99,9
Urban-Industriell	+3520,2	109,6

Die Flächenänderungen in Tabelle 6-9 addieren sich nicht zu Null, weil die Flächen der Satellitenkarten für 1994 und 1998 um 234,2 ha differieren. Bei einer Gesamtfläche von 270 579 ha (1994) entspricht dies einer Abweichung von 0,09 %.

6.4 Räumlich-statistische Modellierung

6.41 Das empirische, räumlich-statistische Modell für die Halbinsel Kocaeli

Gestützt auf die bisherigen Untersuchungen zur Modellierung der Landnutzungsänderung (Kap. 3.3) wurden für die Kocaeli-Halbinsel folgende Zusammenhänge angenommen:

- Beim *Bau neuer Wohnungen* ist die direkte Nachbarschaft zu bereits bebauten Flächen gleichbedeutend mit dem Zugang zu öffentlichen Infrastruktureinrichtungen wie dem Straßennetz, Elektrizitäts- und Wasserversorgung. Die Immigranten werden ihr neues

Domizil dort suchen, wo sie eine geringe Entfernung zu Freunden und Verwandten und möglichen Arbeitsplätzen vermuten.

- Für die *Unternehmen* bedeutet eine Ansiedlung entlang der Hauptverkehrsadern einen erleichterten Austausch von Waren und einen verbesserten Zugang zu den Märkten.
- *Waldflächen* sind in der Türkei verfassungsmäßig geschützt. Artikel 169 der Verfassung lautet: „Der Staat trifft erforderliche Maßnahmen zur Erhaltung und Aufforstung der Wälder. Das Eigentum an staatlichen Wäldern ist unübertragbar.“ (In: VIDINLIOĞLU 1993). Eine Umwandlung ist daher schwierig und darf nur einem übergeordneten, öffentlichen Interesse dienen, so daß die Veränderungswahrscheinlichkeit für solche Flächen drastisch sinkt.
- Die *Topographie* des Geländes spielt insofern eine Rolle, als daß Hanglagen gleichbedeutend mit gesteigerten Baukosten sind. Zugleich sind steilere Hanglagen in Verbindung mit großen Geländehöhen häufig ein Indikator für eine gewisse Abgelegenheit des Gebietes.

Aus den zur Verfügung stehenden Geodaten wurden daher die folgenden Variablen abgeleitet:

Die Ausbreitung der urban-industriell genutzten Flächen (Abbildung 10-1) wurde der Veränderungskarte (Abbildung 6-16) entnommen, während das räumliche Muster der Landnutzung im Jahre 1994 aus der hybriden Klassifizierung der entsprechenden TM-Szene stammt (Abbildung 10-2).

Die Lage der drei Hauptverkehrsadern (vgl. Abbildung 4-5) wurde aus dem Satellitenbild durch Digitalisierung am Bildschirm gewonnen. Die so entstandene Vektorkarte der Straßenverläufe wurde, wie alle Geodaten, in eine Rasterkarte mit einer Auflösung von 30 Metern umgewandelt. Mit Hilfe einer speziellen GIS-Funktion wurde anschließend innerhalb des Kartenraumes für jedes Pixel a) die Entfernung zu urban-industrieller Nutzung, b) die Entfernungen zu den einzelnen Hauptverkehrsadern und c) die Entfernung zur nächsten Hauptverkehrsader berechnet und als digitale Entfernungskarten dem Datensatz hinzugefügt (Abbildung 10-4 bis Abbildung 10-7). Die hierbei verwendete Einheit zur Messung der Entfernung war nicht etwa „Meter“, sondern „Anzahl Pixel“. Auf die gleiche Weise wurde die Entfernung zu urban-industriell genutzten Flächen am Anfang der Untersuchungsperiode hergeleitet (Abbildung 10-3).

Weiterhin wurde aus dem digitalen Geländemodell die Hangneigung berechnet und als weitere Karte dem Datensatz hinzugefügt (Abbildung 10-8 und Abbildung 10-9).

Zusammengefaßt lauten die Variablen für die statistische Programmierung:

1. „urbgrow“ = Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen von 1994 bis 1998
(erklärte Variable)
2. „lu94“ = Landnutzung Wald/Nichtwald im Jahre 1994
3. „urb94dis“ = Entfernung zu urban-industriell genutzten Flächen im Jahre 1994
4. „roaddist“ = Entfernung zur nächsten Hauptverkehrsader
5. „road1dis“ = Entfernung zur *E5*
6. „road2dis“ = Entfernung zur *TEM*
7. „road7dis“ = Entfernung zur Umgehungsstraße im Bezirk Kartal
8. „slope“ = Hangneigung
9. „dem“ = Geländehöhe

Tabelle 6-10: Variablen der räumlich-statistischen Modellierung

Variable	Skalenniveau	Wertebereich	Mittelwert	Std.-Abw.
urbgrow	nominal	1; 2	–	–
lu94	nominal	1; 2	–	–
urb94dis	metrisch	1 - 442	94,19	114,92
roaddist	metrisch	1 - 637	156,56	143,31
road1dis	metrisch	1 - 707	290,27	180,43
road2dis	metrisch	1 - 637	180,48	138,16
road7dis	metrisch	1 - 772	342,07	181,61
slope	metrisch	0 - 66	6,66	5,37
dem	metrisch	0 - 535,6	166,16	72,78

Aus statistischer Sicht ist jedes Pixel der erwähnten Informationsebenen (Variablen) als eine Populationseinheit zu betrachten, die einen spezifischen Satz von Merkmalsausprägungen besitzt. Insgesamt wurden acht erklärende Variablen verwendet, von denen *lu94* nominal, alle anderen metrisch skaliert sind (Tabelle 6-10). Wechselseitige Abhängigkeiten der erklärenden Variablen können bei dem gewählten statistischen Verfahren (nichtparametrische Diskriminanzanalyse) toleriert werden.

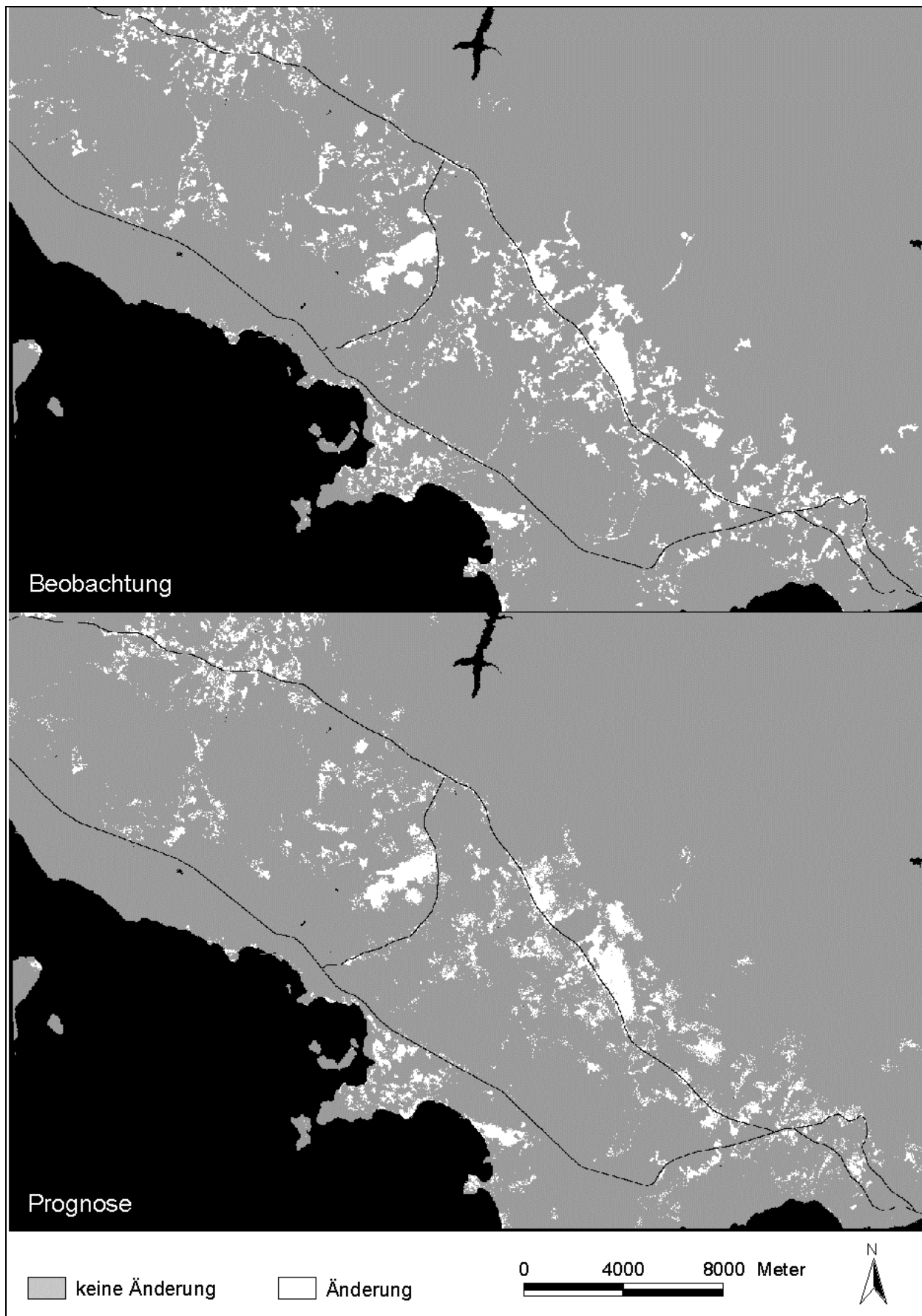


Abbildung 6-17: Kartographische Darstellung der räumlich-statistischen Modellierung: Beobachtete (oben) und modellierte Landnutzungsänderung (unten)

6.42 Ermittlung der Prognosegenauigkeit der nichtparametrischen Diskriminanzanalyse durch Kreuzvalidierung

Einen Einblick in die Fähigkeit des Modells zur räumlichen Vorhersage liefern Kontingenz- oder Fehlermatrizen, wie sie allgemein für die Beurteilung von Klassifizierungsfehlern verwendet werden. In Anlehnung an TURNER et al. (1989) wurde daher diese Methode gewählt, zumal sich aus solchen Fehlermatrizen die verschiedenen Genauigkeitsmaße nach Bedarf ableiten lassen. Die Fehlermatrizen stellen den Output der statistischen Modellierung mit SAS dar. Der kommentierte Programmcode ist im Anhang wiedergegeben (Kap. 10.3). Da für das gesamte Gebiet zwei separate Modellierungen mit jeweils vertauschten Kalibrierungs- und Validierungssets durchgeführt wurden, wird für jedes der Modelle eine Fehlermatrix veröffentlicht (Tabelle 6-11 und Tabelle 6-12). Das Ergebnis der Modellierung wird zusätzlich kartographisch dargestellt (Abbildung 6-17).

Tabelle 6-11: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung des Gesamtmodells

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 399	4 905	261 304
	Änderung	3 164	21 093	24 257
	nicht klassifiziert	22	24	46
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 6-12: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung des Gesamtmodells

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 678	4 900	260 578
	Änderung	3 152	20 977	24 129
	nicht klassifiziert	20	30	50
	gesamt	258 850	25 907	284 757

Üblicherweise werden Prognosemodelle anhand der Richtigkeit der von ihnen gelieferten Schätzungen beurteilt (vgl. BAHRENBERG et al. 1992). Die Güte eines Prognosemodells kann demnach für jede Klasse anhand des Verhältnisses der korrekt klassifizierten Beobachtungen zur Anzahl der Beobachtungen, die insgesamt in diese Klasse eingeordnet wurden, beurteilt werden (Gleichung 6-1). Dieses Genauigkeitsmaß ist äquivalent zur Nutzergenauigkeit, wie sie in der Fernerkundung verwendet wird (vgl. Kap. 5.612).

Prozentuale Schätzungsgenauigkeit für die Klasse i im prognostischen Modell

$$G_i[\%] = \frac{\text{Anzahl der richtig klassifizierten Beobachtungen der Klasse } i}{\text{Anzahl der Beobachtungen der Klasse } i \text{ in der Prognose}} \times 100 \quad (\text{Gleichung 6-1})$$

Aus den Werten der Fehlermatrix I (Tabelle 6-11) ergibt sich nach Gleichung 6-1:

$$\begin{aligned} G_i[\%] &= \frac{21093}{24257} \times 100 \\ &= 86,9 \end{aligned}$$

Und aus den Werten der Fehlermatrix II (Tabelle 6-12) ergibt sich nach Gleichung 6-1:

$$\begin{aligned} G_i[\%] &= \frac{20977}{24129} \times 100 \\ &= 86,9 \end{aligned}$$

Für das vorliegende Modell läßt sich also die Genauigkeit der prognostizierten Ausbreitung der urban-industriell genutzten Flächen („Änderung“) daher mit 86,9 % sowohl für den ersten als auch für den zweiten Durchgang angeben.

6.43 Untersuchung der Einflußstärke einzelner Variablen

Bei multivariaten statistischen Modellen ist eine eingehende Analyse der Wirkungsstärke und Wirkungsrichtung der Einflußgrößen wünschenswert. Bei parametrischen Verfahren wie Regressionsmodellen oder linearen Diskriminanzanalysen kann dies anhand der Koeffizienten in der Regressionsgleichung oder Diskriminanzfunktion erfolgen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die (metrisch skalierten) Variablenwerte zuvor standardisiert werden, um Unterschiede in den Einheiten und Wertebereichen zu beseitigen (BAHRENBERG et al. 1992).

Diese Möglichkeit bietet das hier eingesetzte Verfahren nicht. Statt dessen sollen Permutationen des Modells mit Hilfe der Kreuzvalidierung auf ihre Prognosegenauigkeit getestet werden, wobei nacheinander diejenigen Variablen bzw. Variablengruppen aus dem Modell herausgenommen werden, für deren Einfluß man sich interessiert. Diese Methode hat allerdings den Nachteil, daß wechselseitige Abhängigkeiten unter den erklärenden Variablen nicht berücksichtigt werden können.

Die einzelnen Fehlermatrizen der Kreuzvalidierungen finden sich im Anhang (Tabelle 10-1 bis Tabelle 10-26). An dieser Stelle sollen aus Gründen der Übersichtlichkeit statt dessen die Kappa-Werte zum Vergleich herangezogen werden (vgl. Kap. 5.614). Diese errechnen sich aus dem

Vergleich zwischen der Beobachtung und der Modellierung mit den Methoden der Bildverarbeitung.

Bei Verwendung aller Variablen betragen die Kappa-Werte 0,856 für die Klasse „Änderung“ bzw. 0,793 für die Klasse „keine Änderung“. Der geringere Kappa-Wert für die Klasse „keine Änderung“ mag zunächst überraschen, sind doch Nutzer- und Produzentengenauigkeit weitaus höher als bei der Klasse „Änderung“. Der Grund dafür ist der große Unterschied in den relativen Häufigkeiten mit 0,91 („keine Änderung“) gegenüber 0,09 („Änderung“). Daraus ergibt sich ein hohes Maß an Zufallsübereinstimmung in der Klasse „keine Änderung“, welches bei den genannten Genauigkeitsmaßen unberücksichtigt bleibt. Hierin zeigt sich der besondere Vorteil des Kappa-Koeffizienten, der auch die Randsummen einbezieht und somit die gesamte Fehlermatrix ausnutzt.

