

Kombination von terrestrischen Aufnahmen und
Fernerkundungsdaten mit Hilfe der kNN-Methode zur
Klassifizierung und Kartierung von Wäldern

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Wolfgang Stümer

Tharandt, 24. August 2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation am Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften an der Technischen Universität Dresden. Ich danke Herrn Prof. Dr. Michael Köhl für die hervorragende Betreuung und die fachliche Unterstützung. Ebenso danke ich den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Biometrie und Forstliche Informatik und der Rechenstation Tharandt für die Hilfe bei der fachlichen und technischen Umsetzung der Arbeit.

Das Projekt „Kombination von terrestrischen Aufnahmen und Fernerkundungsdaten mit Hilfe der kNN-Methode zur Kartierung von Waldökosystemen“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt initiiert und finanziell gefördert (FKZ 50EE0037). Ich danke Herrn Dr. Lüttenberg für die Möglichkeit, die Ergebnisse aus der Projektarbeit in dieser Dissertation darstellen zu dürfen. Für die Bereitstellung der Hyperspektraldaten im Rahmen des Vorhaben ProSmart danke ich der Infoterra GmbH und der Astrium GmbH, Friedrichshafen.

Ich möchte mich außerdem bei meinen Eltern, meinen Freunden und allen, die mich auf diesem Weg unterstützt haben, herzlich bedanken. Mein größter Dank gilt meiner Frau Susanne und meinem Sohn Richard, die mir die bestmögliche moralische Unterstützung gaben und mir erst dadurch die Anfertigung dieser Arbeit ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary.....	2
1 Einleitung.....	3
1.1 Ziel der Arbeit	5
1.2 Rahmen der Arbeit	6
1.3 Aufbau der Arbeit.....	7
2 Stand der Forschung	9
2.1 Fernerkundung – Entwicklung und Sensoren.....	9
2.2 Bedeutung der Fernerkundung für die Forstwirtschaft.....	13
2.3 Übersicht über die kNN-Methode	17
3 Untersuchungsgebiet und terrestrische Aufnahmen	22
3.1 Untersuchungsgebiet Tharandter Wald	22
3.2 Beschreibung der Testgebiete.....	24
3.3 Digitale Karten	25
3.4 Terrestrische Aufnahmen	26
3.4.1 ProSmart-Aufnahme.....	29
3.4.2 MNTFR-Aufnahme	30
3.4.3 kNN-Aufnahme	31
4 Fernerkundungsdaten.....	33
4.1 Landsat-Daten.....	34
4.1.1 Atmosphärenkorrektur.....	37
4.1.2 Georeferenzierung	37
4.1.3 Hauptkomponentenanalyse.....	38
4.1.4 Vegetationsindices.....	39
4.1.5 Multitemporaler Ansatz.....	40
4.2 HyMap TM -Daten	40
4.3 HRSC-A-Daten.....	44
5 Methoden	50
5.1 kNN-Methode.....	50
5.1.1 Metrische Daten.....	50
5.1.2 kNN-Methode für kategoriale Daten.....	54
5.1.3 Durchführung der kNN-Methode	54
5.2 Fehleranalyse	57
5.2.1 Wiederholungsgenauigkeit (precision).....	57
5.2.2 Treffgenauigkeit (accuracy)	57
5.2.3 Bias (Verzerrung)	58
5.2.4 Root Mean Square Error (RMSE).....	58
5.2.5 Bootstrapping	59
5.3 Shift-Algorithmus.....	61
5.4 Multitemporaler Ansatz.....	64
5.5 Programmierung	65
5.5.1 Visual Basic.....	66
5.5.2 kNN-Programm	67
6 Ergebnisse.....	70
6.1 kNN-Karten	70
6.1.1 Landsat	71
6.1.1.1 Grundfläche	71
6.1.1.2 Totholz.....	74

6.1.2	HyMap™	77
6.1.2.1	Grundfläche	78
6.1.2.2	Totholz	84
6.2	Fehleranalyse	88
6.2.1	Grundfläche	88
6.2.2	Totholz	97
6.3	Bootstrapping	101
7	Bewertung der Ergebnisse	105
8	Ausblick	110
9	Literaturverzeichnis	113
10	Abbildungsverzeichnis	120
11	Tabellenverzeichnis	123
12	Anhang	125
12.1	kNN-Ergebnisse des Merkmals Grundfläche	125
12.1.1	Landsat	125
12.1.2	HyMap™	143
12.2	kNN-Ergebnisse des Merkmals Totholz	148
12.2.1	Landsat	148
12.2.2	HyMap™	152
Erklärung		153

Zusammenfassung

Bezüglich des Waldes hat sich in den letzten Jahren seitens der Politik und Wirtschaft ein steigender Informationsbedarf entwickelt. Zur Bereitstellung dieses Bedarfes stellt die Fernerkundung ein wichtiges Hilfsmittel dar, mit dem sich flächendeckende Datengrundlagen erstellen lassen. Die k -nächsten-Nachbarn-Methode (kNN-Methode), die terrestrische Aufnahmen mit Fernerkundungsdaten kombiniert, stellt eine Möglichkeit dar, diese Datengrundlage mit Hilfe der Fernerkundung zu verwirklichen. Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Dissertation eingehend mit der kNN-Methode. An Hand der zwei Merkmale *Grundfläche* (metrische Daten) und *Totholz* (kategoriale Daten) wurden umfangreiche Berechnungen durchgeführt, wobei verschiedenste Variationen der kNN-Methode berücksichtigt wurden. Diese Variationen umfassen verschiedenste Einstellungen der Distanzfunktion, der Wichtungsfunktion und der Anzahl k -nächsten Nachbarn. Als Fernerkundungsdatenquellen kamen Landsat- und Hyperspektraldaten zum Einsatz, die sich sowohl von ihrer spektralen wie auch ihrer räumlichen Auflösung unterscheiden. Mit Hilfe von Landsat-Szenen eines Gebietes von verschiedenen Zeitpunkten wurde außerdem der multitemporale Ansatz berücksichtigt. Die terrestrische Datengrundlage setzt sich aus Feldaufnahmen mit verschiedenen Aufnahmedesigns zusammen, wobei ein wichtiges Kriterium die gleichmäßige Verteilung von Merkmalswerten (z.B. Grundflächenwerten) über den Merkmalsraum darstellt. Für die Durchführung der Berechnungen wurde ein Programm mit Visual Basic programmiert, welches mit der Integrierung aller Funktionen auf der Programmoberfläche eine benutzerfreundliche Bedienung ermöglicht. Die pixelweise Ausgabe der Ergebnisse mündete in detaillierte Karten und die Verifizierung der Ergebnisse wurde mit Hilfe des prozentualen Root Mean Square Error und der Bootstrap-Methode durchgeführt.

Die erzielten Genauigkeiten für das Merkmal *Grundfläche* liegen zwischen 35 % und 67 % (Landsat) bzw. zwischen 65 % und 67 % (HyMapTM). Für das Merkmal *Totholz* liegen die Übereinstimmungen zwischen den kNN-Schätzern und den Referenzwerten zwischen 60,0 % und 73,3 % (Landsat) und zwischen 60,0 % und 63,3 % (HyMapTM).

Mit den erreichten Genauigkeiten bietet sich die kNN-Methode für die Klassifizierung von Beständen bzw. für die Integrierung in Klassifizierungsverfahren an.

Summary

Mapping forest variables and associated characteristics is fundamental for forest planning and management. The following work describes the k-nearest neighbors (kNN) method for improving estimations and to produce maps for the attributes basal area (metric data) and deadwood (categorical data). Several variations within the kNN-method were tested, including: distance metric, weighting function and number of neighbors. As sources of remote sensing Landsat TM satellite images and hyper spectral data were used, which differ both from their spectral as well as their spatial resolutions. Two Landsat scenes from the same area acquired September 1999 and 2000 regard multiple approaches.

The field data for the kNN- method comprise tree field measurements which were collected from the test site Tharandter Wald (Germany). The three field data collections are characterized by three different designs.

For the kNN calculation a program with integration all kNN functions were developed.

The relative root mean square errors (RMSE) and the Bootstrap method were evaluated in order to find optimal parameters. The estimation accuracy for the attribute basal area is between 35 % and 67 % (Landsat) and 65 % and 67 % (HyMapTM). For the attribute deadwood is the accuracy between 60 % and 73 % (Landsat) and 60 % and 63 % (HyMapTM).

Recommendations for applying the kNN method for mapping and regional estimation are provided.

1 Einleitung

In der Forstwirtschaft hat die Planung menschlicher Eingriffe in Waldökosysteme unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Bewirtschaftung eine lange Tradition. Während in der Vergangenheit die Nachhaltigkeit der forstlichen Produktion ein Schwerpunkt forstwirtschaftlichen Handelns war, tritt heute immer mehr die nachhaltige Nutzung der Vielfachfunktionen von Wäldern in den Vordergrund (LUND & BOLEY 1995). So genießen Erholungs- und Schutzfunktionen besonders in der Nähe von Städten eine höhere Wertschätzung als beispielsweise die Holzproduktion. Dies hat Auswirkungen auf die Informationen, die mit Forstinventuren bereitgestellt werden müssen. Den veränderten Informationsbedarf, den Politik und Wirtschaft bezüglich des Waldes definieren, zeigen auch die UNCED-Konferenzen in Rio de Janeiro 1992 und Johannesburg 2003, die Ministerkonferenzen zum Schutz der Wälder in Europa sowie das Kyoto-Protokoll auf.

Im Gegensatz zur Produktionsfunktion erfordert die Bewirtschaftung von Wäldern hinsichtlich ihrer Vielfachfunktionen weniger Bestandeskennwerte (z.B. mittleres Volumen, Stammzahl, Grundfläche), sondern vorrangig flächige Informationen, welche die strukturelle Diversität von Wäldern beschreiben. Die derzeit verfügbaren Forsteinrichtungsdaten stellen diese flächigen Informationen nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Meist werden für Bestände Kennwerte und verbale Situationsbeschreibungen bereitgestellt; eine thematische und räumliche Auflösung unterhalb der Bestandesebene ist meist nicht verfügbar.

Für die Planung forstbetrieblicher Maßnahmen im Rahmen der Holzproduktion hat sich diese Informationsgrundlage als ausreichend erwiesen. Für die Planung der Erholungs- und Schutzfunktion sind aber räumlich explizite Informationen erforderlich, deren Detaillierungsgrad unterhalb der Bestandesebene liegt und daher mit den verfügbaren Daten nicht erreicht werden kann.

Der Aufwand zur Erstellung detaillierter Bestandeskarten durch rein terrestrische Methoden übersteigt den Kostenrahmen der forstlichen Planung. Mit Hilfe der Fernerkundung sollen Möglichkeiten zur Verbesserung der flächigen Darstellung von Bestandesinformationen untersucht und somit kostengünstige Methoden zur Waldinventur weiterentwickelt werden.

Ein anderer Aspekt bei der Durchführung von Waldinventuren ist der steigende Bedarf an Informationen über Wälder für die nationale und internationale Forst- und Umweltpolitik, die Holzmarktpolitik und zur Erfüllung der Verpflichtungen, die im Rahmen internationaler Verträge, Programme und Initiativen (z.B. Klimaschutz, Pan-Europäischen Prozess zum Schutz der Wälder – Helsinki-Prozess, Zertifizierung, FFH-Richtlinien, Biotopkartierung etc.) eingegangen wurden. Andererseits werden die finanziellen Ressourcen zur Durchführung von Walderhebungsprogrammen immer knapper. Die Ergänzung der herkömmlichen Waldinventuren durch Fernerkundungsdaten kann dafür eine Lösung bieten, wie beispielsweise die Landesforstinventur (LFI) in der Schweiz zeigt, wo durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten die Kosten gesenkt wurden (BRASSEL et al. 1999, KÖHL & KELLER 2000).

An diesem Punkt setzt die hier vorgestellte Untersuchung an. Es soll eine Verfahrensalternative weiterentwickelt und verifiziert werden, die über die spektrale Information von Scannerdaten eine räumliche Interpolation von punktförmig erhobenen, terrestrischen Daten ermöglicht und somit eine kartenmäßige Darstellung der räumlichen Struktur durch die Kombination verschiedenster, terrestrisch erhobener Merkmale und aus Satellitendaten abgeleiteter Informationen gestattet. Die Kombination von terrestrischen Daten und Scannerdaten zur Erstellung detaillierter Bestandeskarten erfolgt über die so genannte kNN-Methode (MUIONEN & TOKKOLA 1990, TOMPPU 1991, 1993, 1997a, 1997b, FAZAKAS & NILSSON 1996, NILSSON 1997, MALTAMO & KANGAS 1998). Bei der kNN-Methode werden Referenzpixel ausgewählt, die mit terrestrischen Erhebungen zusammenfallen. Für ein Pixel ohne entsprechende terrestrische Erhebung werden aus der Menge der Referenzpixel die k-nächsten Nachbarn im spektralen Merkmalsraum mit Hilfe eines Distanzmaßes bestimmt. Für die ausgewählten k Referenzpixel werden die zugehörigen Werte der terrestrisch erhobenen Merkmale mit der Distanz im spektralen Merkmalsraum gewichtet und dem Pixel zugeordnet. Dies wird für jedes Pixel wiederholt, bis jedem Pixel ein Wert des Merkmals zugeordnet ist. Der so für alle Pixel im Untersuchungsgebiet abgeleitete Informationsgehalt kann als flächendeckende Karte visualisiert werden.

1.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Untersuchung ist mit Hilfe der kNN-Methode terrestrische Aufnahmen mit Fernerkundungsdaten zu kombinieren und die pixelweise Ausgabe der Ergebnisse in detaillierte Karten münden zu lassen. Um dieses Ziel zu erreichen wurde die für metrische Merkmale (z.B. *Grundfläche*) angewandte kNN-Methode erweitert und für die Anwendung mit kategorialen Daten (z.B. *Totholzvorkommen*, *Bestandesdichte*) weiterentwickelt. Für die umfangreichen Berechnungen sollte ein praxistaugliches Programm mit einer leichtverständlichen Bedienungsfläche programmiert werden, welches metrische und kategoriale Daten verarbeitet. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Erstellung von Karten für kategoriale Merkmale, insbesondere zur Beschreibung von Nicht-Produktions-Funktionen von Wäldern.

Die Methode soll für verschiedene Sensoren angewendet werden. Hierbei wurden Sensoren ausgewählt, die sich sowohl von ihrer spektralen wie auch ihrer räumlichen Auflösung unterscheiden. Die ausgewählten Landsat-Daten stammen von einem im operationalen Einsatz befindlichen System, welches einen festen Platz in der forstlichen Fernerkundung einnimmt. Der zweite verwendete Datensatz stammt von einer Befliegung mit einem hyperspektralen Sensor (HyMapTM), der im Rahmen des von der DLR und Dornier-Satellitensysteme geförderten Projektes *ProSmart*¹ (vgl. <http://www.infoterra-global.com/Prosmart1/homepage.htm>) bereitgestellt wurde. Diese Szenen repräsentieren Daten von Sensoren, die mit zukünftigen Fernerkundungssatelliten aufgenommen werden sollen. Sie bieten ein derzeitiges Optimum bei der Bereitstellung von spektralen und räumlichen Informationen. Der Vergleich der zwei Systeme zielt auf die Bestimmung der Genauigkeit der erstellten Karten in Abhängigkeit von der unterschiedlichen räumlichen und spektralen Auflösung.

Die kNN-Methode soll sowohl für mono- als auch für multitemporale Daten zum Einsatz kommen. Eine Fragestellung dabei ist, ob die Ausweitung der Methode auf einen multitemporalen Ansatz, indem Unterschiede der spektralen Signatur zu verschiedenen Zeitpunkten berücksichtigt werden, zu einer wesentlich differenzierteren Betrachtungsweise und zu höheren Genauigkeiten bei der kartenmäßigen Darstellung beitragen.

¹ (*Smart* = **S**ystematic **M**arket Development **A**pproach for **R**emote Sensing **T**echnologies; *Pro* = **P**roduct development for *Smart*)

Neben der Herleitung, Modifikation und Anwendung der kNN-Methode ist ein weiterer Schwerpunkt des Projektes die Verifizierung der hergeleiteten Karten. Hierzu werden Feldaufnahmen herangezogen und über Fehlerbudgets die Situation bestimmt, in denen die Methode zu Ergebnissen mit hohen Genauigkeiten führt.

1.2 Rahmen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik der Technischen Universität Dresden. Während der vergangenen fünf Jahre wurde am Lehrstuhl auf dem Gebiet der Fernerkundung ein Forschungsschwerpunkt aufgebaut. Neben der Waldkartierung mit optischen, multispektralen Satellitendaten wurde auch der Einsatz von Radarsystemen bei Waldinventuren untersucht, um Möglichkeiten zur kosteneffizienten Bereitstellung von Inventurdaten zu finden. Dies wird durch die Verkürzung der Inventurzeiträume z.B. aufgrund internationaler Verpflichtungen (Kyoto, PAN-Europäischer Prozess u.a.) immer wichtiger (HEUVELDOP et al. 1996, KÖHL & PÄIVINEN 1996).

Ausgangspunkt war das Forschungsprojekt mit dem Titel „Hyperspektraldaten zur Erfassung des Zustandes und der Entwicklung von Waldökosystemen“ (HEZEW), welches im Rahmen von ProSmart I von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Daimler Chrysler Aerospace gefördert wurde. Ziel des Smart-Programmes war die Entwicklung, der Bau und Betrieb marktorientierter SAR- und Hyperspektral-Satellitensysteme mit im zivilen Markt führender räumlicher und thematischer Auflösungsfähigkeit sowie die Vermarktung resultierender Ergebnisse und Dienste (RICKEN 2000). In diesem Zusammenhang wurden im Teilprojekt HEZEW zwei Technologiebeispiele auf den Gebieten der Forstlichen Produktion und der Waldökologie entwickelt. Das Ergebnis waren digitale Karten von Produktionsparametern und Landschaftsmaßzahlen, hergeleitet aus der Hyperspektraldatenauswertung. Der inventurstatistische Schwerpunkt des Projektes HEZEW lag auf der Kombination von Hyperspektraldaten mit terrestrisch erhobenen Informationen. Hierbei wurden vor allen stichprobenbasierte Methoden untersucht.

Da die Planung von Vielfachfunktionen von Wäldern in hohem Maße auf kleinflächige, georeferenzierte Informationen angewiesen ist, wurden im Projekt HEZEW die Möglichkeit der Kombination von terrestrischen Informationen und Hyperspektraldaten

zur Herleitung thematischer Karten untersucht. Die ersten Ergebnisse waren so überzeugend, dass die Idee der Kartierung forstlicher Merkmale mit Hilfe der kNN-Methode in einem weiteren Projekt verfolgt werden sollte. Daher wurde vom BMBF und der DLR ein Projekt mit dem Titel „Kombination von terrestrischen Aufnahmen und Fernerkundungsdaten mit Hilfe der kNN-Methode zur Kartierung von Waldökosystemen“ gefördert (FKZ 50 EE 0037). Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen dieses Projektes (HÄUSSLER et al. 2000).

Für die Anwendung der kNN-Methode werden umfangreiche terrestrische Daten benötigt. Dafür wurden terrestrische Daten im Rahmen folgender Projekte erhoben:

- ProSmart (Teilprojekt HEZEW)
- kNN
- MNTFR

Das von der Europäischen Union geförderte Forschungsprojekt mit dem Titel „Scale Dependent Monitoring of Non-Timber Forest Resources Based on Indicators Assessed in Various Data Sources“ (MNTFR), welches am Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik koordiniert wurde, befasste sich mit der Entwicklung effizienter Methoden zum Monitoring des Waldes. In diesen Rahmen wurden umfangreiche Feldaufnahmen durchgeführt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das Kapitel „Stand der Forschung“ gibt einen kurzen Überblick über die Entwicklung der Fernerkundung mit einer Übersicht über ausgewählte operational verfügbare Satelliten und den zugehörigen passiven und aktiven Sensoren, die für die Erderkundung eingesetzt werden. Es folgt ein Überblick über die Bedeutung der Satellitenfernerkundung für die Forstwirtschaft, dem sich eine Zusammenfassung über den Forschungsstand bei der Anwendung der kNN-Methode anschließt.

Im dritten Kapitel wird das Untersuchungsgebiet und die terrestrische Datengrundlage vorgestellt. Es folgt die Beschreibung der verwendeten digitalen Karten und der terrestrischen Datengrundlage, die auf verschiedenen Stichprobenverfahren basieren.

Die verwendeten Satellitendaten und die gesamte Vorverarbeitung werden im vierten Kapitel erläutert. Neben den radiometrischen und geometrischen Korrekturen liegen die Schwerpunkte auf der Beschreibung der Hauptkomponentenanalyse, der Bereitstellung eines Landschaftsindex und des multitemporalen Ansatzes. Die Vorverarbeitung der Satellitenszenen erfolgte mit dem Programm ERDAS IMAGINE.

Die Algorithmen der kNN-Methode für metrische sowie kategoriale Daten und deren Anwendung werden im fünften Kapitel beschrieben. Für den praktischen Einsatz der kNN-Methode wurde ein operational einsetzbares Programm erstellt. Dies ermöglicht auch einem Personenkreis, der mit der kNN-Methode nicht vertraut ist, deren schnellen Einsatz. Über die Integration des multitemporalen Ansatzes wird die kNN-Methode erweitert und eine Methode zur Validierung der Ergebnisse der kNN-Methode vorgestellt, die die Bootstrap-Methode (SACHS 1997, EFRON 1983, EFRON & TIBSHIRANI 1993, 1997) und den Root Mean Square Error (RMSE) (COCHRAN 1997) in ein Konzept zur Fehleranalyse integriert.

Im sechsten Kapitel werden die Methoden angewandt und die erzielten Ergebnisse mit Hilfe der Fehleranalyse überprüft. Für die Erstellung der Ergebnisse wurden die Merkmale *Grundfläche* und *Totholz* ausgewählt. Als Fernerkundungsdatenquellen wurden multispektrale (Landsat) und hyperspektrale Daten (HyMapTM) verwendet.

Das siebente Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und eine Diskussion über die operationale Anwendbarkeit der Methoden.

Im achten Kapitel folgen eine Darstellung des Erkenntnisgewinns und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf.

2 Stand der Forschung

2.1 Fernerkundung – Entwicklung und Sensoren

Der Begriff Fernerkundung ist auf den englischen Begriff *Remote Sensing* zurückzuführen. Dieser wurde in den Vereinigten Staaten in den Sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts eingeführt, als erste Aufnahmen der Erde aus dem Weltraum entstanden. „Heute versteht man unter Fernerkundung die Gewinnung von Informationen über Art und Eigenschaften entfernter Objekte.“ (KRAUS & SCHNEIDER 1988). Diese Definition schließt auch die flugzeuggestützten Aufnahmetechniken mit ein (LAUTNER 2001).

Mit dem Start des amerikanischen Satelliten *Explorer* am 7. August 1958 wurden erstmals Scannerdaten aufgenommen. Diese unterstanden der rein militärischen Kontrolle und wurden nicht für die zivile Nutzung bereitgestellt. Erst ab 1972 wurden satellitengestützte Erderkundungsdaten der Öffentlichkeit zugänglich (KELLENBERGER 1996). Mit dem Start des amerikanischen multispektralen Satelliten *Landsat-1* begann die zivile satellitengestützte Erderkundung. Das große Interesse von Seiten der Forscher, Politiker und Planer, diese Daten für die Erfassung, Kartierung und Überwachung der Erdoberfläche einzusetzen, führte zum Start einer Vielzahl von Satelliten mit verschiedenen Aufnahmesystemen. Neben der Luftbildkamera als traditionelles fotografisches Aufnahmesystem wurden zeilenweise abtastende, digitale Systeme (Scanner) entwickelt. Es wird zwischen passiven Systemen zur Aufnahme der von der Erdoberfläche reflektierten oder emittierten Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen und aktiven Fernerkundungssystemen, beispielsweise Radarsysteme, unterschieden, die Objekte künstlich beleuchten und die Rückstrahlung messen (vgl. u.a. Kraus & Schneider 1998, Albertz 1991, Richards 1999, Löffler 1994, Hildebrandt 1996). Eine Übersicht über ausgewählte operational verfügbare Satelliten und den zugehörigen passiven und aktiven Sensoren, die für die Erderkundung eingesetzt werden, sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1 Übersicht über die operational verfügbaren Satelliten, die für die Erkundung der Erdoberfläche eingesetzt werden (Quelle: nach Enviromental Remote Sensing Center 2003²)

Satellit	Betreiber	Start	Sensor	Typ	Kanäle	Auflösung[m]
Landsat-5	USA	1984	MSS	Multispektral	4	82
			TM	Multispektral	6	30
					1	120
SPOT-2	France	1990	HRV	Multispektral	3	20
				Panchromatisch	1	10
IRS-1B	Indien	1991	LISS-I	Multispektral	4	72,5
			LISS-II	Multispektral	4	36,25
ERS-1	ESA	1991	AMI	Radar	1	26
			ATSR	Multispektral	4	1000
RESURS-O1-3	Russland	1994	MSU-SK	Multispektral	4	170
					1	600
NOAA-14	USA	1994	AVHRR	Multispektral	5	1100
IRS-1C	Indien	1995	WiFS	Multispektral	2	188
			LISS-III	Multispektral	3	23
					1	70
Pan	Panchromatisch	1	5,8			
ERS-2	ESA	1995	AMI	Radar	1	26
			ATSR	Multispektral	4	1000
RADARSAT	Kanada	1995	SAR	Radar	1	9-100
OrbView-2 (SeaStar)	US/Orbimage	1997	SeaWiFS	Multispektral	8	1130
IRS-1D	Indien	1997	WiFS	Multispektral	2	188
			LISS-III	Multispektral	3	23
					1	70
Pan	Panchromatisch	1	5,8			
SPOT-4	Frankreich	1998	VI	Multispektral	4	1150
			HRV	Multispektral	4	20
					Panchromatisch	1
NOAA-15 (NOAA-K)	USA	1998	AVHRR	Multispektral	5	1100
Landsat-7	USA	1999	ETM+	Multispektral	6	30
				Panchromatisch	1	15
IRS-P4 (Oceansat)	Indien	1999	OCM	Multispektral	8	360
IKONOS	Space Imaging	1999	IKONOS	Multispektral	4	4
				Panchromatisch	1	1
CBERS-1	China/ Brasilien	1999	CCD	Multispektral	5	20
			IRMSS	Multispektral	3	80
					1	160
WFI	Multispektral	2	260			

² <http://www.ersc.wisc.edu/resources/EOSC.html>

Satellit	Betreiber	Start	Sensor	Typ	Kanäle	Auflösung[m]
Terra (EOS AM-1)	USA	1999	ASTER	Multispektral	14	15; 30; 90
			MISR	Multispektral	4	275
			MODIS	Multispektral	36	250;500;1000
NOAA-L	USA	2000	AVHRR	Multispektral	5	1100
EO-1	USA	2000	ALI	Panchromatisch	1	10
				Multispektral	9	30
			Hyperion	Hyperspektral	220	30
			LAC	Hyperspektral	256	250
EROS-A1	ImageSat International	2000	Panchromatisch	Panchromatisch	1	1,5
QuickBird	DigitalGlobe	2001	Multispektral	Multispektral	4	2,44
			Panchromatisch	Panchromatisch	1	0,61
MTI	USA	2001	MIT	Multispektral	15	5
Envisat-1	ESA	2001	ASAR	Radar	1	30; 150
			MERIS	Multispektral	15	0,61
Aqua (EOS PM-1)	USA	2002	MODIS	Multispektral	36	300; 1200
SPOT-5	Frankreich	2002	HRV	Multispektral	3	10
					1	20
				Panchromatisch	1	2,5; 5
NOAA-M	USA	2002	AVHRR	Multispektral	5	1100
ADEOS-II	Japan	2002	GLI	Multispektral	36	250-1000
OrbView-3	Orbimage	2003	OrbView	Multispektral	4	4
				Panchromatisch	2	1-2
CBERS-2	China/ Brasilien	2003	CCD	Multispektral	5	20
			IRMSS	Multispektral	3	80
					1	160
			WFI	Multispektral	2	260

Die Weiterentwicklung der Aufnahmesysteme führte zu einer zunehmenden Erhöhung der spektralen Auflösungen sowie der spektralen Abdeckung hin zur hyperspektralen Fernerkundung. Systeme, die im optischen Spektralbereich eine nahezu kontinuierliche spektrale Abdeckung sowie auch eine hohe spektrale Auflösung erreichen und somit über eine große Anzahl von Aufnahmekanälen verfügen, werden als Bildspektrometer oder Hyperspektralsensoren bezeichnet (vgl. GOETZ et al. 1985, GOETZ 1992, BALL 1995, CLARK 1999). Ist in der aufgenommenen Szene die Anzahl der Spektralbänder größer als die Zahl der spektral zu unterscheidenden Klassen werden die Bilddaten als hyperspektral bezeichnet.

Anfang der achtziger Jahre wurden die ersten Bildspektrometersysteme entwickelt, wie beispielsweise der Fluorescence Line Imager. Er wurde zur flächendeckenden Kartierung der Chlorophyll Fluoreszenz von einem amerikanisch-kanadischen Team verwendet (STANZ 1998). In den folgenden Jahren wurde eine ganze Reihe neuer Bildspektrometer realisiert, wozu auch der HyMapTM-Sensor gehört. Er wurde von der australischen Firma Integrated Spectronics entwickelt und basiert auf einem flugzeuggetragenen System. Eine im September 1998 aufgenommene Szene vom Tharandter Wald kam als Fernerkundungsdatenquelle in dieser Untersuchung zum Einsatz.

Die aufwendige technische Realisierung beim Einsatz von hyperspektralen Scannern und vor allem die große anfallende Datenmenge bereitete beträchtliche Schwierigkeiten, den Einsatz auf satellitengestützte Systeme zu übertragen (vgl. RAST 1991). Erst in jüngster Zeit ist es neben einzelnen kurzzeitigen Weltraummissionen zum Einsatz von Satellitensystemen mit Sensoren gekommen, die über eine hohe Anzahl von Aufnahmekanälen für engbandige Wellenlängenbereiche verfügen. Allerdings ist die erreichte geometrische Auflösung niedrig. Ein Vertreter ist der deutsche Sensor MOS-B mit 13 Aufnahmekanälen und einer geometrischen Auflösung von 520 Metern. Er wurde im März 1996 mit dem indischen Satelliten IRS-P3 gestartet. Zwei weitere Aufnahmesysteme mit der Bezeichnung MODIS und ASTER wurden 1999 mit dem amerikanischen Terra-Satelliten EOS AM-1 in die Umlaufbahn gebracht. MODIS-Daten verfügen über 36 Spektralkanäle und einer maximalen Auflösung von 250 m und Daten vom Sensor ASTER erreichen eine Auflösung von 15 m bei Bereitstellung von 14 Kanälen. Allerdings werden diese Sensoren mit einer spektralen Abdeckung von 10 bis 40 Aufnahmekanälen nicht als hyperspektral bezeichnet (vgl. RICHTER & LÜDEKER 1998).

Hyperspektrale Sensoren im engeren Sinne, wie beispielsweise der flugzeuggetragene Scanner HyMapTM, zeichnen sich durch eine kontinuierliche Abdeckung des reflektiven Spektrums in einem Bereich von ca. 0,4 bis 2,5 μm (sichtbares Licht, nahes und mittleres Infrarot) bei gleichzeitiger hoher spektraler Auflösung aus. Durch die kontinuierliche Abdeckung verfügen solche Systeme in der Regel über 100 bis 200 Aufnahmekanäle. Die verwendeten HyMapTM-Daten stellen 128 Kanäle im Spektralbereich von 400-2500 nm bereit. Im November 2000 erfolgte der Start des NASA-Satelliten Earth Observing-1 (EO-1), der mit den hyperspektralen Sensoren Hyperon und LAC ausgestattet ist. Damit stehen erstmals hyperspektrale Daten aus dem Orbit zur Verfügung. Der Hyperon-Sensor hat im

Wellenlängenbereich von 0,4 bis 2,5 μm 220 Aufnahmekanäle mit einer Auflösung von 30 Metern und der LAC-Sensor 256 Kanäle bei 250 m Auflösung (YOUNG 2003, CARMEN & SPECIALE 2003). Für die nächsten Jahre sind zwei weitere hyperspektrale Systeme geplant. Zum einen der amerikanische Satellit NEMO mit dem Sensor AVIRIS und zum anderen das australische System ARIES. Kanalanzahl und Auflösung der beiden Sensoren sowie weitere geplante Satellitensysteme sind der Tabelle 2-2 zu entnehmen (BOWLES et al. 1998, ERSC 2003).

Tabelle 2-2 Übersicht über geplante Satelliten für die Erderkundung (Quelle: nach *Environmental Remote Sensing Center 2003*³)

Satellit	Betreiber	Geplanter Start	Sensor	Typ	Kanäle	Auflösung [m]
IRS-P5 (Cartosat)	Indien/USA	2004	Pan	Panchromatisch	1	2,5
Resource21	Resource21	2004/05	Multispektral	Multispektral	5	10; 20
			Cirrus	Multispektral	1	100+
NEMO (HRST)	USA	2004	AVIRIS	Hyperspektral	210	30
			PIC	Panchromatisch	1	5
IRS-P6	Indien/USA	2004/05	LISS IV	Multispektral	7	6; 23,5
			AWiFS	Multispektral	3	80
ARIES	Australien	2004	ARIES-1	Panchromatisch	1	30
				Hyperspektral	96	10
EROS-B1	ImageSat International	2004	Pan-chromatisch	Panchromatisch	1	0,82
NOAA-N	USA	2004	AVHRR	Multispektral	5	1100
ALOS	Japan	2004	VSAR	Radar	1	10
			AVNIR-2	Multispektral	4	10
				Panchromatisch	1	2,5
Radarsat-2	Kanada	2004	SAR	Radar	1	3+
TerraSAR-X	Deutschland	2006	SAR	Radar	1	1

2.2 Bedeutung der Fernerkundung für die Forstwirtschaft

Ein grundsätzlicher Vorteil der Fernerkundung ist die schnelle und objektive Erfassung großer Flächen mit verhältnismäßig geringem Aufwand. Zu diesem Zweck wurden schon Anfang des 20. Jahrhunderts Luftbilder zur Kartierung von Waldgebieten, als Hilfsmittel zur Forsteinrichtung und zur Erhebung von Bestandesdaten eingesetzt (ALBERTZ 1991, HILDEBRANDT 1996). Für heutige Auswertungen kommen vorwiegend

³ <http://www.ersc.wisc.edu/resources/EOSF.html>

Colorinfrarotluftbilder (CIR) mit einem Maßstab von mindestens 1:15000 zum Einsatz. Mit diesen Bildern ist es dem Nutzer möglich, bestimmte Bestandesparameter auf der Grundlage von ausführlichen und vereinheitlichten Interpretationsschlüsseln zu bestimmen. So können unter bestimmten Aufnahmevoraussetzungen beispielsweise die Baumhöhen und mit vorgefertigten Dichteskalen der Beschirmungsgrad ermittelt werden (ALBERTZ 1991, LAUTNER 2001). Von Seiten der Forstwirtschaft wird an den Luftbildern vor allem die hohe geometrische Auflösung positiv bewertet. Allerdings sind die Aufnahmekosten relativ hoch und die Flächenabdeckung klein. Deshalb haben sich operationale Anwendungen auf Basis von Satellitendaten zur Abschätzung von Bestandesdaten etabliert. Beispielsweise werden in Finnland für die Nationale Waldinventur Landsat-TM-Daten in Verbindung mit terrestrischen Aufnahmen verwendet (TOMPPU 1991, 1993, 1997a, 1997b).

Ein anderes Anwendungsgebiet der Fernerkundung ist die Waldschadenserfassung. Dabei können flächige Schädigungen, wie beispielsweise Waldbrand oder Windwurf leicht und sicher erfasst werden. Probleme treten dort auf, wo Schädigungen durch eine differenzierte Interpretation von Veränderungen an Kronenstruktur und Astsystemen erfasst werden müssen. Solche Schadereignisse sind nur mit Einschränkungen erfassbar (ALBERTZ 1991). Für das Fichtel- und Erzgebirge wurde beispielsweise eine flächendeckende Waldzustandskarte auf Grundlage von Landsat-TM-Daten erstellt, die für geschlossene Fichtenflächen vier Schadklassen unterscheidet (REUTHER et al. 1996).

Die Verpflichtungen im Rahmen der Agenda 21 sowie der Deklaration von Helsinki zum Schutz der Wälder in Europa führt zur Erhebung von Informationen zur Quantifizierung der Schutz- und Erholungsfunktion sowie zur ökologischen Situation von Wäldern (vgl. HEUVELDOP et al. 1996). Von zentraler Bedeutung sind Daten zur Naturnähe und Stabilität von Waldökosystemen sowie zur Beziehung des Waldes zu anderen Landschaftselementen. Die Erfassung solcher Informationen eröffnet ein weiteres Anwendungsfeld für die Fernerkundung. Beispielsweise wurden erste landschaftsökologische Parameter (z.B. Bestockungsdichte) erfasst, wobei auch hier die Klassifikation von Landschaftsräumen dominiert. Die auftretenden Probleme bei der Genauigkeit und der Erfassbarkeit sind vergleichbar mit denen der Waldklassifikation (vgl. BODMER 1993, KELLENBERGER 1996, HOLMGREN & THURESSON 1998).