Tabelle 6-13: Kappa-Werte zur Beurteilung der Prognosegenauigkeit der getesteten Modelle

Nicht berücksichtigte Variable	Kappa-Wert „Änderung“	Kappa-Wert „keine Änderung“
lu94	0,856	0,793
urb94dis	0,854	0,788
roaddist	0,855	0,792
road1dis	0,846	0,783
road2dis	0,852	0,788
road7dis	0,829	0,754
road1dis, road2dis und road7dis	0,659	0,554
road1dis, road2dis, road7dis u. roaddist	0,452	0,300
slope	0,860	0,796
dem	0,869	0,802

Bei genauerer Betrachtung von Tabelle 6-13 fällt auf, daß für sich allein genommen keine der erklärenden Variablen einen besonders starken Einfluß zu haben scheint. Die Kappa-Werte für das Modell ohne *lu94* sind bis auf die dritte Nachkommastelle identisch mit den Kappa-Werten für das Gesamtmodell (Tabelle 6-13). Das Weglassen der Variablen *slope* und *dem* scheint die Prognosegenauigkeit noch zu erhöhen (Kappa von 0,86 bzw. 0,869 gegenüber 0,856 bei Verwendung aller Variablen). Die geringsten Kappa-Werte weisen diejenigen Modelle auf, in denen die Variablen *road1dis*, *road2dis* und *road7dis* fehlen. Wenn diese Variablen als Gruppe aus dem Modell entfernt werden, sinkt Kappa um zwei Basispunkte (von 0,859 auf 0,659). Wenn jetzt zusätzlich noch die Variable *roaddist* aus dem Modell entfernt wird, sinkt Kappa auf 0,452 für die Klasse „Änderung“ und 0,3 für die Klasse „keine Änderung“. Anhand der bisherigen

Ergebnisse kann also folgende These aufgestellt werden: Es sind die Entfernungen zu den verschiedenen Hauptverkehrsadern, welche hauptsächlich die Flächenumwandlung bestimmen.

Um diese These weiter zu überprüfen, wurde eine Modellierung ausschließlich mit den Variablen *road1dis*, *road2dis* und *road7dis* durchgeführt. Anschließend wurden wiederum die einzelnen Variablen nacheinander aus dem Modell entfernt, um eventuell eine besonders herausgehobene Bedeutung einer bestimmten Straße herauszustellen.

Tabelle 6-14: Kappa-Werte der Modellierungen allein auf der Basis der Entfernungen zu den einzelnen Hauptverkehrsadern

Variablen im Modell	Kappa-Wert „Änderung“	Kappa-Wert „keine Änderung“
road1dis, road2dis und road7dis	0,883	0,807
road1dis und road2dis	0,638	0,378
road1dis und road7dis	0,611	0,441
road2dis und road7dis	0,613	0,394

Die Prognosegenauigkeit bei Verwendung von nur drei Variablen, nämlich ausschließlich der Entfernungen zu den Hauptverkehrsadern, ist sogar höher als bei Verwendung aller Variablen (Tabelle 6-14), welche anhand der Zahlen geradezu als „Störgrößen“ erscheinen. Dies legt den Schluß nahe, daß allein die Lage einer Fläche relativ zu den großen Ausfallstraßen und Zubringern deren Nutzungsumwandlung bestimmt. Ein solches Ergebnis würde jedoch den bisherigen Untersuchungen zur Modellierung von Landschaftsveränderungen widersprechen. Betrachtet man zudem noch die räumliche Verteilung der Merkmalsausprägungen für die drei Variablen *road1dis*, *road2dis* und *road7dis* (Abbildung 10-5 bis Abbildung 10-7), so muß spätestens an dieser Stelle die Frage nach der Plausibilität einer solchen Schlußfolgerung gestellt werden, denn das räumliche Verteilungsmuster der topologischen Größen erscheint nicht geeignet, um eine derart flächenscharfe Klassifizierung vornehmen zu können.

Wie läßt sich nun der Erfolg einer Modellierung mit nur drei von acht Variablen erklären? Eine entscheidende Rolle spielt dabei das Nächster Nachbar-Konzept im Diskriminanzraum der nichtparametrischen Diskriminanzanalyse. Diese Nachbarschaftsbeziehung wird anhand euklidischer Distanzen hergestellt (vgl. Kap. 5.72). Bei gleichzeitiger Verwendung der topologischen Größen *road1dis*, *road2dis* und *road7dis* besitzt der Diskriminanzraum drei Dimensionen. Jedes Pixel erhält seine Position innerhalb des Diskriminanzraumes durch die spezifischen Entfernungen zu den drei Hauptverkehrsadern. Diese Entfernungen werden im zweidimensionalen Kartenraum gemessen. Wenn jetzt im Diskriminanzraum die fünf nächsten

Nachbarn eines zu klassifizierenden Pixels betrachtet werden, so zählen diese gleichzeitig zu den nächsten Nachbarn auf der Karte. Das bedeutet nichts anderes, als daß in Wahrheit die Modellierung nicht im abstrakten Diskriminanzraum, sondern im konkreten Kartenraum erfolgt. Die Merkmalsausprägungen der topologischen Größen bekommen damit die Eigenschaften von Kartenkoordinaten. Damit sind inhaltliche Schlußfolgerungen erschwert und die Hauptziele einer räumlich-statistischen Modellierung erscheinen verfehlt.

7 Diskussion

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Hauptbestandteilen, die jeweils recht komplex sind: Dem Monitoring der Landschaftsveränderung auf der Halbinsel Kocaeli mit den Methoden der Fernerkundung und der sich anschließenden, räumlich-statistischen Modellierung. Dementsprechend sollen die Ergebnisse in dieser Reihenfolge diskutiert werden.

So stellt sich zunächst die Frage nach der hinreichenden Genauigkeit der vorgenommenen Kartierung der Landnutzung auf der Basis der Satellitenbilder. Zum Vergleich sollen teils neue, teils bereits erwähnte Arbeiten zur thematischen Kartierung im peri-urbanen Raum herangezogen werden, diesmal jedoch unter einem anderen Aspekt (Tabelle 7-1). Wenn die erzielten Genauigkeitsmaße miteinander verglichen werden sollen, so ist es notwendig, sich die Unterschiede in den Klassifizierungsverfahren, Untersuchungsflächen und Zielsetzungen vor Augen zu führen. Zwei Untersuchungen (CZERANKA 1992, GAO & SKILLKORN 1992) haben die multitemporale Auswertung zum Ziel. Die thematische Kartierung dient demnach als Mittel der Datenbeschaffung für die räumliche Analyse. In beiden Untersuchungen kommen konventionelle Verfahren der multispektralen Klassifizierung zur Anwendung. Sehr verschieden sind die thematische Tiefe der Klassifikation (vier versus zehn Klassen) und die Größe des Untersuchungsgebietes (90 versus 2 500 km²). MARTIN (1986) untersucht die prinzipielle Eignung von SPOT-Daten zur Kartierung eines städtischen Gebietes, während es sich bei den anderen Untersuchungen um experimentelle Arbeiten auf relativ kleiner Fläche handelt, die sich der Entwicklung neuer Klassifizierungsverfahren für die Anwendung im urbanen Raum widmen.

In allen Fällen verwenden die Autoren Kontrollreferenzflächen (Testflächen) bzw. Einzelpixel, die nach sehr unterschiedlichen Designs zufällig bzw. systematisch zufällig ausgewählt wurden. Das Stichprobendesign und die Art des verwendeten Referenzmaterials für die Genauigkeitsschätzung einer thematischen Kartierung sind ein kritischer Punkt bei der Bewertung von Klassifizierungsfehlern. In Abhängigkeit dieser beiden Faktoren kann ein und dieselbe Klassifizierung sehr unterschiedliche Genauigkeitsmaße produzieren (YAFANG et al. 1992). In den genannten Arbeiten wurden zwar unabhängige Referenzdaten zur Lokalisation der Testflächen verwendet, flächendeckende Referenzkarten lagen jedoch nicht vor.

Tabelle 7-1: Arbeiten zur thematischen Kartierung im urbanen Raum und die erzielten Kartierungsgenauigkeiten

Autor(en)	Untersuchungsfläche	verwendete Klassen	Genauigkeitsmaß	Wert
CZERANKA (1992)	2500 km ²	Bebauung, Landwirtschaft, Wasser, Wüste	Gesamtgenauigkeit nach KÖHL (1989) [%]	82
GAO & SKILLKORN (1998)	90 km ²	Residential Industrial Other Urban Pasture Orchards Mixed Forest Bays & Estuaries Wetland Transitional Mixed Barren	Nutzer-/ Prod.-Genauigkeit [%]	88 / 73 82 / 98 66 / 67 72 / 51 78 / 80 66 / 92 100 / 100 64 / 100 58 / 57 88 / 73
MESEV (1998)	24 km ²	Built, Non-Built	Gesamt-Kappa	0,939
MARTIN et al. (1986)	k.A.	Under Development Urban Vegetation	Nutzer-/ Prod.-Genauigkeit [%]	68,4 / 75,4 80,2 / 84,7 83,4 / 74,3
TREITZ et al. (1992)	200 km ²	Residential Cleared Land Construction Industry/Comm. Open Space Woodland Cropland Fallow Land	Nutzer-/ Prod.-Genauigkeit [%]	77,4 / 87,5 80 / 100 94,9 / 75 100 / 71 34,3 / 75 100 / 50 100 / 100 42,5 / 74
GONG & HOWARTH (1990)	100 km ²	Residential Roof Paved Surface Industr. Roof Cleared Land Lawn/Trees Cultivated Grass Deciduous Trees Coniferous Trees Crop Cover New Crops and Pasture Bare Field Water	Nutzer-/ Prod.-Genauigkeit [%]	94,6 / 91,1 87,5 / 65,6 71,1 / 84,4 97,1 / 100 81,4 / 94,6 92,9 / 78,8 85,3 / 90,6 91,3 / 84 71,4 / 76,9 89,7 / 83,9 81 / 97,2 95 / 76
BARNSLEY & BARR (1996)	100 km ²	Small Structure, Large Structure, Tree, Crop, Grass, Soil, Water	Gesamt-Kappa	0,921

Beim Vergleich der Kartierungsergebnisse der vorliegenden Arbeit mit denen der anderen Untersuchungen fällt zunächst das hochgradig aggregierte Klassifikationsschema aus nur drei Nutzungsklassen auf. Die Nomenklatur erklärt sich aus der Zielsetzung der Arbeit, nämlich nicht alle möglichen Oberflächenformen erfassen zu wollen, sondern nur diejenigen Klassen zu bilden, die erstens für den Zweck der weiteren räumlich-statistischen Analyse notwendig sind, und die zweitens mit einer hinreichenden Genauigkeit erfaßt werden können. Eine tiefer gestaffelte Nomenklatur hätte zwangsläufig zu einer Mischnomenklatur mit Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen geführt.

Die Kartierungsgenauigkeit liegt mit Nutzer- und Produzentengenauigkeiten für alle Klassen von deutlich über 80 % und einem Gesamt-Kappa von 0,77 auf etwa demselben Niveau wie in den vergleichbaren Untersuchungen. Zusammenfassend kann die Genauigkeit der Landnutzungskartierung für das Jahr 1994 als ausreichend bezeichnet werden.

Bei der Beurteilung des hier eingesetzten TC-RGB-Cluster-Verfahrens ist neben der Kartierungsgenauigkeit von Bedeutung, inwieweit es sich um ein für die Zwecke der Regionalplanung operational einsetzbares Verfahren handelt. Methodisch handelt es sich um ein Mischverfahren aus Bildverarbeitung/Bildverbesserung und Klassifikation, wie es von PILON et al. (1989) für solche Zwecke vorgeschlagen wurde („multicomponent approach“). Verglichen mit anderen Verfahren der fernerkundungsgestützten Erfassung von Landschaftsveränderungen (vgl. Kap. 5.52) können die folgenden Vorteile des TC-RGB-Cluster-Verfahrens benannt werden:

- Auf die zeitaufwendige Definition von Trainingsflächen (Klassifizierungsreferenzflächen) kann verzichtet werden. Bei multispektralen, überwachten Klassifizierungen wird häufig ein hohes Maß an Expertenwissen über die Objekteigenschaften und deren Einfluß auf die Spektralsignatur verlangt. Die Unabhängigkeit von solchem Expertenwissen kann für operationale Anwendungen im Bereich der Landnutzungs- und Regionalplanung von großer Bedeutung sein.
- Ein häufiges Problem der Auswertung multitemporaler Fernerkundungsdaten ist die Abwesenheit von Daten zur Erstellung der Referenzkarte für den größeren Teil der Zeitreihe. Meist sind solche Daten nur für den Zeitraum eines Aufnahmedatums vorhanden. Wenn die Ursprungsbilder vor der TC-Transformation radiometrisch gut aneinander angepaßt werden können, so müßte die Kartierungsgenauigkeit der gesamten Zeitreihe auf demselben Niveau liegen wie die Kartierungsgenauigkeit des Datensatzes, für den eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt wurde.

- Im Gegensatz zur Auswertung zusammengesetzter, multitemporaler Datensätze mit den Methoden der Bildverarbeitung liefert der Klassifikationsvergleich einen eindeutigen Klassenübergang für die als verändert erkannten Pixel. Für eine anschließende, räumlich-statistische Auswertung ist dies eine unverzichtbare Voraussetzung.

Vor einer Anwendung des TC-RGB-Cluster-Verfahrens müssen jedoch folgende Prämissen gesetzt werden:

- Eine optimale visuelle Unterscheidbarkeit zwischen mehr als zwei oder gar allen relevanten Objektklassen ist mit nur einer Farbkomposite aus der TC-Transformation nicht möglich. Es werden vielmehr spezifische Kanalkombinationen für die einzelnen Objektklassen benötigt.
- Die höchste Effizienz erreicht das Verfahren mit Daten von ein und demselben Sensor. Wenn darüber hinaus die Aufnahmen zur gleichen Jahreszeit gemacht wurden, lassen sich die notwendigen radiometrischen und geometrischen Korrekturen auf ein Minimum reduzieren.
- Der Fehler bei der Beurteilung der Klassifizierungsgenauigkeit der gesamten Zeitreihe auf der Grundlage nur einer Genauigkeitsanalyse ist bis jetzt nicht quantifizierbar. Hier besteht ein Forschungsbedarf, wenn das Verfahren weiterentwickelt werden soll.
- Da es sich bei dem TC-RGB-Cluster-Verfahren um einen Klassifikationsvergleich handelt, pflanzen sich die Klassifizierungsfehler in die Veränderungsanalyse fort. Aufgrund des eindeutigen Klassenübergangs können die Veränderungen jedoch einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden, um unwahrscheinliche Veränderungen herauszufiltern.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das TC-RGB-Cluster-Verfahren zwar problemlos auf andere Untersuchungsgebiete und Objektklassen übertragbar sein dürfte, jedoch wegen der zahlreichen Arbeitsschritte und der eingesetzten Methoden eine sehr gute Kenntnis der digitalen Bildverarbeitung und der Satellitenfernerkundung erfordert. Insofern muß es vorerst als experimentelles Verfahren gelten.