Nationale Forstinventuren streben eine Überwachung und die strategische Planung von großen Waldflächen an. Dabei wird eine große Anzahl von terrestrischen Proben erhoben. Durch den Einsatz der Fernerkundung wird erwartet, dass sich der Stichprobenumfang verringern lässt und dadurch eine Kostenersparnis erreicht wird (RANNEBY et al. 1987, THOMAS 1990, FAZAKAS & NILSSON 1996). Für großräumige Waldinventuren, wie beispielsweise der Landesforstinventur in der Schweiz oder der Bundeswaldinventur (BWI), wurden zweiphasige Inventurverfahren entwickelt, die ein erhebliches Potential an Einsparungen bei den terrestrischen Erhebungen und den damit verbundenen Kosten ermöglichen (DAHM et al. 1997, KÖHL 1994).

Ein weiterer Aspekt ist die multitemporale Anwendung von Fernerkundungsdaten. Grundsätzlich werden mit Satellitenszenen Ist-Zustandsaufnahmen erstellt. Durch zwei oder mehrere Aufnahmezeitpunkte und geeignete Interpretationen lässt sich die Dynamik der beobachteten Erdoberfläche mit ihren Veränderungen aufzeigen (BODMER 1993).

Die inhaltliche Tiefe der Auswertung von Satellitendaten im forstlichen Bereich erfüllt nicht in allen Fällen die Erwartungshaltung der Anwender. Oft sind die mit den derzeit verfügbaren multispektralen Satellitendaten trennbaren Klassen, wie beispielsweise Wald und Nichtwald oder Laub-, Nadel- und Mischwald, nicht detailliert genug (vgl. KELLENBERGER 1996, BODMER 1993). Trotz intensiver Forschungsaktivitäten hat sich die Fernerkundung nicht als ein weit verbreitetes Werkzeug zur Datenerhebung im Rahmen der forstlichen Planung durchsetzen können (HOLMGREN & THURESSON 1998). Von der forstlichen Praxis werden u.a. die folgenden Argumente gegen den Einsatz der operational verfügbaren Satellitensensoren angeführt (KÖHL 2000):

- Die Unterteilung von Waldflächen in die Klassen *Laubholz/ Nadelholz/ gemischt* ist für die forstliche Planung unzureichend.
- Auf nationaler und regionaler Ebene werden Walddefinitionen verwendet, die auf quantitativen Kriterien wie Überschirmungsgrad oder Waldbreite beruhen. Es wird bezweifelt, ob diese Definitionen mit der räumlichen und thematischen Auflösung der verfügbaren Sensoren reproduziert werden können.
- Für die operationale Planung sind geokodierte Merkmale wie *Baumartenverteilung, Schichtaufbau, Totholzanteil* oder *Bestandesalter* notwendig, die mit Satellitendaten nicht bereitgestellt werden können.

- Die forstliche Produktion bezieht in ihre Planung die Risiken der biologischen Produktion (z.B. Sturm, Feuer, Frost, biotische Schäden) in Form von Toleranzwerten der prognostizierten Entwicklung ein. Dennoch scheint die Genauigkeit der Klassifikation von Satellitendaten als zu gering für einen operationalen Einsatz.
- Waldverteilungskarten, die mit Hilfe von Satellitendaten hergestellt wurden, sind zu ungenau. Besonders in Westeuropa sind Forstkarten mit einer höheren kartographischen Genauigkeit vorhanden.
- Mit Hilfe von Luftbildern oder Satellitendaten kann nur ein limitierter Satz von Merkmalen erfasst werden, der bei weitem nicht alle Informationsbedürfnisse einer Planung im Sinne der nachhaltigen Sicherung der Vielfachfunktionen von Wäldern abdeckt.

Dabei ist aber zu beachten, dass nicht alle existenten oder zukünftig denkbaren Parameter zur Beschreibung des Waldes mit fernerkundlichen Methoden erhoben werden können. Ziel muss es sein, die Fernerkundung auf möglichst effiziente Weise mit terrestrischen Erhebungen zu kombinieren (vgl. BOWDEN et al. 1979, KÖHL 1994). Die Entwicklung hin zu Hyperspektralsensoren und den dazugehörigen Analyseverfahren bietet die Möglichkeit, vor allem hinsichtlich der inhaltlichen Auflösung und Genauigkeit, diesen Sprung zu schaffen. Befliegungskampagnen mit hyperspektralen Systemen nähern sich der geforderten räumlichen wie spektralen Auflösung an. Der Einsatz hyperspektraler Sensoren in Satellitensystemen wird voraussichtlich in den nächsten Jahren den gleichen Entwicklungsstand erreichen (RIECKEN 2000).

Die Modifizierung und Entwicklung von neuen Methoden zur Auswertung von Satellitendaten und die Bereitstellung neuer Sensoren mit höheren räumlichen wie spektralen Auflösungen führt zu genaueren Ergebnissen und neuen Anwendungen im Bereich der Forstwirtschaft. Daneben definiert der Wandel des Informationsbedarfes eine wesentlich breitere Palette von Daten, die nicht allein durch Feldaufnahmen und den damit verbundenen hohen Kosten zu erbringen sind.

2.3 Übersicht über die kNN-Methode

Die k-nächsten-Nachbarn-Methode (kNN-Methode) ist ein Verfahren des Maschinellen Lernens, wobei als Lernen jede Änderung der Reaktionsweise eines Systems in Richtung eines optimalen Verhaltens verstanden wird (NIEMANN 1983). Dieses optimale Verhalten wird durch eine Zielfunktion beschrieben, die durch eine gegebene endliche Stichprobe möglichst gut approximiert werden soll (MITCHELL 1997). Daher kann das Lernen als Suche nach der Hypothese, die die Zielfunktion am besten beschreibt, aufgefasst werden (HESSENMÖLLER 2002). Wird die kNN-Methode zur Klassifizierung verwendet, beschreibt OELLIEN (2002) sie wie folgt: „Die k-nächsten Nachbarn Methode ist ein Klassifizierungsverfahren bei dem für einen gegebenen Einzelpunkt der Datenwert gesucht wird, der die größte Ähnlichkeit zu einem bereits klassifizierten Datenpunkt aufweist. Dieser so genannte nächste Nachbar wird dabei mit Hilfe von Distanz- und Kombinationsfunktionen (in der Regel *Euklidische* Distanz) ermittelt. Das unbekannte Datenobjekt wird letztendlich derjenigen Klasse zugeordnet, die die höchste Anzahl an ähnlichen bzw. nächsten Nachbarn enthält“ (vgl. Abbildung 2-1).

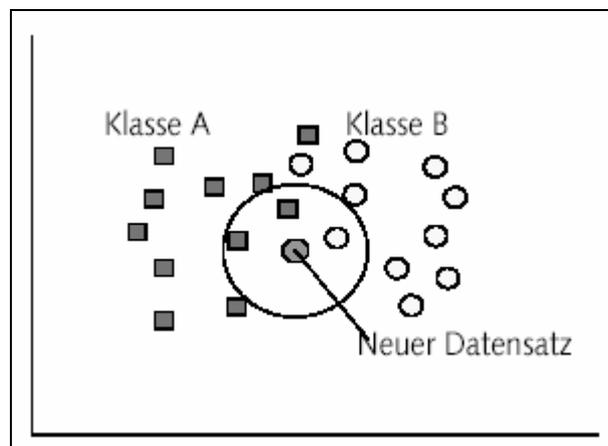


Abbildung 2-1 Bei Auswahl der 3-nächsten Nachbarn in Bezug auf die räumliche Distanz wird der neue Datensatz der Klasse A zugeordnet (Quelle: HINKELMANN 2001).

Bei der Auswertung von Satellitendaten, wie in dieser Untersuchung durchgeführt, werden mit Hilfe der kNN-Methode Referenzpixel ausgewählt, die mit terrestrischen Erhebungen übereinstimmen. Für ein Pixel ohne entsprechende terrestrische Informationen werden aus der Menge der Referenzpixel die k-nächsten Nachbarn im spektralen Merkmalsraum mit Hilfe der euklidischen Distanz bestimmt. Für die ausgewählten k Referenzpixel werden die

zugehörigen Werte der terrestrisch erhobenen Merkmale mit der Distanz im spektralen Merkmalsraum gewichtet und dem Pixel zugeordnet. Dies wird für jedes Pixel wiederholt, bis jedem Pixel der Szene ein Wert des Merkmals zugeordnet ist.

Die Klassifizierung von Bilddaten in der Fernerkundung ist nur ein Beispiel für die Anwendung der kNN-Methode. Eine Vielzahl von Objekten in verschiedenen Fachgebieten können mit Hilfe der kNN-Methode klassifiziert werden. Beispielsweise wird in der Medizin die kNN-Klassifizierung zur Auswertung von MRI-Daten (Magnetic resonance imaging data) und biochemische Substanzen eingesetzt (WARFIELD 1996, QI 2002). Auf dem Fachgebiet der Chemie werden chemische Verbindungen mit Hilfe der kNN-Methode analysiert (DOWNS & BARNARD 2001) und in der Informatik Datenbankabfragen, wie beispielsweise die Suche nach Bildern, Videos, Sprache und Dokumenten, realisiert (vgl. DE VRIES et al. 2002, TUNCEL & ROSE 2002). Ein recht neues Anwendungsgebiet ist die künstliche Intelligenz, bei dem das beispielbasierende Lernen mit der kNN-Methode verwirklicht wird (vgl. DUCH & GRUDZINSKI 1999). Einen ausführlichen Überblick über die k-nächsten-Nachbarn-Methode gibt HESSENMÖLLER (2002).

Die Vorteile der kNN-Modelle gegenüber funktionellen, auf empirischen Parametern beruhenden Verfahren liegt in der Tatsache, dass alle zur Verfügung stehenden Beobachtungen in der Schätzung des fehlenden Merkmals direkt berücksichtigt werden. Nachteilig zeigt sich allerdings der enorm hohe Rechenaufwand und die mangelnde Extrapolationsfähigkeit des Ansatzes (HESSENMÖLLER & ELSSENHANS 2002).

In der Forstwissenschaft wird die kNN-Methode zur Klassifizierung von Beständen eingesetzt. Im Zusammenhang mit Forstinventuren wurde sie zur Kombination von Satellitendaten und terrestrischen Erhebungen erstmals von KILKKI & PÄIVINEN (1986) beschrieben. TOMPPU (1991, 1993, 1997a, 1997b) entwickelte die kNN-Methode weiter und führte sie in die finnische nationale Forstinventur ein. Dort wird die kNN-Methode zur Herleitung von Resultaten für Verwaltungseinheiten (Forestry Board Districts) verwendet, indem Landsat-TM-Daten mit den terrestrisch erhobenen Daten der finnischen nationalen Forstinventur kombiniert werden. Des Weiteren wurde die Methode im Rahmen der Landeswaldinventur Nordrhein-Westfalen 1997 erprobt (TOMPPU & PEKKARINEN, 1997). Die kNN-Methode wurde ursprünglich zur Herleitung von Karten für metrische Daten entwickelt. Da kategoriale Daten keine Mittelwertbildung erlauben, wurde die kNN-

Methode im Rahmen des ProSmart-Projektes an der TU Dresden für die Anwendung mit kategoriale Daten erweitert (KÖHL et al. 2000).

Bei der Anwendung der kNN-Methode ist die Anzahl der k-nächsten Nachbarn ein wichtiges Auswahlkriterium. Durch die Auswahl verschiedener k-Werte und der anschließenden Fehlerrechnung wird ein optimaler k-Wert bei einem minimalen Fehler bestimmt. Für die Fehlerrechnung wird der RMSE (Root Mean Square Error) eingesetzt. FRANCO-LOPEZ et al. (2001) fanden unter Verwendung von Landsat-Daten und Auswahl neun nächster Nachbarn einen minimalen RMSE, der sich durch eine weitere Erhöhung des k-Wertes nur noch um 0,5 % verändert. Dieses Resultat stimmt mit den Ergebnissen anderer Autoren, welche einen minimalen RMSE bei 10 bis 15 nächsten Nachbarn fanden, überein (NILSSON 1997, TOKOLA et al. 1996, TOMPPU 1996).

Die Auswahl der nächsten Nachbarn erfolgt mit Hilfe eines Distanzmaßes. FRANCO-LOPEZ et al. (2001) und NILSSON (1997) stellten die *Mahalanobis-* und *Euklidische-Distanz* bei ihren Berechnungen gegenüber und erzielten sowohl für die *Grundfläche* als auch für das *Volumen* mit Hilfe der *Euklidische-Distanz* einen 5 % (alle k-Werte) geringeren RMSE. STÜMER (2002) setzte bei seinen Berechnungen die *Minkowski-r-Distanz* ein, die eine Generalisierung der *Euklidischen-Distanz* darstellt. Bei der *Minkowski-r-Distanz* wird der Exponent 2 (bzw. $\frac{1}{2}$) durch den Exponent r (bzw. $1/r$) ersetzt, mit deren Hilfe die spektralen Differenzen der einzelnen Kanäle unterschiedlich gewichtet werden können (vgl. Kapitel 5.1). Ob mit der *Minkowski-r-Distanz* eine weitere Minimierung des RMSE möglich ist, soll die Fehlerrechnung in dieser Untersuchung zeigen.

Um Kanäle mit einer großen Variabilität in der Rückstrahlung und den damit verbundenen Einfluss auf die Unterscheidung von Merkmalsklassen stärker zu gewichten, wurde von FRANCO-LOPEZ et al. (2001) in der *Euklidischen-Distanzformel* der Koeffizient a_j für die Gewichtung der Kanäle eingefügt (vgl. Kapitel 5.1). Durch den Einsatz des Wichtungskoeffizienten, den sie mit Hilfe der *downhill simplex optimisation method* ermittelt haben, erzielten sie bei der *Grundfläche* eine Reduktion des RMSE um 9 % von 9,4 auf 8,4 m²/ha.

Die Distanzwerte der nächsten Nachbarn spiegeln die Unterschiede zwischen den spektralen Informationen wieder, die mit Hilfe einer Wichtungsfunktion entsprechend der spektralen Distanz gewichtet werden (vgl. Kapitel 5.1). MALTAMO und KANGAS (1998)

fürten in der Wichtungsfunktion einen Exponenten t ein, der die Gewichtung der Distanz beeinflusst. Durch Einsetzen verschiedener t -Werte erhielten sie in ihrer Untersuchung einen optimalen t -Wert von 4,8 (k-nn empirical), der den Fehler des *Vorrats* minimiert. Ihre Untersuchungen wendeten die kNN-Methode auf einen Kiefernbestand an, der sich im zentralen und östlichen Teil Finnlands erstreckt. Auf einer Fläche von 0,3 ha legten sie 472 Stichproben und erhielten für das *Volumen* einen %RMSE von 9,46 %.

Eine von TOKOLA et al. (1996) durchgeführte Untersuchung mit Landsat-5-Daten und einer Probendichte von 0,00214 Plots pro Hektar erhält nach Auswertung der kNN-Berechnungen für das *Volumen* einen %RMSE von 60 %. Diesen hohen Fehlerwert führen sie auf die geringe Anzahl von Proben pro Hektar zurück. Eine weitere Untersuchung, durchgeführt von FRANCO-LOPEZ et al. (2001), erhält für die *Grundfläche* einen %RMSE von 45 %. Die Berechnungen basieren auf Landsat-TM-5-Daten und terrestrische Daten von der fünften Forstinventur in Minnesota (USA), die von 1986 bis 1991 durchgeführt wurde. Im Rahmen der Inventur wurden 2582 Proben erhoben, dies entspricht einem Durchschnitt von 0,4047 Proben pro Hektar. Bei der Durchführung der kNN-Berechnungen verfolgten FRANCO-LOPEZ et al. einen multitemporalen Ansatz, in dem sie drei Landsat-TM-5-Szenen von verschiedenen Zeitpunkten eines Jahres kombinierten. Die kNN-Schätzung der Grundfläche erreicht für die multitemporale Szene einen niedrigeren %RMSE als die jeweils einzelnen Szenen.

Tabelle 2-3 Übereinstimmung zwischen Forstlichen Merkmalen und der gemessenen spektralen Reflexion auf Pixelebene. Bestimmtheitsmaß der Regression in Gruppen eingeteilt: 0,00-0,05=[-]; 0,05-0,20=[0]; 0,20-1,00=[+]

Forstl. Merkmale	Schweden	Finnland	Deutschland	Italien	Maximales Bestimmtheitsmaß
Volumen	+	+	+	+	0.63
Grundfläche	+	+	+	+	0.58
Holzige Pflanzen	0	0	0	+	0.39
Stammzahl	-	0	-	+	0.37
Stehendes Totholz	+	-	0	-	0.33
Organische Auflage	0	0	+	0	0.25
Beerensträucher	0	0	-	+	0.24
Krautige Pflanzen	-	0	-	-	0.18
Sträucher	0	0	0	-	0.12
Liegendes Totholz	-	0	0	-	0.07
Hangneigung	-	0	-	-	0.05

Nach TOMPPÖ (1993) können durch die kNN-Methode alle Merkmale, die auf terrestrischen Proben erfasst werden, generalisiert und auf die einzelnen Pixel bezogen werden. Dies erscheint jedoch recht optimistisch, da die terrestrisch erfassten Merkmale mit der spektralen Reflexion der betreffenden Waldformation korrespondieren müssen. Im Rahmen des MNTFR-Projektes wurden Forstliche Merkmale in Beziehung zur Reflexion mit Hilfe einer Regression untersucht (KÖHL et al. in Vorbereitung). Dies erfolgte auf vier Versuchsgebieten, die in den Ländern der Projektpartner (Finnland, Schweden, Deutschland und Italien) angesiedelt sind. Als Fernerkundungsdatenquellen kamen Landsat-TM-5- (Finnland, Deutschland und Italien) und SPOT-Daten (Schweden) zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst und geben einen Überblick über Forstliche Merkmale, die sehr gut (*Volumen, Grundfläche*) oder nur bedingt (*Liegendes Totholz, Hangneigung*) mit der spektralen Reflexion korrelieren.

3 Untersuchungsgebiet und terrestrische Aufnahmen

3.1 Untersuchungsgebiet Tharandter Wald

Der Tharandter Wald liegt ca. 15 km südwestlich von Dresden (vgl. Abbildung 3-1). Er bildet in den unteren Lagen der Nordabdachung des Erzgebirges ein geschlossenes Waldgebiet von ca. 6000 ha und ist durch überwiegend sanftwellige Geländeformen zwischen 350 und 400 Meter über NN gekennzeichnet. Die große zusammenhängende Waldfläche, das moderate Relief und die strukturreichen Waldformationen prädestinieren den Tharandter Wald als Untersuchungsgebiet für die Forstliche Fernerkundung.

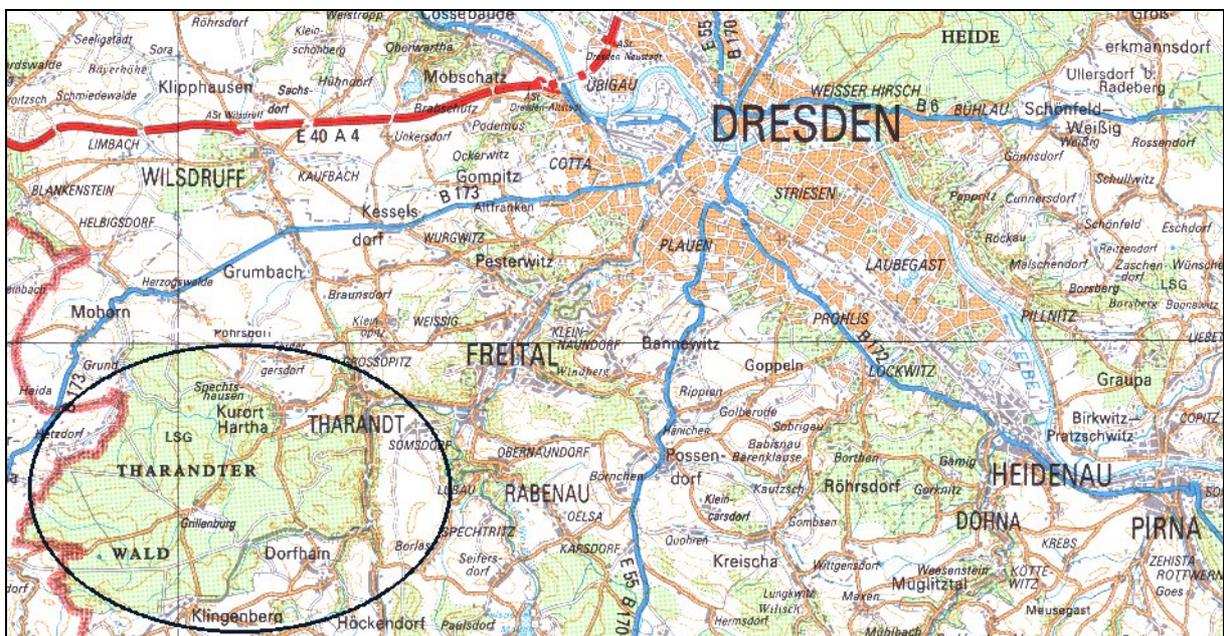


Abbildung 3-1 Lage des Tharandter Waldes

Der Tharandter Wald befindet sich im Übergangsbereich vom maritimen zum kontinentalen Klima (PETZEL 1978). Für die Klimastation *Wildacker* im Tharandter Wald wurde ein mittlerer Jahresniederschlag von 820 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 7,6° Celsius gemessen (vgl. Abbildung 3-2). Der mittlere Niederschlag in der Vegetationsperiode (Mai bis August) beträgt ca. 300 mm. Regional können im Tharandter Wald beträchtliche Abweichungen von normalen Klimaverhältnissen auftreten, so bilden sich viele reliefbedingte Klimate aus. Der Tharandter Wald wird den unteren Berglagen mit feuchten Klimaverhältnissen zugeordnet.

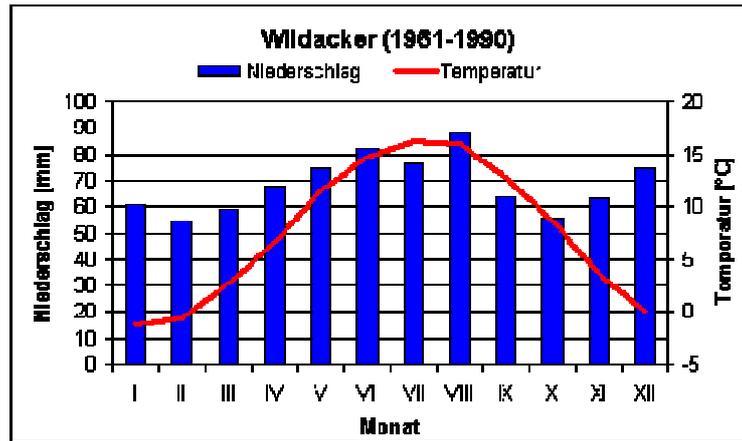


Abbildung 3-2 Niederschlagswerte und Temperatur von der Klimastation „Wildacker“ im Tharandter Wald (Quelle: EICHELMANN 2002)

Die natürlichen Vegetation des Tharandter Waldes war im kollinen Bereich ein Traubeneichen Mischwald und im montanen Bereich ein Hainsimsen-Eichen-Buchenwald. Eine natürliche Strauchschicht fehlte. Heute finden wir vorwiegend Reinbestände von Fichte und Kiefer mit Mischungsanteilen vor. Dabei nimmt die Fichte (*Picea abies*) einen prozentualen Flächenanteil von 66 % und die Kiefer (*Pinus sylvestris*) von 15 % ein (vgl. Abbildung 3-3).

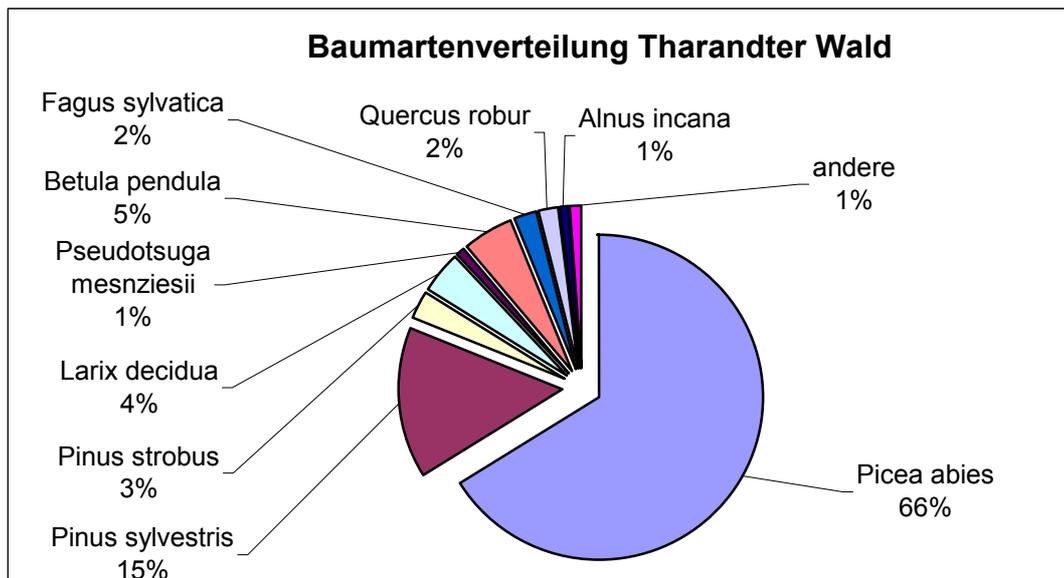


Abbildung 3-3 Die Baumartenverteilung im Tharandter Wald (Quelle: MNTFR-Endbericht 2002)

Es wechseln sich monotone Rheinbestände mit horizontaler und vertikaler Homogenität mit Mischbeständen ab, die sich durch ihre Artenvielfalt und einer vielfältigen räumlichen Struktur auszeichnen. Durch umfangreiche Waldumbaumaßnahmen hin zu natürlichen Mischwäldern nimmt der Anteil der Reinbestände ab. Umso wichtiger ist es, umfangreiche Informationen über Mischbestände mit ihrer strukturellen Vielfalt zu erheben. In dieser Arbeit soll dies mit Hilfe der Fernerkundung und der Verknüpfung mit terrestrischen Daten über die kNN-Methode erfolgen.

3.2 Beschreibung der Testgebiete

Es wurden zwei Testgebiete im zentralen Teil des Tharandter Waldes festgelegt und mit Testgebiet I und II bezeichnet (vgl. Abbildung 3-4).

Das Testgebiet I, welches für die Berechnung der kNN-Karten und für die Fehleranalyse herangezogen wurde, hat eine Ost-West-Ausdehnung von 2 km und eine Nord-Süd-Ausdehnung von 2,5 km. Die Gauß-Krüger-Koordinaten der Eckpunkte sind in der Tabelle 3-1 zu finden. Das Gebiet umfasst eine Fläche von 500 ha und erstreckt sich zwischen 330 m und 405 m über NN.

Um die operationale Anwendbarkeit der kNN-Methode für produktionsspezifische sowie ökologische Merkmale zu überprüfen (in dieser Arbeit wurden beispielhaft die Merkmale *Grundfläche* und *Totholz* verwendet), wurde eine Waldfläche als Testgebiet ausgewählt, die sich durch eine horizontale und vertikale Diversität auszeichnet. Ebenfalls berücksichtigt wurde, dass eine möglichst große Anzahl der aufgenommenen terrestrischen Probepunkte im Testgebiet liegen und die Hyperspektraldaten, die im Rahmen des ProSmart-Projektes erhoben wurden, die Fläche abdecken.

Für das Bootstrapping-Verfahren wurde ein zweites Testgebiet festgelegt (Testgebiet II), welches sich nur durch die größere Nord-Süd-Ausdehnung vom ersten unterscheidet. Es hat eine Größe von 2,0 x 5,0 km und umschließt eine Fläche von 1000 ha (vgl. Abbildung 3-4 und Tabelle 3-1). Die vor allem größere südliche Ausdehnung wurde gewählt, um Landschaftsformen wie Seen und Wiesen, wie sie um die Ortschaft Grillenburg zu finden sind, bei dem Bootstrap-Verfahren zu berücksichtigen und damit ihren Einfluss auf die kNN-Ergebnisse zu überprüfen.

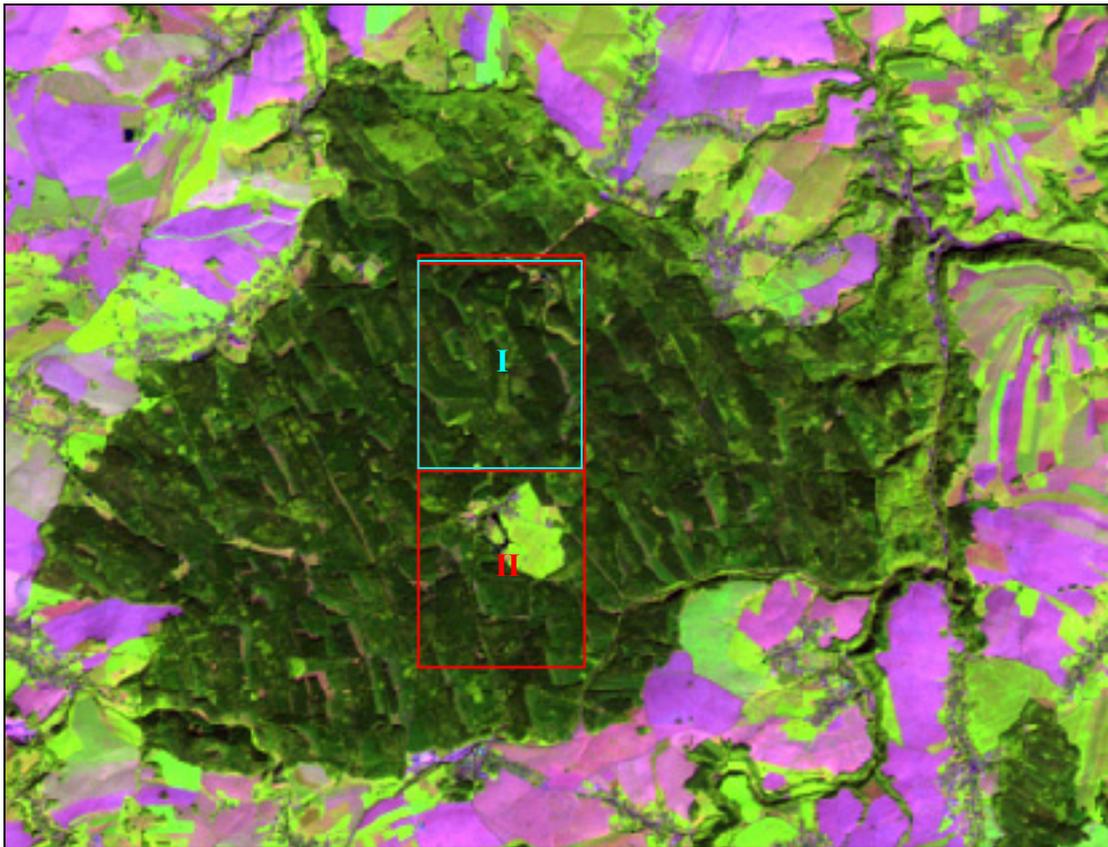


Abbildung 3-4 Landsat-7-Szene vom September 2000 (Kanäle rot: 5, grün: 4, blau: 3) mit der Lage der Testgebiete I (blau) und II (rot) im Tharandter Wald.

Tabelle 3-1 Gauß-Krüger-Koordinaten der Eckpunkte der Testgebiete I und II im Tharandter Wald

Testgebiet I	NW	NO	SO	SW
Rechtswert	5394300	5396300	5396300	5394300
Hochwert	5647900	5650400	5650400	5647900
Testgebiet II	NW	NO	SO	SW
Rechtswert	5394300	5396300	5396300	5394300
Hochwert	5650500	5650500	5645500	5645500

3.3 Digitale Karten

Für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Feldaufnahmen, für die Georeferenzierung sowie der Darstellung der Ergebnisse wurden digitale Karten vom Tharandter Wald verwendet (vgl. Tabelle 3-2). Die Bereitstellung der Karten erfolgte durch das Landesvermessungsamt Sachsen. Mit Hilfe von ARC VIEW konnten diese Daten aufbereitet und visualisiert werden. Abbildung 3-5 zeigt einen mit ARC VIEW bereitgestellten Kartenausschnitt vom Tharandter Wald.

Tabelle 3-2 Angaben zu den verwendeten digitalen topographischen Karten des Landesvermessungsamts Sachsen.

Datenbeschreibung	Rasterdaten der TK 10
Räumliche Ausdehnung (Bezeichnung Kartenblätter)	5047-NW, -SW, -NO, -SO 5046-NO, -SO
Aktualitätsstand	1996-1998
Genutzte Kartenelemente (Objekte)	Vollständig (4 Ebenen)

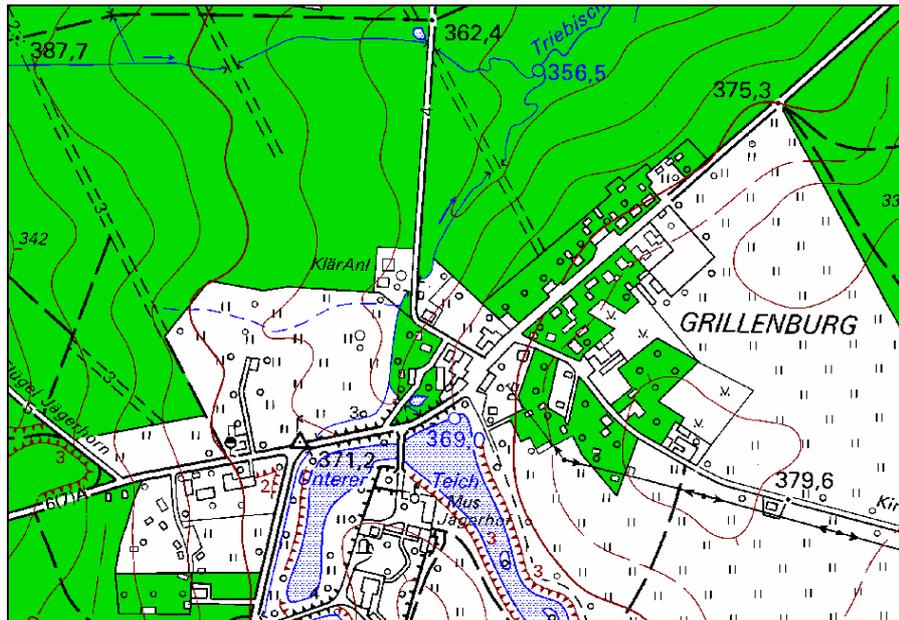


Abbildung 3-5 Ausschnitt aus einer digitalen Karte mit Tharandter Wald und Grillenburg.

3.4 Terrestrische Aufnahmen

Als terrestrische Datengrundlage standen drei terrestrische Datenquellen zur Verfügung, die sich durch ihr Aufnahmedesign unterscheiden. Die Aufnahme der Daten erfolgte im Rahmen von verschiedenen Projekten (vgl. Kapitel 1.2), weshalb in der Arbeit die Feldaufnahmen nach den Kurzbezeichnungen der Projekte benannt sind. Die MNTFR⁴- und kNN-Aufnahmen verwenden ein einphasiges Stichprobenverfahren, in dem konzentrische Probeflächen systematisch in einem Raster angeordnet sind. Die MNTFR-Punkte sind zusätzlich in Clustern zusammengefasst. Dem gegenüber steht ein zweiphasiges Stichprobenverfahren, welches im Rahmen des ProSmart⁵-Projektes

⁴ Scale Dependent Monitoring of Non-Timber Forest Resources Based on Indicators Assessed in Various Data Sources.

⁵ Systematic Market Development Approach for Remote Sensing Technologies

aufgenommen wurde (vgl. Abbildung 3-6). Die verschiedenen Aufnahmedesigns ermöglichen eine Optimierung der terrestrischen Datengrundlage für die kNN-Methode und die damit verbundene Senkung der Aufnahmekosten.

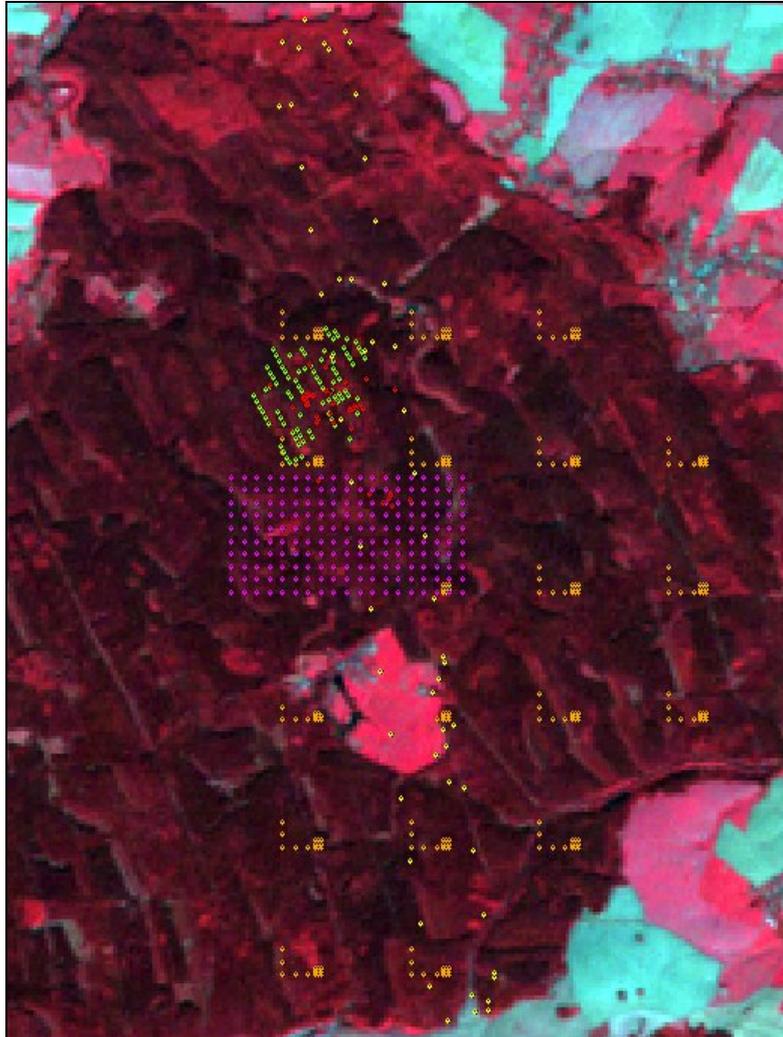


Abbildung 3-6 Probepunkte im Tharandter Wald dargestellt auf der Landsat-7-Szene vom September 2000: kNN-Punkte (rot), ProSmart-Punkte (grün) und MNTFR-Punkte (orange).

Tabelle 3-3 stellt die aufgenommenen Probepunkte den für die kNN-Methode verwendeten gegenüber. Die Differenz zwischen den erhobenen und verwendeten Proben resultiert aus der Problematik der Lagegenauigkeit. Um die kNN-Methode anwenden zu können, müssen die Grauwerte der Pixel (HyMapTM und Landsat) über der terrestrischen Probe ausgelesen werden. Zu diesem Zweck ist eine Georeferenzierung der Fernerkundungsdaten notwendig. Da eine 100-prozentige Lagegenauigkeit nicht möglich ist, können ein oder mehrere Pixel, von denen die Grauwerte erhoben werden, verschoben zu der terrestrischen

Probefläche sein (vgl. Kapitel 4.1.2). Deshalb wurde bei den terrestrischen Aufnahmen protokolliert, ob die Probefläche eine Partitionierung aufweist, beispielsweise durch einen Alt- und Jungholzbestand, und ob in einen Umkreis von 30 m eine homogene Bestockung vorliegt. Um Lagegenauigkeitsfehler bei der kNN-Methode auszuschließen, wurden Proben mit einer partitionierten Probe- oder Umgebungsfläche für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Die unterschiedliche Anzahl Proben zwischen den zwei Datenquellen Landsat und HyMap™ resultieren aus der verschiedenen Abdeckung des Untersuchungsgebietes durch die Szenen. Nicht alle beim MNTFR-Projekt erhobene Probepunkte liegen im Aufnahmebereich der Hyperspektralszene.

In dieser Arbeit wurde für die kNN-Berechnungen beispielhaft die Merkmale *Grundfläche* und *Totholz* ausgewählt. Die Tabelle 3-4 enthält den Mittel-, Maximal- und Minimalwert der *Grundfläche* und die Tabelle 3-5 die Anzahl der Stichproben mit und ohne *Totholz*.

Tabelle 3-3 Gegenüberstellung der aufgenommenen terrestrischen Probepunkte mit den verwendeten.

Projekt	Terrestrische Aufnahme	Aufnahmezeitpunkt	Erhobene Proben	verwendete Proben	
				Grundfläche Landsat/HyMap™	Totholz Landsat/HyMap™
ProSmart	Aufnahme II	Juli 1999	89	69 / 69	70 / 70
	Totholz	Aug. 1999	27	0 / 0	27 / 27
MNTFR	Tharandter Wald	Juli 2000	260	217 / 126	217 / 126
kNN		Aug. 2001	110	68 / 68	68 / 68
Total			542	354 / 263	382 / 291

Tabelle 3-4 Mittelwert, Minimum und Maximum für die Grundfläche

Terrestrische Aufnahme	Grundfläche [m²/ha]		
	Mittelwert	Minimum	Maximum
ProSmart Aufnahme II	24,72	1,00	48,00
MNTFR (Landsat)	42,96	0,00	77,89
MNTFR (HyMap™)	44,90	9,83	77,89
kNN	33,52	3,36	54,86
Total (Landsat)	37,59	0,00	77,89
Total (HyMap™)	34,02	1,00	77,89

Tabelle 3-5 Anzahl der Proben mit oder ohne Totholz

Feldaufnahme	Probepunkte		
	Totholz	kein Totholz	Total
ProSmart Aufnahme II	44	26	70
ProSmart Totholz	27	0	27
MNTFR (Landsat)	45	172	217
MNTFR (HyMap™)	23	103	126
kNN	27	41	68
Total (Landsat)	143	239	382
Total (HyMap™)	121	170	291

3.4.1 ProSmart-Aufnahme

Im Rahmen des ProSmart-Projektes wurde eine Anleitung für die Feldaufnahmen und die dazugehörigen Erhebungsbögen entwickelt (HÄUSSLER et al. 2000). Die aufgenommenen Merkmale stützen sich auf erhobene Nutzeranforderungen und setzen diese in terrestrisch erfassbare Größen um. Neben den produktionsorientierten Merkmalen (wie z.B. *Baumart*, *Stammdurchmesser*, *Baumhöhe*, *Stammzahl*, *Volumen* u.a.) wurden solche Merkmale erfasst, die Information über Non-Wood Goods and Services (NWGS, Nicht-Holz-Güter und –Leistungen) liefern (wie z.B. *Spezialstandorte*, *Totholz*, *Strauchvegetation*, *Bodenvegetation*, *Waldrand* u.a.).

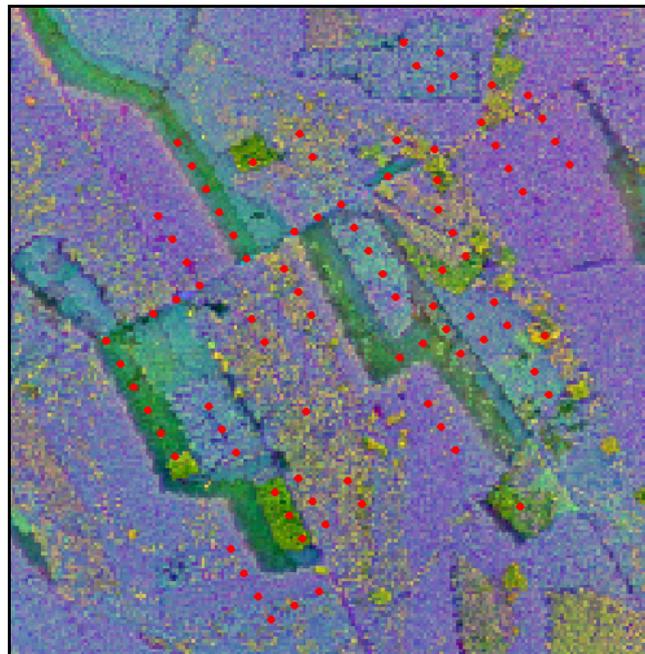


Abbildung 3-7 Probepunkte (rot) der zweiten terrestrischen Aufnahme dargestellt auf der Hyperspektralszene.

Die Erhebungsmethode wurde vorab in einer Pilotaufnahme getestet. In den Monaten September und Oktober 1998 wurden die ersten Feldaufnahmen durchgeführt. Ziel war die Erfassung ausgewählter ökologischer Merkmale. Im Sommer 1999 wurde eine zweite Feldaufnahme durchgeführt. Um den Aufwandaufwand in Grenzen zu halten, wurde ein zweiphasiges Stichprobenverfahren realisiert. Mit Hilfe der in den HRSC-Daten abgebildeten *Bestockungsdichte* wurden im Aufnahmegebiet Straten gebildet und in jedem Stratum mindestens fünf terrestrische Proben ausgewählt (für kNN-Berechnungen mit $k = 5$) (vgl. Abbildung 3-7).

Eine dritte Erhebung befasste sich mit der Aufnahme von stehendem *Totholz*. Es wurden 27 Punkte mit *Totholz* aufgesucht und die Lage mit einem GPS-Gerät (Global Position System) vermessen. Alle Ergebnisse wurden in einer Microsoft Access Datenbank abgelegt.

3.4.2 MNTFR-Aufnahme

Auf einem systematischen 1 x 1 km Gitternetz, welches an dem 1 km Netz der topographischen Karte 1:25000 orientiert ist, wurden Cluster verteilt (vgl. Abbildung 3-8). Dabei wird zwischen Dense- (dichten) und Sparse Cluster (L-Cluster) unterschieden. Die L-Cluster bestehen aus 5 konzentrischen Probeflächen die durch Aufnahmelinien verbunden sind. Die Länge der Aufnahmelinien beträgt 100 m. Zusätzlich wurden Dense Cluster aus 9 konzentrischen Probekreisen in einer quadratischen 3 x 3-Anordnung aufgenommen. Die Cluster haben eine Ausdehnung von 50 x 50 Metern. Tabelle 3-6 gibt eine Übersicht der erhobenen Cluster und Probepunkte. Die Aufnahmen wurden von zwei Zweiertteams im Juli 2000 durchgeführt und die Daten in eine Access-Datenbank zusammengeführt.

Tabelle 3-6 *Übersicht der erhobenen Cluster und Probepunkte.*

	Moritzburg	Tharandt	Total
Anzahl der L-Cluster	17	19	36
Anzahl der Dense Cluster	12	19	31
Anzahl aller Cluster	29	38	67
Anzahl der Probepunkte der L-Cluster	77	90	167
Anzahl der Probepunkte der Dense Cluster	108	170	278
Anzahl aller Probepunkte	185	260	445

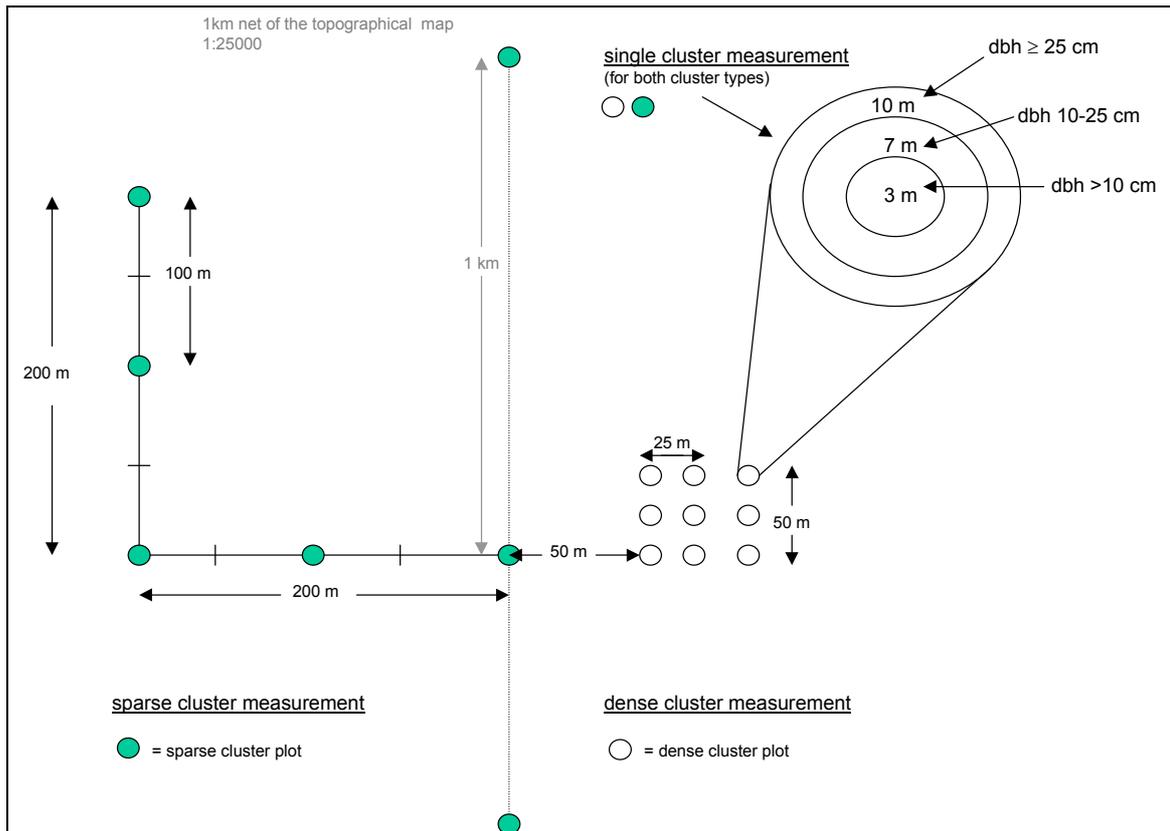


Abbildung 3-8 MNTFR-Aufnahmedesign (Quelle: MNTFR field work report)

3.4.3 kNN-Aufnahme

Wie die MNTFR-Aufnahme verwendet die kNN-Aufnahme ein einphasiges Stichprobenverfahren. Es wurden 190 Probeflächen systematisch in einem 100 m x 100 m Raster verteilt. Die Probefläche besteht aus konzentrischen Kreisen. Daten der Bäume mit $BHD \geq 30$ cm werden in einem Probekreisradius von 14,93 m, Bäume mit $10 \text{ cm} \leq BHD < 30 \text{ cm}$ in einem Kreisradius von 7,98 m und Bäume mit $5 \text{ cm} \leq BHD < 10 \text{ cm}$ in einem Kreisradius von 5,64 m erhoben (vgl. Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10). Die Aufnahme erfolgte im August 2002 von einem Zweierteam, welches in einem Zeitraum von 2 Wochen 110 Probeflächen aufnahm. Die erhobenen Daten wurden in einer Access-Datenbank abgelegt.

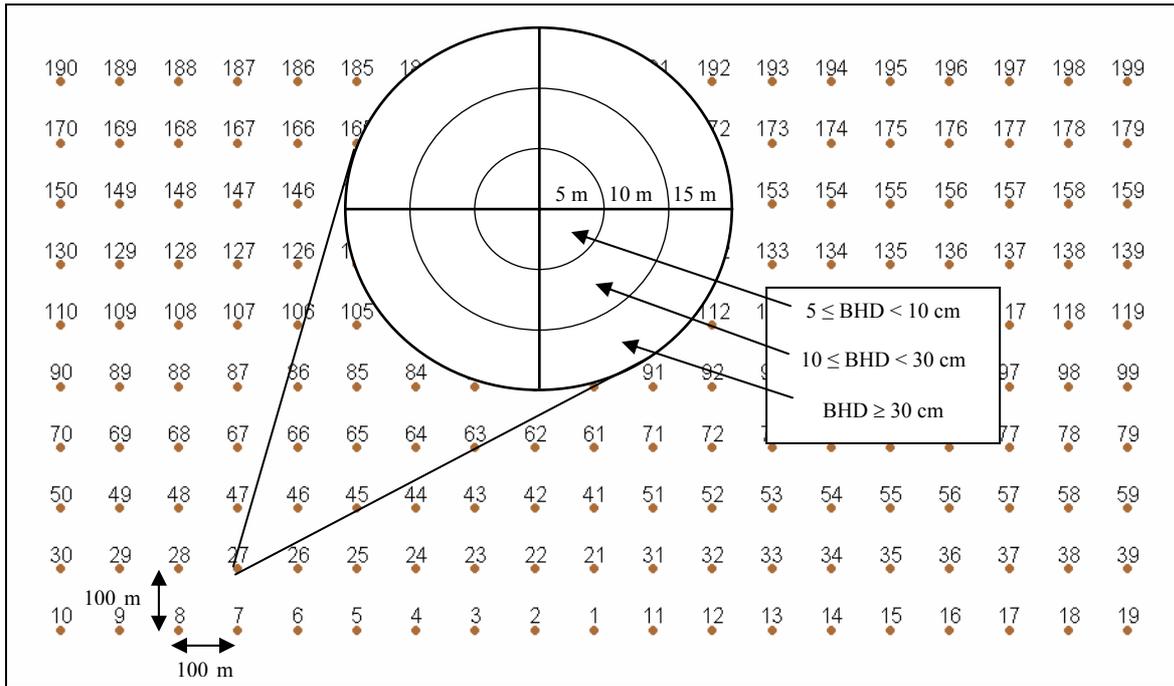


Abbildung 3-9 kNN-Aufnahmedesign

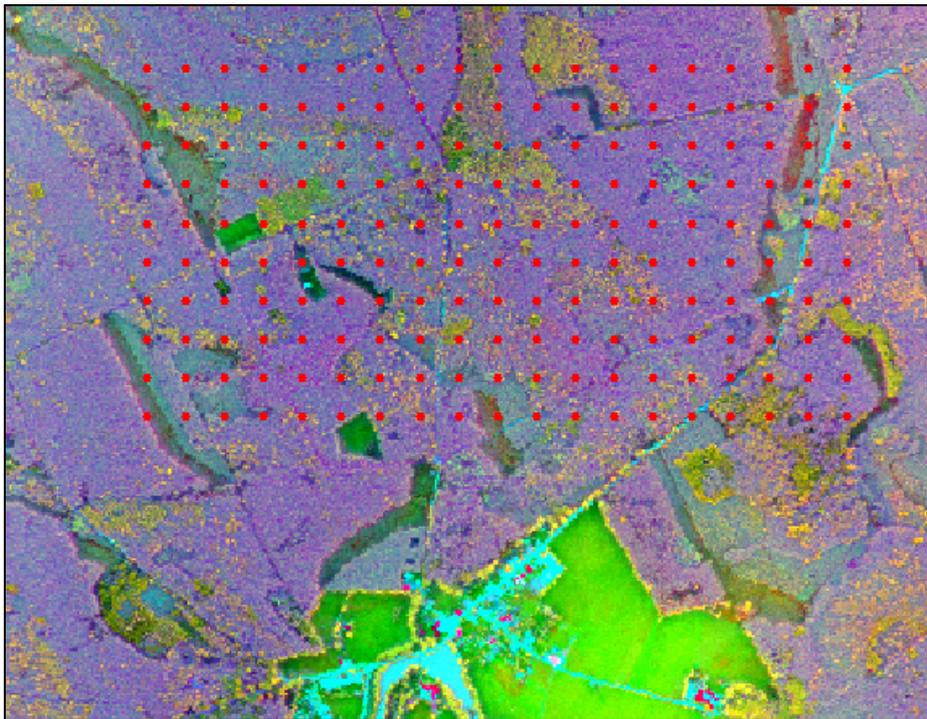


Abbildung 3-10 Probepunkte (rot) des 100 m x 100 m Stichprobengitters der kNN-Aufnahme, wovon 110 Probepunkte erhoben wurden, verschnitten mit einem Ausschnitt der Hyperspektralszene.

4 Fernerkundungsdaten

In der Arbeit wurden multispektrale Daten verwendet, die von Sensoren aus dem Orbit aufgenommen und von Anbietern bereitgestellt werden. Sie sind somit allgemein verfügbar. Neben multispektralen wurden auch hyperspektrale Daten, aufgenommen von flugzeugtragenden Systemen, verwendet, die das Potential der nächsten Satellitensensoren aufzeigen.

Es wurden neben einer Landsat-5- und zwei Landsat-7-Szenen noch jeweils eine HyMapTM- und HRSC-A-Szene verwendet (vgl. Kapitel 4.1 bis 4.3). In Abbildung 4-1 sind Bilder der drei Sensorensysteme dargestellt.



Abbildung 4-1 HRSC-A- (links), Hyperspektral- (mitte) und Landsat-7-Daten (rechts).

Die HyMapTM- und HRSC-A-Daten wurden durch flugzeuggetragene Sensoren aufgenommen und stellen Daten neuer Qualität dar. Dies bedeutet, dass sie sich in ihrer räumlichen und spektralen Auflösung von heute operational verfügbaren Satelliten-Daten deutlich abheben. Der verwendete Hyperspektralsensor mit seinen 128 Kanälen deckt den gesamten in Abbildung 4-2 dargestellten Wellenbereich ab. Er sammelt im Gegensatz zu den Landsat-Systemen (gelber Bereich) wesentlich mehr Informationen über die Rückstrahlung der Vegetation und anderer Objekte.

Mit den geokodierten, atmosphärenkorrigierten Hyperspektraldaten stehen Daten mit hoher Qualität und Informationsdichte zur Verfügung, die bisher mit multispektralen Sensoren nicht erreicht wurde. Durch die neue Qualität können neue Auswertalgorithmen eingesetzt werden, die eine Ausweitung der quantitativen Auswertung der Fernerkundungsdaten ermöglichen. Die Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz

dieser neuen Technologie in der Fernerkundung ist eine präzise, gut kalibrierte und charakterisierte Sensorik sowie eine konsistente Datenaufbereitung (MÜLLER et al. 2000).

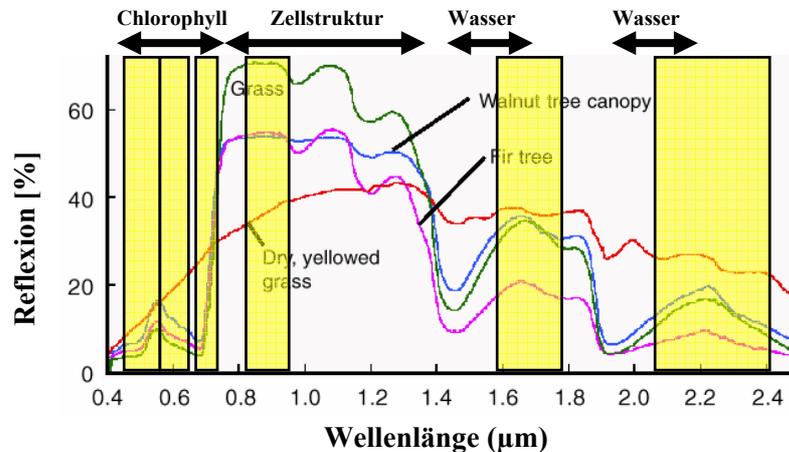


Abbildung 4-2 Reflexion ausgewählter Pflanzen und Bäume im Verhältnis zur Wellenlänge. Der gelbe Bereich signalisiert die Abdeckung des Landsat-Sensors. (Quelle: nach MÜLLER et al. 1999)

4.1 Landsat-Daten

Bei den Landsat-Systemen wird zwischen drei Generationen unterschieden. Die erste Generation (Landsat-1 bis -3) wurde mit dem Transport des Satelliten Landsat-1 im Juni 1972 in eine erdnahe Umlaufbahn gestartet. Diese drei Satelliten waren mit zwei Sensoren ausgestattet - eine Return Beam Vidicon (RBV) Kamera und einen Multispektralscanner (MSS).

Der Start des Landsat-4 1982 eröffnete die zweite Generation (4 bis 6) von Landsat-Satelliten. Zusätzlich zum MSS Sensor wurden diese mit einem Thematic Mapper (TM) ausgestattet, der eine Auflösung von 30 m erreicht. Die Satelliten Landsat-4 und -5 befinden sich noch auf ihren Umlaufbahnen und sind betriebsbereit. Allerdings können nur von den Sensoren des Satelliten Landsat-5 Daten akquiriert werden, die aber durch den langen Einsatz schon Qualitätsverluste aufweisen. Der Satellit Landsat-6 ging beim Start 1993 verloren.

Die dritte Generation umfasst bisher den Satelliten Landsat-7, der im April 1999 startete. Er ist mit einem Enhanced Thematic Mapper (ETM+) ausgestattet, der sechs

Multispektralkanäle mit 30 m und einen panchromatischen Kanal mit 15 m Auflösung aufweist.

In Tabelle 4-1 sind die wichtigsten Daten zu den Landsat-Satelliten-1 bis -7 zusammengefasst. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die verwendeten Sensoren mit den bereitgestellten Kanälen.

Tabelle 4-1 Übersicht der Landsat-Satelliten (Quelle: nach EURIMAGE)

Landsat Satelliten	Missionsbeginn	Höhe der Umlaufbahn (km)	Operationale Sensoren	Status
1	23.07.1972	907	MSS	Beendet 06.01.1978
2	22.01.1975	908	MSS	Beendet 05.02.1982
3	05.03.1978	915	MSS	Beendet 31.03.1983
4	16.07.1982	705	MSS, TM	Seit 1987 für Testzwecke genutzt
5	01.03.1984	705	MSS, TM	Operational
6	04.10.1993		MSS, TM	Verloren beim Start
7	15.04.1999	705	ETM+	Operational

Tabelle 4-2 Die drei Generationen der Sensoren in den Landsat-Systemen mit den Frequenzbereichen der einzelnen Kanäle (Quelle: Eurimage)

Sensoren	Merkmale	Kanäle							
		1	2	3	4	5	6 (Thermal IR)	7	Pan
MSS	Wellenlänge (µm)	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-1,1				
	Auflösung (m)	80	80	80	80				
	Aufnahmebreite	183 km							
TM	Wellenlänge (µm)	0,45-0,52	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75	10,42-12,50	2,08-2,35	
	Auflösung (m)	30	30	30	30	30	120	30	
	Aufnahmebreite	183 km							
ETM+	Wellenlänge (µm)	0,45-0,52	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75	10,42-12,50	2,08-2,35	0,45-0,90
	Auflösung (m)	30	30	30	30	30	60	30	13x15
	Aufnahmebreite	183 km							

Für die Auswertung wurden drei wolkenfreien, systemkorrigierten Landsat-Szenen verschiedener Aufnahmezeitpunkte ausgewählt, deren Aufnahme- und Orbitdaten in Tabelle 4-3 zusammengestellt sind. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der Landsat-7-Szene vom September 2000.

Table 4-3 *Übersicht über die verwendeten Landsat-Szenen*

Sensor	Aufnahmedatum	Produkt	Orbit	Frame
Landsat-5-TM	07.07.1989	Systemkorr. Vollszene	193	25
Landsat-7-ETM+	13.09.1999	Systemkorr. Vollszene	193	25
Landsat-7-ETM+	24.09.2000	Systemkorr. Vollszene	192	24

Die Atmosphärenkorrektur und die Georeferenzierung der Szenen wurde am Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik der TU Dresden durchgeführt.

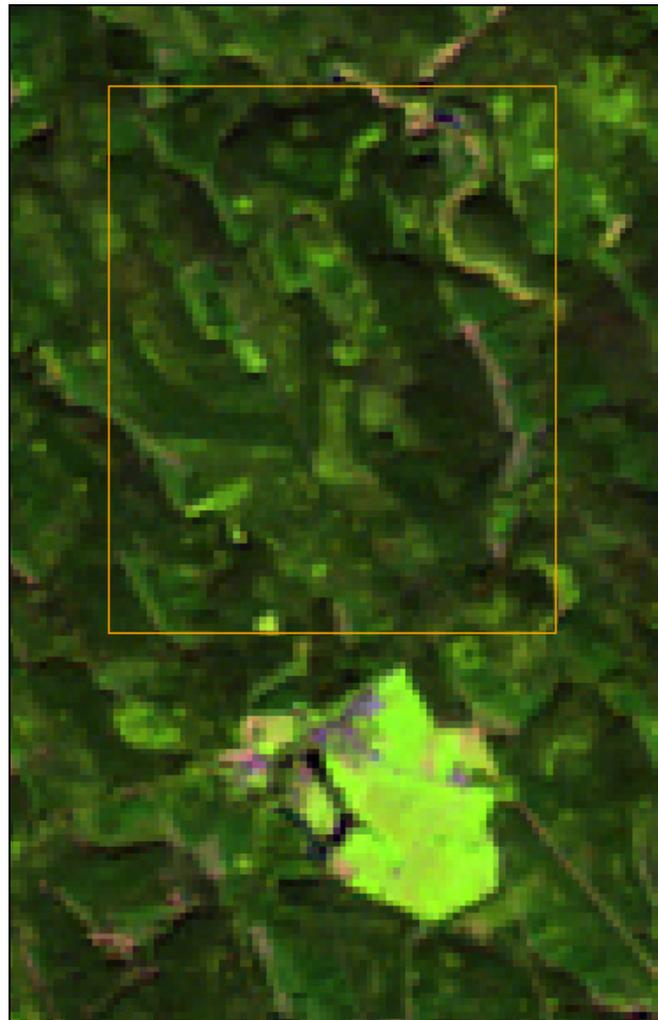


Abbildung 4-3 *Ausschnitt aus der Landsat-7-Szene (September 2000) mit dem Tharandter Wald (hellgrün: Grillenburg) und der 2,0 x 2,5 km Testfläche (orange Rahmen).*

4.1.1 Atmosphärenkorrektur

Für die atmosphärische Korrektur wurde zur Eliminierung des maskierenden Einflusses des am Bildaufbau beteiligten objektfremden Streulichts ein einfaches Näherungsverfahren angewendet. Es wird davon ausgegangen, dass die Aufzeichnung in einem nahen Infrarotkanal frei oder nahezu frei vom Einfluss atmosphärischer Strahlung ist (HILDEBRANDT 1996). Zunächst werden die Grauwertistogramme aller Spektralkanäle der Aufzeichnung gegenübergestellt. Da die Menge der atmosphärischen Zustrahlung wellenlängenabhängig ist, fallen die Histogrammverschiebungen unterschiedlich aus. Die Differenz zwischen dem dunkelsten Grauwert des jeweiligen Histogramms und dem dunkelsten Grauwert des nahen Infrarotkanals wird als Atmosphäreneinfluss interpretiert und als Korrekturgröße von den Grauwerten aller Bildelemente der Aufzeichnung abgezogen. Dieses Verfahren wurde mit der Software ERDAS IMAGINE gleichermaßen auf alle Satellitenszenen angewandt (HEHMKE 2001).

4.1.2 Georeferenzierung

Für die Georeferenzierung der Landsat-5- und -7-Szene von 1989 bzw. 1999 wurden zunächst 50 bis 80 Passpunkte in den Satellitenszenen und den digitalen topographischen Karten 1:25.000 identifiziert. Danach wurden Punkte mit sehr großen RMSE (Root Mean Square Error) verworfen. Der RMSE wird definiert durch die Differenz zwischen der gewünschten Ausgabeposition eines Passpunktes und der aktuellen Ausgabeposition desselben Punktes, nachdem dieser mit Hilfe einer Transformationsgleichung berechnet wurde. Letztendlich standen noch ca. 50 Passpunkte zur Verfügung. Abbildung 4-4 zeigt beispielhaft die Lage der Passpunkte der Landsat-5-Szene (Juli 1989) im Untersuchungsgebiet. Die RMSE an den Passpunkten bewegen sich zwischen 29,7 m und 0,48 m und liegen damit in einem akzeptablen Subpixelbereich. Mit einer Polynomialtransformation 2. Grades wurden die Szenen im Nearest Neighbor Resampling-Verfahren georeferenziert. Diese Methode wurde gewählt, um die aus der Atmosphärenkorrektur stammenden Reflexionswerte ohne räumliche Mittelung zu erhalten (HEHMKE 2001). Die Landsat-7-Szene vom 24.09.2000 wurde dann im Bild zu Bild-Verfahren auf die referenzierte Landsat-7-Szene von 1999 geokodiert. Die praktische Durchführung wurde mit der Funktion „Image Geometric Correction“ unter „Data Preparation“ im Programm ERDAS IMAGINE realisiert.

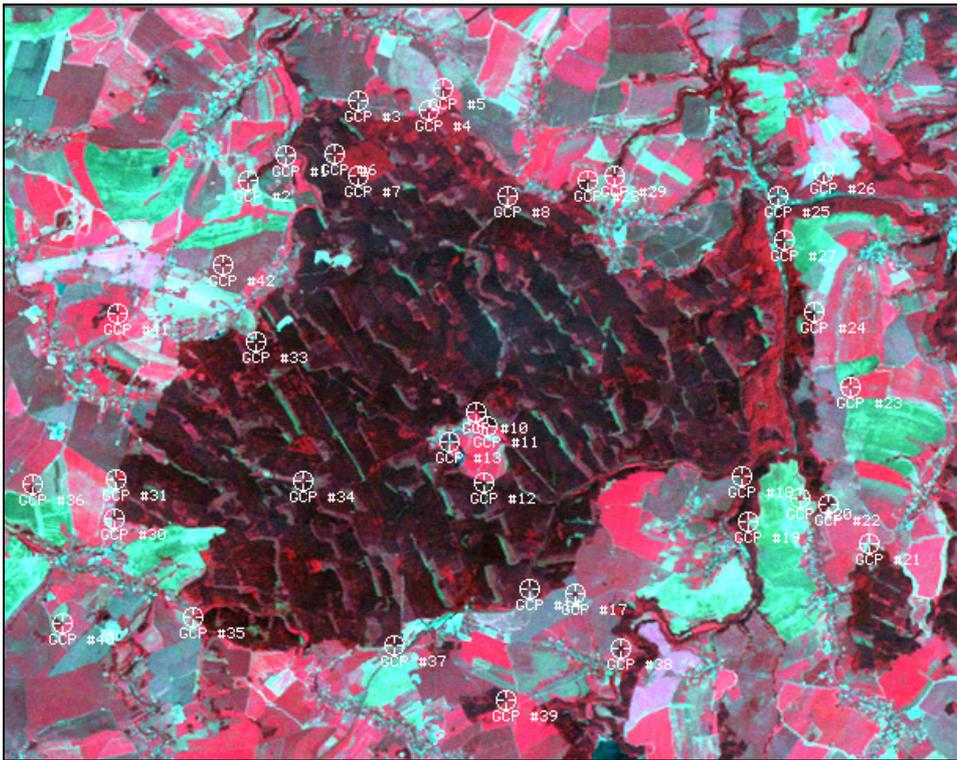


Abbildung 4-4 Lage der Passpunkte auf der Landsat-5-Szene im Untersuchungsgebiet Tharandter Wald

4.1.3 Hauptkomponentenanalyse

Benachbarte multispektrale Kanäle weisen visuell und numerisch Ähnlichkeiten und somit redundante Informationen auf. Ein Verfahren zur Reduktion der Redundanzen ist die Hauptkomponentenanalyse (Principle Component Analysis, PCA), die einen neuen Datensatz mit geringerer spektraler Redundanz generiert. Die redundanten Daten werden auf wenige Kanäle verdichtet, wobei die Dimensionalität der Daten reduziert wird. Die Kanäle der PCA sind nicht korreliert, unabhängig und meist besser interpretierbar als die Ausgangsdaten. Die erste Hauptkomponente enthält die meisten aus den Daten erschließbaren Informationen und zeigt bereits eine Vielzahl von unterscheidbarer Merkmale (vgl. Abbildung 4-5). Weitere Ausführungen zur PCA sind bei KÖHL & LAUTNER (2001) und LAUTNER (2001) nachzulesen.

Für alle drei Landsat-Datensätze wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt und die vier neu generierten Kanäle dem Ausgangsbild angehängt (Kanäle 9-12 Landsat-5 bzw. 10 bis 13 Landsat-7). Für die Analyse kam ERDAS IMAGINE mit der Funktion „Principal Components“ unter „Spectral Enhancement“ zum Einsatz.

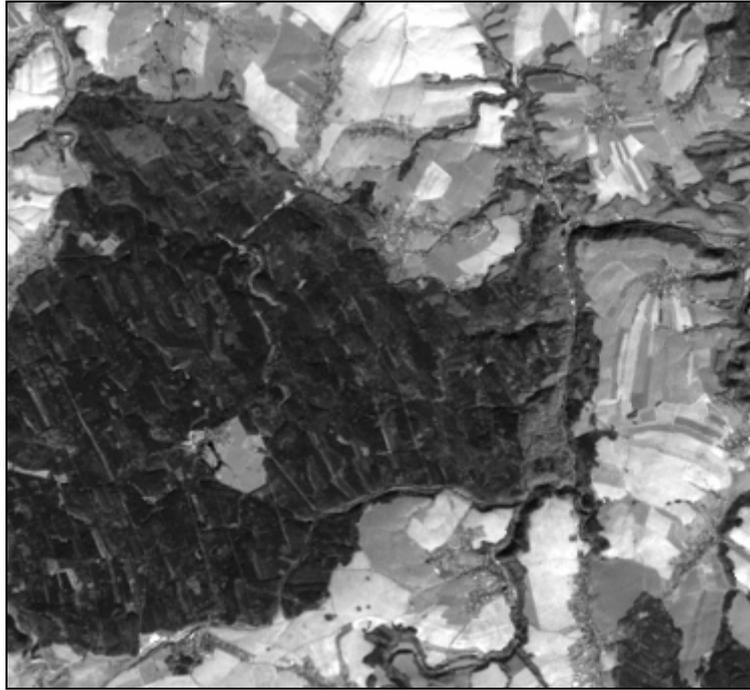


Abbildung 4-5 Erste Hauptkomponente der PCA aus der Landsat-7-Szene vom September 2000.

4.1.4 Vegetationsindices

Indices werden genutzt, um Bilder durch mathematische Kombinationen von Pixelwerten mehrerer Bänder zu erzeugen. Sie werden häufig zur Vegetationsanalyse und zur Minimierung von Schatteneffekten in Satellitenszenen eingesetzt. Ein traditioneller Index zur Charakterisierung von Vegetation in Fernerkundungsdaten ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (RICHARDS 1999, HILDEBRANDT 1996). Der NDVI nutzt charakteristische Reflexionsunterschiede zwischen sichtbarem Licht und nahem Infrarot (vgl. Gleichung 4.1). Abbildung 4-6 zeigt für das Untersuchungsgebiet Tharandter Wald den mit Hilfe der Landsat-5-Szene berechneten NDVI.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (4.1)$$

Mit ERDAS IMAGINE wurden für alle drei Landsat-Szenen der NDVI bestimmt und als Kanal dem Ausgangsbild hinzugefügt (Kanal 8 für Landsat-5 oder 9 für Landsat-7).