Es muß an dieser Stelle die Frage gestellt werden, ob die beobachtete Verstärkung von ca. 10 % innerhalb von vier Jahren vor dem Hintergrund des postulierten Bevölkerungswachstums plausibel erscheint. Schließlich entfällt bei der beobachteten Zunahme der urban-industriell genutzten Flächen nur schätzungsweise die Hälfte auf Siedlungsflächen, der Rest sind planmäßige Industrie- und Gewerbeparks (vgl. Kap. 6.3).

HÖHFELD (1995) nennt eine aktuelle jährliche Zuwanderung von 300 000 Menschen bei einer jährlichen Wachstumsrate von 4,2 %. AKKAYA et al. (1998) berichten dagegen von 400 000

Zuwanderern pro Jahr. Bei einer angenommenen Einwohnerzahl von 10 Mio. für den gesamten Großraum würde dies einer jährlichen Zunahme von 4 % entsprechen. Beide Schätzungen stimmen also in etwa überein. Bei der Annahme einer gleichbleibenden Wachstumsrate würde die Einwohnerzahl des Großraums Istanbul über einen Zeitraum von vier Jahren also um deutlich mehr als 10 % zunehmen.

Bevor die Schlußfolgerung gezogen wird, die Verstädterung verhalte sich stark unterproportional zum Bevölkerungswachstum und sei damit unterschätzt worden, gilt es, folgende Punkte zu bedenken: Erstens ist die Annahme einer Proportionalität zwischen Bevölkerungswachstum und Verstädterung höchst unsicher, da der flächenhafte Effekt einer gleichbleibenden Wachstumsrate bei sich ändernder Bebauungsstruktur sehr verschieden sein kann. Eine hoch verdichtete Wohnbebauung, wie sie für die „Hisseli Ifraz“ typisch ist, kann im Vergleich mit lockeren Einfachhaussiedlungen pro Flächeneinheit ein Vielfaches der absolut gleichen Zahl von Zuwanderern aufnehmen. Zweitens erstreckt sich das Untersuchungsgebiet nur auf die östliche Hälfte des Großraums Istanbul, während der Strom der Zuwanderer beide Seiten des Bosphorus erfaßt. Es bestehen keine gesicherten Erkenntnisse über die Dispersion der Immigranten zwischen dem westlichen und dem östlichen Teil der Stadt. Drittens hat sich in der Vergangenheit das mittlere jährliche Bevölkerungswachstum innerhalb der Fünfjahresperioden der Volkszählungen als stark schwankend erwiesen (vgl. HÖHFELD 1995 S. 148). RITTER & RICHTER (1990, S. 8) haben in ihrer Darstellung des exponentiellen Bevölkerungswachstums der Stadt Istanbul übersehen, daß dieses überwiegend auf Eingemeindungen zurückzuführen ist (vgl. Kap. 3.11).

Die Zielsetzung räumlich-statistischer Modelle ist wiederholt mit der Beantwortung der Fragen nach dem „Wo?“, „Warum?“ und „Wann?“ der Landnutzungsänderung verbunden worden (LAMBIN 1994). Die Rate und die Lokalisation der Landnutzungsänderung konnten mit dem in dieser Arbeit vorliegenden Modell äußerst exakt bestimmt werden. Die Aussagekraft hinsichtlich der treibenden Kräfte und Wirkungszusammenhänge muß demgegenüber als gering eingestuft werden. Diesbezüglich kann das hier vorgestellte Verfahren die Erwartungen nicht erfüllen, da es sich als eine statistische Modellierung auf der Basis von Kartenkoordinaten herausgestellt hat. Trotzdem können aus den Ergebnissen einige Schlußfolgerungen gezogen werden, was die Nutzungsumwandlung von Flächen im peri-urbanen Raum und die sie bestimmenden Faktoren angeht.

Bei dem Phänomen der Landnutzungsänderung handelt es sich um das Ergebnis ökonomisch und politisch motivierter Handlungen einer Vielzahl von Individuen, welche z. B. mit

ökonomischen Modellen dargestellt werden können (ESSER 1989). Zu den Akteuren zählen im einzelnen:

- Die Bewohner bzw. Zuwanderer in den Siedlungsgebieten, die zugleich Arbeitnehmer in den Industrie- und Gewerbebetrieben sind,
- die hinsichtlich der Wertschöpfung und des Flächenbedarfs im Untersuchungsgebiet wichtigsten Branchen,
- die kommunalen Verwaltungsträger,
- die öffentlichen und privaten Flächeneigentümer in ihrer Eigenschaft als Verkäufer von Immobilien und
- die kommunalen und regionalen Planungsträger, insbesondere das BINBP („Greater Istanbul Master Plan Bureau“ nach SCHIRMER 1977).

Die Motive der an der Landnutzungsänderung beteiligten Akteure sind in Kap. 3.13 ausführlich dargestellt worden. Es war deshalb von vornherein versucht worden, solche geophysischen Faktoren einzubeziehen, die ihrerseits Bestandteil ökonomischer Modelle sein könnten. Dies ist auch bei den meisten der in Kap. 3.3 vorgestellten Untersuchungen geschehen. Der grundlegende Unterschied zu dieser Arbeit liegt in der Art der Nutzungsänderung: Bei den im Untersuchungsgebiet zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten spielen die Topographie des Geländes oder Bodeneigenschaften keine tragende Rolle bei der Entscheidung, an dieser oder jener Stelle ein Gebäude zu errichten oder eine Straße zu bauen. Dies gilt um so mehr, als es sich bei einem großen Teil der im Untersuchungszeitraum überbauten Fläche um Gewerbeparks und Industrieansiedlungen handelt. Die Entscheidung eines Investors wird sich wohl erst an letzter Stelle nach der Größe der Erdmassenbewegungen richten. Dagegen würde die Kenntnis des zukünftigen Trassenverlaufs einer geplanten Hauptverkehrsstraße als ein Ergebnis der politischen Willensbildung entscheidende Vorteile für die prognostische Modellierung bringen.

Aus diesen Gründen erscheint die räumlich-statistische Modellierung der Landnutzungsänderung allein auf der Grundlage topographischer und topologischer Einflußgrößen angesichts der komplexen politischen, wirtschaftlichen, rechtlichen und demographischen Rahmenbedingungen innerhalb des Untersuchungsgebietes wenig aussichtsreich, auch wenn sie mit einem anderen statistischen Verfahren durchgeführt würde. Daraus ergibt sich als weiterer Forschungsbedarf die Verknüpfung mit sozioökonomischen Zusatzdaten. Ein großes Problem von Wirtschaftsdaten ist

jedoch ihr mangelnder Bezug zum Raum: Zwar gibt es in der Türkei detaillierte Statistiken für die einzelnen Wirtschaftssektoren, jedoch sind diese in Tabellenform verbreitet und reichen hinsichtlich ihrer räumlichen Auflösung nur bis auf die Ebene der Provinz. Bevölkerungsdaten sind in Ausnahmefällen für einzelne Gemeinden erhältlich, jedoch fehlt es an aktuellen Karten mit den Grenzen der Gebietskörperschaften. Räumlich höher aufgelöste Daten finden sich nur in wissenschaftlichen Untersuchungen (z.B. SEYREK 1982), deren Ergebnisse zeitlich schwer mit eigenen Untersuchungen in Übereinstimmung zu bringen sind.

Für einen anderen Zweig der räumlich expliziten Modellierung kann die hier vorgelegte Kartierung der urban-industriell genutzten Fläche einen wichtigen Beitrag liefern, nämlich für die Risikomodellierung (vgl. Kap. 3.2). Diese ist auf genaue und aktuelle Kartierungen angewiesen wie kaum eine andere Disziplin. Die Risikomodellierung ermittelt die im Falle eines natürlichen Großschadensereignisses davon betroffenen Flächen aufgrund deren geophysischer Eigenschaften, um die Gefährdung der dort vorhandenen baulichen Anlagen beurteilen zu können (ERDIK & SWIFT-AVCI 1997, BRAUN et al. 1997). Auf dieser Grundlage können Planungen für den Zivilschutz und Schätzungen der zu erwartenden monetären und anderen Verluste erfolgen.

In diesem Zusammenhang stellt das Erdbeben in der Nacht vom 18. auf den 19. August 1999 mit seinen angeblich bis zu 18 000 Todesopfern für Istanbul einen tiefen Einschnitt in die Stadtentwicklung dar. Es markiert nicht etwa den Beginn von Überlegungen zur Vorsorge, hat aber die Dringlichkeit des Problems deutlich vor Augen geführt. Die Möglichkeiten der Fernerkundung für einen Beitrag zum Risikomanagement innerhalb des Untersuchungsgebietes sind bereits sehr bald nach dem Erdbeben dokumentiert worden (OZDOGAN & EL-BAZ 2000).

Eine ökologische Bewertung der ungebremsten Verstädterung muß sehr differenziert erfolgen. Prinzipiell besteht bei unregelmäßiger Bebauung immer die Gefahr, daß die Behausungen auf Flächen entstehen, die entweder ökologische Risiken aufweisen (Überschwemmungen, Erdbeben), oder auf Flächen, die ein hohes Nutzungspotential als Schutzflächen, Naherholungsgebiete oder landwirtschaftliche Produktionsflächen besitzen (YILDIRIM et al. 1996). Der letzte Punkt trifft für die Kocaeli-Halbinsel allerdings nicht zu: Trotz günstiger Klimadaten gilt der größte Teil des Gebietes wegen der an einigen Stellen recht hohen Reliefenergie und der hochgradig erosionsgefährdeten Böden nicht als landwirtschaftliches Vorranggebiet (vgl. Kap. 4.11).

Für eine fundierte Bewertung weiterer Gefahrenpotentiale liegen zuwenig Informationen für das Untersuchungsgebiet vor, abgesehen von den Umweltproblemen, die in urbanen Ballungsräumen allgemein anzutreffen sind. Beispielhaft seien hier die Verhältnisse an der Küste der Catalca-Halbinsel jenseits des Bosphorus zu Beginn der achtziger Jahre genannt: So flossen im Jahre 1982 täglich 700 Tonnen Urin, 100 Tonnen Fäkalien und 200 Tonnen giftiger Fabrikabwässer ungeklärt in das Goldene Horn (SANRI 1983). Zu dieser Zeit befanden sich noch industrielle Produktionsstätten in direkter Nähe zur Altstadt. Für das Untersuchungsgebiet können daraus Schlußfolgerungen hinsichtlich der heutigen Umweltgefahren gezogen werden. Seit Anfang der achtziger Jahre hat eine enorme Industrialisierung entlang der Entwicklungsachse Istanbul-Izmit (SEYREK 1982) stattgefunden. Die größten Anlagen liegen direkt an der Küste des Golfs von Izmit, der nur über eine schmale Meerenge mit dem Marmara-Meer verbunden ist und daher – wie das Goldene Horn – einen relativ eingeschränkten Wasseraustausch haben dürfte. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Entwicklung der Entsorgungseinrichtungen nicht mit der Industrialisierung und Verstädterung Schritt gehalten und sich die Umweltbelastung in diesem Gebiet drastisch erhöht hat.

8 Zusammenfassung

Das Wachstum der Städte ist der größte Einzelfaktor, der die sozioökonomische und ökologische Entwicklung der Welt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts beeinflussen wird. Als Begleiterscheinung der Industrialisierung und Modernisierung eines Landes bietet die Verstädterung zahlreiche Chancen für die gesellschaftliche Entwicklung, sie birgt aber zugleich ebensoviele Risiken. Neben den direkten Auswirkungen auf die Gesundheit und die Lebensqualität der Stadtbevölkerung gibt es zahlreiche Wechselwirkungen mit dem Naturhaushalt, die weit über den lokalen Betrachtungsmaßstab hinausreichen. Umweltverschmutzung, Landschaftsverbrauch, die Zerstörung ökologisch bedeutsamer Flächen und die Klimaveränderung zählen dabei zu den größten Gefahrenquellen.

Den größten Anteil an der globalen Verstädterung haben die urbanen Ballungsräume in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Der Großraum Istanbul bietet ein gutes Beispiel für vergleichbare Gebiete, weswegen seine östliche Hälfte auf der Halbinsel Kocaeli als Untersuchungsgebiet gewählt wurde. Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit das Monitoring der Verstädterung mit den Methoden der Satellitenfernerkundung. Weiterhin wird der Versuch unternommen, das räumliche Verteilungsmuster der Landschaftsveränderung durch topographische und topologische Größen zu erklären und schließlich – im statistischen Sinne – zu prognostizieren.

Zu Beginn erfolgt eine ausführliche Darstellung der demographischen, wirtschaftlichen und sozio-geographischen Entwicklung des Großraumes Istanbul und deren Ursachen. Wenn möglich, wird dabei von den amtlichen Statistiken Gebrauch gemacht, deren Angaben durch die weitere Literatur kritisch beleuchtet wird. Demnach wird die Vergrößerung der Einwohnerzahl der Provinz Istanbul von etwa 7,3 Mio. im Jahre 1995 auf über 11 Mio. im Jahre 2000 geschätzt. Eine große Rolle bei dieser Entwicklung spielen die widerrechtlichen Wohnsiedlungen („Hisseli Ifraz“), die von einflußreichen Spekulanten entgegen den planerischen Vorgaben errichtet werden, um Mieteinnahmen von den jährlich über 300 000 Zuzüglern zu erhalten. Die gewachsenen „Gecekondus“ (Einfachhaussiedlungen aus den früheren Tagen der illegalen Landnahme) haben sich inzwischen zu Stadtvierteln entwickelt, die ihren Bewohnern jedoch wegen der planerischen Mängel kaum Gemeinschaftseinrichtungen und städtische Infrastruktur bieten können.

Hauptverantwortlich für die dramatische Verstädterung ist die Landflucht, die ihrerseits von den schlechten Lebensbedingungen auf dem Lande angetrieben wird. Bei einer Gesamtbeurteilung

des Phänomens der türkischen Binnenmigration stimmt bedenklich, daß die traditionellen „Pull“-Faktoren der Städte gegenüber den „Push“-Faktoren der ländlichen Gebiete zunehmend an Bedeutung verlieren.

Es folgt eine Übersicht bisheriger Untersuchungen zur Verstädterungsdynamik im In- und Ausland. Hierbei wird besonderer Wert auf die angewendeten Methodiken gelegt, um den technischen Stand der Forschung in diesem Bereich wiederzugeben. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Aspekt der Operationalität der eingesetzten Monitoringverfahren als Voraussetzung für die kostengünstige Gewinnung aktueller, flächenbezogener Daten gewidmet. Anschließend werden die bisherigen Versuche zur räumlichen Modellierung von Landnutzungsänderungen vorgestellt. Es wird gezeigt, wie der Grad der Komplexität im Laufe der Zeit von den einfacheren statistischen Modellen ohne konkreten Raumbezug (Markow-Modelle) über die regressionsanalytischen Ansätze bis hin zu den dynamischen Systemmodellen neueren Datums zugenommen hat. Die vorherrschende Einteilung der Modelle nach inhaltlichen und modelltechnischen Gesichtspunkten wird dabei einer kritischen Würdigung unterzogen.