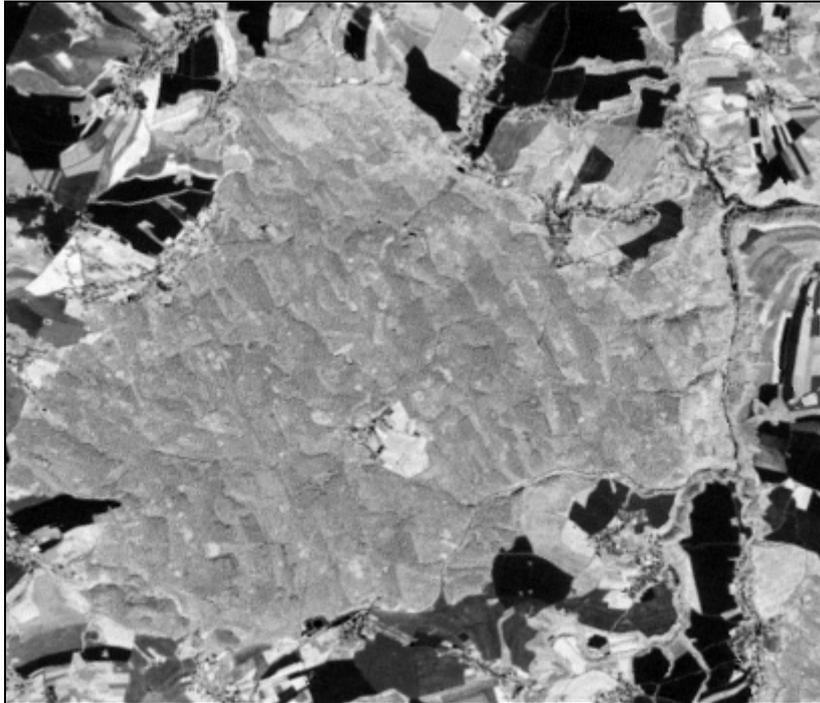


Abbildung 4-6 *Vegetationsindex NDVI vom Tharandter Wald berechnet aus der Landsat-5-Szene*

4.1.5 Multitemporaler Ansatz

Für die multitemporalen Auswertungen mit der kNN-Methode mussten Szenen von verschiedenen Aufnahmezeitpunkten zusammengefügt werden. Dies erfolgte mit dem Utility „Layer Selection and Stacking“ im Programm ERDAS IMAGINE. Es wurden die zwei Landsat-7-Szenen von 1999 und 2000 sowie alle drei Landsat-Szenen jeweils zu einem Bild zusammengesetzt. Nähere Informationen können dem ERDAS IMAGINE Field Guide (1997) und HILDEBRANDT (1996) entnommen werden.

4.2 HyMapTM-Daten

Bei dem HyMapTM-Sensor (vgl. Abbildung 4-7) handelt es sich um eine Entwicklung der australischen Firma Integrated Spectronics, der weltweit vor allem für geowissenschaftliche Fragestellungen eingesetzt wird. Das Instrument besteht aus 4 Teilspektrometern mit jeweils 32 Kanälen, die im Spektralbereich von 400-2500 nm Bilddaten mit 512 Pixel pro Zeile aufzeichnen. Dabei wird ein rotierender Spiegel mit zwei Facettenflächen verwendet, um die Szene quer zur Flugrichtung abzutasten. Der HyMapTM kommt vor allem wegen der nahezu kompletten Spektralabdeckung im reflektiven

Wellenlängenbereich zum Einsatz (MÜLLER et al. 2000). Weitere detaillierte Beschreibungen und technische Parameter zum Sensor finden sich bei COOKS et al. (1998).



Abbildung 4-7 Der australische HyMap™-Sensor

Der erste Schritt der Prozessierung der hyperspektralen Daten des HyMap™-Sensors ist die Systemkorrektur. Diese wurde vom Institut für Optoelektronik der Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Software von Integrated Spectronics durchgeführt. Sie umfasst die Dunkelstromkorrektur und die radiometrische Kalibrierung. Die Daten wurden mit 32 Bit pro Pixel geliefert, d.h. reelle Werte, welche die kalibrierte Strahldichte am Sensor darstellen (MÜLLER et al. 2000).

Zur atmosphärischen Korrektur, die ebenfalls am Institut für Optoelektronik erfolgte, wurde die Software ATCOR-A verwendet. Wegen des Fehlens von atmosphärischen Messungen zum Zeitpunkt des Überfluges waren Unsicherheiten insbesondere in Bereichen mit starker atmosphärischer Absorption nicht zu vermeiden (MÜLLER et al. 2000).

Die Geokodierung der HyMap™-Daten wurde von der Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung (GAF) in München durchgeführt. Da keine Aufzeichnung der Fluglagedaten erfolgte, kamen nur polynomische Entzerrungsverfahren in Betracht. Dies führt zu Einschränkungen bei der erzielbaren Genauigkeit für die Überlagerung der terrestrischen Stichproben mit den Bildpixel. So wurde die Georeferenzierung durch

Bestimmung genau vermessener Passpunkte mit anschließender Orthorektifizierung vorgenommen. Die Passpunkte mit hoher Qualität sind aus den Level-3-prozessierten HRSC-A-Daten (vgl. Kapitel 4.3) entnommen. Für die Bildbereiche außerhalb der Abdeckung der HRSC-A-Streifen musste zur Passpunktbestimmung allerdings auf vorhandene topographische Karten zurückgegriffen werden. Aufgrund der unsystematischen Verzerrungen der Flugzeugscannerdaten und der unterschiedlichen Qualität der Passpunkte in den verschiedenen Bildbereichen wurde zur Entzerrung der Daten dem Rubber Sheeting Verfahren den Vorzug gegeben. Dabei wurden die ca. 100 Passpunkte im Ergebnisbild in ihrer exakten Lage wiedergegeben und in den dazwischen liegenden Bereichen eine Interpolation mit Hilfe der Delaunay Triangulation (FORTUNE 1987) vorgenommen. Bei diesem Verfahren kann ein Ergebnis nur für den durch Passpunkte abgedeckten Bereich angegeben werden, wodurch einige Randbereiche des HyMapTM-Streifens abgeschnitten wurden. Die Abdeckung der Testgebiete wurde dadurch aber nicht beeinträchtigt (HÄUSSLER et al. 2000).

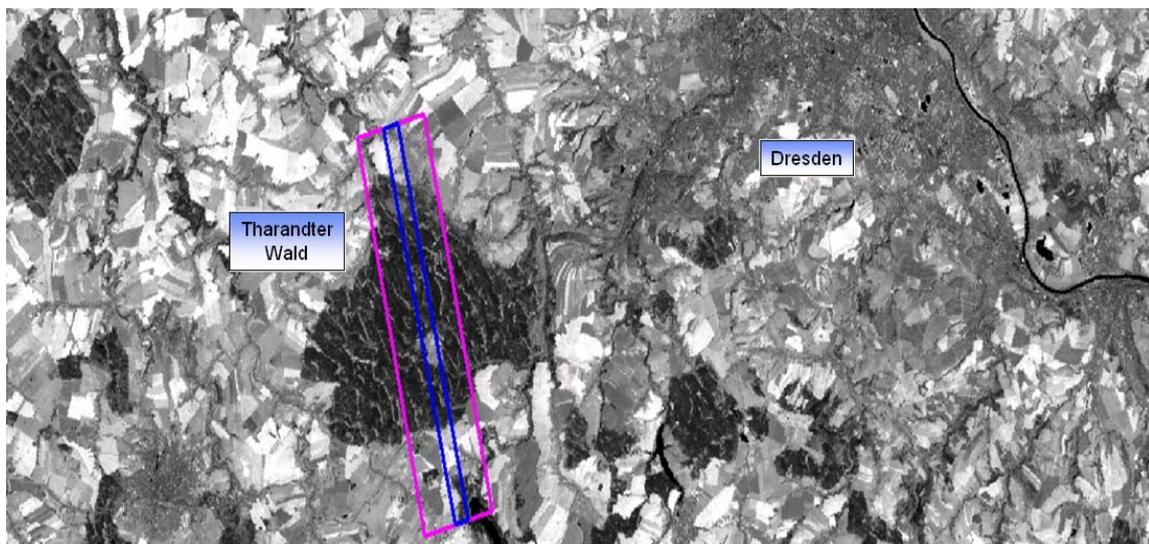


Abbildung 4-8 Lage des Flugstreifens über dem Untersuchungsgebiet Tharandter Wald für die Erhebung der HRSC-A (blau)- und HyMapTM-Daten (rot)

Neben der Geokodierung wurde von der GAF auch eine Minimum Noise Fraction Transformation (MNF-Transformation) durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Informationsgehalt der hyperspektralen Daten analysiert und konzentriert. Mit einer MNF-Transformation wird der Informationsgehalt der Daten neu angeordnet und weitgehend vom Rauschen getrennt. Die Anzahl der spektralen Bänder, die für die weiterführenden

Arbeitsschritte nötig sind, werden durch die Beseitigung von Redundanzen reduziert. Im Wesentlichen handelt es sich bei der MNF-Transformation um zwei ineinander geschachtelte Hauptkomponententransformationen (Principle Component Analysis, PCA). Anhand der daraus resultierenden Eigenwerte und der dazugehörigen Bilder wird die nutzbare Dimensionalität der Information ermittelt. Der informationsreichere Datenanteil wird vom Rauschen getrennt und eine Datenreduktion durch Beseitigung von Redundanzen durchgeführt (KÖHL & LAUTNER 2001). Es wurden die ersten 20 Hauptkomponenten ausgewählt und eine Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen erzeugt.



Abbildung 4-9 Cessna 208 CARAVAN (links) und HyMapTM - und HRSC-A eingebaut in der Cessna (rechts) (Quelle: LEHMANN et al. 2000).

Die HyMapTM-Daten stammen aus der Befliegung vom 02.09.1998 und decken einen Streifen von ca. 2,5 km Breite ab. Für die Befliegung wurde der HyMapTM -Sensor in eine Cessna 208 CARAVAN eingebaut (vgl. Abbildung 4-9). Die Lage des Flugstreifens und die Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit den Hyperspektral- und HRSC-A-Daten ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Die Szenen beanspruchen einen Speicherplatz von 526 MB (HyMapTM) bzw. 1,39 GB (HRSC-A).

Für die kNN-Berechnungen mit Hyperspektraldaten standen für die Untersuchung eine Level-3-Prozessierte HyMapTM - Szene mit 128 Kanälen und daraus mit der Minimum Noise Fraction Transformation gewonnenen Szene mit 20 MNF-Kanälen zur Verfügung.

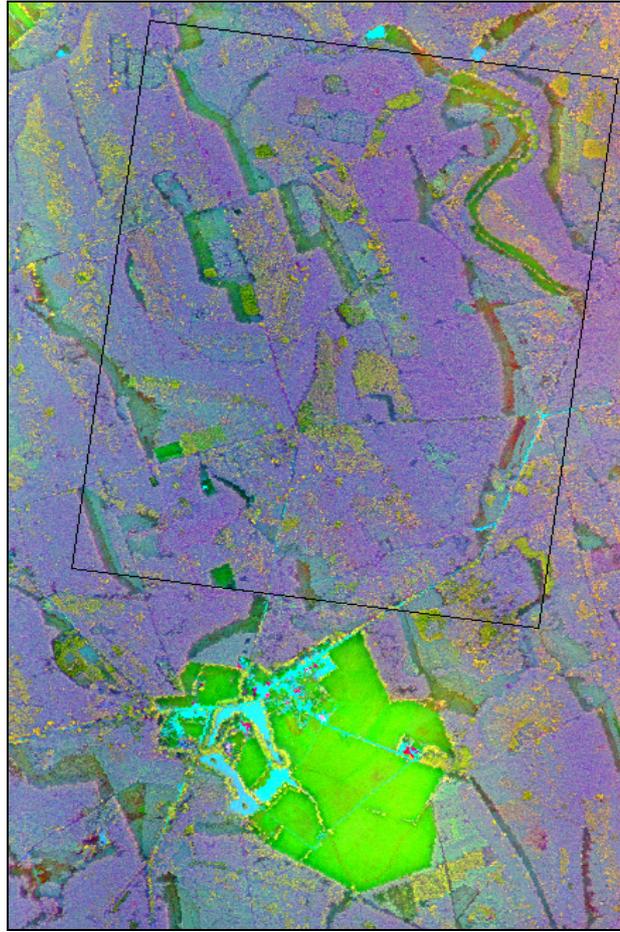


Abbildung 4-10 Ausschnitt aus der Hyperspektralszene (20 MNF- Kanäle) mit dem Tharandter Wald (hellgrün: Grillenburg) und der 2,0 x 2,5 km Testfläche (schwarzer Rahmen).

4.3 HRSC-A-Daten

Die High Resolution Stereo Camera (HRSC-A) ist ein digitaler multispektraler Stereoscanner für photogrammetrische und allgemeine Fernerkundungsanwendungen. Die räumliche Auflösung liegt im Dezimeterbereich, was bei einer Flughöhe von 2500 m zu einer Auflösung von 10 cm führt. Die photogrammetrische Genauigkeit liegt in Bezug auf die absolute äußere Orientierung zwischen 15 und 20 cm lateral und vertikal.

Die Kameratechnologie wurde als High Resolution Stereo Camera für die russische Mission „Mars 96“ entwickelt. Für flugzeuggetragene Fernerkundungsanwendungen wurde das System modifiziert. Wegen der Auslegung für den Weltraum („Deep Space“-Einsatz) weist die Kamera kleine Abmessungen, ein geringes Gewicht, geringen Stromverbrauch und ein robustes Design auf.

Die Kamera ist in der grundlegenden Struktur und Elektronik identisch mit der Originaloptik des für die Mission Mars 96 entwickelten Systems, wurde aber ergänzt mit erweiterten Peripherie-Geräten. Für den Flugzeugeinsatz wurde das System auf eine Zeiss T-AS Stabilisierungsplattform montiert. Das Instrument, bestehend aus Kamerakopf, Elektronikmodulen und Interfaceboards ist in einem kompakten Gehäuse untergebracht (vgl. Abbildung 4-11) (LEHMANN et al. 2000).

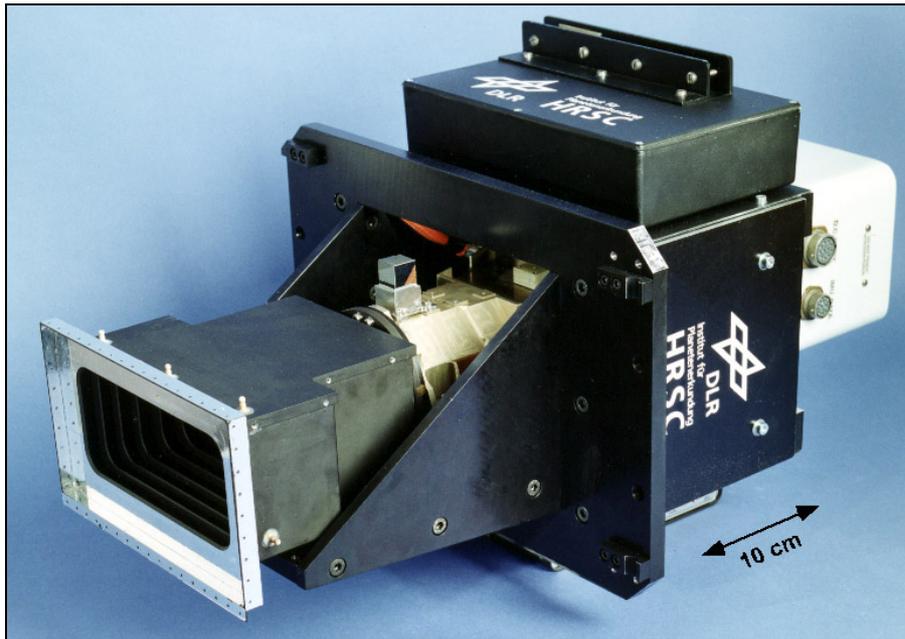


Abbildung 4-11 HRSC-A mit aufmontiertem Kreiselblock (Quelle: LEHMANN et al. 2000)

Die Stereoaufnahme in Flugrichtung (along-track stereo) basiert auf CCD-Zeilen, die hinter einer einzigen Optik parallel auf einer Fokalebene montiert sind ("Pushbroom-Prinzip"). Durch die Flugbewegung über Grund werden die Bilder der Vorwärts-, Nadir- und Rückwärtsblickrichtung simultan erzeugt. Insgesamt sind neun CCD-Zeilen parallel auf der Fokalebene der HRSC-A angeordnet: davon dienen fünf der Stereo- und photometrische Aufnahmefähigkeiten der Kamera und vier haben verschiedene Filter zur Erzeugung multispektraler Bilder (vgl. Abbildung 4-12). Weitere technische Parameter sind der Tabelle 4-4 zu entnehmen (LEHMANN et al. 2000).

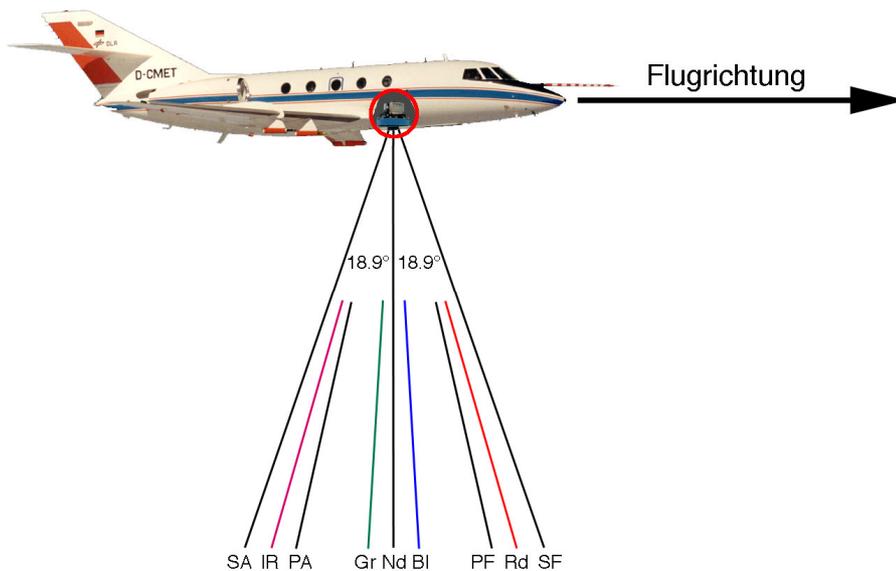


Abbildung 4-12 Aufnahmeprinzip des HRSC-A multispektralen Stereo-Zeilenscanners, die Abkürzungen für die einzelnen Kanäle bedeuten (Quelle: LEHMANN et al. 2000):

<i>SA</i>	-	<i>Stereo rückwärts, panchromatisch</i>
<i>IR</i>	-	<i>Infrarot</i>
<i>PA</i>	-	<i>Photometrie rückwärts, panchromatisch.</i>
<i>Gr</i>	-	<i>Grün</i>
<i>Nd</i>	-	<i>Nadir, panchromatisch.</i>
<i>Bl</i>	-	<i>Blau</i>
<i>PF</i>	-	<i>Photometrie vorwärts, panchromatisch.</i>
<i>Rd</i>	-	<i>Rot</i>
<i>SF</i>	-	<i>Stereo vorwärts, panchromatisch.</i>

Der HRSC-A-Scanner wird seit 1997 in vielfältigen Pilotprojekten zur Erprobung der ersten digitalen multispektralen Kamera in der digitalen Photogrammetrie und Fernerkundung eingesetzt. Im Rahmen von ProSmart wurde die Kamera zur verbesserten Interpretation der Bildspektrometerdaten des HyMapTM eingesetzt:

- Die extrem hohe räumliche Auflösung der HRSC-A-Daten von 12 cm dient zur verbesserten Objektbeschreibung der Bildspektrometerdaten (HyMapTM), die ca. 6 m räumliche Auflösung aufweisen.
- Die hochauflösenden digitalen Oberflächenmodelle aus HRSC-A-Stereodaten dienen zur quantitativen Modellierung und Analyse der Bildspektrometriedaten (winkelabhängige Effekte).

Table 4-4 Technische Parameter des HRSC-A-Scanners (Quelle: LEHMANN et al. 2000)

HSRC-A-Parameter	Wert
Brennweite	175 mm
Total Field of View	36.0 deg x 11.8 deg
Anzahl der CCD-Zeilen	9
Anzahl der Pixel pro - Zeile, Pixelgröße	5184, 7 mm x 7 mm
Stereowinkel (bezogen auf Nadir)	± 18.9 deg, ± 12.8 deg
Radiometrische Auflösung	10 bit, reduziert auf 8 bit
Scanfrequenz	450 Zeilen/s (Maximum)
Masse	32 kg
Datenrate	10 MBytes/s
Instrument Stabilisierung Lagedatenaufzeichnung Navigationsdatenaufzeichnung	Carl Zeiss T-AS Stabilisierungsplattform IMU auf der Kamera montiert Applanix DGPS (position and orientation system)
Datenaufnahme	Sony high-speed tape recorder, Kapazität 100 Gbytes/tape
Flugparameter (typisch für Cessna 208)	3500 m AGL (6000 m max), Geschwindigkeit = 250 km/s

Für das ProSmart-Vorhaben wurde in eine Cessna Caravan 208 der HRSC-A-Scanner zusammen mit dem HyMapTM-System eingebaut (vgl. Abbildung 4-9). Die dafür notwendigen Umbauten wurden durch die DLR Berlin durchgeführt.

Am Institut für Planetenerkundung der DLR wurde die radiometrische Kalibration der HRSC-A-Rohdaten vorgenommen. Die Kalibrierung beinhaltet eine Korrektur unter Berücksichtigung der Sensortemperatur und der bei der Aufnahme verwendeten Gainfaktoren sowie eine Flat-Field-Korrektur. Die notwendigen Korrekturtabellen werden aus den Daten von Wolkenbefliegungen berechnet.

Für die weitere Verarbeitung der HRSC-A-Daten wurde ein an der TU Berlin in Zusammenarbeit mit dem DLR entwickeltes vollautomatisches photogrammetrisches Auswertesystem verwendet. Es umfasst u.a. die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) aus Mehrzeilenstereodaten, die Berechnung von kartenprojizierten Orthobildern und das Mosaiken von Multispektraldaten.

Der Arbeit standen Level 3 Daten des HRSC-A-Sensors für einen Teil des Untersuchungsgebietes von der Befliegung am 21.10.1998 zur Verfügung (vgl. Abbildung 4-8 und Abbildung 4-14). Außerdem liegen die aus den HRSC-A-Daten abgeleiteten Höhenmodelle in der gleichen Projektion vor. Ein Problem stellte die Einschränkung der

Datenverfügbarkeit auf einen relativ kleinen Teilbereich der als Arbeitsgrundlage dienenden HyMap™-Daten dar.

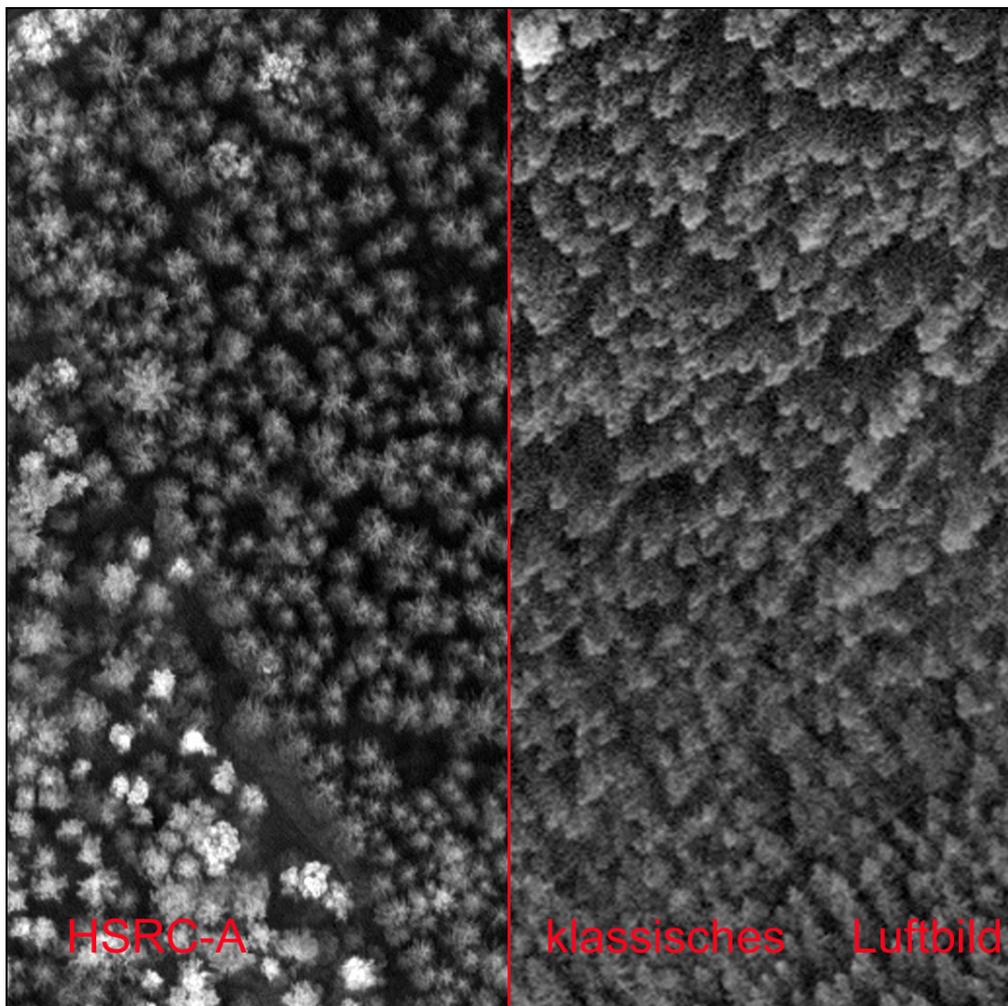


Abbildung 4-13 Gegenüberstellung von HRSC-A-Bild (links) und klassischer Luftbildfotografie (rechts) (Quelle: LEHMANN et al. 2000).

Die HRSC-A-Daten dienen als Luftbildersatz mit einer sehr hohen Qualität, wie in Abbildung 4-13 zu sehen. In der Abbildung stammt das linke HRSC-A-Bild vom Tharandter Wald und wurde am 21.10.98 aus einer Höhe von 3000 m aufgenommen. Die Auflösung beträgt 25 cm. Die Luftbildfotografie (rechts) vom selben Gebiet wurde am 23.10.98 aus einer Höhe von 2500 m aufgenommen, die Auflösung beträgt 40 cm. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen der Zentralperspektive in der klassischen Luftbildfotografie und der durch das Pushbroomprinzip bedingten Perspektive der HRSC-A-Daten.

In dieser Untersuchung wurden die HRSC-A-Daten zum Festlegen der Testgebiete herangezogen, die möglichst heterogene Strukturen aufweisen sollten. Eine weitere wichtige Anwendung der HRSC-A-Bilder war die Validierung der kNN-Karten. Durch die visuelle Interpretation konnten Differenzierungen in den kNN-Karten auf den HRSC-A-Bildern nachvollzogen und Fehler aufgedeckt werden.

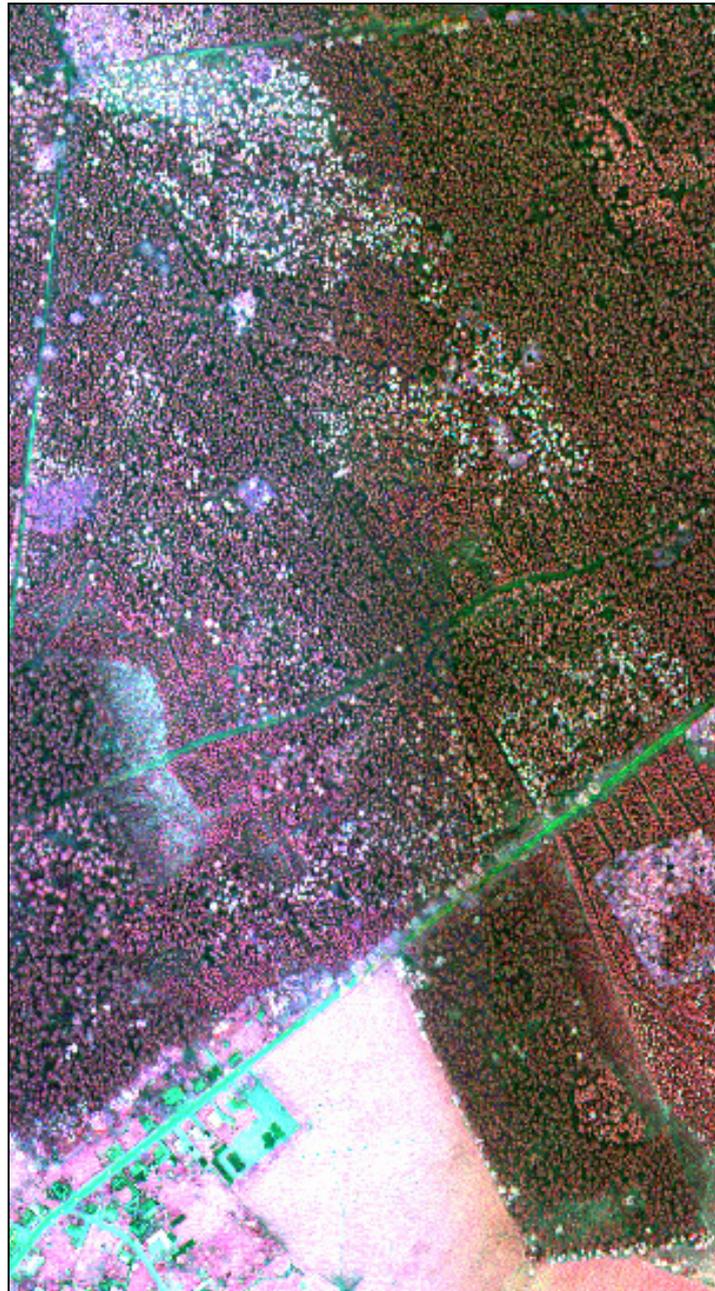


Abbildung 4-14 Ausschnitt der HRSC-A-Szene vom Tharandter Wald (unten links: Grillenburg).

5 Methoden

5.1 kNN-Methode

5.1.1 Metrische Daten

In dieser Untersuchung werden die Möglichkeiten zur Herstellung von Karten durch die Kombination von terrestrischen Aufnahmen mit Fernerkundungsdaten mit Hilfe der kNN-Methode untersucht. Ausgehend von Pixel, deren geografische Position mit den Probepunkten bei den Feldaufnahmen übereinstimmen, werden für alle Pixel – auch solche, die nicht mit terrestrischen Proben koinzidieren – Merkmalschätzer (z.B. *Holzvorrat*, *Stammzahl* oder *Totholz*) berechnet. Die Merkmalschätzer eines Pixels ergeben sich als Mittelwerte von k benachbarten Proben, die über ein Distanzmaß, das die spektrale Ähnlichkeit beschreibt, gewichtet werden (vgl. Abbildung 5-1).

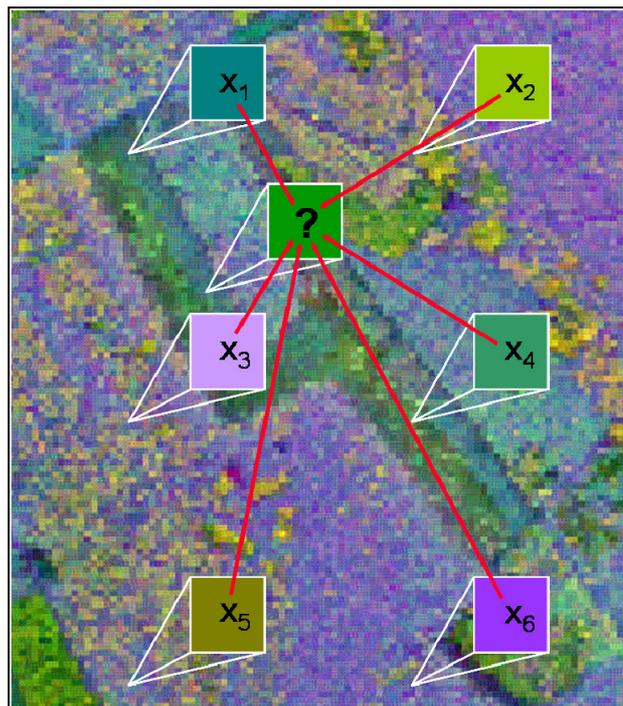


Abbildung 5-1 kNN-Methode - Über bekannte Merkmale von Pixels (x_1 bis x_6) wird über einen Schätzer das unbekannte Pixel (?) klassifiziert.

Jedes Pixel enthält pro Kanal einen digitalen Wert als spektrale Information. Die spektrale Differenz zwischen zwei Pixel kann mit Hilfe einer einfachen Metrik bestimmt werden. Ein gebräuchliches Distanzmaß ist die Euklidische Distanz, $d_{(ip)}$, die im spektralen Raum von Pixel p , das klassifiziert werden soll, zu jedem Pixel i , für das eine terrestrische

Beobachtung vorliegt, berechnet wird. Falls x_1 und x_2 die Merkmalsvektoren zweier Pixel sind, deren Ähnlichkeit überprüft werden soll, ist die Euklidische Distanz $d(x_1, x_2)$ zwischen ihnen

$$d_{(x_1, x_2)} = \left[\sum_{j=1}^N (x_{1j} - x_{2j})^2 \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

wobei N die Anzahl der spektralen Komponenten (z.B. verwendete Kanäle) bezeichnet.

Ein euklidisches Distanzmaß, bei dem die korrelativen Beziehungen zwischen den Merkmalen unberücksichtigt bleiben, ist die Mahalanobis-Distanz (BORTZ 1993)

$$d'_{(x_1, x_2)} = \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c^{(x_1, x_2)} \cdot (x_{1j} - x_{2j}) \cdot (x_{1k} - x_{2k}) \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

mit $c^{(x_1, x_2)}$ = Element (x_1, x_2) aus der Inversen der Varianz-Kovarianz-Matrix.

Eine Generalisierung der Euklidischen Distanz ist die Minkowski- r -Distanz (BORTZ 1993). Wird statt des Exponenten 2 (bzw. $1/2$) der Exponent r (bzw. $1/r$) eingesetzt, erhält man eine Verallgemeinerung der mit der Gleichung (5.1) beschriebenen Euklidischen Distanz:

$$d''_{(x_1, x_2)} = \left[\sum_{j=1}^N (x_{1j} - x_{2j})^r \right]^{1/r} \quad (5.3)$$

Aus $r = 1$ resultiert die City-Block-Metrik (BORTZ 1993), bei der sich die Distanz zweier Punkte aus der Summe der Merkmalsdifferenzen ergibt.

Durch das Variieren des Exponenten r werden Merkmalsdifferenzen unterschiedlich gewichtet. Mit $r = 1$ werden alle Merkmalsdifferenzen unabhängig von ihrer Größe gleich gewichtet. Für $r = 2$ erhalten größere Differenzen ein stärkeres Gewicht als kleinere Differenzen. Wird $r = \infty$ gesetzt, wird die größte Merkmalsdifferenz mit 1 gewichtet und alle übrigen erhalten ein Gewicht von 0.

Objekte zeigen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Intensität, räumliche Variabilität und den Spektralbereich der Reflexion. Die Spektralbereiche mit einer großen Variabilität

in der Rückstrahlung sind meist besser zur Differenzierung von Merkmalsklassen geeignet. Die Variabilität der spektralen Information ist in den einzelnen Kanälen unterschiedlich stark ausgeprägt. Um Kanäle mit einer großen Variabilität in der Rückstrahlung und den damit verbundenen Einfluss auf die Unterscheidung von Merkmalsklassen stärker zu gewichten, wird in die Distanzformel der Parameter a_j für die Gewichtung der Kanäle eingefügt (FRANCO-LOPEZ et al. 2001).

$$d_{(x_1, x_2)} = \left[\sum_{j=1}^N a_j^r (x_{1j} - x_{2j})^r \right]^{1/r} \quad (5.4)$$

Wählt man den Parameter a_j für $j = 1, \dots, N$ gleich 1, so haben alle Kanäle bei der Berechnung der Distanz das gleiche Gewicht. Es kann aber auch jedem Kanal ein angepasstes Gewicht a_j zuteil werden.

Die $k = 1$ bis $k = 50$ nächsten spektralen Nachbarn, d.h. Pixel mit korrespondierenden terrestrischen Beobachtungen, werden für die weiteren Betrachtungen verwendet. Dabei kommen die Pixel zur Auswahl, die die Bedingung

$$d_{(1),p} \leq d_{(2),p} \leq \dots \leq d_{(k),p} \leq \dots \leq d_{(n),p} \quad (5.5)$$

im spektralen Raum erfüllen, wobei $d_{(k),p}$ die Distanz der k nächsten Nachbarn und n die Anzahl der verfügbaren Pixel mit korrespondierenden terrestrischen Daten ist. Alle Pixel mit Distanzen im spektralen Raum größer $d_{(k),p}$ vom betrachteten Pixel p werden ignoriert. Bei $k = 1$ wird nur das Pixel mit der geringsten spektralen Differenz für die weitere Berechnung berücksichtigt. Je höher k ist, desto mehr Pixel mit zugeordneten terrestrischen Informationen beeinflussen den zu berechnenden Merkmalswert des Pixels ohne terrestrische Informationen. Die Verwendung von k Stichproben erlaubt es, die beispielsweise durch Signalstörung verursachte, zufällige Streuung einzuschränken.

Die Distanzwerte spiegeln nur die Unterschiede zwischen den spektralen Informationen zweier Pixel wieder. Um die Werte eines bei terrestrischen Aufnahmen erhobenen Merkmals, welche den k nächsten Pixel zugeordnet sind, in die weitere Berechnung einfließen zu lassen, müssen diese entsprechend ihrer spektralen Distanz gewichtet werden. Deshalb wird für jedes ausgewählte Pixel ein Gewicht $w_{(i),p}$ kalkuliert.

$$w_{(i),p} = \frac{1}{d_{(i),p}^2} \bigg/ \sum_{i=1}^k \frac{1}{d_{(i),p}^2} \quad (5.6)$$

Je ähnlicher die spektrale Information ist, desto höher ist das Gewicht und damit der Einfluss auf den zu berechnenden Merkmalswert.

MALTAMO & KANGAS (1998) modifizieren (5.6) zur Bestimmung des Pixelgewichtes

$$w'_{(i),p} = \frac{\left(\frac{1}{1+d_{(i),p}}\right)^t}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{1+d_{(i),p}}\right)^t} \quad (5.7)$$

wobei k die Anzahl der nächsten Nachbarn festlegt und t die Gewichtung der Distanz beeinflusst. Je größer t gewählt wird, umso größer ist das Gewicht der Pixel mit geringer spektraler Distanz. Die Summe aller Gewichte $w'_{(i),p}$ beträgt stets 1.

Für ein Pixel wird mit Hilfe der auf terrestrischen Probeeinheiten erfassten Merkmalswerte und den zugehörigen, aus spektralen Daten abgeleiteten Gewichten der k nächsten Pixel ein Wert für das Merkmal bestimmt.

\hat{m}_p ist ein Schätzer des Merkmals M für Pixel p

$$\hat{m}_p = \sum_{i=1}^k w_{(i),p} m_{(i),p} \quad (5.8)$$

wobei $m_{(i),p}$ die terrestrisch erfassten Werte der $i = 1, \dots, k$ Pixel sind, die im spektralen Raum am nächsten zu Pixel p liegen. Der Prozess wird für jedes Pixel wiederholt und resultiert in Abhängigkeit von der Größe der Inventurregion und der räumlichen Auflösung des Sensors in intensiven Berechnungen.

Durch die Wahl der Parameter k , r , t und a_j ist eine Einflussnahme auf den Schätzer möglich. Für diese Arbeit wurden über 650 Berechnungen mit verschiedensten

Kombinationsmöglichkeiten der Parameter k , r und t durchgeführt. Die Parameter a_1, a_2, \dots, a_j erhielten den Wert 1, da sonst die direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Sensoren unter praxisnahen Bedingungen nicht mehr möglich wäre. Um die optimalen Einstellungen für die Parameter zu erhalten, wurden die Fehler der kNN-Ergebnisse mit dem Prozentualen Root Mean Square Error (%RMSE) (vgl. Kapitel 5.2.4) bestimmt und die Berechnungsalternative ermittelt, die zum kleinsten %RMSE führte.

5.1.2 kNN-Methode für kategoriale Daten

Die oben gezeigten Schätzprozeduren sind nur für intervall- und absolutskalierte Daten definiert und können unter der Voraussetzung der Permutationsinvarianz nicht auf rang- oder nominalskalierte Daten übertragen werden. Als Ansatz zur Lösung dieses Problems wird auf eine gewichtete Mittelwertbildung verzichtet und stattdessen die dem betrachteten Pixel zuzuordnende Merkmalsklasse über Wahrscheinlichkeiten hergeleitet.

Zunächst wird wie im metrischen Fall der Abstand der k nächsten Nachbarn im spektralen Raum zu Pixel p bestimmt und die Gewichte $w_{(i),p}$ hergeleitet (Gleichungen 5.1 bis 5.7). Jedem der k Referenzpixel ist ein Merkmal j mit t Merkmalsklassen zugeordnet. Für jede der t Merkmalsklassen von j wird die Summe der Gewichte $w_{(i),p}$, $w_{p,j}$, berechnet.

$$w_{(i),p,j} = \begin{cases} w_{(i),p}, & \text{falls Pixel } p \text{ Attribut } j \text{ zugeordnet ist} \\ 0, & \text{in allen anderen Fällen} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$w_{p,j} = \sum_{i=1}^k w_{(i),p,j} \quad \text{mit } p = 1, \dots, N; \quad i = 1, \dots, k; \quad (5.10)$$

Aus der Menge der t Gewichte $w_{p,j}$ wird das Maximum bestimmt und das entsprechende Merkmal j mit der entsprechende Merkmalsklasse t wird Pixel p zugeordnet.

5.1.3 Durchführung der kNN-Methode

Die für die Durchführung der Berechnungen nötigen Flächendaten wurden mittels ERDAS IMAGINE (ERDAS Inc.) aus einer georeferenzierten Hyperspektral- (HyMapTM) bzw. Multispektralszene (Landsat) in eine ASCII-Datei ausgelesen. Dies erfolgte mit der Utility

„Pixel to ASCII“, der die im ERDAS-Format „*.img“ abgespeicherte Szene einliest, interpoliert und ausgibt. Eine Zusammenstellung der verwendeten Szenen finden sich im Kapitel 4. Da nicht die gesamte Fläche der Szene von Interesse ist, wird mit Hilfe eines AOI-Layers (Area of Interest) ein Ausschnitt der Szene als Testgebiet festgelegt. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, fiel die Entscheidung auf eine Fläche mit einer Größe von 2,0 x 2,5 km bzw. für das Bootstrapp-Verfahren von 2,0 x 5,0 km. Die daraus resultierende Datei enthält die Gauss-Krüger-Koordinaten und die Grauwerte aller Kanäle eines jeden Pixels. Für die 2,0 x 2,5 km große Testfläche beinhaltet die Datei für Landsat-Daten 5712 und für die Hyperspektraldaten 139674 Pixel. Die Größe variiert von ca. 600 Kilobyte bei einer Multispektralszene bis ca. 110 Megabyte für die Hyperspektralszene mit 128 Kanälen. Um entsprechende aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und realitätsnahe Bedingungen sicherzustellen, wurde bei der Auswahl der Fläche auf Heterogenität der spektralen Information Wert gelegt.

Die Erstellung der Feldaufnahmedatei erfolgt analog zur Aufbereitung der Flächendaten. Zunächst werden die Koordinaten aller Probeflächen in eine ASCII-Datei gespeichert. Für die Hyperspektraldaten dienen als Referenzpixel über der terrestrischen Probe – wie in Kapitel 5.3 beschrieben – das Zentralpixel sowie der Mittelwert der neun über der Probefläche gelegenen Pixel. Mit dem Utility „Pixel to ASCII“ im Programm ERDAS IMAGINE werden die Grauwerte für die Stichprobenkoordinaten ausgelesen. In die letzte Spalte der ASCII-Datei wird dann entweder das waldwachstumskundliche Merkmal *Grundfläche je Hektar* oder das ökologische Merkmal *Totholz* (Kodierung: 0 = kein Totholz, 1 = Totholz) angehängt. Da die *Grundfläche* mit dem Vorrat des Bestandes korreliert, können die Aussagen für die Grundflächendaten auch auf die Vorratsschätzung übertragen werden. Eine Übersicht über die Feldaufnahmen und die verwendeten Proben sind im Kapitel 3.4 zu finden.

Für die Berechnungen wurden für den monotemporalen Ansatz die drei Landsat- und die Hyperspektralszene und für den multitemporalen Ansatz zwei kombinierte Landsat-Szenen verwendet (siehe Kapitel 4). Die Kalkulationen nahmen auf einem, mit einem Pentium III (750 MHz) ausgestatteten, PC eine Rechenzeit entsprechend den Einstellungen zwischen einer Minute für die Multispektral- und 12 Stunden für die Hyperspektraldaten mit 128 Kanälen in Anspruch. Die von dem kNN-Programm ausgegebene ASCII-Datei beinhaltet die x-y-Koordinaten und die kalkulierte *Grundfläche* bzw. die 0-1-Kodierung beim

Totholz. Zusätzlich wird bei nominal-skalierten Merkmalen die Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegeben. Einzelheiten zum Programm und mögliche Einstellungen finden sich im Kapitel 5.5.2.

Im Anschluss an die Berechnungen erfolgte die Visualisierung der Ergebnisse mit dem Programm ARC VIEW 3.1 von ESRI Inc. Von großem Vorteil ist, dass die vom kNN-Programm erzeugte ASCII-Datei ohne Umformatierungen direkt importiert werden kann.

Neben der Visualisierung der Ergebnisse wird für Probepunkte der terrestrisch erhobene und der mit der kNN-Methode kalkulierte Wert verglichen und der Root Mean Square Error (vgl. Kapitel 5.2.4) für das Merkmal *Grundfläche* bzw. für das *Totholz* die Anzahl der Übereinstimmungen errechnet.

Von den auf der 2,0 x 2,5 km großen Testfläche liegenden Probepunkten wurde mit Hilfe von Zufallszahlen 30 Punkte ausgewählt und als Referenzpunkte definiert. Diese Punkte flossen nicht in die kNN-Berechnungen ein. Aus der kNN-Ergebnisdatei werden mit Hilfe der Koordinaten die Merkmalswerte der Pixel ausgelesen, die genau über den weggelassenen Probepunkten liegen. Den 30 terrestrisch erhobenen Werten stehen somit 30 kalkulierte Werte gegenüber. Dies erlaubt den Fehler für die Grundfläche mit dem Prozentualen Root Mean Square Error zu bestimmen. Der Vergleich der Fehlerwerte ermöglicht es, unterschiedliche Ausgangsdaten und Parametereinstellungen zu vergleichen und die Variante mit dem geringsten %RMSE zu ermitteln. Bei dem Merkmal *Totholz* wird die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen den terrestrisch erhobenen Referenzpunkten und den kNN berechneten Werten bestimmt und die Variante mit den meisten Übereinstimmungen ermittelt.

5.2 Fehleranalyse

Für die Bestimmung des Fehlers der kNN-Berechnungen wird der Root Mean Square Error und zur Überprüfung der Robustheit der kNN-Methode gegenüber variierenden Stichprobendaten ein modifiziertes Bootstrapp-Verfahren eingesetzt. Zum Verständnis wird kurz auf die Wiederholungs- und Treffergenauigkeit sowie auf den Bias eingegangen.

Bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit von Ergebnissen sind zwei Arten von Genauigkeiten zu unterscheiden:

- Wiederholungsgenauigkeit (precision)
- Treffergenauigkeit (accuracy).

5.2.1 Wiederholungsgenauigkeit (precision)

Die Wiederholungsgenauigkeit bezieht sich auf die Größe der Abweichungen eines geschätzten Mittelwertes, $\hat{\mu}$, vom wahren Populationsmittelwert, μ , falls die Stichprobe wiederholt durchgeführt wird. Die Wahl des Stichprobenumfanges beeinflusst die Wiederholungsgenauigkeit (COCHRAN 1977).

5.2.2 Treffergenauigkeit (accuracy)

Die Treffergenauigkeit bezieht sich auf die Abweichungen vom wahren Mittelwert, μ . Im Gegensatz zur Wiederholungsgenauigkeit lässt sich die Treffergenauigkeit nicht durch den Stichprobenumfang beeinflussen.

In Abbildung 5-2 wird der Effekt der beiden Genauigkeitskonzepte dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass die Angabe des Stichprobenfehlers nur die Wiederholungsgenauigkeit einschließt. Ein Ergebnis kann daher eine hohe Genauigkeit suggerieren, wenn die Wiederholungsgenauigkeit hoch aber die Treffergenauigkeit unzulänglich ist (COCHRAN 1977).

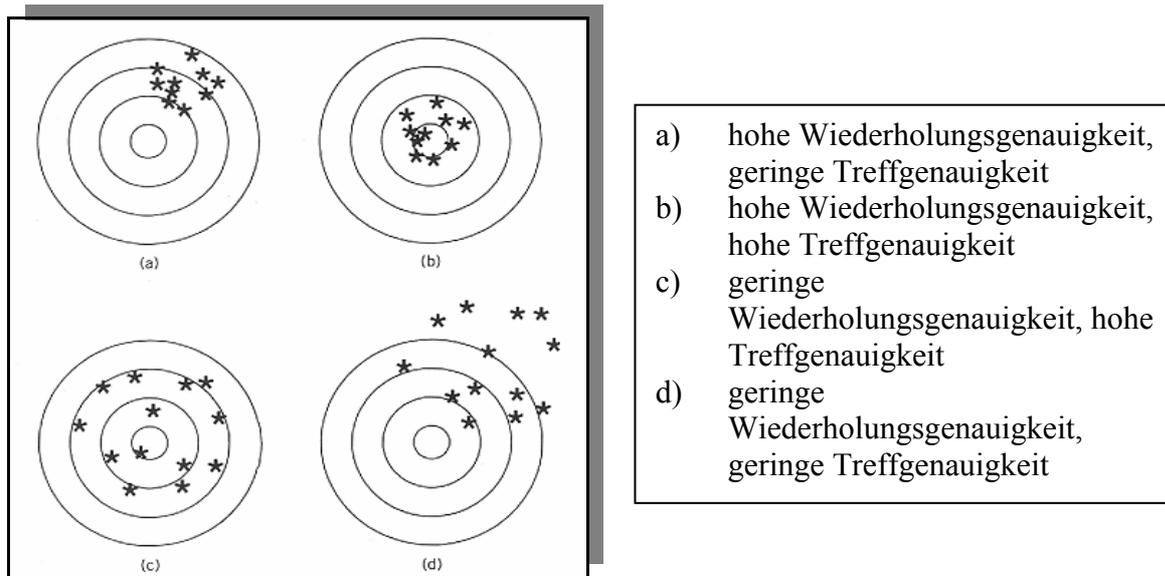


Abbildung 5-2 Treffgenauigkeit (accuracy) und Wiederholungsgenauigkeit (precision)
(Quelle: HÄUSSLER et al. 2000)

5.2.3 Bias (Verzerrung)

Der Bias, B , ist direkt verknüpft mit der Treffgenauigkeit, da

$$B = \hat{\mu} - \mu. \quad (5.11)$$

5.2.4 Root Mean Square Error (RMSE)

Der Mean Square Error (MSE) ist ein Maß zur Beurteilung von Stichprobenalternativen, da er Bias und Varianz eines Verfahrens verbindet.

$$\text{MSE} = (\text{Varianz von } \hat{\mu}) + (\text{bias})^2 \quad (5.12)$$

Wird aus der Gleichung (5.12) die Wurzel gezogen, so erhält man den Root Mean Square Error (RMSE).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} \quad (5.13)$$

Der RMSE wird für analytische Zwecke auch als Prozentualer Root Mean Square Error (%RMSE) angegeben.

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{MSE(\hat{\mu})}}{\hat{\mu}} \quad (5.14)$$

5.2.5 Bootstrapping

Die Bootstrap-Methode wird für die Prüfung der Unempfindlichkeit der kNN-Methode gegenüber variierender Stichprobengrundlagen verwendet. Es existieren verschiedene Varianten der Bootstrap-Methode, von denen hier die einfachste – Bootstrapping with Replacement – beschrieben wird (SACHS 1997, EFRON 1983, EFRON & TIBSHIRANI 1993, 1997).

Ist \hat{F} die empirische Verteilungsfunktion einer Datenreihe mit der Auswahlwahrscheinlichkeit $1/n$ für jedes y_i , und falls $y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$ eine Zufallsstichprobe von \hat{F} ist, dann ist

$$y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^* \approx \hat{F} \quad (5.15)$$

Jedes y_i^* wird unabhängig mit Zurücklegen und mit gleicher Auswahlwahrscheinlichkeit von $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ gezogen. Damit hat

$$\bar{y}^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^*}{n} \quad (5.16)$$

die Varianz

$$v(\bar{y}^*) = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n^2} \quad (5.17)$$

Beim Bootstrap-Verfahren werden Zufallsstichproben vom Umfang n aus einem vorliegenden Datensatz gezogen und für jede Ziehung ein Parameter $\hat{\theta}$ (z.B. das

arithmetische Mittel) berechnet. Die Zufallsziehung der Stichproben vom Umfang n wird nB mal wiederholt und

$$\hat{\theta}^2(\hat{\theta}) = \frac{\sum_{i=1}^{nB} (\hat{\theta}_i - \bar{\theta})^2}{nB - 1} \quad (5.18)$$

berechnet, mit

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{nB} \hat{\theta}_i}{nB} \quad (5.19)$$

Für $\hat{\theta}$ kann nicht nur der Mittelwert sondern jeder komplexe Parameter eingesetzt werden (SACHS 1997)

Für die kNN-Methode wurde das Bootstrap-Verfahren wie folgt angepasst: Aus der Gesamtheit m der terrestrisch erhobenen Probepunkte werden Zufallsstichproben vom Umfang n gezogen. Nach der kNN-Berechnung wird die Stichprobe zurückgelegt. Die einmal gezogenen Probepunkte werden nicht noch einmal gezogen. Die Zufallsziehung der Stichproben $y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$ wird $nB = m/n$ mal wiederholt, wobei nB aufgerundet werden muss, weil der Umfang n der Zufallsstichprobe kein ganzzahliges Vielfaches von der Gesamtheit m sein muss. So erhält man nB Gruppen mit $m-n$ Probepunkten. Es ist zu beachten, dass die letzte Zufallsstichprobe einen kleineren Umfang n umfassen kann. Mit jeder der nB Gruppen wird die kNN-Methode durchgeführt und für jedes Pixel der Minimal-, Maximal- und Mittelwert sowie die Standardabweichung des gewählten Merkmals (z.B. *Grundfläche*) berechnet.

Bei der Auswertung der Bootstrap-Berechnungen traten deutliche Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit zwischen den Durchläufen auf (vgl. Kapitel 6.3). Da nicht geklärt werden konnte, ob dies durch die Anzahl unterschiedlicher Wiederholungen oder durch den Einfluss der Anzahl gezogener Proben zurückzuführen ist, wurde das Bootstrap-Verfahren nochmals angepasst. Für drei weitere Bootstrap-Durchläufe wurde die Anzahl der Wiederholungen auf 354 festgelegt. Jeder Probepunkt muss mindestens einmal gezogen werden. Dies wurde realisiert, indem jeder Probepunkt einmal zur Auswahl kam

und die noch zum Stichprobenumfang n fehlenden Probepunkte zufällig mit Hilfe von Zufallszahlen gezogen wurden.

Zur Ermittlung der Unempfindlichkeit der kNN-Methode gegenüber verschiedenen Stichprobenausgangsdaten wurden sechs Bootstrap-Durchläufe mit den Zufallsstichprobenumfängen $n = 1; 10$ und 30 gerechnet. Dabei ist zu beachten, dass die kNN-Rechnungen nicht mit der Stichprobe sondern mit der Gruppe, aus der die Stichprobe gezogen wurde, erfolgte (Gruppenumfang = Grundgesamtheit m minus Stichprobenumfang n) Die Wiederholungen (= Anzahl der Gruppen) und der Gesamtstichprobenumfang sind der Tabelle 5-1 zu entnehmen.

Tabelle 5-1 Parameter der sechs durchgeführten Bootstrap-Durchläufe.

Bootstrap-Durchlauf	Probepunkte gesamt (m)	Anzahl gezogener Probepunkte (n)	Wiederholungen (nB)
1	354	1	354
2	354	10	36
3	354	30	12
4	354	1	354
5	354	10	354
6	354	30	354

Zum Einsatz kam eine Testfläche von $2,0 \times 5,0$ km im Tharandter Wald. Für jedes der 11424 Pixel über der Testfläche der Landsat-7-Szene vom August 2000 und der multitemporalen Szene von 1999/2000 wurden die *Grundflächen* berechnet. Dies ergibt entsprechend den Bootstrap-Durchläufen 354, 36 oder 12 Grundflächen pro Pixel. Die aus den Grundflächen berechneten Kennwerte Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung geben Auskunft über die Abweichungen der kNN-Ergebnisse gegenüber unterschiedlichen Zusammensetzungen der Stichproben.

5.3 Shift-Algorithmus

Die Anwendung der kNN-Methode erfordert einen pixelweisen Vergleich der spektralen Informationen und eine Zuordnung von terrestrisch erhobenen Daten zu einzelnen Referenzpixel. Die kNN-Methode wurde vor allem auf der Grundlage von Landsat-Daten durchgeführt. Die Pixelgröße von 30×30 m überdeckt etwa eine terrestrische Probefläche von 700 m^2 , d. h. einen Radius von 15 m.

Bei hochauflösenden Sensoren, wie dem verwendeten Hyperspektralsensor, entsteht das Problem, dass eine terrestrische Probefläche von mehr als einem Pixel überdeckt wird (Abbildung 5-3). Die verwendeten Hyperspektraldaten von HyMapTM haben eine Auflösung von 6 x 6 m.

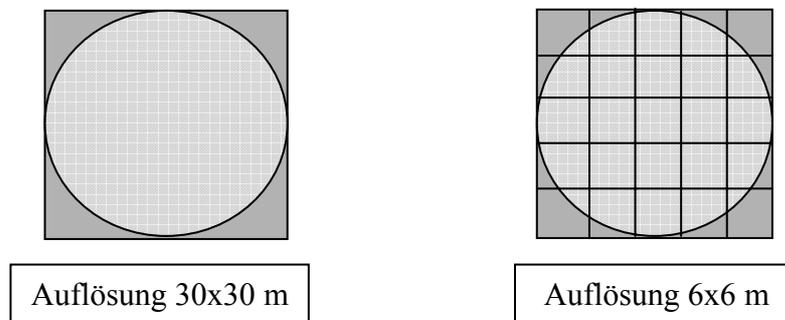


Abbildung 5-3 Pixelüberdeckung der terrestrischen Probe ($r = 15\text{ m}$)

Eine Zuordnung von Teilinformationen der Probefläche (z.B. Daten einzelner Bäume) zu einzelnen Pixel ist aufgrund geometrischer Lagefehler bei großräumigen Anwendungen nicht möglich. Daher werden zur Auswahl von Referenzpixel für die Grunddaten 3 Varianten beschrieben (HÄUSSLER et al. 2000):

- 1) Sämtliche Grunddaten werden auf das zentrale Pixel über dem Stichprobenzentrum bezogen.

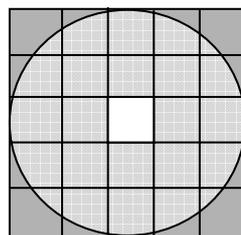


Abbildung 5-4 Verwendung eines zentralen Pixels für die kNN-Methode

- 2) Die Grauwerte in ausgewählten Spektralbereichen der neun Pixel um das Stichprobenzentrum werden für jeden Spektralbereich gemittelt, so dass ein virtuelles Pixel entsteht. Die Grundinformationen werden auf dieses Pixel bezogen.

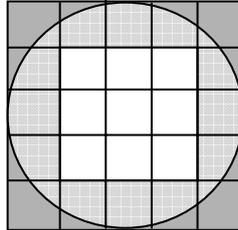


Abbildung 5-5 Mittelwertbildung für 9 Pixel zur Verwendung für die kNN-Methode

- 3) Analog zum Vorgehen bei Variante 2 werden alle 21 Pixel, die auf der Probefläche liegen, zur Mittelwertbildung herangezogen.

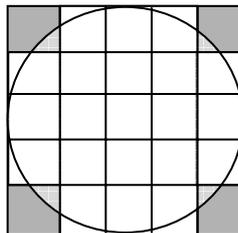


Abbildung 5-6 Mittelwertbildung für 21 Pixel zur Verwendung für die kNN-Methode

In der Untersuchung wurden für die Hyperspektraldaten nur die Varianten 1 und 2 berücksichtigt. Auf die Mittelwertbildung der 21 Pixel über den Stichproben wurde verzichtet, da bei dieser Variante eine sehr hohe Lagegenauigkeit der Pixel über der Stichprobenfläche gefordert ist. Schon eine leichte Abweichung lässt die Randpixel aus dem Stichprobenkreis wandern. Für die Landsat-Daten, mit einer Auflösung von 30 x 30 m, kommt nur die Variante 1 in Frage.

Ein Problem der Mittelwertbildung in heterogenen Beständen besteht darin, dass die Differenzierung, die durch die hohe räumliche Auflösung möglich ist, wieder zurückgenommen wird. Die Auswirkungen der Mittelwertbildung auf das Ergebnis werden im Kapitel 6 beschrieben.

Zunächst wurde eine flächendeckende Schätzung mit Hilfe der kNN-Methoden für eine Testfläche von 2,0 x 2,5 km für die beiden erst genannten Alternativen durchgeführt. Die Überprüfung der Genauigkeit dieser Schätzung wird durch den Root Mean Square Error realisiert. Für jedes zentrale Pixel einer Stichprobe der Variante 2 werden die terrestrischen Daten geschätzt, indem die spektrale Information aller übrigen 9 Pixel von der Probefläche zusammengefasst werden. Durch Vergleich der geschätzten terrestrischen Information mit der tatsächlich beobachteten, lässt sich die Treffgenauigkeit quantifizieren.

5.4 Multitemporaler Ansatz

Bei der Auswertung von Satellitenszenen, insbesondere bei digitalen Klassifizierungsverfahren und den dabei eingeschlossenen thematischen Kartierungen, wird davon ausgegangen, dass das Ziel der Fernerkundung darin besteht, gegebene Situationen und Zustände zu untersuchen und zu erfassen. Eine Erweiterung der Ziele ist es, Entwicklungen der Landschaft und von Ökosystemen, Veränderungen von Zuständen, Folgen von Katastrophen und Kalamitäten usw. zu betrachten. Voraussetzung dafür sind fernerkundliche Aufzeichnungen, wie beispielsweise multispektrale Szenen, in Form von Zeitreihen. Diese können zwei oder beliebig viele Satellitenszenen umfassen. Unabhängig welche Auswertungen vorgenommen werden, müssen die zugrunde gelegten Datensätze vergleichbar sein. Es müssen gleiche Spektralkanäle oder Ratios, Vegetationsindices usw. eingesetzt werden (HILDEBRANDT 1996).

Hier interessieren weniger Veränderungen oder Entwicklungen von Landschaften, sondern die zu verschiedenen Jahreszeiten vorliegende phänologische Situation. Auch bei einer phänologisch günstigen Aufnahmezeit lassen sich oft nicht alle Klassifizierungswünsche erfüllen. Bestimmte Vegetationsunterschiede lassen sich wegen ihrer phänologischen Zyklen und der damit verbundenen zeitlichen spektralen Reflexionscharakteristika zu einer bestimmten Zeit unterscheiden, andere nicht. Deshalb sollte untersucht werden, ob ein multitemporaler Ansatz zur Verbesserung und Verfeinerung der Klassifizierungsergebnisse und daraus resultierend zu einer höheren Genauigkeit bei der kartenmäßigen Darstellung führen kann.

Da sich phänologische Unterschiede auf die spektralen Signaturen auswirken, wird die oben vorgestellte kNN-Methode nicht nur monotemporal sondern auch multitemporal angewendet. Aus dem Blickwinkel der Auswertung bedeutet dies, dass die Anzahl

unabhängiger Variablen verdoppelt wird, da für jedes Band mindestens zwei Grauwerte in das Modell einfließen.

Für die Untersuchung standen drei Landsat-Szenen zur Verfügung. Eine Landsat-5-Szene vom 07. Juli 1989 und zwei Landsat-7-Szenen vom 13. September 1999 bzw. 24. September 2000. Schon am Datum der beiden Landsat-7-Szenen ist erkennbar, dass sie sich phänologisch kaum unterscheiden. Aber gerade dies scheint interessant und wirft die Frage auf, ob eine Verdopplung der Kanäle und der damit erhoffte Informationsgewinn trotz annähernd gleicher pänologischer Situation schon eine höhere Genauigkeit der kNN-Ergebnisse ermöglicht?

In der Untersuchung wurde sowohl der multitemporale Ansatz für die zwei Landsat-7-Szenen als auch für die Landsat-5- mit den Landsat-7-Szenen untersucht. Im Kapitel 4 ist die Transformation zu einer Szene beschrieben. Anschließend werden mit der kNN-Methode Schätzwerte für *Grundfläche* und *Totholz* für jedes Pixel der Testfläche hergeleitet und der Fehlerwert berechnet (vgl. Kapitel 5.1.3).

5.5 Programmierung

Wie im Kapitel 5.1 erläutert, können mit Hilfe der kNN-Methode anhand von über einer Feldaufnahme liegenden Pixel, Variablen von solchen Pixel berechnet werden, die nicht mit terrestrischen Proben koinzidieren.

Die Programmierung dieser Methode erfolgte mit dem Entwicklungswerkzeug Visual Basic von Microsoft Corp. in der Version 6.0 Professional. Sowohl der Ansatz für nominal wie für ordinal skalierte Merkmale wurden berücksichtigt. Ein Struktogramm der Programmierung zeigt Abbildung 5-7. Das so entstandene Programm wird im Folgenden als kNN-Programm bezeichnet.

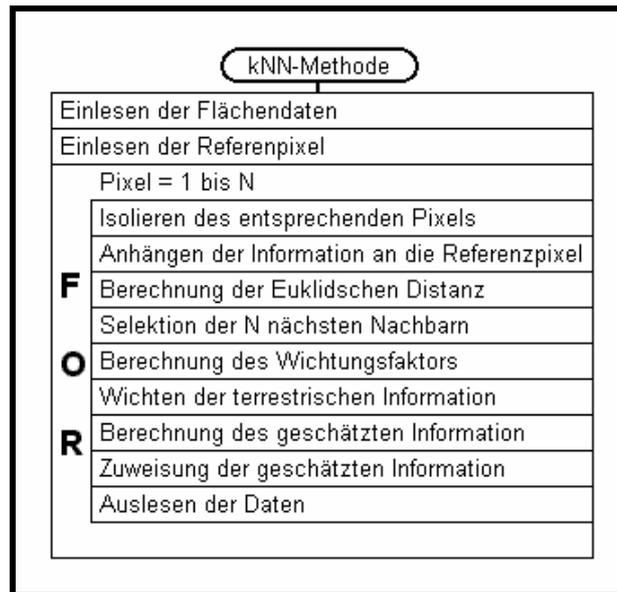


Abbildung 5-7 Struktogramm des Visual-Basic-Programms für die kNN-Methode (nominal)

5.5.1 Visual Basic

Visual Basic bietet eine umfassende Sammlung an Werkzeugen, mit denen eine rationelle Anwendungsentwicklung möglich ist. Das „Visual“ im Namen bezieht sich auf das Verfahren zum Erstellen von grafischen Benutzeroberflächen. Anstatt Programmzeilen zu schreiben, die das Aussehen und die Position der Oberflächenelemente festlegen, können vorgefertigte Objekte am gewünschten Ort hinzugefügt werden. Das „Basic“ im Namen bezieht sich auf die Sprache BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code). Visual Basic hat sich aus dem ursprünglichen BASIC entwickelt und enthält heute mehrere Hundert Anweisungen, Funktionen und Schlüsselwörter, von denen sich viele direkt auf die Windows-Oberfläche beziehen (DREWS & SCHWAB 2000).

Die Visual Basic-Programmiersprache kann auch als Visual Basic für Applikationen in Microsoft Excel, Microsoft Access und anderen Windows-Anwendungen verwendet werden. Die Visual Basic Scripting Edition (VBScript) ist eine weit verbreitete Skriptsprache und eine Untermenge der Visual Basic-Sprache (MSDN LIBERY 1998)

Visual Basic umfasst folgende Werkzeuge und Funktionen:

- Mit den Datenzugriffsfunktionen werden Datenbanken, Front-End- Anwendungen und skalierbare Server-Side-Komponenten für die gängigen Datenbankformate erstellt, u.a. für Microsoft SQL Server und andere Unternehmensdatenbanken.

- ActiveX™-Technologien gestattet die Nutzung der Funktionalität anderer Anwendungen, wie z.B. Microsoft Word, Microsoft Excel und anderer. Des Weiteren können Anwendungen und erstellte Objekte automatisiert werden (Visual Basic Professional Edition oder Enterprise Edition).
- Internet-Funktionen ermöglichen den Zugriff auf Dokumente und Anwendungen über das Internet oder Intranet aus der programmierten Anwendung heraus oder das Erstellen von Internet-Serveranwendungen.
- Die erstellte Anwendung ist eine echte ausführbare Datei, die Visual Basic Virtual Machine verwendet, und kann uneingeschränkt integriert werden.

Die Arbeitsumgebung in Visual Basic wird oft als „Integrierte Entwicklungsumgebung“ oder IDE (Integrated Development Environment) bezeichnet, weil in ihr viele unterschiedliche Funktionen in einer gemeinsamen Umgebung integriert sind, wie beispielsweise Entwurf, Bearbeitung, Kompilierung und Debuggen eines Programms. Dadurch kann die Anwendung schon während der Entwicklung ausgeführt werden. Es besteht so die Möglichkeit, die Qualität des Programms unmittelbar während der Arbeit zu testen.

5.5.2 kNN-Programm

Das in Visual Basic programmierte kNN-Programm wird mit einer Installationsroutine ausgeliefert, welche über die Datei „setup.exe“ gestartet wird. Die Routine packt alle Dateien aus und kopiert sie in die entsprechenden Verzeichnisse. Danach steht dem Nutzer ein Icon zum starten des Programms unter „Start – Programme“ zur Verfügung. Alternativ kann der Start des Programms auch durch öffnen der Datei „knn.exe“ erfolgen.

Nach dem Start des Programms wird dem Nutzer die in Abbildung 5-8 dargestellte Programmoberfläche präsentiert. Die Oberfläche ist benutzerfreundlich gestaltet, so dass auch ein Anwender ohne Hintergrundwissen die Einstellungen vornehmen und die Berechnungen durchführen kann. Im Weiteren wird jede Einstellmöglichkeit kurz beschrieben und die wichtigsten Merkmale dargelegt.

Im oberen Teil der Oberfläche kann zwischen nominal und ordinal skalierte Daten gewählt werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen musste die Einstellung für die *Grundfläche* „Nominal“ und für das *Totholz* „Ordinal“ heißen.

In der Optionsgruppe „Image Bands“ wird unter „Number“ die Anzahl der in der Szene vorhandenen Kanäle eingestellt. Bis zu 200 Kanäle können gewählt werden. In der Sektion „Selection“ trifft der Anwender die Auswahl der Kanäle, die für die Berechnungen zu berücksichtigen sind. Er kann zwischen der Einstellung „all“ oder jeden Kanal einzeln markieren wählen. Über die Befehlsflächen „<“, „>“ wechseln die zur Auswahl stehenden Kanäle in zehner Schritten vor oder zurück.



Abbildung 5-8 Die Programmoberfläche des kNN-Programms, alle Einstellmöglichkeiten sind auf ihr integriert.

Unter „Number of Neighbors“ werden die k -nächsten Nachbarn und unter „Euclidean Distance“ bzw. „Distance Weight“ die Parameter a_i , r und t eingestellt. Im Kapitel 5.1.1 sind die Parameter und ihr Einfluss auf die Berechnungen erklärt.

Im unteren Teil stehen Eingabefelder für die Auswahl der Flächen-, Feld- und Ausgabedatei zur Verfügung. Über die Buttons rechts können die Dateien bequemer über die Menüs „Datei öffnen“ bzw. „Speichern unter“ ausgewählt werden.

Die Berechnung startet mit betätigen des Button „OK“ und kann mit „Cancel“ jederzeit abgebrochen werden. Der Button „Close“ beendet das Programm. In der Fortschrittsanzeige wird der Stand der Berechnung und unter Status der aktuelle Arbeitsschritt angezeigt.

Als erstes überprüft das Programm das Format der Flächen- und Felddatei und bricht mit einer Fehlermeldung bei Unstimmigkeiten ab. Weitere Fehlerrountinen fangen Fehleingaben ab. Die berechneten Ergebnisse werden direkt in die Ausgabedatei geschrieben, so bleiben bei einem Abbruch die schon gerechneten Werte erhalten. Das ASCII-Format garantiert eine leichte Übernahme der Daten in andere Programme wie beispielsweise ARC VIEW oder ERDAS IMAGINE.

6 Ergebnisse

6.1 kNN-Karten

Die mit Hilfe der kNN-Methode errechneten Karten zeigen für jedes einzelne Pixel den über die Grauwerte der Kanäle ermittelten Wert für die Merkmale *Grundfläche* und *Totholz*. Zur besseren Darstellung wurden Klassen gebildet und diese aussagefähigen Farben zugeteilt. Bei *Totholz* sind die beiden Merkmalsklassen *vorhanden* oder *nicht vorhanden* möglich, weshalb die aus der kNN-Berechnung geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit für das *Totholz* zur Klassenbildung herangezogen wurde.