Nach einer Beschreibung der naturräumlichen Gegebenheiten auf der Kocaeli-Halbinsel und der aktuellen Landnutzung beginnt der methodische Teil der Arbeit mit der Auswahl des Verfahrens zur Kartierung der Landnutzungsänderung unter Verwendung vorhandener Landsat TM-Daten. Als Alternativen stehen dabei Verfahren der „digital change detection“ i. e. S. und ein Klassifikationsvergleich zur Verfügung. Wegen der aufwendigen radiometrischen Korrekturen bei der „digital change detection“ und der besser nachvollziehbaren Landnutzungsänderung beim Klassifikationsvergleich wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die einen Klassifikationsvergleich darstellt, ohne jedoch auf einen parametrischen Klassifikator zu setzen. Aufgrund der Heterogenität vieler Siedlungsbereiche haben die Erfahrungen aus den bisherigen Untersuchungen gezeigt, daß die Anwendung parametrischer Klassifizierungsverfahren im peri-urbanen Raum mit großen Schwierigkeiten verbunden ist.

Zuerst wird eine Histogrammstreckung für beide Datensätze durchgeführt, gefolgt von einer näherungsweise, radiometrischen Angleichung durch einfache Histogrammanpassung. Im nächsten Schritt wird die visuelle Unterscheidbarkeit von vegetationsgeprägten Flächen einerseits und vegetationsfreien, urban-industriell genutzten Flächen andererseits optimiert, indem für jeden Datensatz eine Tasseled Cap (TC)-Transformation durchgeführt wird, um daraus ein Kanaltriolett mit einer geeigneten Farbkomposite auszuwählen. Die visuell erfassbare Information der beiden Kanaltrioletts wird mittels Clustering im RGB-Farbraum jeweils zu einem einzigen, thematischen Layer zusammengefaßt. Es werden bestimmte Farbwerte des

Clusterbildes zu einer einzigen Klasse rekodiert, um eine Karte der räumlichen Verteilung urban-industriell genutzter Flächen am Anfang und Ende der Untersuchungsperiode zu erstellen. In Anlehnung an die einzelnen Arbeitsschritte wird das Verfahren als TC-RGB-Cluster-Methode bezeichnet.

Verglichen mit anderen Verfahren der fernerkundungsgestützten Erfassung von Landschaftsveränderungen können die folgenden Vorteile der TC-RGB-Cluster-Methode genannt werden:

- Die zeitaufwendige Definition von Trainingsflächen (Klassifizierungsreferenzflächen) kann übergangen werden. Bei multispektralen, überwachten Klassifizierungen wird häufig ein hohes Maß an Expertenwissen über die Objekteigenschaften und deren Einfluß auf die Spektralsignatur verlangt. Die Unabhängigkeit von solchem Expertenwissen kann für operationale Anwendungen im Bereich der Landnutzungs- und Regionalplanung von großer Bedeutung sein.
- Ein häufiges Problem der Auswertung multitemporaler Fernerkundungsdaten ist die Abwesenheit von Daten zur Erstellung der Referenzkarte für den größeren Teil der Zeitreihe. Meist sind solche Daten nur in der Nähe eines Aufnahmezeitpunktes vorhanden. Wenn die Ursprungsbilder vor der TC-Transformation radiometrisch gut aneinander angepaßt werden können, so müßte die Kartierungsgenauigkeit der gesamten Zeitreihe auf demselben Niveau liegen wie die Kartierungsgenauigkeit des Datensatzes, für den eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt wurde.
- Im Gegensatz zur Auswertung zusammengesetzter, multitemporaler Datensätze mit den Methoden der Bildverarbeitung liefert der Klassifikationsvergleich einen eindeutigen Klassenübergang für die als verändert erkannten Pixel. Für sich anschließende räumlich-statistische Auswertungen ist dies eine unverzichtbare Voraussetzung.

Vor einer Anwendung des TC-RGB-Cluster-Verfahrens müssen jedoch folgende Prämissen gesetzt werden:

- Eine optimale visuelle Unterscheidbarkeit zwischen mehr als zwei oder gar allen relevanten Objektklassen ist mit nur einer Fabkomposite aus der TC-Transformation nicht möglich. Es werden vielmehr spezifische Kanalkombinationen für die einzelnen Objektklassen benötigt.

- Die höchste Effizienz erreicht das Verfahren mit Daten von ein und demselben Sensor. Wenn darüber hinaus die Aufnahmen zur gleichen Jahreszeit gemacht wurden, lassen sich die notwendigen radiometrischen und geometrischen Korrekturen auf ein Minimum reduzieren.
- Der Fehler bei der Beurteilung der Klassifizierungsgenauigkeit der gesamten Zeitreihe auf der Grundlage nur einer Genauigkeitsanalyse ist bis jetzt nicht quantifizierbar. Hier besteht ein Forschungsbedarf, wenn das Verfahren weiterentwickelt werden soll.
- Da es sich bei dem TC-RGB-Cluster-Verfahren um einen Klassifikationsvergleich handelt, pflanzen sich die Klassifizierungsfehler in die Veränderungsanalyse fort. Aufgrund des eindeutigen Klassenübergangs können die Veränderungen jedoch einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden, um unwahrscheinliche Veränderungen herauszufiltern.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das TC-RGB-Cluster-Verfahren zwar problemlos auf andere Untersuchungsgebiete und Objektklassen übertragbar sein dürfte, jedoch wegen der zahlreichen Arbeitsschritte und der eingesetzten Methoden eine sehr gute Kenntnis der digitalen Bildverarbeitung und der Satellitenfernerkundung erfordert. Insofern muß es vorerst als experimentelles Verfahren gelten.

Mit dem beschriebenen Verfahren kann für die östliche Hälfte des Großraumes Istanbul eine Zunahme der urban-industriell genutzten Fläche von ca. 10 % im Zeitraum von 1994 bis 1998 festgestellt werden. Dabei entfällt etwa die Hälfte der neu bebauten Fläche auf planmäßige Industrieansiedlungen. Die Satellitenbilddauswertung wird durch eine Genauigkeitsschätzung validiert, wobei eine aus digitalisierten Luftbildern abgeleitete Referenzkarte verwendet wird.

Für die räumlich-statistische Modellierung wird die Ausbreitung urban-industriell genutzter Flächen von 1994 bis 1998 als erklärte Variable betrachtet. Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen wird von folgenden Größen als erklärenden Variablen ausgegangen:

- Landnutzung im Jahre 1994
- Entfernung zu urban-industriell genutzten Flächen im Jahre 1994
- Entfernung zur nächsten Hauptverkehrsader
- Entfernung zur *E5*
- Entfernung zur *TEM*
- Entfernung zur Umgehungsstraße im Bezirk Kartal
- Hangneigung
- Geländehöhe

Sämtliche Variablen werden aus den Satellitendaten und einem digitalen Höhenmodell abgeleitet.

Die Modellierung wird mit einer nichtparametrischen Diskriminanzanalyse mit fünf nächsten Nachbarn durchgeführt. Sie wird mit Hilfe von Kreuzvalidierungen auf ihre Richtigkeit und Fähigkeit zur räumlich expliziten Prognose getestet. Grundlage dafür sind ein Kalibrierungsset (Trainingsgebiet) und ein Validierungsset (Testgebiet), die sich nicht überschneiden dürfen. Dazu werden alle Pixel des Modellierungsgebietes mit einer Zufallszahl zwischen Null und Eins versehen. Im ersten Durchgang werden alle Pixel mit einem Zufallswert $\leq 0,5$ zum Trainingsgebiet erklärt, alle Pixel mit einem Zufallswert $> 0,5$ zum Testgebiet.

Die Diskriminanzanalyse für die fünf nächsten Nachbarn wird auf dem Trainingsgebiet durchgeführt und mit ihr die Klassenzugehörigkeit aller Pixel des Testgebietes vorhergesagt. Im zweiten Durchgang werden Trainings- und Testgebiet vertauscht: Pixel mit einem Zufallswert $> 0,5$ gehören zum Trainingsgebiet, während Pixel mit einem Zufallswert $\leq 0,5$ das Testgebiet bilden. Das Ergebnis der Modellierung läßt sich in kartographischer Form darstellen, wozu die ASCII-Datensätze wieder in eine Rasterkarte zurückverwandelt werden. Das Ergebnis zeigt eine Vorhersagegenauigkeit des multivariaten, nicht-parametrischen Modells von 86,9 % in beiden Validierungsdurchgängen.

Da das nicht-parametrische Verfahren keine Diskriminanzfunktion liefert, deren Koeffizienten eine Analyse der Wirkungsstärke und -richtung der erklärenden Variablen zuläßt, werden für diesen Zweck Permutationen des Gesamtmodells mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Variablen getestet. Dabei stellt sich heraus, daß die Modellierung im abstrakten Diskriminanzraum bei Verwendung topologischer Größen (Entfernungsvariablen) auf eine Modellierung im konkreten Kartenraum hinausläuft. Die Hauptanforderungen an eine räumlich-statistische Modellierung, nämlich die Beantwortung der Fragen nach dem „Warum?“ und dem zukünftigen „Wo?“ der Landnutzungsänderung, können somit nur unzureichend erfüllt werden.

In der abschließenden Diskussion werden die Ergebnisse des Monitorings der Verstädterung und der räumlich-statistischen Modellierung vor dem Hintergrund der zitierten Literatur kritisch beleuchtet. Es wird vorgeschlagen, angesichts der komplexen ökonomischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Zusammenhänge im Untersuchungsgebiet eine räumliche Modellierung um die Basis sozioökonomischer Daten zu erweitern.

9 Literatur

- AKÇA, A (1989): Permanente Luftbildstichprobe. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 160 (4): S. 65-69.
- AKÇA, A. (2001): Waldinventur. Sauerländer. Frankfurt. 210 S.
- AKÇA, A. & RADBERGER, R. (2000): Softcopy-Photogrammetrie in Forstwirtschaft und Naturschutz – Spielzeug oder Werkzeug? In: GRUEHN, D., HERBERG, A. & ROESRATH, C.: Naturschutz und Landschaftsplanung. Mensch und Buch. Berlin: S. 13-24.
- AKKAYA, Ç., ÖZBEK, Y. & ŞEN, F. (1998): Länderbericht Türkei. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 355 S.
- BÄHR, J. (1992): Bevölkerungsgeographie. Ulmer. Stuttgart. 429 S.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie – Band 2: Multivariate Statistik. Teubner. Stuttgart. 415 S.
- BAKER, W.L. (1989): A review of models of landscape change. *Landscape Ecology* 2 (2): S. 111-133.
- BARNESLEY, M.J. & BARR, S.L. (1996): Inferring urban land use from satellite sensor images using kernel-based spatial reclassification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62 (8): S. 949-958.
- BATEMAN, I. & LOVETT, A. (1992): Modelling the potential impact of changing UK agro-forestry subsidies using GIS – a bioeconomic approach. In: RIDEOUT, T.W.: Geographical information systems and urban and rural planning. Planning and Environment Study Group of the Institute of British Geographers. Edinburgh: S. 100-115.
- BAYHAN, İ. (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.
- BELL, E.J. & HINOJOSA, R.C. (1977): Markov analysis of land use change: continuous time and stationary process. *Socio-Economic Planning Science* 11: S. 13-17.
- BELL, E.J. (1974): Markov analysis of land use change – an application of stochastic processes to remotely sensed data. *Socio-Economic Planning Science* 8: S. 311-316.
- BERNSTEIN, S. (1996): Weltbevölkerungsbericht 1996. UNO-Verlag. Bonn. 82 S.
- BRAUN, G., ERNST, S., HÖRSCH, B. & WEIERS, S. (1997): Hochwasserschutz und -prävention durch räumliche Modellierung. *GIS Geo-Informationssysteme* (5): S. 10-15.
- CAMPBELL, J. (1987): Introduction to remote sensing. Guildford. New York. 551 S.
- CHAIBVA, S. (1995): Local authorities: the key actors in sustainable development. *Contdown to Istanbul* 1 (5): S. 8.
- CHOMITZ, K.M. & GRAY, D.A. (1995): Roads, land, markets and deforestation – a spatial model of land use in Belize. Washington, DC. The World Bank: policy research working paper (1444). 50 S.
- COHEN, J. (1960): A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational & Psychological Measurement* 20 (1): S. 37-46.
- CONGALTON, R.G. & MEAD, R.A. (1983): A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 49 (1): S. 69-74.

- CONGALTON, R.G. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: S. 35-46.
- COSTANZA, R. & RUTH, M. (1998): Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. *Environmental Management* 22 (2): S. 183-195.
- CRIST, E.P. & CICONE, R.C. (1984): Comparisons of the dimensionality and features of simulated Landsat-4 MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment* 14: S. 235-246.
- CRIST, E.P. & KAUTH, R.J. (1986): The Tasseled Cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52 (1): S. 81-86.
- CUBASCH, U. & KASANG, D. (2000): Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes. Gotha. 128 S.
- CZERANKA, M. (1992): Hilfsmittel der räumlichen Analyse und Planung am Beispiel von Groß-Kairo. *GIS Geo-Informationssysteme* 60 (3): S. 74-79.
- DABBERT, S. (1995): Agroforestry and land-use change in industrialized nations: a case study from northeastern Germany. *Agroforestry Systems* 31: S. 157-168.
- DALAN, B. (1989): Die Zukunft in Istanbul hat begonnen. *Bauwelt* 79 (40): S. 1728-1730.
- DARVISHSEFAT, A.A. (1995): Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitenbilddaten zur Erfassung von Waldinventuren. Zürich. Remote Sensing Series 24. 147 S.
- DEVLET İSTATİSTİK ENSTİTÜSÜ (1998 I): Ekonomik ve sosyal Göstergeler (Ökonomische und soziale Indikatoren) – İstanbul. Ankara. 463 S.
- DEVLET İSTATİSTİK ENSTİTÜSÜ (1998 II): Ekonomik ve sosyal Göstergeler (Ökonomische und soziale Indikatoren) – Kocaeli. Ankara. 329 S.
- DEVLET İSTATİSTİK ENSTİTÜSÜ (2000): Ekonomik ve sosyal Göstergeler (Ökonomische und soziale Indikatoren) – Auszüge aus der amtlichen Statistik für Kocaeli und İstanbul. Ankara. CD-ROM.
- DIVAN, O. (1998): Monitoring der Landnutzung durch Fernerkundung und Geo-Informationssystem am Beispiel der Ömerli-Region/Istanbul. Magisterarbeit. Göttingen. 45 S.
- EHRHARDT, H. (1990): Modellorientierte Entzerrung von Thematic-Mapper-Rohdaten. Köln. DLR Forschungsbericht 90-55. 103 S.
- EINIG, K., GÖSSEL, J. & SIEDENTOP, S. (1997): Nutzen von CORINE-Daten zur Verfolgung des Verstädterungsprozesses in ostdeutschen Ballungsräumen. *GIS Geo-Informationssysteme* (1): S. 16-21.
- ELSTON, D.A. & BUCKLAND, S.T. (1993): Statistical modelling of regional GIS data: an overview. *Ecological Modelling* 67: S. 81-102.
- ERB, W.-D. (1990): Anwendungsmöglichkeiten der linearen Diskriminanzanalyse in Geographie und Regionalwissenschaft. Hamburg. Schriften des Zentrums für regionale Entwicklungsforschung der Justus-Liebig-Universität Gießen 39. 164 S.
- ERDAS (1997): Erdas® field guide – fourth edition. Erdas, Inc. Atlanta. 656 S.
- ERDIK, M. & SWIFT-AVCI, J. (1997): Utilizing Gis for earthquake damage scenario development. *GIS Geo-Informationssysteme* (5): S. 16-20.
- EROL, H. (1983): Die naturräumliche Gliederung der Türkei. Reichert. Wiesbaden. 245 S.
- ESSER, G. (1989): Global land-use change from 1860 to 1980 and future projections to 2500. *Ecological Modelling* 44: S. 307-316.