Die über die kNN-Methode hergeleiteten räumlichen Verteilungsmuster wurden mit Hilfe zweier Ansätze überprüft. Zum einen wurden die errechneten kNN-Karten mit HRSC-A- und HyMapTM-Daten verglichen, in denen Strukturdetails der Bestände klar erkennbar sind. Mit der visuellen Begutachtung wird eingeschätzt, wie weit diese Bestandesstrukturen in den Karten abgebildet werden. In Abbildung 6-1 sind beispielhaft Ausschnitte der HRSC-A- und HyMapTM-Szenen sowie der kNN-Karte vom 2,0 km x 2,5 km Testgebiet gegenübergestellt.

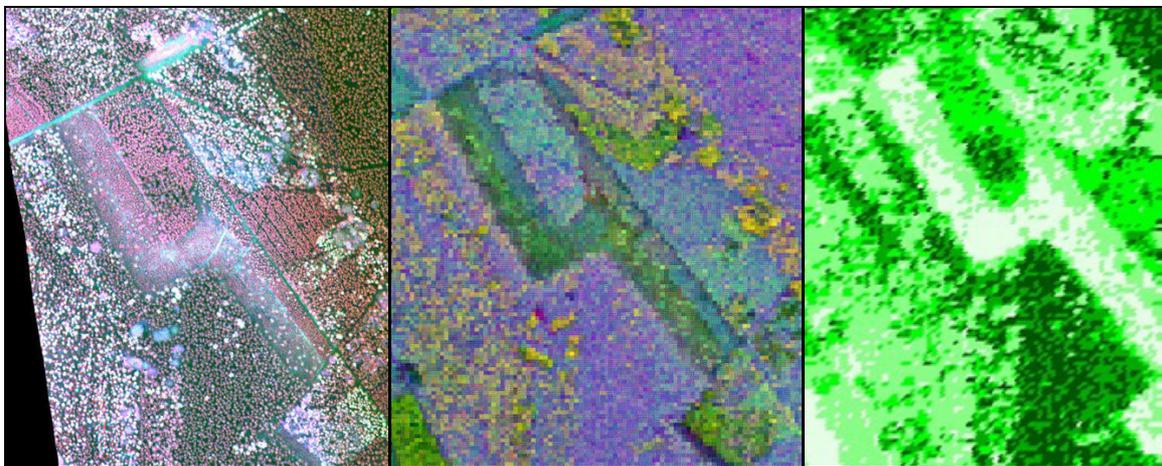


Abbildung 6-1 Vergleich von HRSC-A-Daten (links), HyMapTM-Daten (mitte) und kNN-Grundflächen-Karte (rechts)

Ein zweiter Ansatz zielt auf den Vergleich der kNN-Karten in Abhängigkeit von den bei den Berechnungen verwendeten Szenen, Kanälen und terrestrischen Daten ab. Bei diesem Ansatz wird durch Einschätzung der Grundflächenverteilung aller Pixel untersucht, wie weit unterschiedliche Parameterwerte die abgebildeten Informationsmuster beeinflussen.

6.1.1 Landsat

6.1.1.1 Grundfläche

Als erstes wurde untersucht, welchen Einfluss verschiedene Kanalkombinationen auf die kNN-Grundflächenkarten haben. Für die Berechnung der kNN-Karten kam die Landsat-7-Szene vom September 2000 zum Einsatz. Neben den bei Landsat-7 zur Verfügung stehenden Kanälen 1 bis 8 wurden die durch die Hauptkomponentenanalyse (vgl. Kapitel 4.1.3) und des NDVI-Indexes (vgl. Kapitel 4.1.4) gewonnenen Kanäle 9 bis 12 bzw. 13 mit berücksichtigt. Zu beachten ist, dass der Thermal-Infrarotbereich (Kanäle 6 und 8 – von EURIMAGE wurde der Thermal-Infrarotkanal in zwei Kanäle aufgeteilt) wegen seiner mangelnden Eignung zur Differenzierung von Vegetationsunterschieden nicht in die Betrachtung einfließt (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Es wurden vier Kanalkombinationen bei der Erstellung der Karten berücksichtigt. Die erste Kombination beinhaltet die vom Sensor aufgenommenen Kanäle 1 bis 5 und 7. Die zweite Kombination umfasst eine Zusammenstellung der vier Kanäle der Hauptkomponentenanalyse (PCA) und die dritte den aus dem NDVI-Index hervorgegangenen Kanal. Diesen drei Kanalkombinationen wurde eine vierte Variante, die alle vorher genannten Kanäle beinhaltet, hinzugefügt. Die Gegenüberstellung der kNN-Karten mit einem Hyperspektralbild vom selben Testgebiet ermöglicht einen Vergleich der Bestandesstruktur (vgl. Abbildung 6-2). Der visuelle Vergleich bestätigt die Grundflächenkarte aus allen Kanälen die beste Abbildung der Bestandesstruktur. Die Grundflächenkarten aus dem NDVI-Index und der PCA wirken eher wie zufällig zusammengesetzte Pixelflächen, die aber in Verbindung mit der Karte aus den Kanälen 1 bis 5 und 7 eine deutliche Verbesserung der erkennbaren Struktur bewirken.

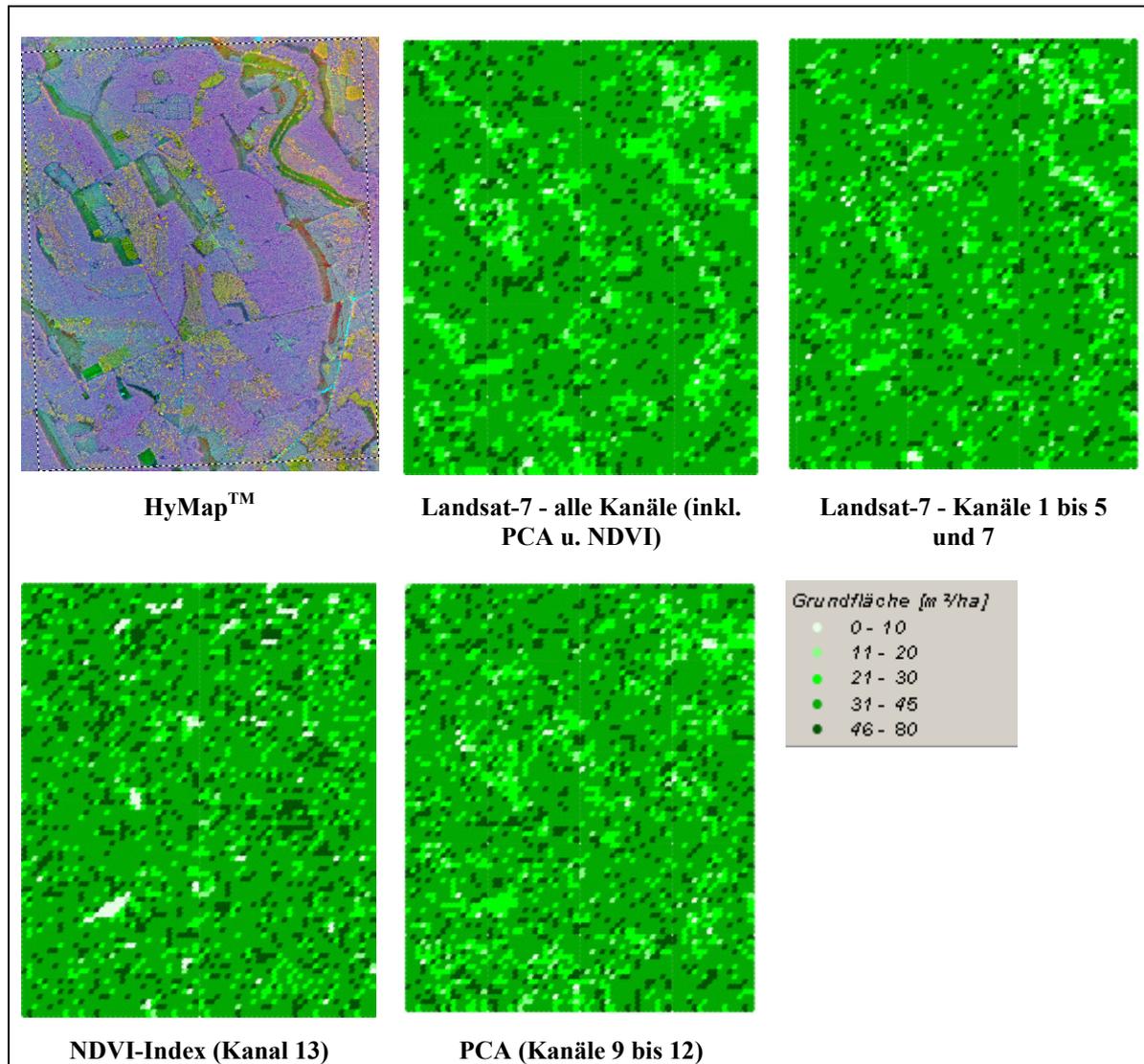


Abbildung 6-2 HyMap™-Szene und kNN-Grundflächen-Karten der Landsat-7-Szene (September 2000) vom Testgebiet I. Gegenüberstellung der für die Berechnungen verwendeten Kanäle.

In Abbildung 6-3 sind die kNN-Karten des Merkmals *Grundfläche* für die drei verwendeten Landsat-Szenen dargestellt. Die vierte Karte entstand aus einer Landsat-Szene, die die Kanäle der 1999- und 2000-Szene verknüpft und hiermit den multitemporalen Ansatz vertritt. Für die Berechnungen wurden alle Kanäle (1 bis 5, 7, PCA-Kanäle, NDVI-Kanal) benutzt. Die Darstellung des Hyperspektralbildes ermöglicht einen optischen Vergleich mit den Karten. Die niedrige Auflösung der Landsat-Daten von 30 m x 30 m und die damit verbundene grobe Rasterung der Karten lässt nur schwer eine Differenzierung von Beständen erkennen. Die kNN-Karten von 1999, 2000 und 1999/2000 erlauben eine Bestandesdifferenzierung nach der *Grundfläche*. Die geringe Übereinstimmung der 1989-kNN-Karte mit dem Hyperspektralbild ist auf die

Zeitverschiebung zwischen dem Aufnahmedatum der Szene und den Feldaufnahmen zurückzuführen.

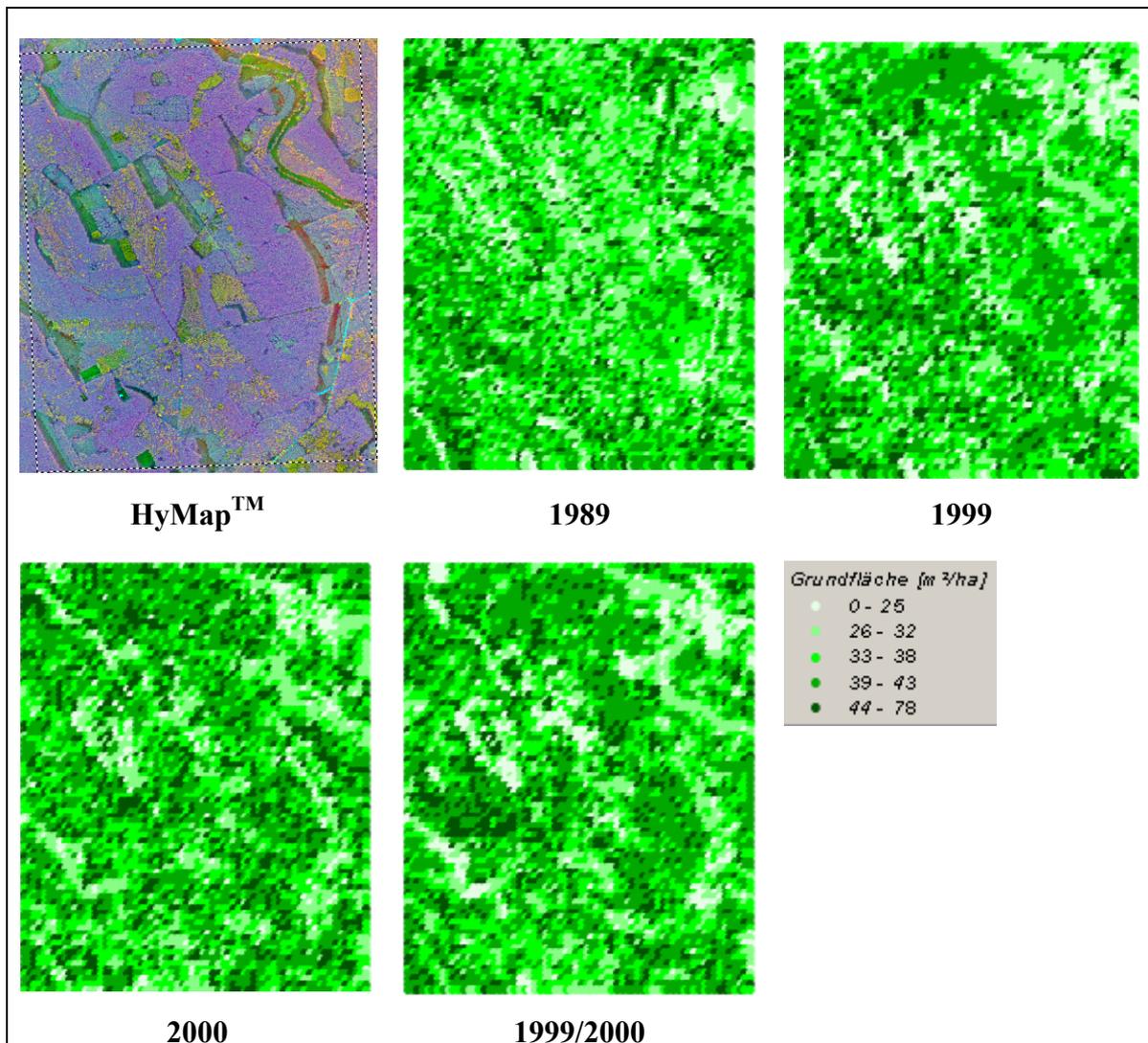


Abbildung 6-3 HyMap™-Szene und kNN-Grundflächen-Karten vom Testgebiet I.
Gegenüberstellung der mono- und multitemporalen Landsat-Szenen.

Eine mit der kNN-Methode erstellte Grundflächenkarte vom gesamten Tharandter Wald ist in Abbildung 6-4 zu finden. Auffällig ist, dass Flächen ohne Wald (beispielsweise Grillenburg) nicht separiert wurden. Dies ist auf das Fehlen von Probepunkten auf Nicht-Waldflächen (z.B. Felder, Wiesen u.a.) zurückzuführen. Durch die Optimierung des Stichprobendesigns der Feldaufnahmen für die Walddifferenzierung wurden nur Probepunkte im Wald aufgenommen. In dieser Arbeit wurde auf die zusätzliche Aufnahme von Nichtwaldpunkten oder die Verwendung einer Waldmaske verzichtet.

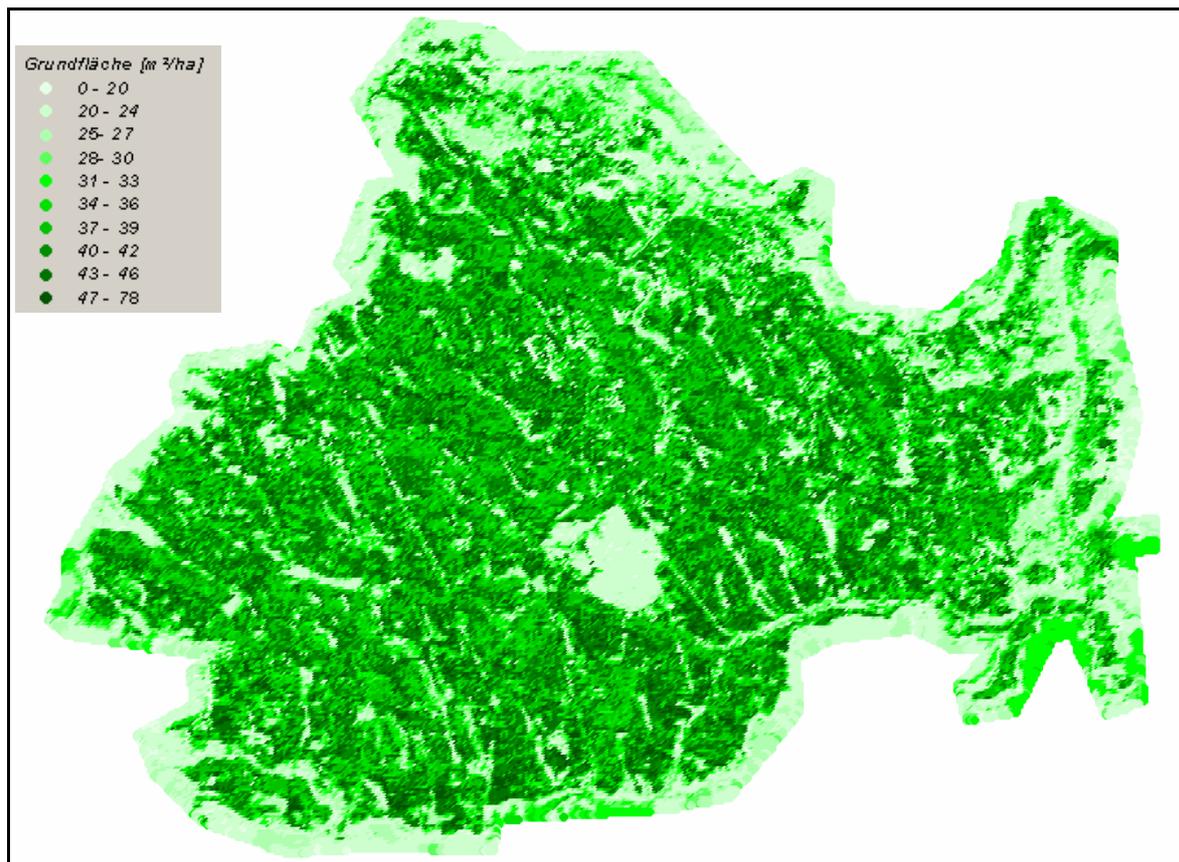


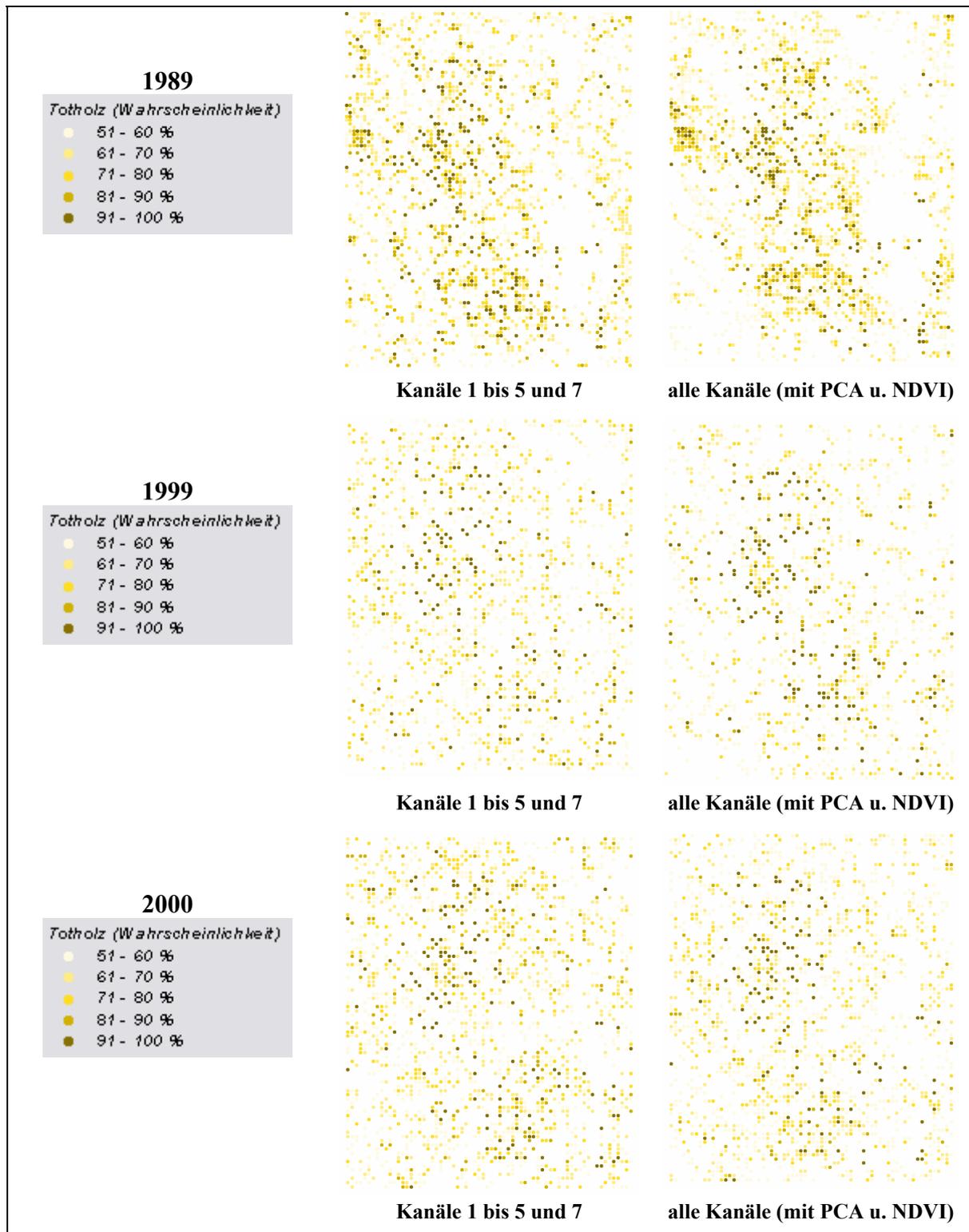
Abbildung 6-4 kNN-Karte für die Grundfläche vom Tharandter Wald (Ausgangsdaten Landsat-7-Szene von 1999/2000 alle Kanäle)

6.1.1.2 Totholz

Für die Erstellung der Totholz-Karten wurde die kNN-Methode für ordinale Daten eingesetzt (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Ausgabedatei enthält neben den Koordinaten die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von *Totholz* und die daraus abgeleiteten Klassen *Totholz* und *kein Totholz*. Die bei der kNN-Methode für ordinale Daten verwendete Wahrscheinlichkeitsschwelle beträgt bei zwei Merkmalsklassen 0,5. Das heißt, bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von über 50 % wird dem Pixel die Klasse *Totholz* zugeordnet. Ist die Wahrscheinlichkeit kleiner gleich 50 % wird für das Pixel *kein Totholz* angenommen. Bei der Visualisierung der kNN-Totholz-Ergebnisse wurde ein zweiter Schwellenwert eingesetzt, der den Pixeln die Klasse *Totholz* bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit größer gleich 90 % zuordnet.

In Abbildung 6-5 sind kNN-Totholz-Karten vom Testgebiet I dargestellt. Zwei Varianten für die Kanalauswahl wurden jeweils für die Landsat-Szenen von 1989, 1999, 2000 und 1999/2000 gegenübergestellt. Die erste Variante beinhaltet die Kanäle 1 bis 5 und 7 und

die zweite alle Kanäle inkl. den PCA- und NDVI-Kanälen. Die Kanäle der Szenen sind identisch mit den bei der Grundfläche besprochenen.



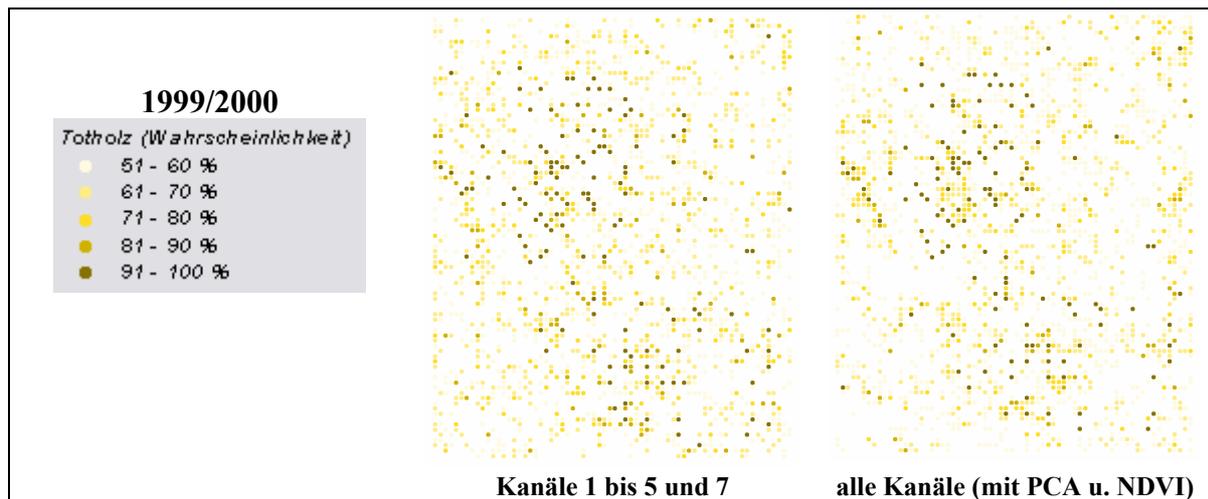


Abbildung 6-5 *kNN-Totholz-Karten für zwei Kanalauswahlvarianten der Landsat-Szenen von 1989, 1999, 2000 und 1999/2000 (Testgebiet I).*

Beim Vergleich der Totholzarten sind zwischen den Karten der Kanalvarianten und den Karten der verschiedenen Szenen Unterscheide zu erkennen, ohne dass eine Gesetzmäßigkeit bei der Verwendung von Kanälen und Szenen auf die flächenmäßige Ausprägung des Merkmals *Totholz* zu erkennen ist. Wird für die Klassifizierung des *Totholzes* der Wahrscheinlichkeitsschwellenwert auf 0,9 erhöht, verringert sich der flächenmäßige Totholzanteil, aber die Genauigkeitsaussage für das Auftreten von *Totholz* erhöht sich (vgl. Abbildung 6-6).

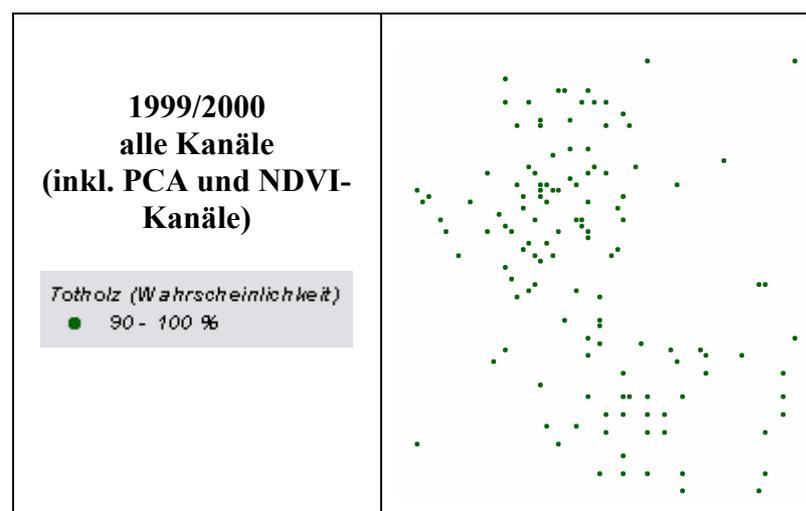


Abbildung 6-6 *kNN-Totholzkarte mit der Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 90 % und 100 %.*

Eine Totholz-kNN-Karte für den gesamten Tharandter Wald gibt die Abbildung 6-7 wieder.

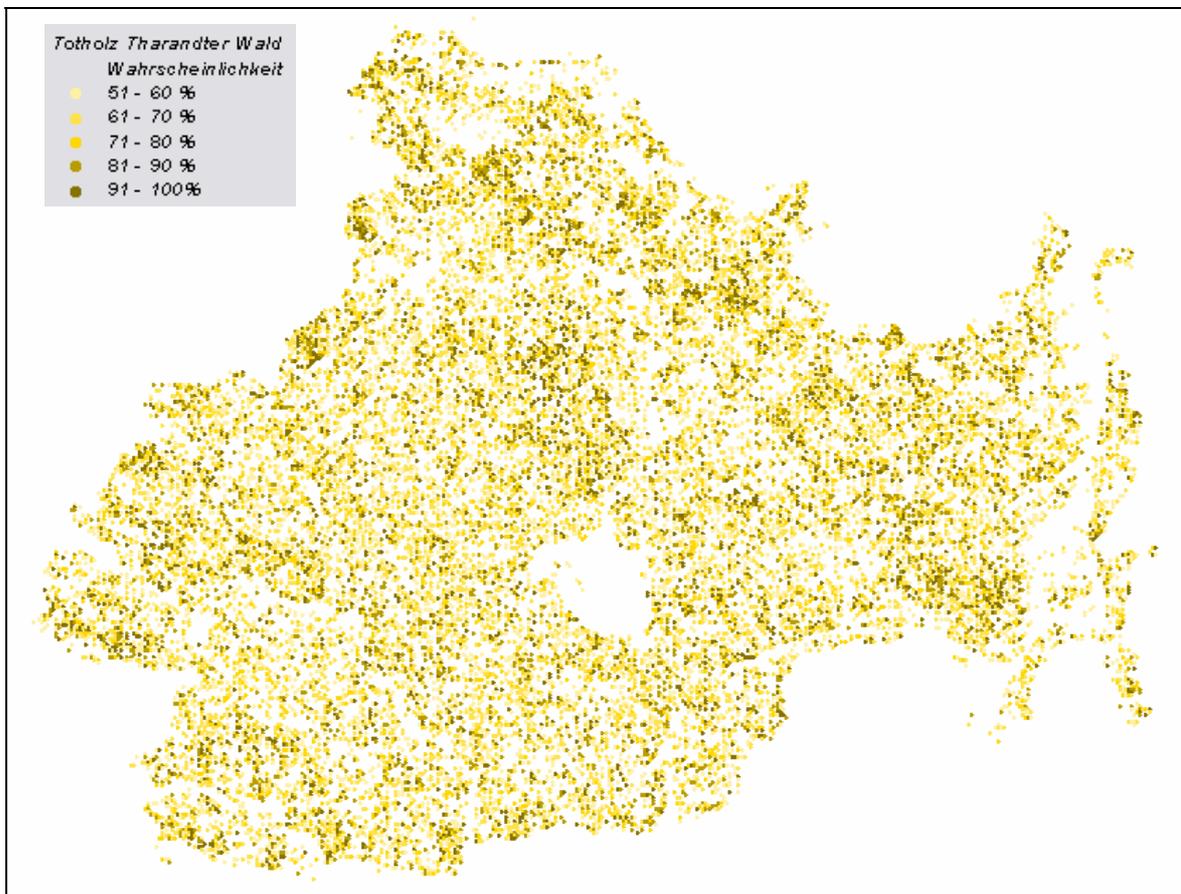


Abbildung 6-7 kNN-Totholzkarte für den Tharandter Wald (Ausgangsdaten Landsat-7-Szene von 1999/2000)

6.1.2 HyMap™

Die verwendeten Hyperspektraldaten unterscheiden sich hinsichtlich der Landsat-Daten nicht nur in ihrer höheren spektralen (128 Kanäle), sondern auch in ihrer besseren geometrischen Auflösung. Die Pixelgröße von 6 m x 6 m ermöglicht bei der Darstellung der kNN-Karten eine wesentlich detailreichere Abbildung der Merkmalsausprägung. In Abbildung 6-8 wird am Beispiel des Merkmals *Grundfläche* die kNN-Karte, hervorgegangen aus der MNF-Transformierten-Hyperspektralszene, einer HRSC-A-Szene gegenübergestellt. Die auf dem HRSC-A-Bild gut erkennbare Bestandesstruktur ist auf der kNN-Karte abgebildet. Im Weiteren werden die kartenmäßigen Ergebnisse für die Merkmale *Grundfläche* und *Totholz* vorgestellt.

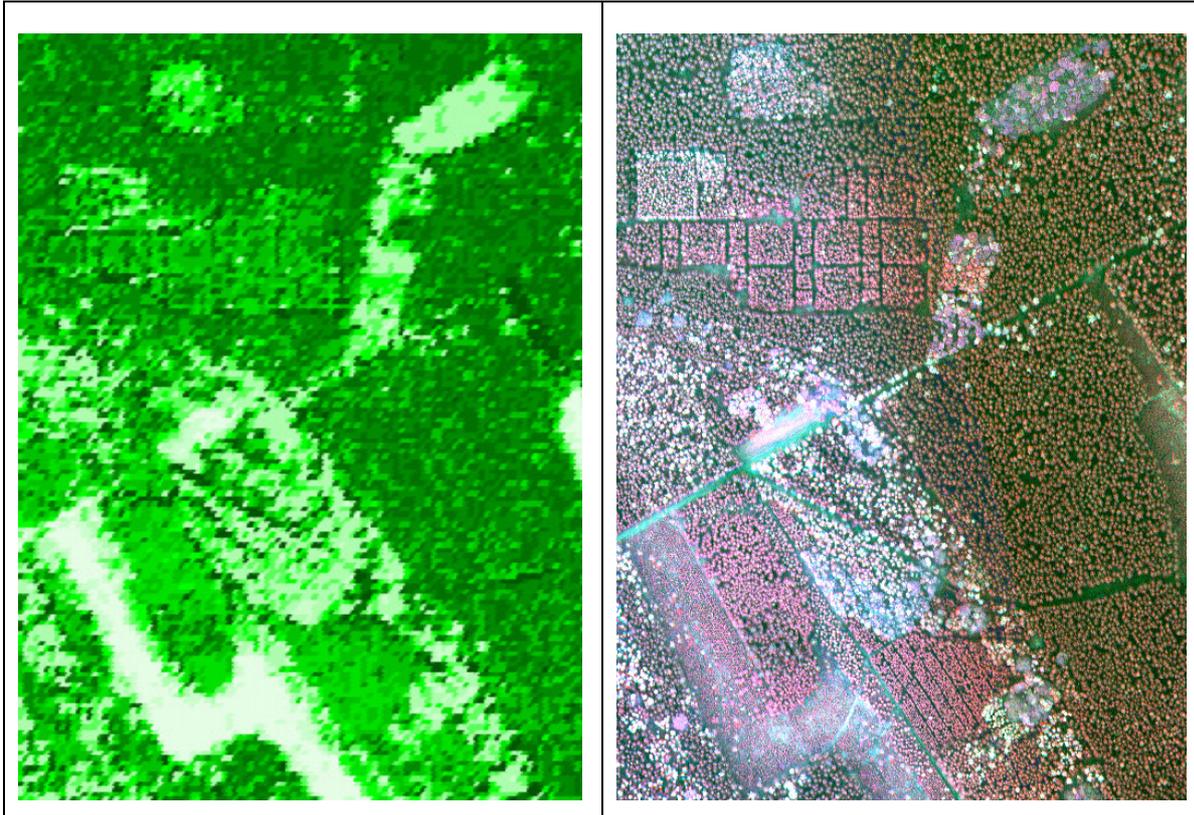


Abbildung 6-8 Vergleich einer kNN-Grundflächen-Karte (HyMapTM; links) mit den HRSC-A-Daten.

6.1.2.1 Grundfläche

Für die Berechnung der kNN-Grundflächenkarten standen zwei hyperspektrale Datensätze bereit. Zum einen der Datensatz mit 128 Kanälen und die durch die MNF-Transformation auf 20 Kanäle reduzierte Szene. Die MNF-Transformation dient der Datenreduktion und der Trennung des Informationsgehaltes der Daten vom Rauschen. Aufnahmekanäle, die einen zu hohen Rauschanteil aufweisen, wurden von Beginn an von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Kapitel 4.1.3). Welche Auswirkungen die Analyse bzw. Transformation auf die kNN-Ergebnisse hat, ist in Abbildung 6-9 ersichtlich. Deutliche Unterschiede treten bei der Darstellung der Jungbestände auf. Die Berechnung mit 128 Kanälen weist einen geringeren Anteil von Pixel mit niedriger *Grundfläche* auf. Dies führt zu einer schlechteren Differenzierung zwischen den Jungbeständen. Die Analyse der spektralen Information der Pixel in Bezug zu ihrer berechneten *Grundfläche* bestätigt die visuelle Einschätzung, wie die Ergebnisse in Abbildung 6-10 belegen. Daher wurden für die weiteren Betrachtungen nur die mit der Minimum-Noise-Fraction-Transformation transformierten Hyperspektraldaten herangezogen.