- FISHER, R.A. (1936): The use of multiple measurement in taxonomic problems. *Annals of Eugenics* (7): S. 179-188.
- FITZPATRICK-LINS, K. (1981): Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 47 (3): S. 343-351.
- FLURY, B. & RIEDWYL, H. (1983): *Angewandte multivariate Statistik – computergestützte Analyse mehrdimensionaler Daten*. Fischer. Stuttgart. 187 S.
- FOODY, G.M., CAMPBELL, N.A., TROOD, N.M. & WOOD, T.F. (1992): Derivation and application of probabilistic measures of class membership from the Maximum-likelihood classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (9): S. 1335-1341.
- FOODY, G.M. & COX, D.P. (1994): Sub-pixel land cover composition using a linear mixture model and fuzzy membership functions. *International Journal of Remote Sensing* 15 (3): S. 619-631.
- GADOW, K. v. (1997): Dynamic forest resource planning. In: MOISEEV, N. A., GADOW, K. & KROTT, M.: *Planning and decision-making for forest management in the market economy*. Cuvillier. Göttingen: S. 77-88.
- GAO, J. & SKILLKORN, D. (1998): Capability of SPOT XS data in producing detailed land cover maps at the urban-rural periphery. *International Journal of Remote Sensing* 19 (15): S. 2877-2891.
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. & SINULINGGA, A.B. (1988): Designing a GIS for the study of forest evolution in central Java. *Tijdschrift voor Economische en Soziale Geografie* 79 (2): S. 93-102
- GIRARDET, H. (1995): Sustainability in the age of the city. *Countdown to Istanbul* 1 (5): S. 5.
- GONG, P. & HOWARTH, P.J. (1990): The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56 (1): S. 67-73.
- GONG, P. & HOWARTH, P.J. (1992): Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (4): S. 423-437.
- GÖRGÜLÜ, Z. (1993): Gecekondu-Siedlungen in der Türkei: Strukturen und Entwicklungen. In: ARSLAN, R., SCHAFFER, F. & KLINGSHIRN, U.: *Angewandte Stadtforschung in der Türkei*. Augsburg. *Angewandte Sozialgeographie* 30: S. 49-68.
- GREEN, K., KEMPKA, D. & LACKEY, L. (1994): Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60 (3): S. 331-337.
- HARRIS, P.M. & VENTURA, S.J. (1995): The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61 (8): S. 993-998.
- HATHOUT, S. (1988): Land use change analysis and prediction of the suburban corridor of Winnipeg, Manitoba. *Journal of Environmental Management* 27: S. 325-335.
- HEINZ, V. (1996): Die Flächennutzung der Stadt Leipzig im klassifizierten Landsat-TM-Bild. Leipzig. UFZ-Bericht 9. 63 S.

- HELLER, W. & GERDES, D. (1991): Stadtumbau in Istanbul. *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie* 35 (1): S. 24-36.
- HEPNER, G.F., HOUSHMAND, B., KULIKOV, I. & BRYANT, N. (1998): Investigation of the integration of AVIRIS and IFSAR for urban analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64 (8): S. 813-829.
- HEYMANN, Y. (1994): CORINE land cover – technical guide. Luxembourg. EUR Environment and Quality of Life Series 12585. 92 S.
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann. Heidelberg. 676 S.
- HÖHFELD, V. (1984): Gecekondus – Dörfer am Rande türkischer Städte? *Geographische Rundschau* 36 (9): S. 444-450.
- HÖHFELD, V. (1995): Türkei – Schwellenland der Gegensätze. Klett-Perthes. Gotha. 282 S.
- ITTEN, K.I., MEYER, P., KELLENBERGER, T., LEU, R., SANDMEIER, S., BITTER, P. & SEIDEL, K. (1992): Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions. Zürich. Remote Sensing Series 18. 48 S.
- JACOBS, H. & STIES, M. (1995): Multitemporale Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Nutzungsänderung im Oberrheingraben. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* (4): S. 160-173.
- JENSEN, J.R. & COWEN, D.C. (1999): Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (5): S. 611-622.
- JENSEN, J.R. & TOLL, D.L. (1982): Detecting residential land-use development at the urban fringe. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 48 (4): S. 629-643.
- JENSEN, J.R. (1996): Introductory digital image processing – a remote sensing perspective. Prentice Hall. Upper Saddle River. 318 S.
- KÄCHELE, H. & DABBERT, S. (1995 I): Ökonomisches Regionalmodell. In: BORK, H.-R., DALCHOW, C., KÄCHELE, H. & WENKEL, K.-O.: Agrarlandschaftswandel in Nordostdeutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen. Ernst & Sohn. Berlin: S. 70-84.
- KÄCHELE, H. & DABBERT, S. (1995 II): Ergebnisse des ökonomischen Regionalmodells. In: BORK, H.-R., DALCHOW, C., KÄCHELE, H. & WENKEL, K.-O.: Agrarlandschaftswandel in Nordostdeutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen. Ernst & Sohn. Berlin: S. 108-125.
- KAIMOWITZ, D. & ANGELSEN, A (1998): Economic models of tropical deforestation – a review. Center for International Forestry Research. Bogor. 139 S.
- KAUTH, R.J. & THOMAS, G.S. (1976): The Tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West-Lafayette. S. 4B41-4B51.
- KING, L.J. (1967): Discrimination analysis of urban growth patterns in Ontario and Quebec, 1951-1961. *Annals of the Association of American Geographers* 57: S. 566-578.
- KLINGEBIEL, A.A. & MONTGOMERY, P.H. (1961): Land capability classification. Washington, D.C. Agriculture Handbook 210. 21 S.

- KÖHL, M. (1989): Die Überprüfung der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten durch ein sequentielles statistisches Verfahren. *Bildmessung und Luftbildwesen* 57 (2): S. 49-54.
- KÖY HİZMETLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ (1987): Istanbul İli Arazi Varlığı (Bodenkarte der Provinz Istanbul). Karte mit Erläuterungen. Ankara
- KRAUS, K. (1997): Photogrammetrie – Band1: Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler. Bonn. 394 S.
- KÜCHLER, A.W. (1967): Vegetation mapping. Ronald. New York. 472 S.
- LAMBIN, E.F. (1994): Modelling deforestation processes - a review. Luxembourg. TREES Series B: Research Report (1). 113 S.
- LAMBIN, E.F. (1997): Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21 (3): S. 375-393.
- LANDGREBE, D. (2000): Multispectral data analysis: a signal theory perspective. Purdue University, West-Lafayette. 46 S.
Als PDF-Dokument unter <http://dynamo.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>.
- LEITNER, W. (1981): Der Wandel der urbanen Raumorganisation der „Stadt am Goldenen Horn“ – Marmarameer und Bosphorus. In: LEITNER, W.: Festschrift für Herbert Paschinger zum 70. Geburtstag. Graz. Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz 24: S. 51-97.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. (1994): Remote sensing and image interpretation. Wiley. New York. 750 S.
- LIU, D.S., IVERSON, L.R. & BROWN, S. (1993): Rates and patterns of deforestation in the Philippines: application of geographic information system analysis. *Forest Ecology and Management* 57: S. 1-16.
- LO, C.P. & SHIPMAN, R.L. (1990): A GIS approach to land-use change dynamics detection. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56 (11): S. 1483-1491.
- LO, C.P. & YANG, X. (2000): Mapping the dynamics of land use and land cover change in the Atlanta Metropolitan Area using time sequential Landsat images. In: Proceedings ASPRS Annual Convention 2000 (CD-ROM). Washington, DC: 10 S.
- LOUIS, H. (1939): Das natürliche Pflanzenkleid Anatoliens – geographisch gesehen. Stuttgart. Geographische Abhandlungen Dritte Reihe 11. 132 S.
- LUDEKE, A.K., MAGGIO, R.C. & REID, L.M. (1990): An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression models and GIS. *Journal of Environmental Management* 31: S. 247-259.
- MARTIN, V. & FROSCHAUER, E. M. (1998): Tausend Häuser in einer Nacht. *StadtBauwelt* (139): S. 2022-2027.
- MARTIN, L.R.G. (1989): Accuracy assessment of Landsat-based visual change detection methods applied to the rural-urban fringe. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 55 (2): S. 209-215.
- MATSON, P.A. & OJIMA, D.S. (1990): Terrestrial biosphere exchange with global atmospheric chemistry. Stockholm. IGBP Report 13. 103 S.

- MEINEL, G. KNAPP, C., GÖSSEL, J. & BUCHROITHNER, M.F. (1996): Kartierung von Flächennutzungsänderungen mittels Landsat-TM-Daten – Methodische Untersuchungen im Raum Dresden. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 64 (5): S. 163-175.
- MERTENS, B. & LAMBIN, E.F. (1997): Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon – spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Applied Geography* 17 (2): S. 143-162.
- MESEV, V. (1998): The use of census data in urban image classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64 (5): S. 431-438.
- MESEV, V., GORTE, B. & LONGLEY, P.A. (1998): Modified Maximum-Likelihood classification algorithms and their application to urban remote sensing. In: DONNAY, J.-P.: Remote sensing and urban analysis. London. *Gisdata* 9: S. 71-94.
- MILLER, L.D., NUALCHAWEE, K. & TOM, C. (1978): Analysis of the dynamics of shifting cultivation in the tropical forest of northern Thailand using landscape modelling and classification of Landsat imagery. In: Proceedings of the 20th International Symposium on Remote Sensing of the Environment. Ann Arbor: S. 1167-1185.
- NAPOLITANO, P. (2000): Land use-land cover photo-interpretation on high resolution imagery. In: Proceedings ASPRS Annual Convention 2000 (CD-ROM). Washington, DC: 12 S.
- NELSON, G.C. & HELLERSTEIN, D. (1997): Do roads cause deforestation? Using satellite images in economic analysis of land use. *American Journal of Agricultural Economics* 79: S. 80-88.
- NIPPER, J. & STREIT, U. (1978): Modellkonzepte zur Analyse, Simulation und Prognose raumzeit-varianter stochastischer Prozesse. Bremen. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumordnung (1). 17 S.
- OZDOGAN, M. & EL-BAZ, F. (2000): Utilizing satellite imagery to assess the effect of Izmit earthquake, western Turkey. In: Proceedings ASPRS Annual Convention 2000 (CD-ROM). Washington, DC: 9 S.
- PALUBINSKAS, G., LUCAS, R.M., FOODY, G.M. & CURRAN, P.J. (1985): An evaluation of fuzzy and texture-based approaches for mapping regenerating tropical forest classes from Landsat-TM data. *International Journal of Remote Sensing* 16 (4): S. 747-759.
- PILON, P.G., HOWARTH, P.J. & BULLOCK, R.A. (1989): An enhanced classification approach to change detection in semi-arid environments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54 (12): S. 1709-1716.
- PYKA, K. & STEINACHER, K. (1994): Auswahl eines optimalen Datensatzes für die multispektrale Klassifizierung unter Einbeziehung von Texturmerkmalsbildern. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 62 (4): S. 116-122.
- QUARMBY, N.A. & CUSHNIE, J.L. (1989): Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in south-east England. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): S. 953-963.
- QUATTROCHI, D.A. & PELLETIER, R.E. (1990): Remote sensing for analysis of landscape: an introduction. In: TURNER, M.G. & GARDNER, R.H.: Quantitative methods in landscape ecology. New York. *Ecological Studies* 82. S. 51-76.

- RADBERGER, R. (2000): Monitoring urban/industrial land use in the Greater Metropolitan Area Istanbul, Turkey, utilizing the Tasseled Cap transformation and RGB-clustering. In: Proceedings ASPRS Annual Convention 2000 (CD-ROM). Washington, DC: 12 S.
- RICHARDS, J.A. (1993): Remote sensing – digital image analysis. Springer. Berlin. 340 S.
- RITTER, G. & RICHTER, W. (1990): Aktuelle Urbanisierungsprozesse in der Türkei. Leverkusen. Geostudien 12. 202 S.
- RÖSSEL, N. (1999): Evaluation von CORINE Land Cover: satellitengestützte Auswertung (Landsat TM) und Anwendung zur ökologischen Indikatorerfassung am Beispiel des Landkreises Göttingen. Diplomarbeit. Göttingen. 114 S.
- ROSENFELD, G.H. & FITZPATRICK-LINS, K. (1986): A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52 (2): S. 223-227.
- SANDOVAL VASQUEZ, V. (2001): Methodische Untersuchungen zur raumbezogenen Modellierung und Prognose von Landnutzungsänderungen: „Am Beispiel eines 60 000 ha großen Gebietes in dem Längstal der VIII Region, Chile“. Cuvillier. Göttingen. 141 S.
- SANRI, Y.I. (1983): Der Verstädterungsprozeß in der Türkei und sein Einfluss auf die Struktur der Städte – dargestellt am Beispiel Istanbul. Dissertation. Bonn. 299 S.
- SAS INSTITUTE (1989): SAS/STAT User's Guide Vers. 6. Vol. 4. Cary. SAS Institute. 943 S.
- 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. Augsburg. Angewandte Sozialgeographie 30: S. 29-48.
- SCHIRMER, A. (1977): Industrielle Wachstumskerne in der Metropolitan Area Istanbul/Türkei: Ihre Aktivierbarkeit für die Gestaltung der Großstadt. Dissertation. Bonn. 167 S.
- SCHMIDT, K. & STOYE, H. (1990): Texturparameter zur Diskriminierung städtischer Geosysteme. *Vermessungstechnik* 38 (1): S. 16-18.
- SCHÖPPER, H., CALONEC-RAUCHFUSS, C. & LAVALLE, C. (2000): Monitoring städtischer Dynamik im Ruhrgebiet. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* (4): S. 259-271.
- SEYREK, S. (1982): Regionale Polarisierung – Analyse der Istanbul-Izmit-Entwicklungssachse und der Veränderungen in den regionalen Produktions- und Standortstrukturen der Türkei. Dissertation. Berlin. 310 S.
- SIEBERT, A. (1990): Die Integration von Satellitendaten und vorliegenden Kartenmaterialien für Zwecke der Raumplanung. *GIS Geo-Informationssysteme* 3 (3): S. 19-25.
- SINGH, A. (1989): Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): 989-1003.
- SKLAR, F.H. & COSTANZA, R. (1991): The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis.. In: TURNER, M.G. & GARDNER, R.H.: Quantitative methods in landscape ecology. New York. Ecological Studies 82: S. 240-288.
- SOHL, T.L. (1999): Change analysis in the United Arab Emirates: an investigation of techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (4): S. 475-484.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1994): Länderbericht Türkei. Moetzler-Poeschel. Stuttgart. 140 S.