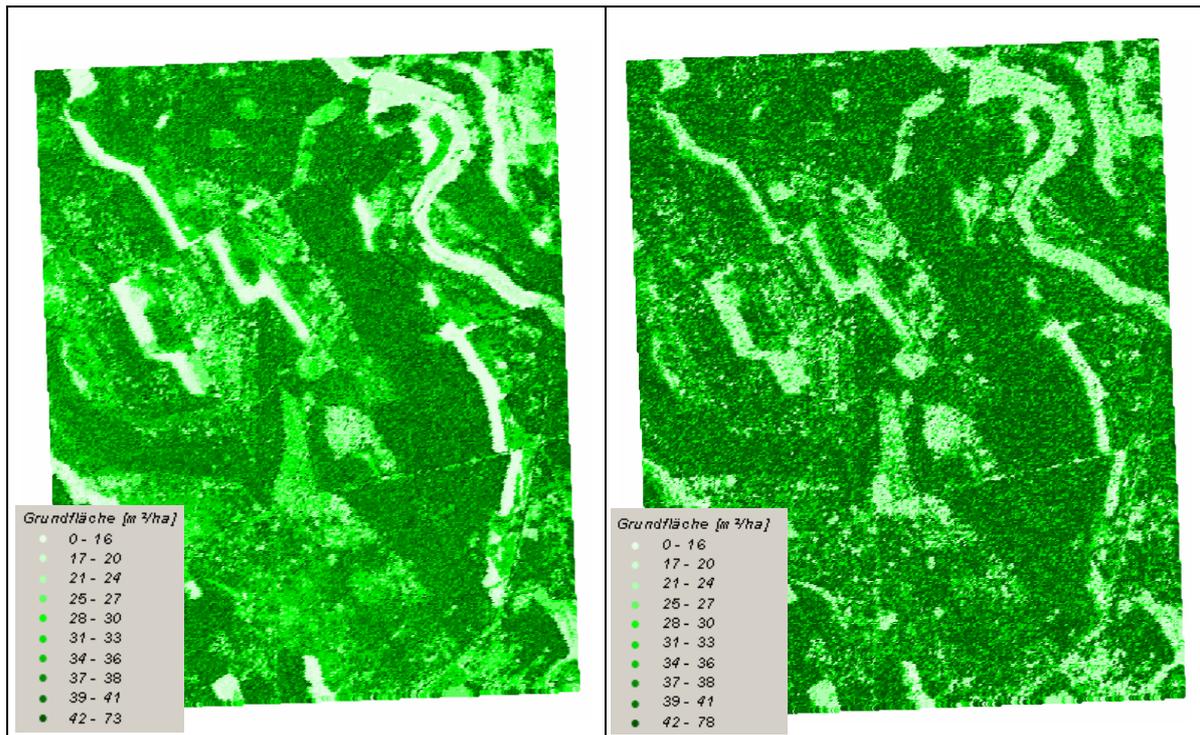


Abbildung 6-9 Vergleich der aus den Hyperspektralszenen mit 128(rechts) bzw. 20 MNF-Kanälen (links) berechneten kNN-Grundflächenkarten (Testgebiet I, Tharandter Wald, Zentralpixel).

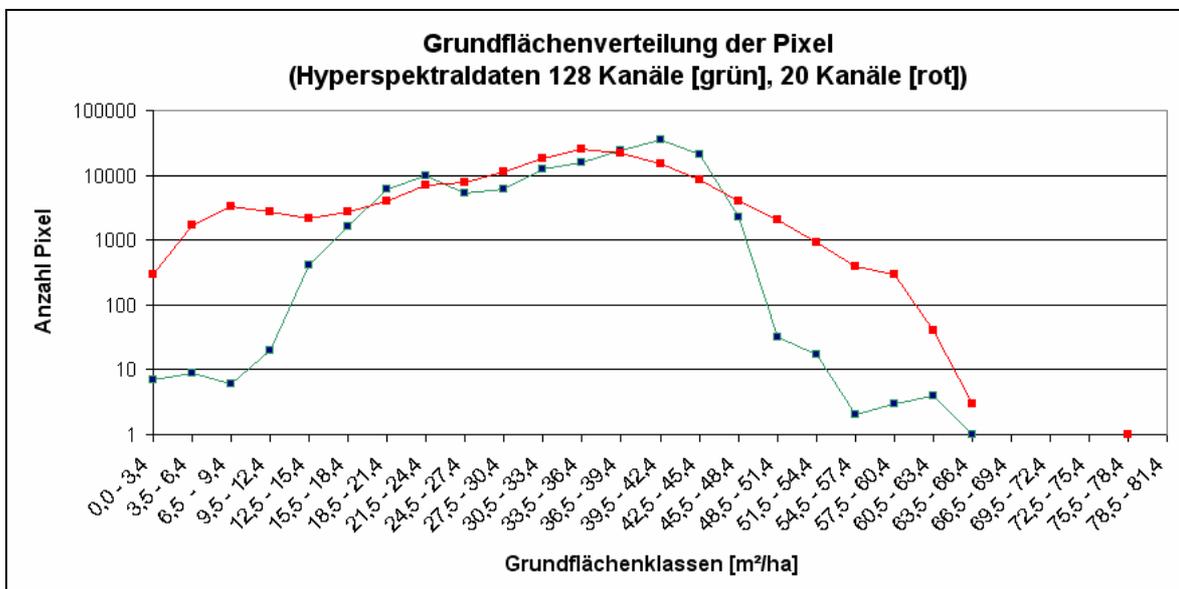


Abbildung 6-10 Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit von der Anwendung der MNF-Transformation: ohne (128 Kanäle, grün); mit (20 Kanäle, rot).

Die Pixelgröße von 6 m x 6 m der Hyperspektraldaten decken nur einen kleinen Teil der Stichprobenfläche mit einem Radius von 15 m ab. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, stehen verschiedene Ansätze zur Lösung dieses Problems zur Verfügung. Für die kNN-Berechnungen wurden zwei Varianten berücksichtigt: das Zentralpixel und die Mittelwertbildung der 9 Pixel, die über den Stichprobenfläche liegen. In Abbildung 6-11 sind die kNN-Karten unter Berücksichtigung dieser zwei Ansätze gegenübergestellt. Karten, die nur mit Hilfe des Zentralpixels berechnet wurden, zeigen eine detaillierte Feinstruktur. Allerdings finden sich keine ausgeprägten Unterschiede in der räumlichen Verteilung des untersuchten Merkmales in Abhängigkeit von der Wahl der verwendeten Variante, i.e. Zentralpixel oder Mittelwertbildung der zentralen 9 Pixel.

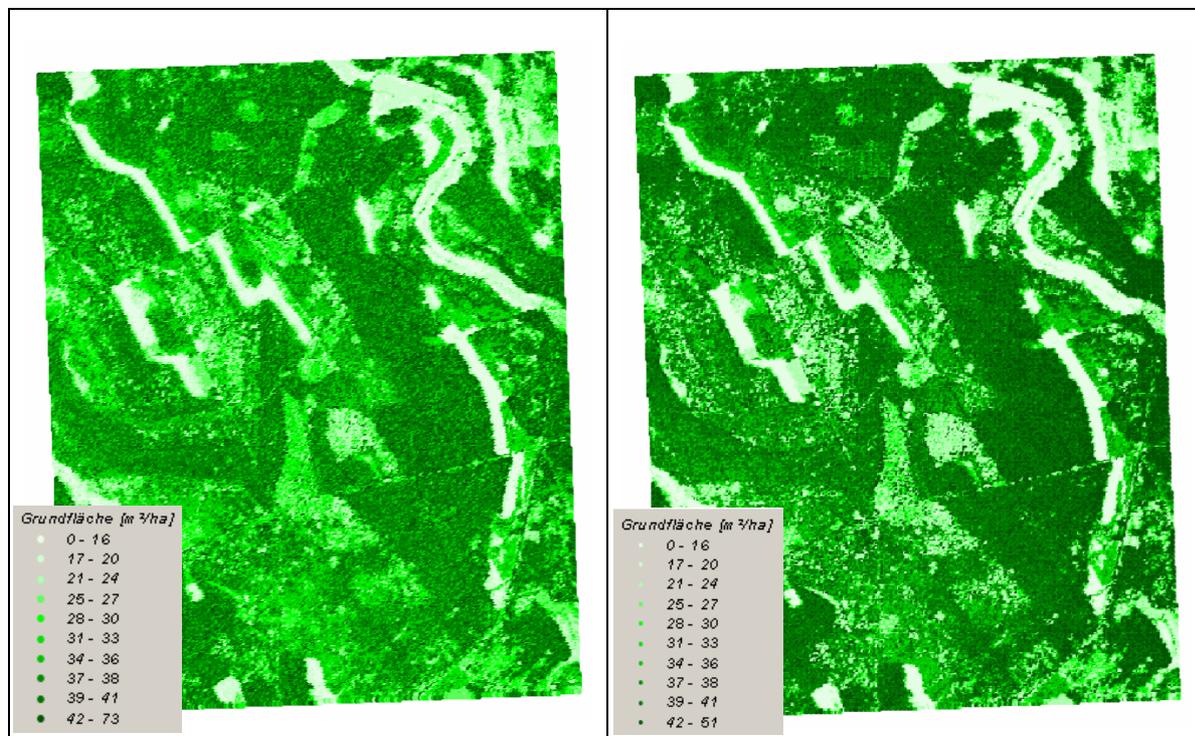


Abbildung 6-11 kNN-Karten basierend auf dem Zentralpixel (links) und dem Mittelwert der 9 Pixel (rechts) über der Stichprobenfläche für die Grundfläche (Testgebiet I, Tharandter Wald)

Ein weiterer Effekt der Mittelwertbildung ist die Verringerung der Variationsbreite der Grundflächenwerte (vgl. Abbildung 6-12). Durch die gewählte Klasseneinteilung bei der Darstellung der Grundfläche in den kNN-Karten mit einer unteren Klasse {0-16 m²/ha} und einer oberen Klasse {42-73 m²/ha} wird dieser Effekt ausgeklammert (vgl. Abbildung 6-12). Die größere Spannweite der Grundflächenwerte bei Anwendung des Zentralpixels

und der geringere Rechenaufwand führten zu der Entscheidung, auf die Mittelwertbildung der neun Pixel über der Stichprobe bei der weiteren Betrachtung des Einflusses der Feldaufnahmen auf die Karten zu verzichten.

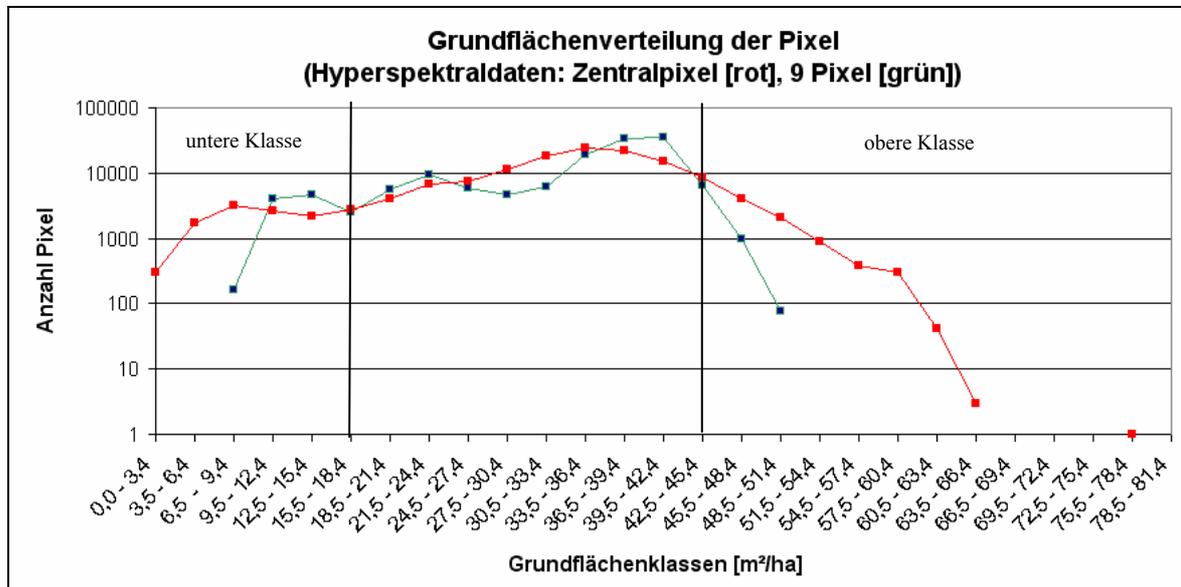


Abbildung 6-12 Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit der über der Stichprobe verwendeten Pixel: Zentralpixel (rot); 9 Pixel (grün).

Als terrestrische Datengrundlage standen drei terrestrische Datenquellen zur Verfügung, die sich durch ihr Aufnahmedesign unterscheiden. Die MNTFR⁶- und kNN-Aufnahmen verwenden ein einphasiges Stichprobenverfahren. Bei den kNN-Aufnahmen sind konzentrische Probeflächen systematischen in einem 100 m x 100 m Raster verteilt. Im Rahmen der MNTFR-Aufnahmen wurden auf einem systematischen 1 km x 1 km Raster Cluster von Probeflächen verteilt (vgl. Kapitel 3.4.2).

Bei den Feldaufnahmen im Rahmen des ProSmart⁷-Projektes wurde ein zweiphasiges Stichprobenverfahren realisiert. Mit Hilfe der in den HRSC-Daten abgebildeten Bestockungsdichte wurden im Aufnahmegebiet Straten gebildet und in jedem Stratum mindestens fünf terrestrische Proben ausgewählt (vgl. Kapitel 3.4.1).

Abbildung 6-13 zeigt die kNN-Karten, berechnet aus den verschiedenen terrestrischen Datenquellen, ergänzt durch eine vierte Karte, die sämtliche Proben der drei Datenquellen

⁶ Scale Dependent Monitoring of Non-Timber Forest Resources Based on Indicators Assessed in Various Data Sources.

⁷ Systematic Market Development Approach for Remote Sensing Technologies

gleichzeitig verwendet. Die Unterschiede zwischen den Karten treten deutlich hervor, die von der Dominanz einzelner Grundflächenklassen verursacht werden. Beispielsweise hat die kNN-Karte, basierend auf der MNTFR-Feldaufnahme, eine Vielzahl von Pixel mit hohen Grundflächenwerten (sehr dunkel). Es dominieren die drei Grundflächenklassen 21 bis 30 m²/ha, 31 bis 40 m²/ha und 41 bis 76 m²/ha. Das Diagramm mit der Grundflächenverteilung der Pixel in Abbildung 6-14 verdeutlicht, dass Pixel mit einer Grundfläche unter 15 m²/ha nur gering und demgegenüber Pixel in den höheren Grundflächenklassen häufig vertreten sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur sehr wenige MNTFR-Stichproben in Jungbeständen bzw. in Beständen mit geringen Grundflächenwerten und eine überproportionale Anzahl in Altbeständen bzw. in Beständen mit hohen Grundflächenwerten liegen. Dies wird untermauert von dem hohen Grundflächenmittelwert von 44,9 m²/ha der MNTFR-Stichproben (vgl. Tabelle 3-4). Bei den kNN-Berechnungen stehen als terrestrische Datengrundlage nur wenige Proben von Beständen mit Grundflächenwerten von kleiner 15 m²/ha zur Verfügung. Diese Konstellation führt bei den Berechnungen zu einer Überschätzung der Grundflächenwerte, da für die k-nächsten Nachbarn Proben mit großen Grundflächenwerten herangezogen werden. Voraussetzung für die Erstellung von kNN-Karten eines Gebietes ohne Über- bzw. Unterschätzung des Merkmals ist die repräsentative Stichprobenerhebung mit der an den k-nächsten Nachbarn angepassten Anzahl.

Durch den zweiphasigen Ansatz bei der ProSmart-Feldkampagne konnten für die kNN-Berechnungen mit 5-nächsten Nachbarn eine ausreichende Anzahl von Proben mit einer großen Grundflächenspannbreite gewährleistet werden. Allerdings ist durch die Wahl des Aufnahmegebietes, indem vor allem junge und mittelalte Bestände vorherrschen, Proben mit hohen Grundflächenwerten kaum vertreten. Der Grundflächenmittelwert der Aufnahme von 24,72 m²/ha bestätigt die geringe Präsenz von Beständen mit hohen Grundflächenwerten. Dies führt zu der kNN-Karte (vgl. Abbildung 6-13), in denen Jungbestände gut differenziert und Altbestände kaum dargestellt werden.

Die kNN-Karte, basierend auf der kNN-Feldaufnahme, differenziert vor allem Bestände im mittleren Alter. Eine Ausscheidung von Jungbeständen ist durch die Ermanglung von Probepunkten in Jungbeständen nicht möglich.

Die Zusammenführung aller drei Feldaufnahmen führt zu einem terrestrischen Datenumfang, der eine ausreichende Anzahl von Proben in allen Altersklassen für die

kNN-Berechnungen bereitstellt. Die daraus berechnete kNN-Karte (vgl. Abbildung 6-13) stellt die Bestockung auf Grundlage von Grundflächenklassen wirklichkeitstreu dar.

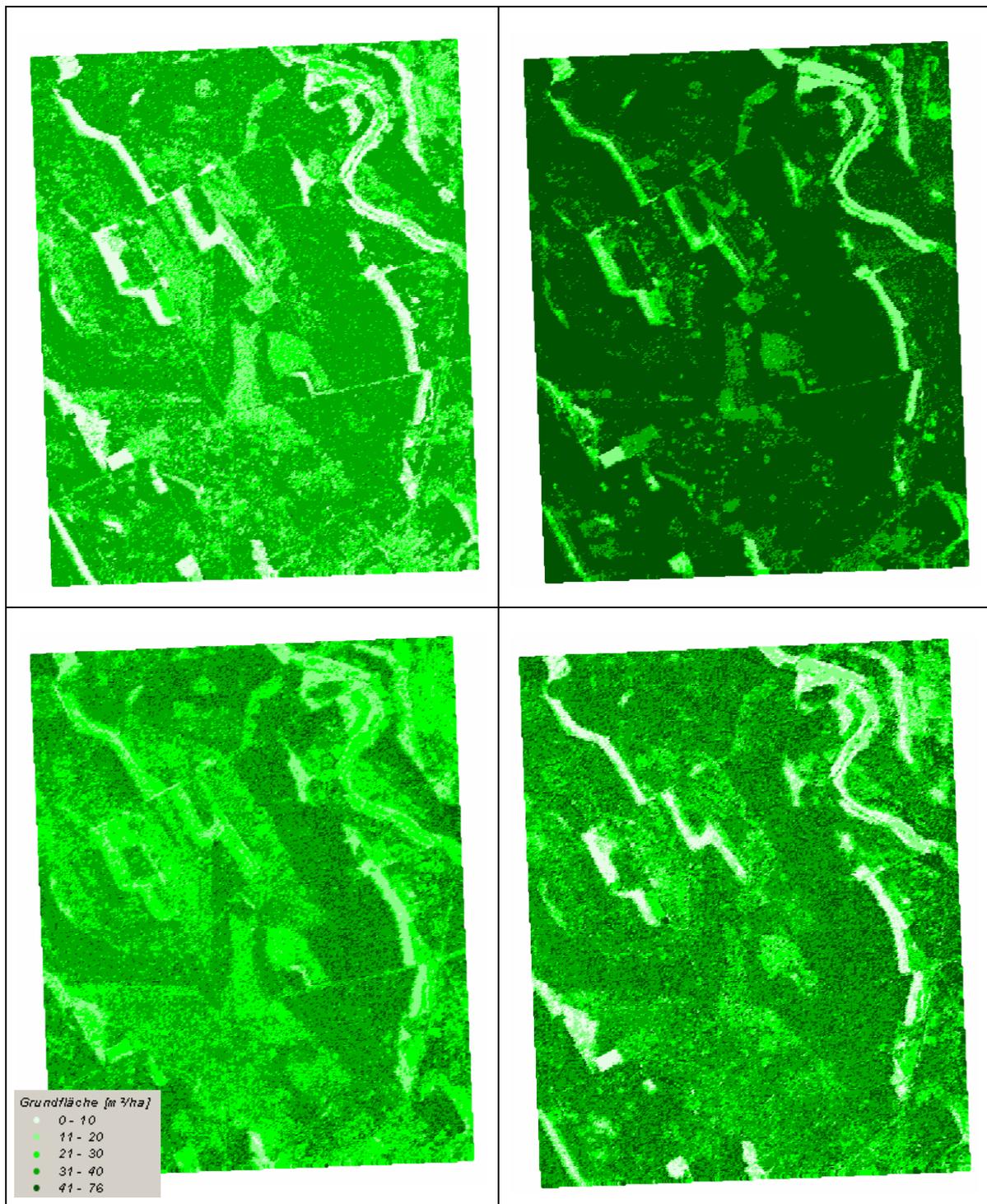


Abbildung 6-13 kNN-Grundflächen-Karten (Zentralpixel); verwendete terrestrische Aufnahmen: ProSmart (links oben), MNTFR (rechts oben), kNN (links unten) und alle (rechts unten).

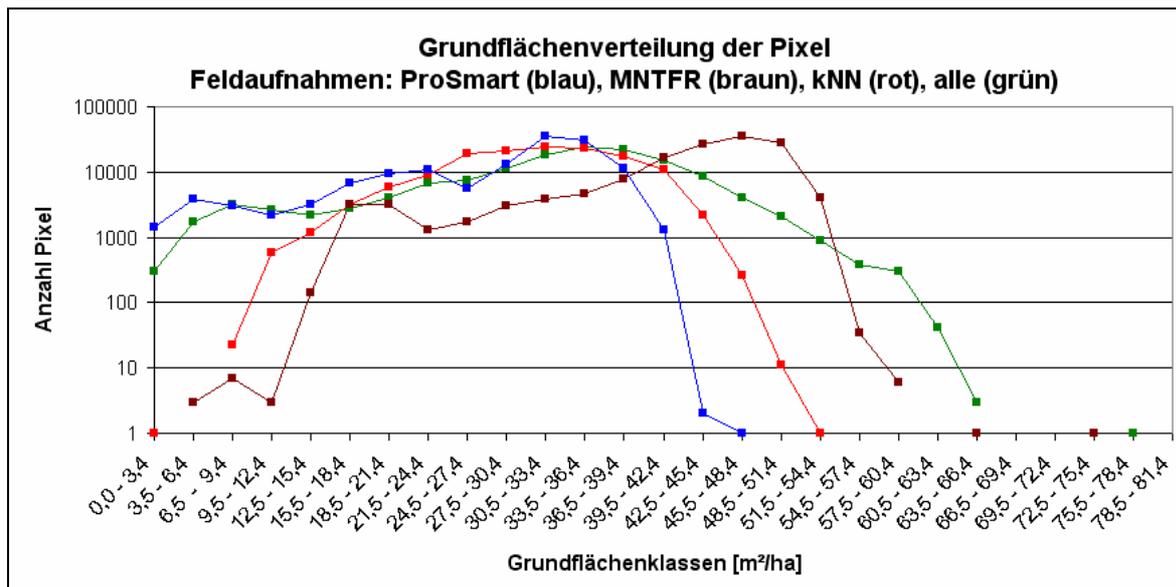


Abbildung 6-14 Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit der verwendeten Stichproben.

Eine kNN-Grundflächenkarte von dem Ausschnitt des Tharandter Walds, der von der hyperspektralen Szene abgedeckt wird, ist in Abbildung 6-15 zu sehen. Neben der Verwendung der Stichproben aller drei terrestrischen Aufnahmen wurden die transformierte Szene mit 20 Kanälen und die Zentralpixelmethode angewandt. Mit diesem Beispiel liegt eine großflächige Karte vor, die pixelgenau die Grundflächenverteilung vom Tharandter Wald wiedergibt.

6.1.2.2 Totholz

Für die Berechnung der Totholzarten wurde wie bei den Landsat-Daten die kNN-Methode für ordinale Daten angewandt. Die für das *Totholz* untersuchten Fragestellungen sind identisch mit den Untersuchungen des Merkmals *Grundfläche*. Zuerst wurden die kNN-Karten des *Totholzes* gegenübergestellt (vgl. Abbildung 6-16), die aus der Hyperspektralszene mit 128 und der MNF-Transformierten-Szene mit 20 Kanälen berechnet wurden. Beim Vergleich der Karten treten deutliche Unterschiede auf. Die auf Grundlage der transformierten Szene entstandene Karte lässt eine deutliche Struktur erkennen. Vor allem auf Jungwaldflächen, die kein stehendes *Totholz* aufweisen, wird auch auf der Karte kein *Totholz* ausgewiesen.

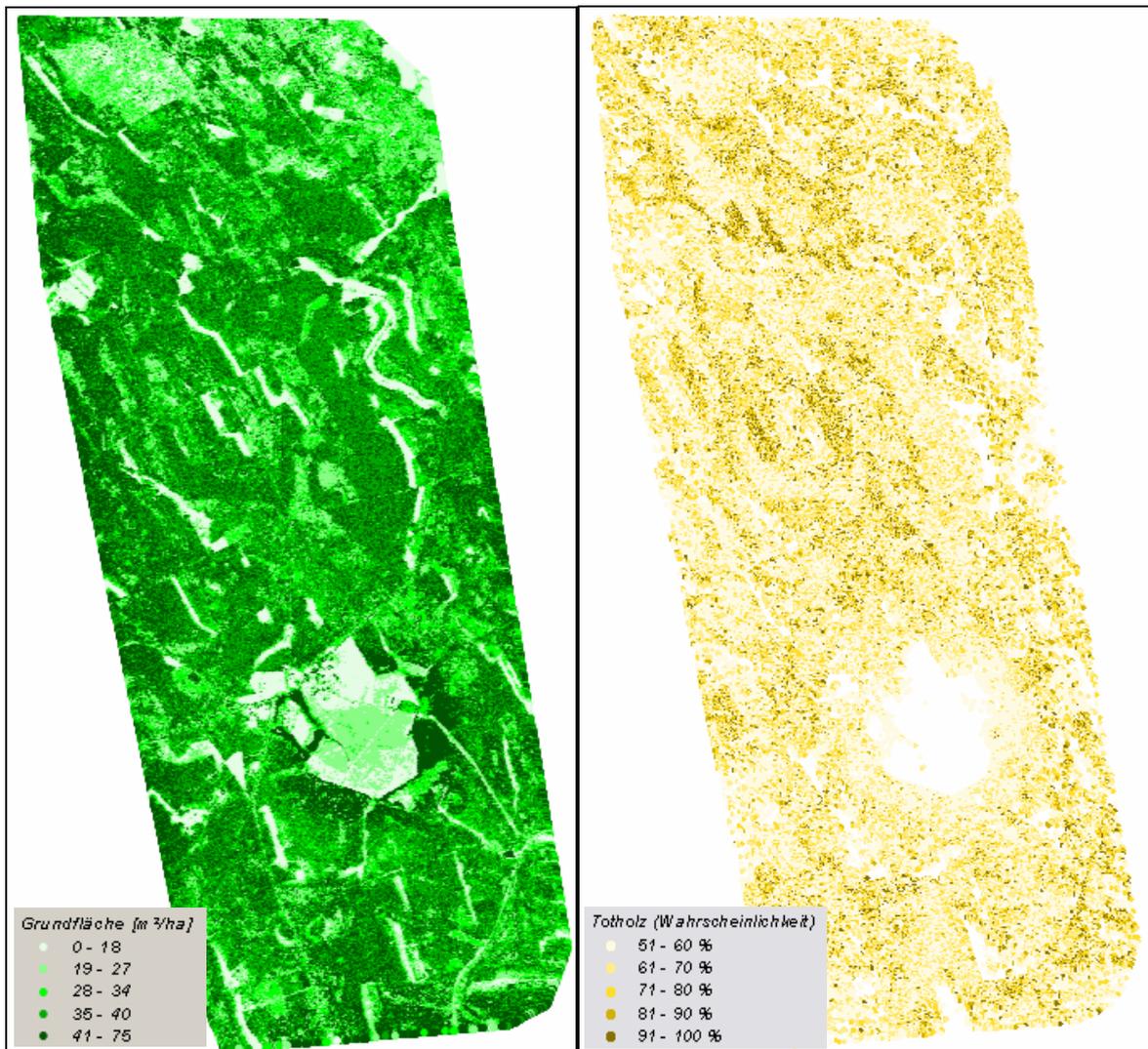


Abbildung 6-15 *kNN-Grundflächen- und Totholz-Karte für den Teil des Tharandter Waldes, der von der Hyperspektralszene (20 MNF-Kanäle; Zentralpixel) abgedeckt wird.*

Die auf der Hyperspektralszene mit 128 Kanälen basierende Karte zeigt diese Differenzierung nicht. Auch hier wird deutlich, dass durch die Reduzierung der redundanten Daten und Eliminieren des Rauschens durch die MNF-Transformation zuverlässigere Ergebnisse möglich sind. Für die weiteren Berechnungen wurde daher auf die Hyperspektralszene mit 128 Kanälen als Datengrundlage verzichtet.

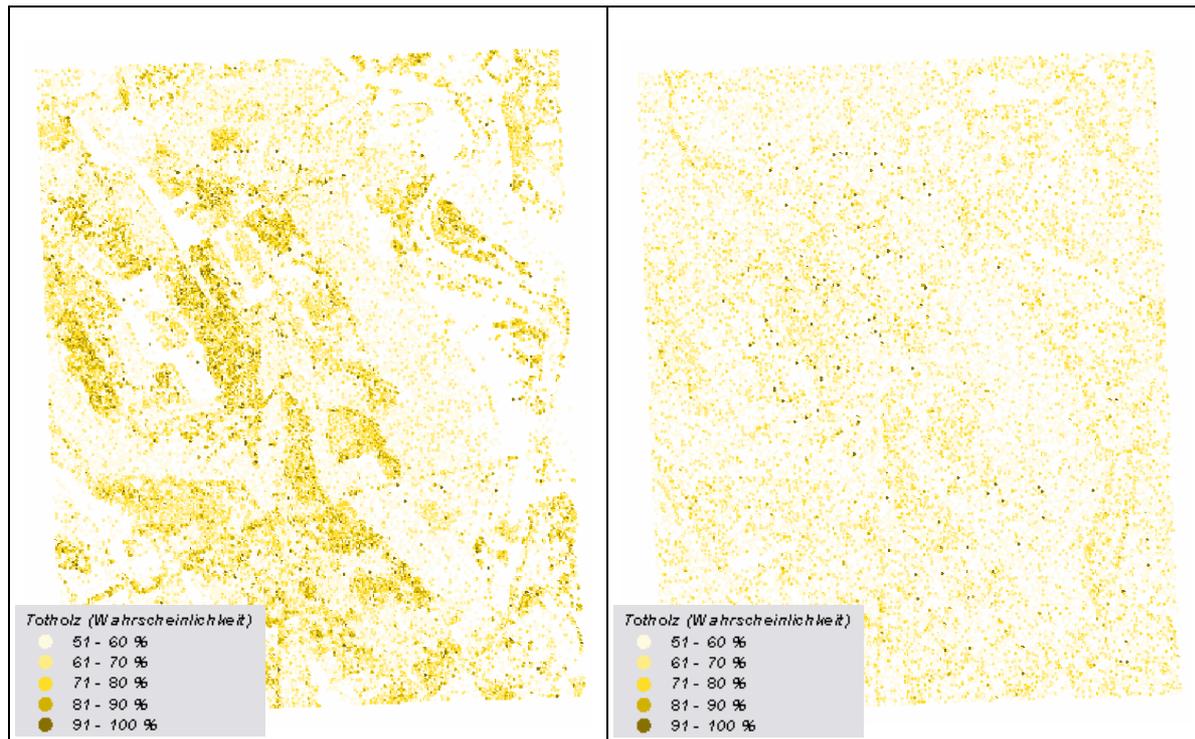


Abbildung 6-16 kNN-Totholz-Karten (Zentralpixel) mit Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit des Totholzes. Die Ausgangsdaten für die linke Karte ist die transformierte HyMapTM-Szene mit 20 und für die rechte Karte die HyMapTM-Szene mit 128 Kanälen.

Die in Abbildung 6-17 dargestellten kNN-Karten stellen die Ansätze *Zentralpixel* und *Mittelwertbildung der 9 Pixel* gegenüber. Für diese zwei Ansätze wurde das *Totholz* mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 90 % und 100 % in zwei separate Karten abgebildet. Beim Vergleich der kNN-Karten, die die zwei Ansätze repräsentieren, fällt der flächenmäßig unterschiedliche Anteil an *Totholz* auf. Die Mittelwertbildung der 9 Pixel führt zu einer Abnahme des Totholzanteils, der vor allem bei der Karte mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 90 % und 100 % deutlich wird. Bei der Mittelwertbildung werden die Informationen (Grauwerte) einzelner Pixel zusammengefasst, was zu einer Glättung des Informationsgehalts auf Pixelebene führt. Da *Totholz* meist nicht flächendeckend auf der Probefläche vorkommt, sondern meist gruppiert auftritt, führt die Mittelwertbildung zu einer ungenauen Abbildung des *Totholzes*. Der Zentralpixelansatz scheint somit zu zuverlässigeren Ergebnissen zu führen.

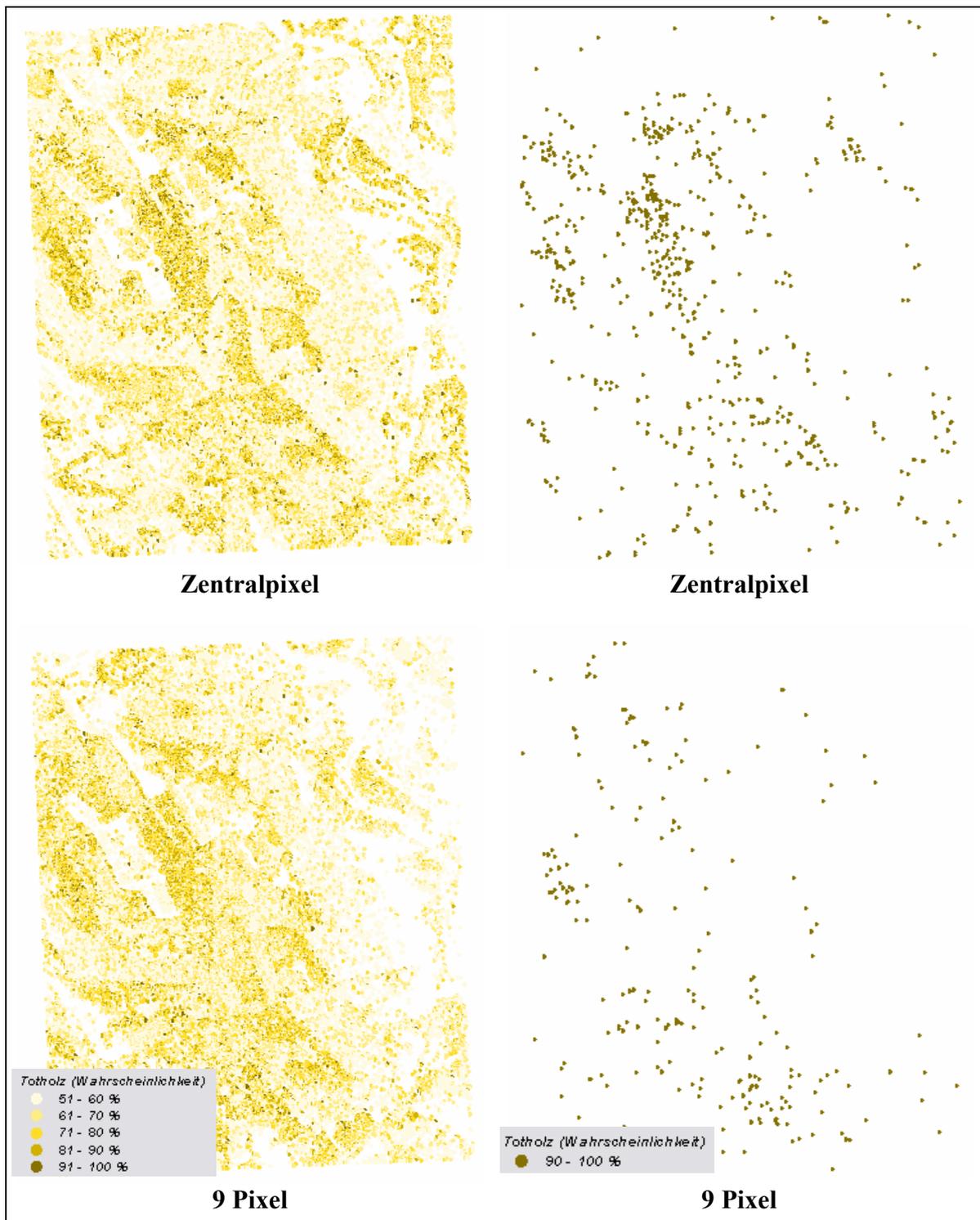


Abbildung 6-17 kNN-Totholz-Karten mit Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit von Totholz berechnet aus dem Zentralpixel (oben) und dem Mittelwert von 9 Pixel (unten). Die rechten Karten zeigen das Totholz welches mit mind. 90 % Wahrscheinlichkeit auftritt.

Bei der Betrachtung der in Abbildung 6-17 links dargestellten kNN-Totholzkarten fällt der hohe Flächenanteil von Totholz auf. Eine Reduzierung der Totholzklassen und die damit verbundene Darstellung des Totholzes ab 90 % Eintrittswahrscheinlichkeit ist eine Möglichkeit, eine Überschätzung zu vermeiden und eine realistische Einschätzung des tatsächlichen Vorkommens darzustellen. Eine kNN-Totholzkarte vom Tharandter Wald, soweit von den Hyperspektraldaten abgedeckt, ist in Abbildung 6-15 zu finden.

6.2 Fehleranalyse

Zur Bestimmung des Fehlers der kNN-Grundflächenberechnungen wurde der Root Mean Square Error (RMSE) verwendet. Für das kategorial skalierte Attribut *Totholz* erfolgte ein Vergleich von 30 zufällig ausgewählten, terrestrisch erhobenen Werten mit den errechneten kNN-Werten und einer daraus abgeleiteten Genauigkeitsaussage.