- STEWIG, R. (1998): Entstehung der Industriegesellschaft in der Türkei – Teil 1: Entwicklung bis 1950. Kiel. Kieler Geographische Schriften 96. 349 S.
- STORY, M. & CONGALTON, R.G. (1986): Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52 (3): S. 397-399.
- STRATHMANN, F.-W. (1986): Multitemporale Aspekte der Nutzung von Fernerkundungsdaten in der Bundesrepublik Deutschland. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V.: Die Nutzung von Fernerkundungsdaten in der Bundesrepublik Deutschland. Bonn. DGLR-Bericht 86-01: S. 69-79.
- SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. (1978): Remote sensing: the quantitative approach. MacGraw-Hill. New York. 396 S.
- TOEPFFER, H. (1989): Die Entwicklungsdynamik in der Türkei – regionale Unterschiede aufgrund bevölkerungs- und wirtschaftsgeographischer Disparitäten. *Geographische Rundschau* 41 (4): S. 211-219.
- TREITZ, P.M., HOWARTH, P.J. & GONG P. (1992): Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe: a case study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (4): S. 439-448.
- TURNER, M.G. (1987): Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of 3 transition models. *Landscape Ecology* 1 (1): S. 29-36.
- TURNER, M.G., COSTANZA, R. & SKLAR, F.H. (1989): Methods to evaluate the performance of spatial simulation models. *Ecological Modelling* 48: S. 1-18.
- TURNER II, B.L. (1995): Land-use and land-cover change science/research plan. Stockholm. IGBP Report 35. Zugl. HDP Report 7. 132 S.
- UHLMANN, F. (1988): Landnutzung, Erzeugung und Vermarktung pflanzlicher Produkte in der Türkei. Braunschweig. IFLM-Arbeitsbericht 88/3. 44 S.
- ULUSOY, E. (1987): Landtechnik in der Türkei: Vergangenheit – Gegenwart – Tendenzen der Entwicklung. Braunschweig. ATSAF-Circular 12: S. 43-44.
- UNITED NATIONS (1998): World urbanization prospects: the 1996 revision. United Nations Publications. New York. 188 S.
- VAN DER MERWE, I.J. (1989): The urban structure of Southwest Africa/Namibia viewed within a third-world framework. In: STERN, E.: International aspects of rural and urban metropolitan systems. New Brunswick. Geography Research Forum 9: S. 109-126.
- VIDINLIOĞLU, N. (1993): Siedlungsentwicklung und Flächennutzung in der Türkei – rechtliche Aspekte. In: ARSLAN, R., SCHAFFER, F. & KLINGSHIRN, U.: Angewandte Stadtforschung in der Türkei. Augsburg. Angewandte Sozialgeographie 30: S. 145-154.
- VÖGTLE, T. & SCHILLING, K.-J. (1995)23: Wissensbasierte Extraktion von Siedlungsbereichen in der Satellitenbildanalyse. *ZPF Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 63 (1): S. 199-207.
- WOLFF, K. (1990): Der Verstädterungsprozeß in Indien unter besonderer Berücksichtigung der Großstadtentwicklung. Dissertation. Berlin. 165 S.
- YAFANG, S., SHUPENG, C., YUANHONG, Z. & LAN, C. (1992): Monitoring urban development of Hangzhou city by using multitemporal TM data. *GIS Geo-Informationssysteme* 5 (2): S. 8-13.
- YERASIMOS, S. (1997): Wie groß ist Istanbul? *StadtBauwelt* (139): S. 2012-2017.

- YILDIRIM, H., FELDKÖTTER, C. & AKCA, A. (1996): Monitoring der Landnutzung im Großraum Istanbul mit Fernerkundung und GIS. In: BEISCH, T., AKÇA, A. & KOMP, K. U.: Fernerkundung und Geo-Informationssysteme in der Ökologie der Landoberfläche. Cuvillier. Göttingen: S. 211-224.
- ZERDA, H.R. (1998): Monitoring der Vegetations- und Landnutzungsveränderungen durch Brandrodung und Übernutzung im Trocken-Chaco Argentiniens mit Satellitenfernerkundung und GIS. Cuvillier. Göttingen. 175 S.

10 Anhang

10.1 Analyse der Einflußstärke einzelner Variablen mittels der Kreuzvalidierung

10.11 Modellierung ohne die Landnutzung („lu94“)

Tabelle 10-1: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „lu94“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 398	4 910	261 308
	Änderung	3 166	21 085	24 251
	nicht klassifiziert	21	27	48
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-2: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „lu94“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 676	4 901	260 577
	Änderung	3 153	20 976	24 129
	nicht klassifiziert	21	30	51
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.12 Modellierung ohne die Entfernung zu urban-industrieller Nutzung am Anfang der Untersuchungsperiode („urb94dis“)

Tabelle 10-3: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „urb94dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 355	5 023	261 378
	Änderung	3 200	20 967	24 167
	nicht klassifiziert	30	32	62
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-4: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „urb94dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 628	5 067	260 695
	Änderung	3 195	20 810	24 005
	nicht klassifiziert	27	30	57
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.13 Modellierung ohne die Entfernung zu den Hauptverkehrsadern insgesamt („roaddist“)

Tabelle 10-5: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „roaddist“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 372	4 937	261 309
	Änderung	3 183	21 053	24 236
	nicht klassifiziert	30	32	62
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-6: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „roaddist“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 653	4 949	260 602
	Änderung	3 167	20 934	24 101
	nicht klassifiziert	30	24	54
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.14 Modellierung ohne die Entfernung zur Hauptverkehrsader „E5“ („road1dis“)

Tabelle 10-7: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „road1dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 118	5 107	261 225
	Änderung	3 439	20 876	24 315
	nicht klassifiziert	28	39	67
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-8: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „road1dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 471	5 178	260 649
	Änderung	3 348	20 693	24 041
	nicht klassifiziert	31	36	67
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.15 Modellierung ohne die Entfernung zur Hauptverkehrsader „TEM“ („road2dis“)

Tabelle 10-9: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „road2dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 315	5 008	261 323
	Änderung	3 237	20 968	24 205
	nicht klassifiziert	33	46	79
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-10: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „road2dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 576	5 041	260 617
	Änderung	3 237	20 833	24 070
	nicht klassifiziert	37	33	70
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.16 Modellierung ohne die Entfernung zur Querverbindung im Bezirk Kartal („road7dis“)

Tabelle 10-11: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne "road7dis"

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 815	5 833	261 648
	Änderung	3 723	20 139	23 862
	nicht klassifiziert	47	50	97
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-12: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne "road7dis"

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 125	5 844	260 969
	Änderung	3 676	20 030	23 706
	nicht klassifiziert	49	33	82
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.17 Modellierung ohne die Entfernungen zu den einzelnen Hauptverkehrsadern („road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“)

Tabelle 10-13: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	252 592	10 649	263 241
	Änderung	6 877	15 258	22 135
	nicht klassifiziert	116	115	231
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-14: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	251 915	10 637	262 552
	Änderung	6 782	15 127	21 909
	nicht klassifiziert	153	143	296
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.18 Modellierung ohne die Hangneigung („slope“)

Tabelle 10-15: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „slope“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 490	4 836	261 326
	Änderung	3 068	21 153	24 221
	nicht klassifiziert	27	33	60
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-16: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „slope“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 721	4 827	260 548
	Änderung	3 103	21 045	24 148
	nicht klassifiziert	26	35	61
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.19 Modellierung ohne die Geländehöhe („dem“)

Tabelle 10-17: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung ohne „dem“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 399	4 905	261 304
	Änderung	3 164	21 093	24 257
	nicht klassifiziert	22	24	46
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-18: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung ohne „dem“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 678	4 900	260 578
	Änderung	3 152	20 977	24 129
	nicht klassifiziert	20	30	50
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.110 Modellierung ausschließlich mit den Entfernungen zu den einzelnen Hauptverkehrsadern („road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“)

Tabelle 10-19: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung mit „road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	256 403	4 457	260 860
	Änderung	2 423	20 744	23 167
	nicht klassifiziert	759	821	1 580
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-20: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung mit „road1dis“, „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	255 638	4 464	260 102
	Änderung	2 510	20 595	23 105
	nicht klassifiziert	702	848	1 550
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.111 Modellierung mit den Entfernungen zur E5 und TEM („road1dis“ und Road2dis“)

Tabelle 10-21: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung mit „road1dis“ und „road2dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	252 725	14 534	267 259
	Änderung	5 025	10 244	15 269
	nicht klassifiziert	1 835	1 244	3 079
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-22: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung mit „road1dis“ und „road2dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	252 098	14 520	266 618
	Änderung	5 013	10 076	15 089
	nicht klassifiziert	1 739	1 311	3 050
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.112 Modellierung mit den Entfernungen zur E5 und zur Querverbindungsstraße im Bezirk Kartal („road1dis“ und „road7dis“)

Tabelle 10-23: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung mit „road1dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	250 764	12 547	263 311
	Änderung	6 348	11 529	17 877
	nicht klassifiziert	2 473	19 46	4 419
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-24: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung mit „road1dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	250 104	12 599	262 703
	Änderung	6 286	11 310	17 596
	nicht klassifiziert	2 460	1 998	4 458
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.113 Modellierung mit den Entfernungen zur TEM und Querverbindungsstraße im Bezirk Kartal („road2dis“ und „road7dis“)

Tabelle 10-25: Fehlermatrix I der Kreuzvalidierung mit „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	251615	13943	265558
	Änderung	5719	10450	16169
	nicht klassifiziert	2251	1629	3880
	gesamt	259 585	26 022	285 607

Tabelle 10-26: Fehlermatrix II der Kreuzvalidierung mit „road2dis“ und „road7dis“

	tatsächliche Klassenzugehörigkeit			
	Klasse „urbgrow“	keine Änderung	Änderung	gesamt
prognostizierte Klassen- zugehörigkeit	keine Änderung	250960	13814	264774
	Änderung	5684	10413	16097
	nicht klassifiziert	2206	1680	3886
	gesamt	258 850	25 907	284 757

10.2 Kartographische Darstellungen der Variablen der räumlich-statistischen Modellierung

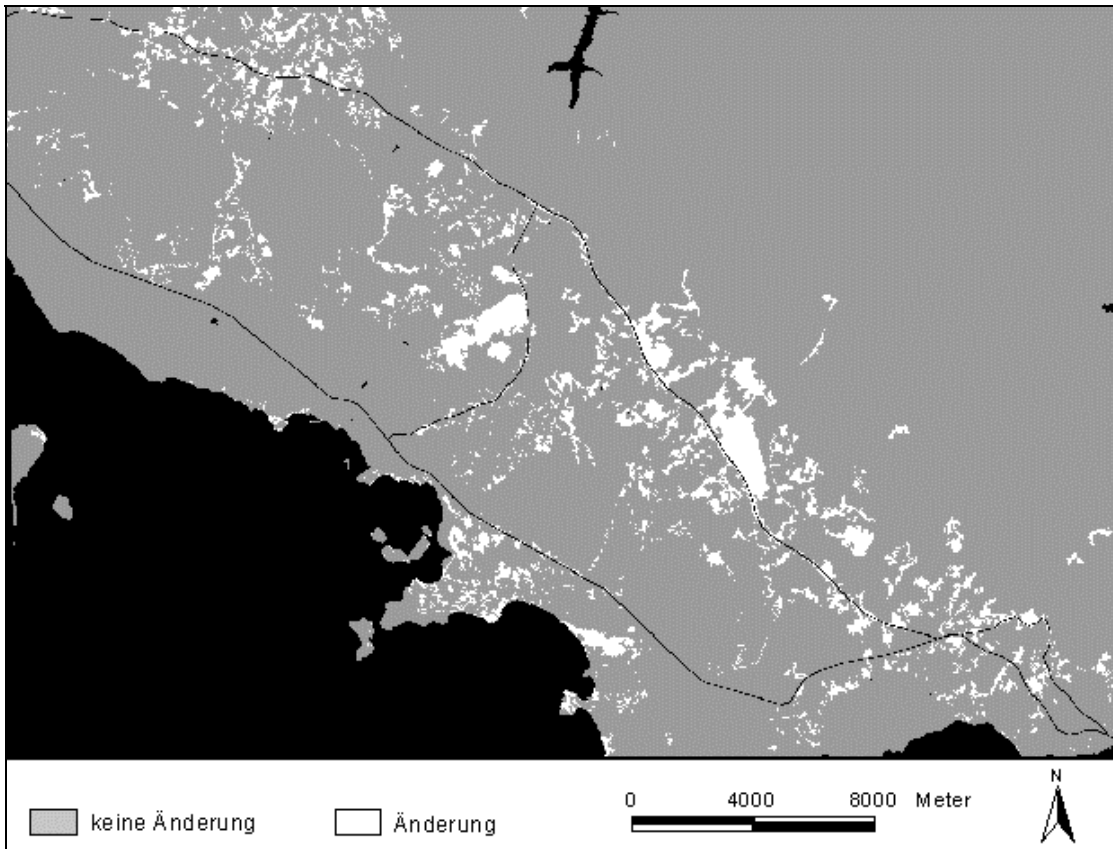


Abbildung 10-1: Abhängige Variable „urbgrowth“

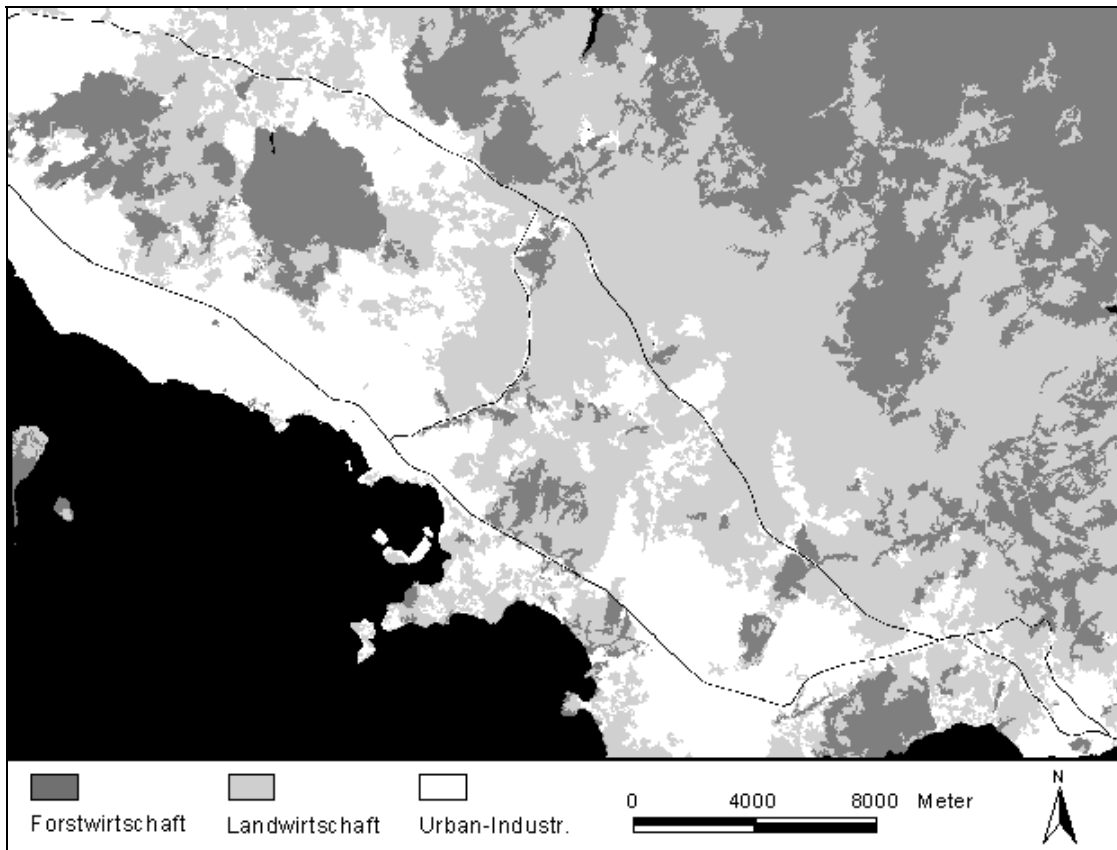


Abbildung 10-2: Unabhängige Variable „Lu94“

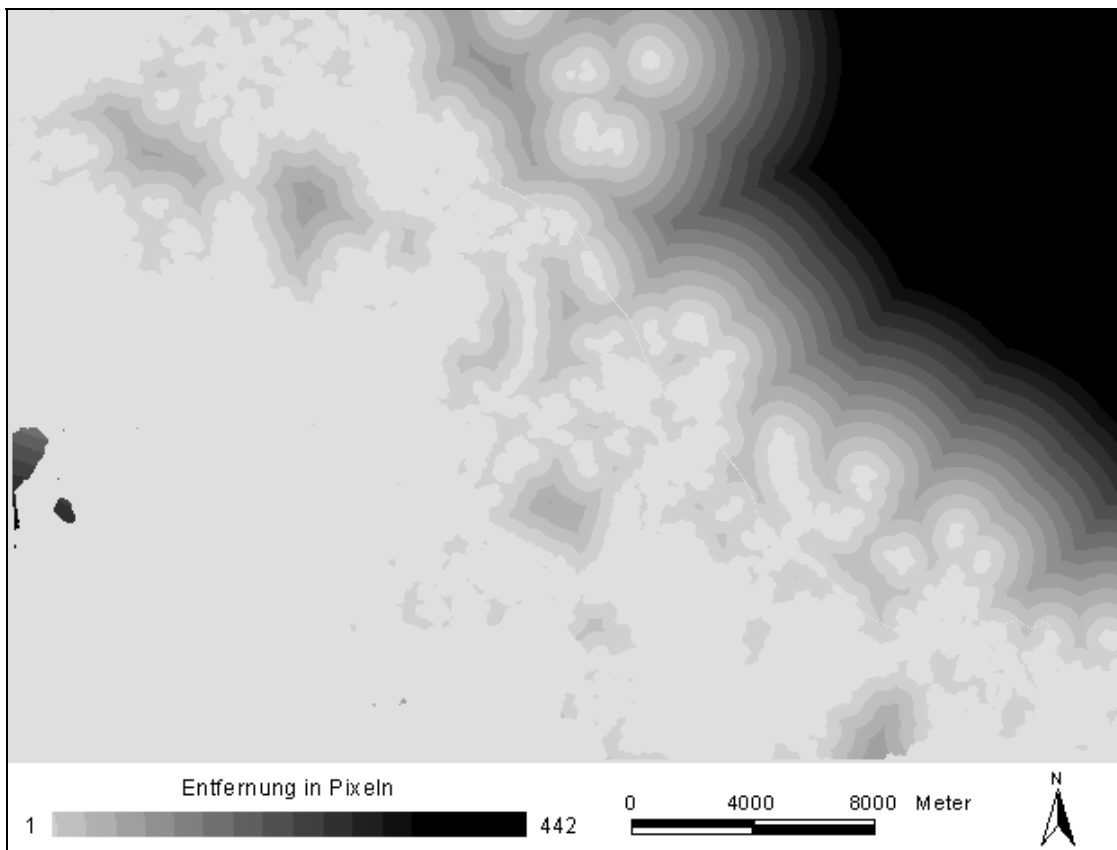


Abbildung 10-3: Unabhängige Variable "urb94dis"

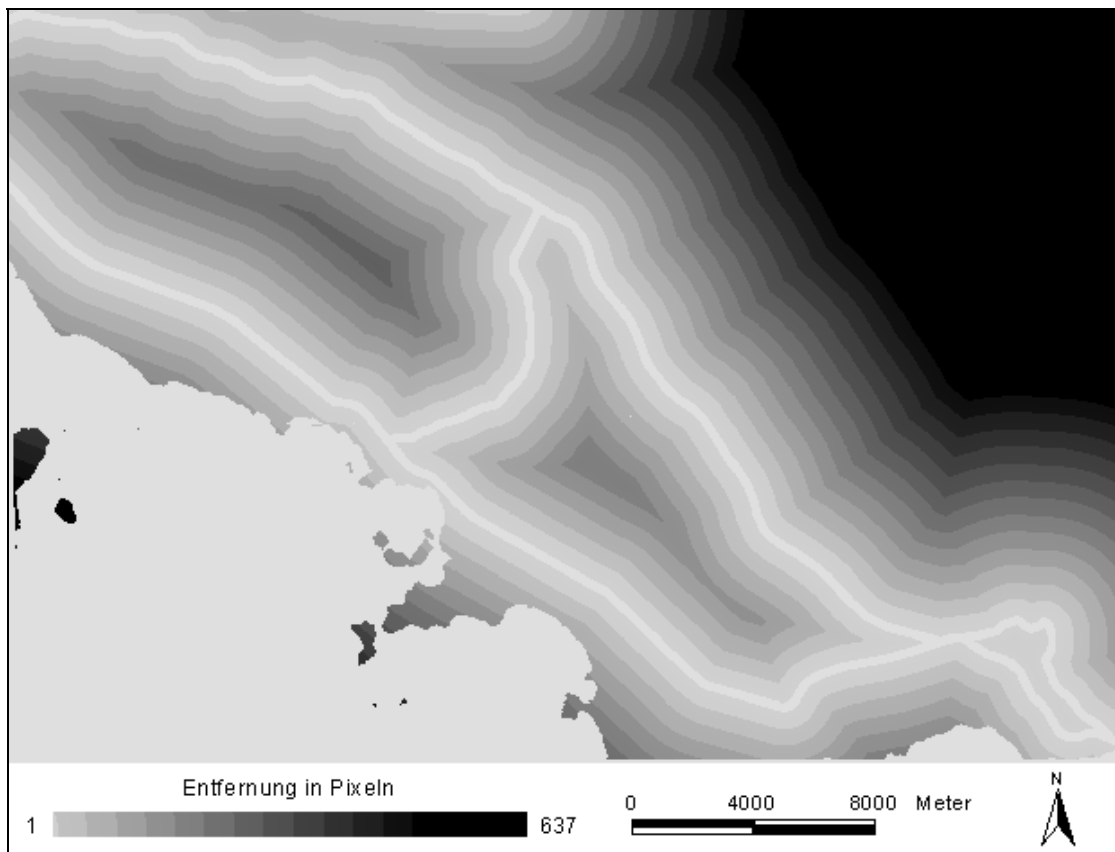


Abbildung 10-4: Unabhängige Variable "roaddist"

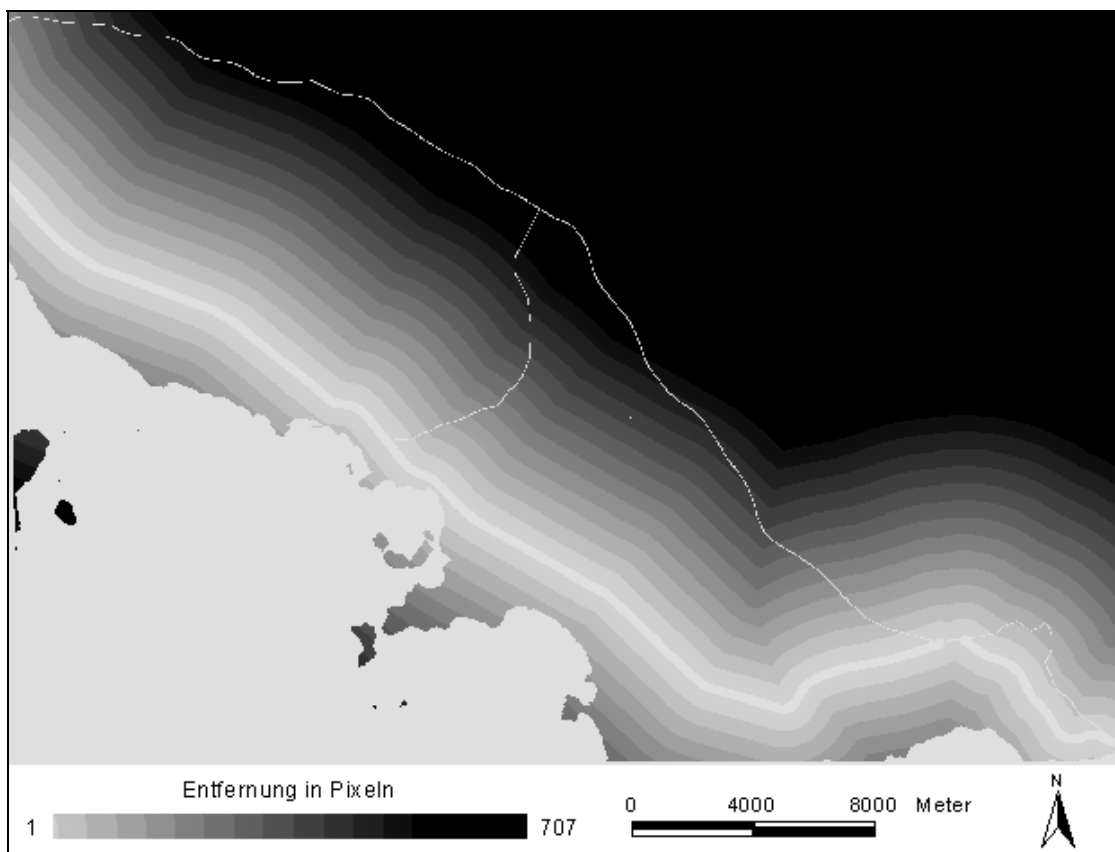


Abbildung 10-5: Unabhängige Variable "road1dis"

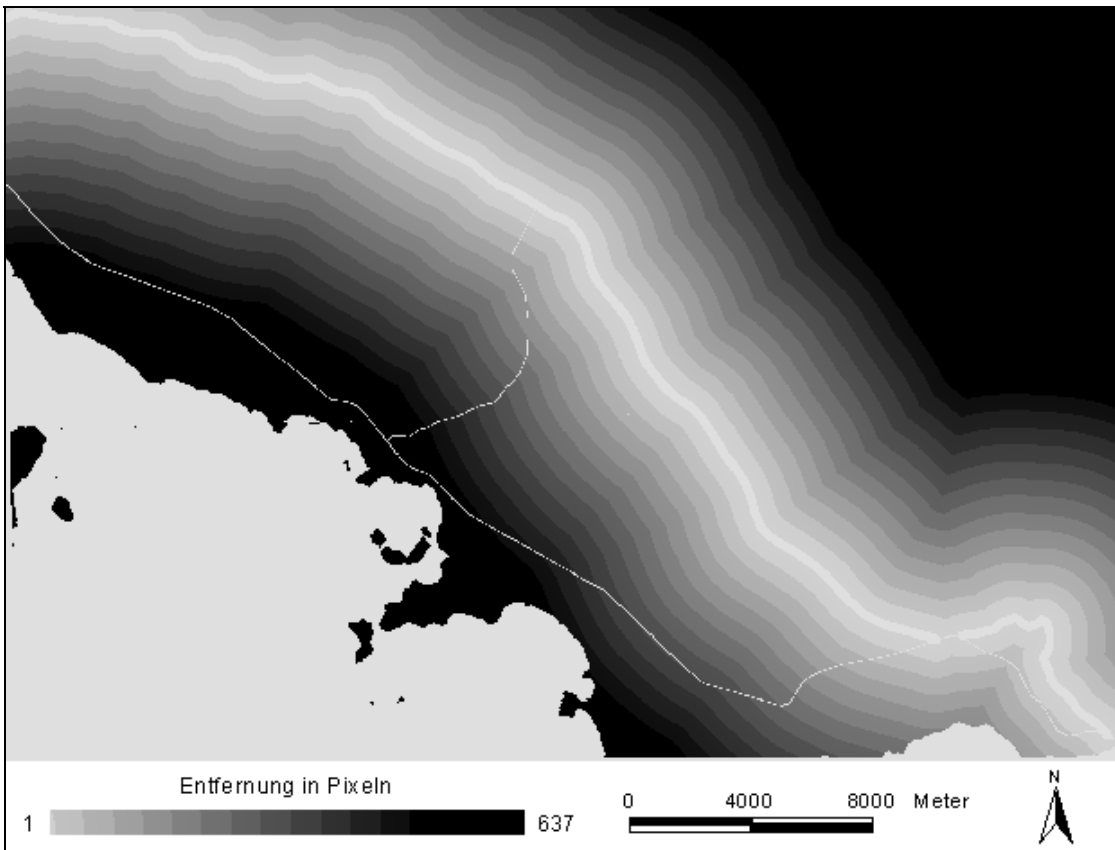


Abbildung 10-6: Unabhängige Variable "road2dis"

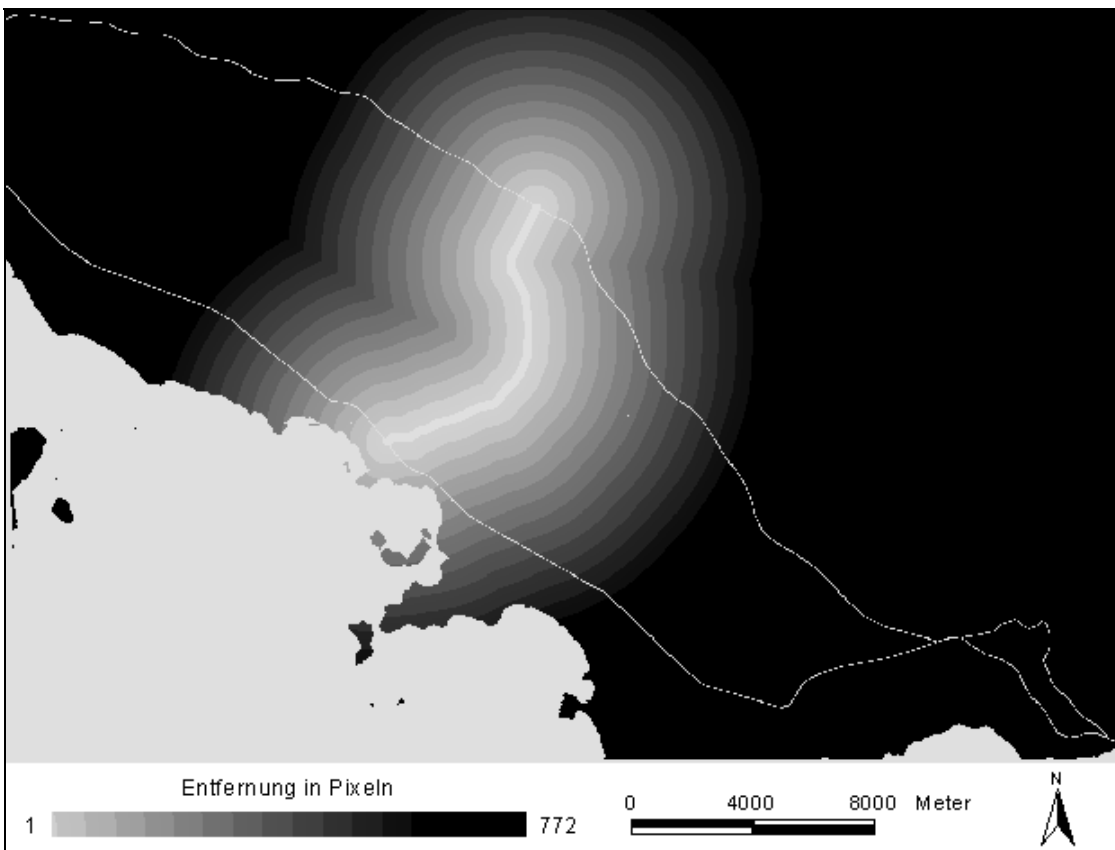


Abbildung 10-7: Unabhängige Variable "road7dis"

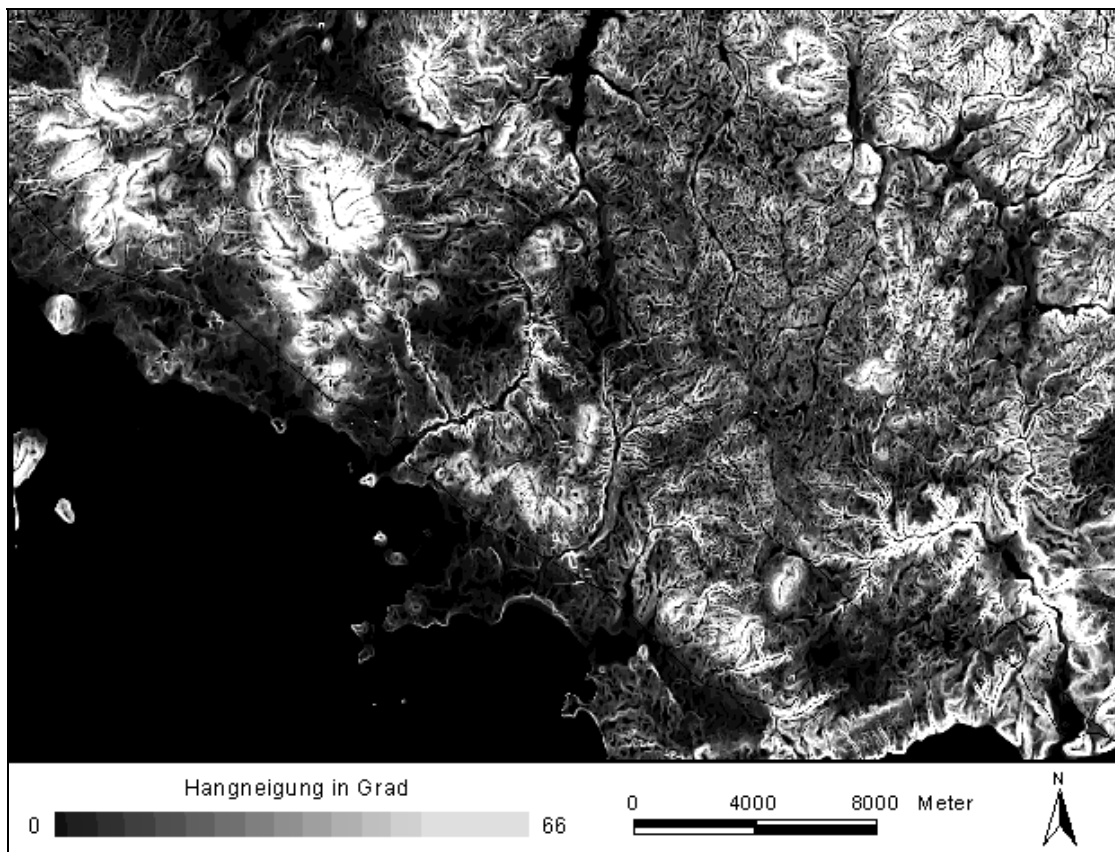


Abbildung 10-8: Unabhängige Variable "slope"

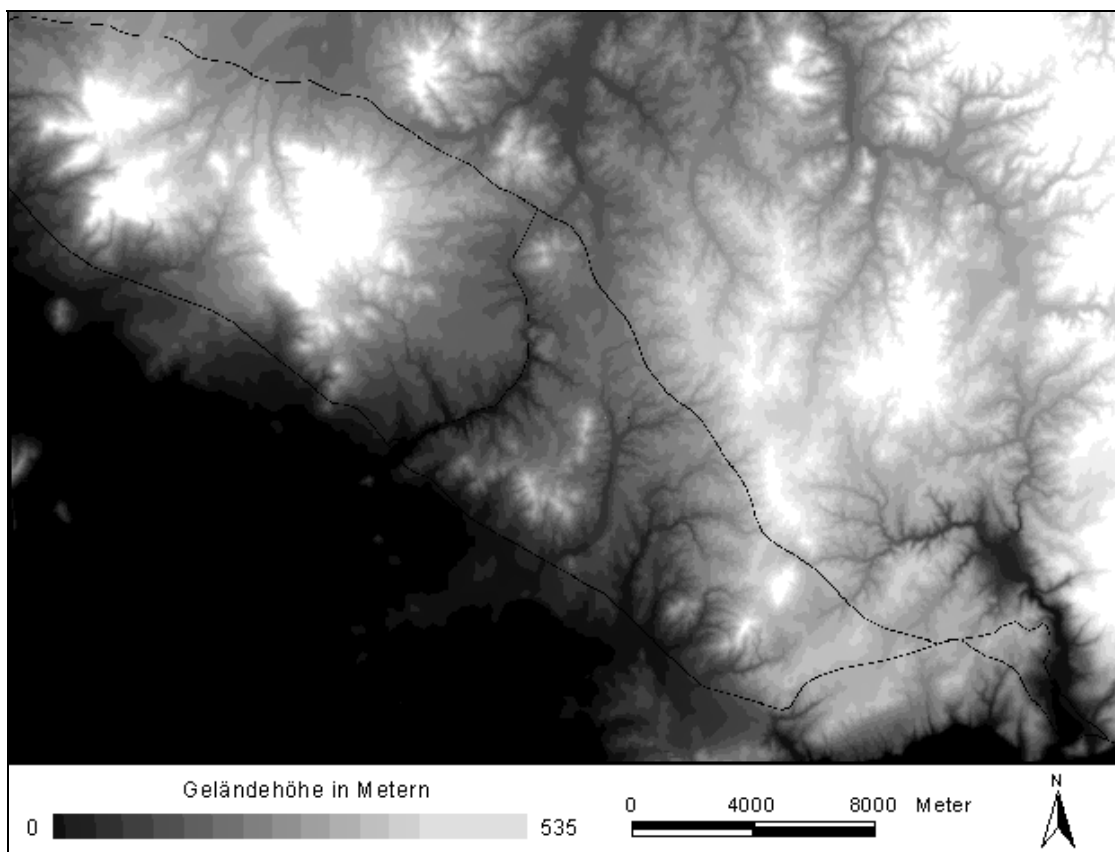


Abbildung 10-9: Unabhängige Variable "dem"

10.3 SAS-Programmcode der statistischen Modellierung

```
/* Definition der SAS-Library */
libname kocaeli "u:\mosaic\modeleva";

/* Import des ASCII-Datensatzes */
data kocaeli.import1;

    infile "u:\mosaic\modeleva\logit5.asc" firstobs=1;

    input X Y URBGROW LU94 URB94DIS ROADDIST ROAD1DIS ROAD2DIS ROAD7DIS SLOPE DEM;

/* Ausschluß aller Beobachtungen (Pixel) mit dem Hintergrundwert Null und Generierung der
Zufallszahl/*
data kocaeli.import2; set kocaeli.import1;

    where urbgrow ^= 0 and dem ^= 0 and roaddist ^= 0 and lu94 ^= 3 and lu94 ^= 0;

    RANDOM=ranuni(99999);

/* Definition der Zufallsstichprobe Eins/*
data eins; set kocaeli.import2;

    where RANDOM>0.5;

/* Definition der Zufallsstichprobe Zwei/*
data zwei; set kocaeli.import2;

    where RANDOM<=0.5;

/* Klassifizierung I: Zufallsstichprobe Eins ist das Kalibrierungsset, Zufallsstichprobe Zwei ist
das Validierungsset /*
proc discrim data=eins testdata=zwei testout=zweiclas method=npar k=5 metric=identity;

    class URBGROW;

    var LU94 URB94DIS ROADDIST ROAD1DIS ROAD2DIS ROAD7DIS SLOPE DEM;

    priors prop;

/* Klassifizierung II: Zufallsstichprobe Zwei ist das Kalibrierungsset, Zufallsstichprobe Eins
ist das Validierungsset /*
proc discrim data=zwei testdata=eins testout=einsclas method=npar k=5 metric=identity;

    class URBGROW;

    var LU94 URB94DIS ROADDIST ROAD1DIS ROAD2DIS ROAD7DIS SLOPE DEM;

    priors prop;

/* Zusammenfassen der Validierungssets zu einer Ergebnisdatei /*
data drei; set zweiclas einsclas;
```

```
proc sort; by descending y x;
/* Ausgabe der Pixelkoordinaten in eine ASCII-Datei */
data xy; set drei;
file "u:\mosaic\modeleva\xy.asc";
put _n_ x y;
/* Ausgabe der geschätzten Pixelwerte in ein SAS-Dataset */
data kocaeli.in; set drei;
keep _into_;

run;
```

**DIPL.-FORSTWIRT
ROMAN RADBERGER**

**INST. F. FORSTEINRICHTUNG U. ERTRAGSKUNDE
BÜSGENWEG 5
37077 GÖTTINGEN
TEL.: 0551 / 39-3574
EMAIL: RRADBER@GWDG.DE**

**PRIVATANSCHRIFT:
HERMANN-REIN-STR. 2 B, APP. 74
37075 GÖTTINGEN
TEL.: 0551 / 3795922**

PERSÖNLICHE DATEN

Geburtsdatum: 16.06.1971
Geburtsort: Hamm/Westf.
Familienstand: ledig

AUSBILDUNG

06.05.91 Abitur am „Gymnasium im Schloß“ zu Wolfenbüttel.
01.10.91 bis 31.03.97 Studium an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen;
Diplomarbeit zum Thema: „Der Einfluß von Deposition, Temperatur, Bodenlösungsschemie und Bodenfeuchte auf die Emission von Spurengasen entlang eines Transektes in der Langen Bramke/Harz; Note: „GUT“;
24.03.94 Diplomvorprüfung
31.03.97 Diplomprüfung
Gesamtnote: „GUT“;

PRAKTIKA

23.04.95 bis 17.05.95 Geländepraktikum am FTZ Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel;
01.11.95 bis 01.12.95 entgeltliches Praktikum im Büro für Landschaftsplanung
19.02.96 bis 19.04.96 Birkigt-Quentin in Adelebsen;

BERUFSTÄTIGKEIT

01.10.97 bis 31.12.97 Leitung des Projekts zur Grünflächenkartierung der Stadt Hamburg;
seit 01.01.98 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen; Bearbeitung des DFG-Projektes AK 9/9-2 „Raumbezogene Prognose von Landnutzungsänderungen durch die Ausdehnung urban-industrieller Landnutzung in Schwellenländern auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten“;

10.10.00 bis 2.12.00	Consultant bei PHOENICS Dienstleistungsgesellschaft für digitale Photogrammetrie mbH – technische Unterstützung und Mitarbeiterschulung;
02.01.01 bis 05.01.01	Mitarbeiterschulung bei PHOENICS – Digitale Photogrammetrie und Anwendung mit Softplotter 2.0;

LEHRERFAHRUNG

Sommersemester 99/00/01 „Einführung in die Satellitenfernerkundung“ (jeweils 18 Std.);
Übungen zur Vermessungs- und Waldmeßlehre;

AUSLANDSERFAHRUNG

15.07.96 bis 15.10.96	wissenschaftliche Hilfskraft am Great Lakes Forestry Research Centre in Saul Ste. Marie, Ontario/Kanada;
22.10.98 bis 27.11.98	Forschungsaufenthalt am Marmara Research Centre, Gebze/Türkei;
09.03.99 bis 07.05.99	

FREIZEITAKTIVITÄTEN

Laufen, Radsport, Fantasy-Rollenspiele, Mitglied im göttinger vokalensemble e.V. (im Vorstand seit 1998);

FREMDSPRACHEN

Englisch fließend in Wort und Schrift
Türkisch in Grundzügen

EDV-KENNTNISSE

Officeanwendungen	MS-Office
Programmierung	Turbo Pascal, SQL, AML
Statistik	SAS, Statistica
Datenbanken	MS-Access, dBase
Betriebssysteme	Windows 95/98, Windows NT, Linux, IRIX, SUN
GIS	Arc/Info, ArcView
Bildverarbeitung	Imagine, eCognition, MultiSpec
Digitale Photogrammetrie	Softplotter, OrthoEngine

PROMOTION

Thema: „Monitoring der Verstädterung im Großraum Istanbul mit den Methoden der Satellitenfernerkundung und der Versuch einer räumlich-statistischen Modellierung“;
Rigorosum am 02.07.2001 (Gesamtnote: „SEHR GUT“);

PUBLIKATIONEN

- AKÇA, A. & RADBERGER, R. (2000): Softcopy-Photogrammetrie in Forstwirtschaft und Naturschutz – Spielzeug oder Werkzeug? In: GRUEHN, D., HERBERG, A. & ROESRATH, C.: Naturschutz und Landschaftsplanung. Mensch und Buch. Berlin: S. 13 - 24.
- AKÇA, A., RADBERGER, R. & DIVAN, O. (2000): Die ferngesteuerte Stadtentwicklung. *Forschung (2)*: S. 25 - 27.
- AKÇA, A., RADBERGER, R. & DIVAN, O. (2000): Remotely controlled urban development. *German Research (2-3)*: S. 33 - 35.
- RADBERGER, R. (2000): Monitoring urban/industrial land use in the Greater Metropolitan Area Istanbul, Turkey, utilizing the Tasseled Cap transformation and RGB-clustering. In: Proceedings ASPRS Annual Convention 2000 (CD-ROM). Washington, DC: 12 S.
- RADBERGER, R. (2001): Räumlich-statistische Modellierung der Landnutzungs-änderung im Großraum Istanbul. *GIS Geo-Informationssysteme (3)*: S. 42 - 47.

Göttingen, den 6. Juli 2001