Für die Fehlerwertberechnung wurde eine Vielzahl von Szenarien berücksichtigt. Dazu zählen, wie schon bei der Erstellung der Grundflächen- und Totholz-Karten (vgl. Kapitel 6.1), unterschiedliche Kanalkombinationen. Eine eingehende Beschreibung der verwendeten Kanäle ist im Kapitel „Methoden“ zu finden. Weitere Varianten wurden durch die Wahl der Parameter k , r und t generiert, wobei k als Schlüsselparameter die Anzahl der verwendeten nächsten Nachbarn definiert. Der Parameter r steht als Exponent bei der Euklidischen Distanz und ermöglicht die Wichtung der spektralen Differenzen der einzelnen Kanäle. Mit dem Parameter t ist wiederum eine Einflussnahme auf die Wichtung der Distanz möglich. Der Einsatz von Feldaufnahmepunkte von unterschiedlichen Aufnahmekampagnen erlaubt die Untersuchung des Einflusses verschiedener Stichprobenverfahren auf die kNN-Ergebnisse.

Im Folgenden werden die einzelnen Fehlerwerte der verschiedenen Varianten für die Landsat- und Hyperspektraldaten, getrennt nach den Merkmalen *Grundfläche* und *Totholz*, vorgestellt.

6.2.1 Grundfläche

Eine wichtige Frage bei der kNN-Methode ist die Festlegung der Anzahl der zu verwendenden k -nächsten Nachbarn. Für die Berechnung des RMSE wurden verschiedene k -Werte in Verbindung mit unterschiedlichen Kanalkombinationen berücksichtigt. In

Tabelle 6-1 sind die kleinsten beobachteten prozentualen RMSE (%RMSE) für drei Kanalkombination der vier Landsat-Szenen zusammengefasst. Demgegenüber werden in Abbildung 6-18 für zwei Kanalkombinationen die Ergebnisse der kompletten k -nächsten Nachbarn-Wertereihen dargestellt. Unter Verwendung der nur vom Sensor bereitgestellten Kanäle ist der kleinste %RMSE bei der Landsat-Szene von 1999 zu beobachten. Werden diese Kanäle durch die PCA- und NDVI-Kanäle ergänzt, wird bei der multitemporalen Szene von 1999/2000 das Minimum erreicht. Dabei unterscheiden sich die zwei Szenen durch die verschiedene Anzahl von k -nächsten Nachbarn, bei denen der kleinste beobachtete %RMSE erzielt wird. Die Szene von 1999 mit den Kanälen 1 bis 5 und 7 erreicht bei $k = 25$ einen %RMSE von 38,56 %. Bei Verwendung der multitemporalen Szene von 1999/2000 und aller Kanäle wird bei $k = 15$ ein prozentualer RMSE von 37,07 % erzielt. Die Zusammenführung zweier Landsat-Szenen zu einer multitemporalen Szene und die Verwendung dieser bei den kNN-Auswertungen führen zu einem Genauigkeitsgewinn, der bei Verwendung aller Kanäle sein Maximum erreicht.

Tabelle 6-1 *Kleinste beobachtete RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene Kanal- und k -nächste-Nachbarn- Auswahl für Landsat-Daten (alle Feldaufnahmepunkte; $t = 2$; $r = 2$; k -Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).*

Szene	Landsat 1989	Landsat 1989	Landsat 1989	Landsat 1999	Landsat 1999	Landsat 1999
Kanäle	1-5;7	PCA	1-5;7;PCA; NDVI	1-5;7	PCA	1-5;7;PCA; NDVI
Parameter k	50	25	10	25	50	30
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]	37,92	38,82	37,30	38,03	38,86	38,36
Bias [m ² /ha]	-5,85	-6,75	-5,23	-5,96	-6,79	-6,29
Standardfehler	14,90	13,98	14,16	13,40	14,21	13,45
MSE [m ² /ha] ²	256,19	240,96	227,78	215,15	247,98	220,33
RMSE [m ² /ha]	16,01	15,52	15,09	14,67	15,75	14,84
%RMSE	42,21	39,99	40,46	38,56	40,53	38,70
Szene	Landsat 2000	Landsat 2000	Landsat 2000	Landsat 1999/2000	Landsat 1999/2000	Landsat 1999/2000
Kanäle	1-5;7	PCA	1-5;7;PCA; NDVI	1-5;7;14-18;20	PCA	1-5;7;14-18;20;PCA;NDVI
Parameter k	40	50	25	20	35	15
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]	38,54	37,66	38,85	36,70	39,30	36,58
Bias [m ² /ha]	-6,47	-5,58	-6,78	-4,63	-7,23	-4,51
Standardfehler	15,18	14,72	14,43	13,46	14,19	12,79
MSE [m ² /ha] ²	272,37	247,79	254,28	202,58	253,50	183,95
RMSE [m ² /ha]	16,50	15,74	15,95	14,23	15,92	13,56
%RMSE	42,82	41,80	41,04	38,78	40,51	37,07

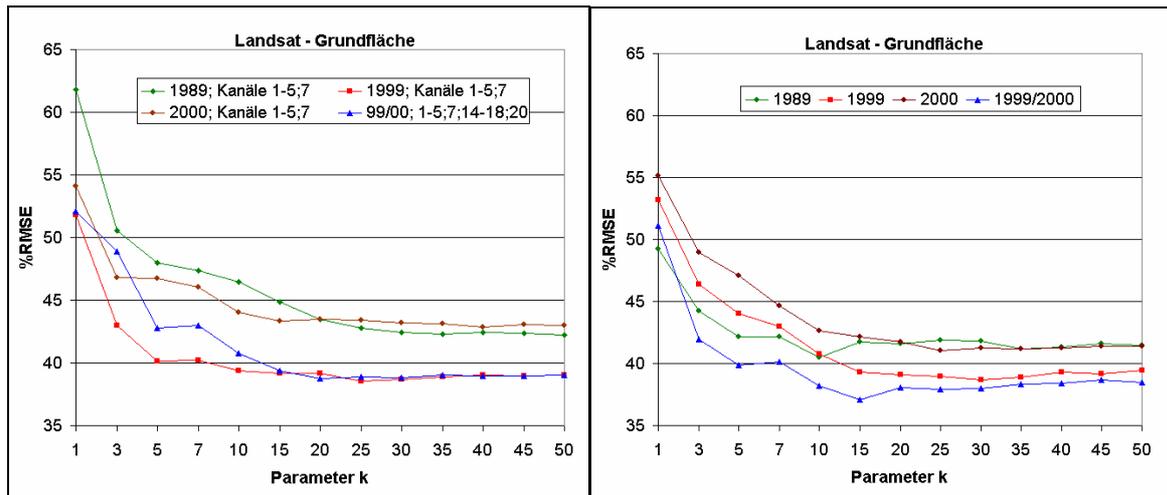


Abbildung 6-18 %RMSE der Grundfläche von vier Landsat-Szenen und zwei Kanalkombinationen (links die vom Sensor bereitgestellten Kanäle und rechts alle Kanäle inkl. PCA und NDVI) für verschiedene k -Werte (alle Stichproben; $r = 2$, $t = 2$).

Bei den Hyperspektraldaten konnte kein temporaler Ansatz untersucht werden, da nur eine Szene zur Verfügung stand. Der Szene mit 128 Kanälen wurde die transformierte Szene mit 20 Kanälen gegenübergestellt und die Fehlerwerte für die *Grundfläche* verglichen (vgl. Tabelle 6-2). Der kleinste %RMSE für die 128-kanalige-Szene beträgt 41,79 % bei $k = 75$ und für die 20-kanalige-Szene 36,05 % bei $k = 5$ (Zentralpixel; alle Stichproben; $r = 2$; $t = 2$). Wie schon bei der Vorstellung der kNN-Karten gezeigt, bringt die transformierte Szene bei den kNN-Berechnungen einen Genauigkeitserfolg.

Als nächstes wurde der Unterschied zwischen den zwei Varianten Zentralpixel und Mittelwertbildung der 9 Pixel über der Probefläche untersucht. Die in Abbildung 6-19 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, dass die Zentralpixelvariante zu den kleineren %RMSE-Werten führt.

Die terrestrisch erhobenen Proben haben durch ihre Anzahl und Verteilung einen entscheidenden Einfluss auf die kNN-Ergebnisse. Wie schon bei der Erstellung der kNN-Karten kamen bei dem Attribut *Grundfläche* die drei terrestrischen Aufnahmen aus den Projekten *ProSmart*, *MNTFR* und *kNN* und eine vierte Variante mit allen Stichproben zum Einsatz (vgl. Kapitel 3.4). Für die Hyperspektraldaten sind die %RMSE-Werte der vier Varianten in Abbildung 6-19 gegenübergestellt und zeigen bei Verwendung aller Proben die kleinsten Fehlerwerte. Für die kNN-Methode wird eine Verteilung der Probepunkte

über die gesamte Merkmalsklasse benötigt, was näherungsweise durch die Verwendung aller Probepunkte (354 Punkte bei Landsat bzw. 263 bei HyMapTM) erreicht wird.

Tabelle 6-2 *Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k-nächste-Nachbarn- und terrestrische Aufnahmen für HyMapTM-Daten ($t = 2$; $r = 2$; k-Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).*

Szene	HyMap MNF	HyMap				
Kanäle	20 (alle)	128 (alle)				
Shift-Algorithmus	Zentralp.	Zentralp.	Zentralp.	Zentralp.	9 Pixel	Zentralp.
Terrestr. Aufnahme	alle	kNN	MNTFR	ProSmart	alle	alle
Parameter k	5	50	10	20	100	75
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]	34,57	33,97	41,90	28,21	35,28	35,39
Bias [m ² /ha]	-2,50	-1,90	-9,82	3,86	-3,20	-3,32
Standardfehler	12,21	14,34	16,24	14,52	14,16	14,41
MSE [m ² /ha] ²	155,30	209,13	360,37	225,63	210,66	218,78
RMSE [m ² /ha]	12,46	14,46	18,98	15,02	14,51	14,79
%RMSE	36,05	42,57	45,31	53,25	41,15	41,79

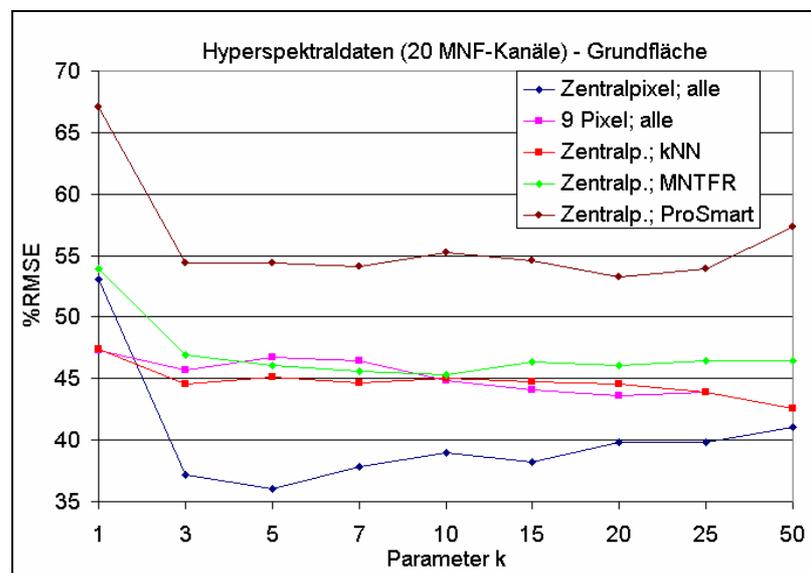


Abbildung 6-19 *%RMSE der Grundfläche der transformierten Hyperspektralszene (20 MNF-Kanäle) für die Variante „Zentralpixel“ (vier Feldaufnahmevarianten) und „9 Pixel“.*

Die unterschiedlichen Aufnahmedesigns haben wegen ihrem anteilmäßig geringen Stichprobenumfang nur einen untergeordneten Einfluss auf die Ergebnisse. Beim

Vergleich der Varianten treten allerdings erhebliche Unterschiede zwischen den Aufnahmedesigns auf. Das schlechte Abschneiden der MNTFR-Aufnahme ist auf das Fehlen von Probepunkten in Jungbeständen und der damit verbundenen Überschätzung der *Grundfläche* zurückzuführen. Die Verteilung der MNTFR-Proben erstreckt sich nicht über den gesamten Merkmalsraum, sondern deckt vor allem Bestände mit einer mittleren und hohen *Grundfläche* ab. Auch die beiden anderen Aufnahmen beschränken sich auf einen Teil des Merkmalraums, wobei die aufgenommenen Proben unterschiedliche Bereiche abdecken. Durch die Zusammenführung der Stichproben wird ein breiter Bereich abgedeckt und damit ein entsprechender Genauigkeitsgewinn erzielt.

Den Einfluss der bei den Feldaufnahmen vorliegenden Probenverteilungen kann beispielhaft für die multitemporale Landsat-Szene von 1999/2000 in Tabelle 6-3 veranschaulicht werden. Die k -nächsten Nachbarn-Auswahl entspricht dem kleinsten %RMSE-Wert der Feldaufnahmevariante. Wie bei den Hyperspektraldaten ist auch bei den Landsat-Daten der geringste %RMSE (37,07 %) bei Verwendung aller terrestrischen Aufnahmen zu finden. Damit bestätigt sich auch bei den Landsat-Daten die Erkenntnis, dass für eine hohe Genauigkeit neben dem Aufnahmeregime auch eine große Abdeckung des Merkmalraums, hier die *Grundfläche*, notwendig ist.

Tabelle 6-3 *Kleinster beobachteter %RMSE der multitemporalen Landsat-Szene von 1999/2000 aufgelistet nach den verwendeten Proben der terrestrischen Aufnahmen (alle Kanäle; $t = 2$; $r = 2$; k -Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert)*

Szene		Landsat 1999/2000	Landsat 1999/2000	Landsat 1999/2000	Landsat 1999/2000
Terrestrische Aufnahme		kNN	MNTFR	ProSmart	alle
Parameter k		25	5	30	15
Grundfläche (alle terrestrische Aufnahmen)	Mittelwert [m ² /ha]	33,52	42,96	24,72	37,59
	Minimum [m ² /ha]	3,36	0,00	1,00	0,00
	Maximum [m ² /ha]	54,86	77,89	48,00	77,89
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]		32,98	39,40	25,28	36,58
Bias [m ² /ha]		-0,91	-7,33	6,88	-4,51
Standardfehler [m ² /ha]		13,59	14,75	14,94	12,79
MSE [m ² /ha] ²		185,59	271,18	270,63	183,95
RMSE [m ² /ha]		13,62	16,47	16,45	13,56
%RMSE		41,31	41,80	65,31	37,07

Beim Vergleich der Bias-Werte der vier Varianten treten große Unterschiede auf, die eine Über- bzw. Unterschätzung der Grundflächenwerte zeigen. Bei Verwendung der MNTFR-Aufnahme als terrestrische Datengrundlage beträgt der Bias -7,33 m²/ha. Da die MNTFR-

Proben vor allem Bestände mit mittlerer und hoher Grundfläche abdecken, kommt es zur Überschätzung der *Grundfläche*, welche sich im Bias widerspiegelt.

Wird bei der Euklidischen Distanz der konstante Exponent durch den Exponent r ersetzt, erhält man einen Parameter, der die Wichtung von spektralen Differenzen der einzelnen Kanäle ermöglicht. Mit $r = 1$ werden alle Merkmalsdifferenzen unabhängig von ihrer Größe gleich gewichtet. Für $r = 2$ erhalten größere Differenzen ein stärkeres Gewicht als kleinere Differenzen. Wird $r = \infty$ gesetzt, wird die größte Merkmalsdifferenz mit 1 gewichtet und alle übrigen erhalten ein Gewicht von 0. Für die Berechnungen wurden verschiedene r -Werte untersucht. Beispielhaft für die Landsat-Szene von 1999/2000 und der Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen sind in Abbildung 6-20 die %RMSE für verschiedene k -nächste-Nachbarn-Varianten dargestellt. Der Einfluss des Parameters r auf die Wichtung einzelner Kanäle und die damit verbundene Gesamtdistanz bewegt sich in sehr engem Rahmen. Die maximale Differenz des minimalen und maximalen %RMSE für beide Szenen beträgt 4,06 % (*Grundfläche*). Trotz des geringen Einflusses wird bei $r = 10$ eine Minimierung des %RMSE auf 36,63 % (Landsat; $k = 10$; $t = 2$) bzw. bei $r = 4$ auf 36,01 % (HyMapTM; $k = 5$; $r = 2$) erreicht.

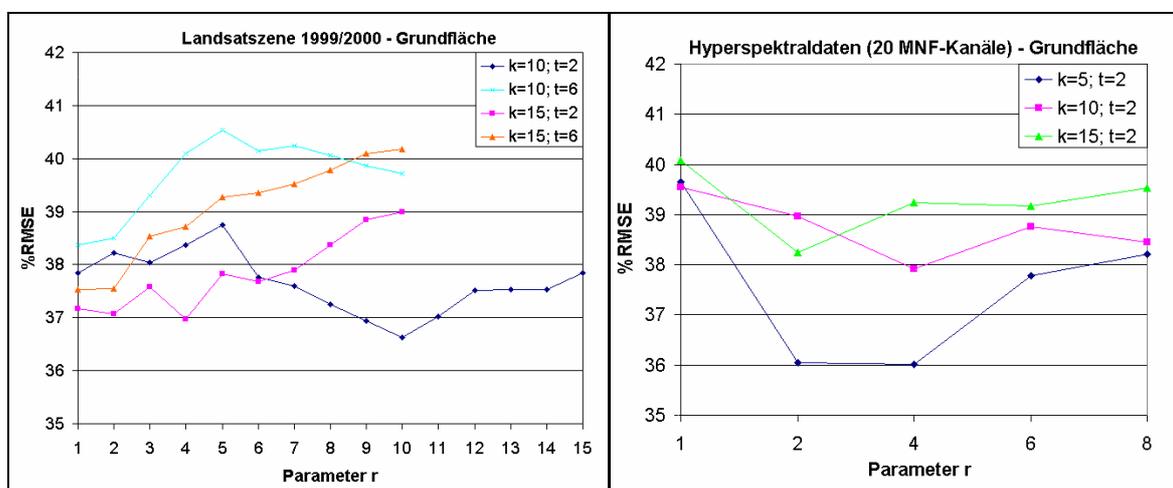


Abbildung 6-20 %RMSE der Grundfläche für die 1999/2000-Landsat-Szene (links) und der Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen (rechts) für den Parameter r (alle terrestrischen Proben).

Die Distanzwerte spiegeln nur die Unterschiede zwischen den spektralen Informationen zweier Pixel wieder. Um die Werte eines bei terrestrischen Aufnahmen erhobenen Merkmales, welche den k nächsten Pixel zugeordnet sind, in die weitere Berechnung

einfließen zu lassen, wurden diese entsprechend ihrer spektralen Distanz gewichtet. Je ähnlicher die spektrale Information ist, desto höher ist das Gewicht und damit der Einfluss auf den zu berechnenden Merkmalswert. Mit der Einführung des Parameters t ist eine Einflussnahme auf die Gewichtung der Distanz möglich. Je größer t gewählt wird, umso größer ist das Gewicht der Pixel mit geringer spektraler Distanz.

Für die Landsat-Daten wurden umfangreiche Berechnungen mit t -Wert-Reihen durchgeführt. Die Ergebnisse für die 1999/2000-Szene können in Abbildung 6-21 betrachtet werden. Durch die Verwendung identischer k -nächsten Nachbarn haben die in den Diagrammen dargestellten Kurven einen systematischen Verlauf. Nur die Gewichtung der Nachbarn zueinander wird durch den Parameter t beeinflusst. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden die drei terrestrischen Aufnahmen *ProSmart*, *MNTFR* und *kNN* und eine vierte Variante mit allen Proben berücksichtigt und miteinander verglichen. Die Aufnahmevarianten reagieren sehr unterschiedlich auf die Veränderung des t -Wertes. Bei Verwendung aller Probepunkte wird ein Optimum bei $t = 0,6$ erreicht. Demgegenüber wird ein Optimum beim Einsatz der ProSmart-Proben bei $t = 4,5$, der MNTFR-Proben bei $t = 7,5$ und der kNN-Proben bei $t = 0,1$ erreicht. Welcher Faktor für diesen Zusammenhang verantwortlich ist, konnte mit dem verfügbaren Datenmaterial nicht geklärt werden. Durch den Einsatz des Parameters t bei der Landsat-Szene 1999/2000 und der Verwendung aller terrestrischen Proben konnte eine weitere Minimierung des %RMSE auf 35,19 % erfolgen ($k = 15$; $r = 2$).

Für weitere Berechnungen wurden die Ergebnisse der kNN-Berechnungen mit den k -, r - und t -Wertreihen zusammengeführt, um eine optimale Kombination dieser drei Parameterwerte zu finden (vgl. Tabelle 6-4). Unter Verwendung aller terrestrischer Proben wurde für die multitemporale Landsat-Szene von 1999/2000 bei $k = 9$, $r = 10$ und $t = 0,6$ ein %RMSE von 33,76 % gefunden. Eine weitere Minimierung des Fehlers ist mit den gegebenen Einstellungen und Daten nicht möglich.

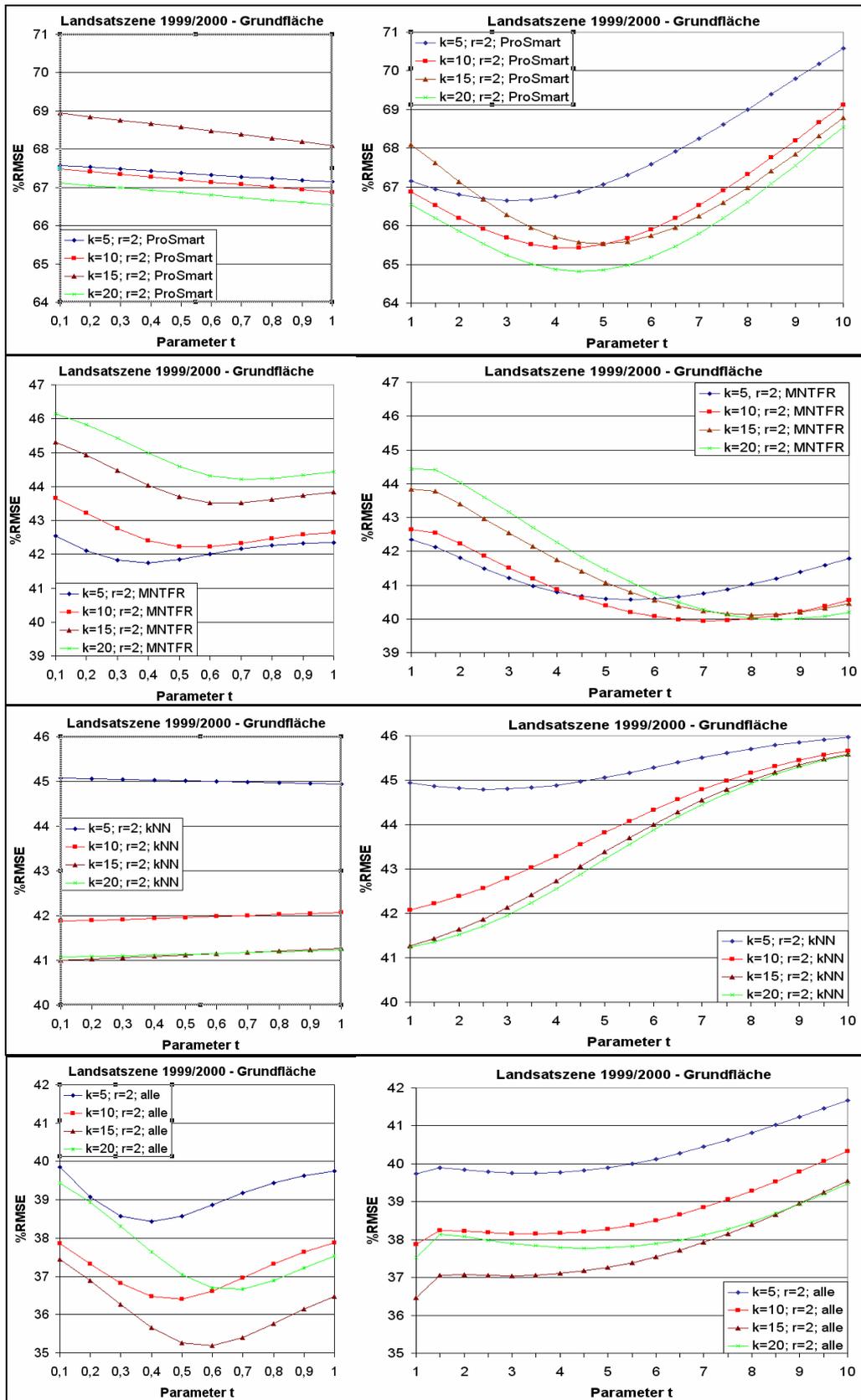


Abbildung 6-21 %RMSE der Grundfläche für die 1999/2000-Landsat-Szene für den Parameter t geordnet nach den terrestrischen Aufnahmen: ProSmart – oben, MNTFR –Mitte oben, kNN – Mitte unten, alle Aufnahmen –unten.

Tabelle 6-4 Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k -, r - und t -Werte der Landsat-Szene 1999/2000 (alle terrestrischen Proben, alle Kanäle).

Szene	Landsat 1999/2000				
Parameter k	8	9	9	9	10
Parameter r	10	9	10	11	10
Parameter t	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]	35,62	35,72	35,71	35,96	36,02
Bias [m ² /ha]	-3,54	-3,65	-3,63	-3,89	-3,95
Standardfehler [m ² /ha]	11,72	11,58	11,49	11,80	11,71
MSE [m ² /ha] ²	149,82	147,43	145,33	154,33	152,83
RMSE [m ² /ha]	12,24	12,14	12,06	12,42	12,36
%RMSE	34,37	33,99	33,76	34,55	34,32

Die kNN-Berechnungen mit Hyperspektraldaten unter Einsatz der t -Wert-Reihen brachten einen geringfügigen Genauigkeitsgewinn. Bei Verwendung der 20 MNF-Kanäle und der Auswahl von vier nächsten Nachbarn wird bei $t = 0,1$ ein Minimum des %RMSE mit 35,29 % erreicht ($t = 2$, alle terrestrischen Aufnahmen) (vgl. Abbildung 6-22). Weitere %RMSE für verschiedene k -nächste Nachbarn sind in Tabelle 6-5 zu finden. Eine weitere Minimierung des Fehlers durch Variieren des r -Wertes konnte nicht erreicht werden.

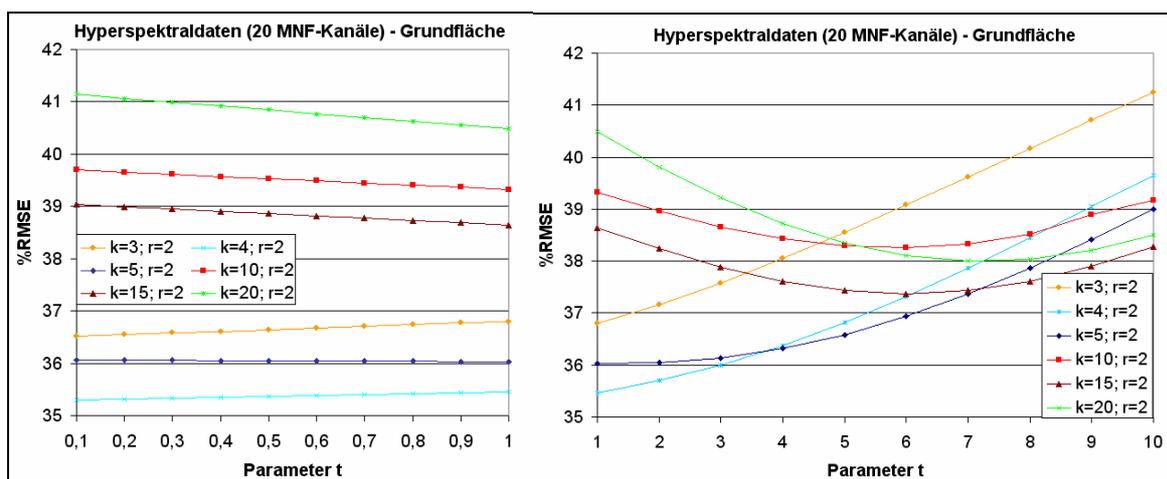


Abbildung 6-22 %RMSE der Grundfläche für die transformierte Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen für den Parameter t .

Tabelle 6-5 *Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k - und t -Werte der MNF-Transformierten Hyperspektralszene (alle terrestrischen Proben, alle Kanäle, $r = 2$, t -Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).*

Szene/Kanäle	HyMap 20 MNF					
Parameter k	3	4	5	10	15	20
Parameter t	0,1	0,1	1	6	6	7
Grundfläche (kNN-Schätzwert) [m ² /ha]	34,84	35,02	34,59	34,08	33,76	33,78
Bias [m ² /ha]	-2,76	-2,95	-2,52	-2,01	-1,69	-1,71
Standardfehler [m ² /ha]	12,42	12,00	12,21	12,88	12,50	12,72
MSE [m ² /ha] ²	161,82	152,81	155,38	169,95	159,18	164,70
RMSE [m ² /ha]	12,72	12,36	12,47	13,04	12,62	12,83
%RMSE	36,52	35,29	36,03	38,26	37,37	37,99

Eine vollständige Aufstellung aller Ergebnisse, die mit verschiedenen k -, r - und t -Einstellungen erzielt wurden, ist für das Merkmal *Grundfläche* im Anhang zu finden.

6.2.2 Totholz

Da das Merkmal *Totholz* nicht metrisch skaliert ist, wird statt des RMSE ein alternativer Ansatz zur Fehleranalyse verwendet. Es wurden 30 terrestrisch erhobene Werte, die als Referenzpunkte zufällig ausgewählt wurden und nicht in die kNN-Berechnungen einfließen, mit den über den kNN-Ansatz berechneten Werten verglichen und über die Anzahl der Übereinstimmungen eine Genauigkeitsaussage getroffen (vgl. Kapitel 5.1.3). Die Aussage über das Auftreten oder des Nichtauftreten von *Totholz* wird über die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit mit Hilfe der kNN-Methode getroffen. Die Wahrscheinlichkeitsschwelle für die Zuordnung zur Merkmalsklasse *Totholz* wurde bei allen Ergebnissen bei 50 % festgelegt. In Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8 sind die Ergebnisse der Fehleranalyse für das Merkmal *Totholz* für die Landsat-Daten zusammengefasst. Tabelle 6-7 beinhaltet die Varianten mit den vom Sensor bereitgestellten Kanälen und in einer zweiten Variante folgen die Fehlerwerte bei Auswahl aller Kanäle, welche die vom Sensor bereitgestellten Kanäle und die errechneten PCA- und NDVI-Kanäle beinhalten. Als terrestrische Datengrundlage wurden alle Probepunkte der verschiedenen terrestrischen Datenquellen zusammengefasst. Die Auswahl der im folgendem gezeigten Fehlerwerte erfolgte in Abhängigkeit von der größten erreichten Genauigkeit. Weitere Fehlerwerte unter Verwendung der vollständigen k -, r - und t -Wertreihen befinden sich im Anhang.

Die Präsentation der Fehlerwerte umfasst folgende Angaben:

- Anzahl der Übereinstimmungen von 30 möglichen
- Übereinstimmungen in Prozent

sowie (vgl. auch Tabelle 6-6)

- Prozent und Anzahl der *Übereinstimmungen* wenn die Bedingung Feldaufnahme und kNN-Berechnung *Totholz* vorhanden zutrifft
- Prozent und Anzahl der *Übereinstimmungen* wenn die Bedingung Feldaufnahme und kNN-Berechnung *kein Totholz* vorhanden zutrifft,
- Prozent und Anzahl der *Nichtübereinstimmungen* wenn die Bedingung Feldaufnahme *kein Totholz* und kNN-Berechnungen *Totholz* vorhanden zutrifft
- Prozent und Anzahl der *Nichtübereinstimmungen* wenn die Bedingung Feldaufnahme *Totholz* und kNN-Berechnungen *kein Totholz* vorhanden zutrifft

Tabelle 6-6 Zusammenfassung der bei den Totholzberechnungen angegebenen Fehlerwerte.

		kNN-Berechnung Totholz vorhanden	
		ja	nein
Terrestrische Aufnahme Totholz vorhanden	ja	Prozent (Anzahl)	Prozent (Anzahl)
	nein	Prozent (Anzahl)	Prozent (Anzahl)

Die größte Anzahl Übereinstimmungen wurde bei Verwendung der Landsat-Szene aus dem Jahr 2000 mit Integrierung aller Kanäle⁸ und aller Probepunkte mit 22 Übereinstimmungen (73,3 %) erreicht (Tabelle 6-8). Beim Vergleich der Ergebnisse bezogen auf die verwendeten Kanäle erhält keine Variante den Vorzug, da sich bei den Landsat-Szenen von 1989, 1999 und 1999/2000 die Ergebnisse bei Auswahl aller Kanäle verschlechtert und bei der Szene von 2000 verbessert. Die Parameter r und t bringen einen Genauigkeitsgewinn, der bei der Szene von 1999/2000, die den multitemporalen Ansatz verwendet, nachgewiesen werden konnte. Mit Hilfe des multitemporalen Ansatzes konnte keine Verbesserung der Fehlerwerte erreicht werden. Allerdings ist zu beachten, dass sich die Abweichungen der Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Fehlerrechnungsvarianten zwischen 1 (3,3 %) und max. 3 (10 %) in einem kleinen Rahmen bewegen.

⁸ unter aller Kanäle sind die vom Sensor bereitgestellten Kanäle sowie die PCA- (bzw. MNF-) und NDVI-Kanäle zusammengefasst

Die zwei letzten Zeilen in den Tabellen Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8 geben einen Überblick über die Nichtübereinstimmungen bei den Bedingungen:

- Feldaufnahme *kein Totholz* und kNN-Berechnungen *Totholz* vorhanden und
- Feldaufnahme *Totholz* und kNN-Berechnungen *kein Totholz* vorhanden.

Die Anzahl der Fehlinterpretationen unter der Voraussetzung, dass bei der Feldaufnahme *kein Totholz* vorhanden aber die kNN-Rechnung *Totholz* ausgibt, liegt zwischen 1 (3,3 %) und max. 5 (16,7 %). Hingegen wird bei nachgewiesenem *Totholz* im Feld und nichtvorhanden bei den kNN-Berechnungen eine Anzahl von Nichtübereinstimmungen zwischen 5 (16,7 %) und 11 (36,7 %) ausgegeben. Dieser Vergleich legt die Vermutung nahe, dass eine Unterschätzung des Totholzanteiles bei der kNN-Methode wahrscheinlicher ist als eine Überschätzung. Dies lässt die Verschiebung der Totholzeintrittswahrscheinlichkeit auf 90 % zur Klassifizierung von *Totholz* wenig sinnvoll erscheinen.

Tabelle 6-7 *Totholzfehlerwerte für verschiedene Landsat-Szenen unter Verwendung aller Probepunkte der Feldaufnahmen mit verschiedenen Kanalkombinationen und Parametereinstellungen für k, r und t ($p^2 = 50\%$).*

Landsat-Szene	1989	1999	2000	99/00	99/00	99/00
Kanäle	1-5,7	1-5,7	1-5,7	1-5,7,14-18,20	1-5,7,14-18,20	1-5,7,14-18,20
Feldaufnahme	alle	alle	alle	alle	alle	alle
Parameter k	50	3	20	5	5	5
Parameter r	2	2	2	2	2	5
Parameter t	2	2	2	2	7	2
Übereinstimmungen (max. 30 möglich)	21	20	18	20	21	21
Übereinstimmungen in Prozent	70,0	66,7	60,0	66,7	70,0	70,0
Berechnung = ja Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	26,7 (8)	26,7 (8)	13,3 (4)	23,3 (7)	26,7 (8)	26,7 (8)
Berechnung = nein Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	43,3 (13)	40,0 (12)	46,7 (14)	43,3 (13)	43,3 (13)	43,3 (13)
Berechnung = ja Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	6,7 (2)	10,0 (3)	3,3 (1)	6,7 (2)	6,7 (2)	6,7 (2)
Berechnung = nein Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	23,3 (7)	23,3 (7)	36,7 (11)	26,7 (8)	23,3 (7)	23,3 (7)

Tabelle 6-8 *Totholzfehlerwerte für verschiedene Landsat-Szenen unter Verwendung aller Probepunkte und Kanäle (inkl. PCA und NDVI) mit verschiedenen Parametereinstellungen für k, r und t ($p^2 = 50\%$).*

Landsat-Szene	1989	1999	2000	2000	2000	99/00	99/00
Kanäle	alle						
Parameter k	3	7	2	2	2	1	25
Parameter r	2	2	2	2	3	2	2
Parameter t	2	2	2	5	2	2	2
Übereinstimmungen (max. 30 möglich)	18	18	22	22	22	19	19
Übereinstimmungen in Prozent	60,0	60,0	73,3	73,3	73,3	63,3	63,3
Berechnung = ja Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	26,7 (8)	13,3 (4)	33,3 (10)	33,3 (10)	33,3 (10)	16,7 (5)	16,7 (5)
Berechnung = nein Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	33,3 (10)	46,7 (14)	40,0 (12)	40,0 (12)	40,0 (12)	46,7 (14)	46,7 (14)
Berechnung = ja Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	16,7 (5)	3,3 (1)	10,0 (3)	10,0 (3)	10,0 (3)	3,3 (1)	3,3 (1)
Berechnung = nein Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	23,3 (7)	36,7 (11)	16,7 (5)	16,7 (5)	16,7 (5)	33,3 (10)	33,3 (10)

Die Ergebnisse für die Hyperspektraldaten sind in Tabelle 6-9 zusammengestellt. Bei der Verwendung der MNF-Transformierten-Szene werden 19 Übereinstimmungen (63,3 %) bei der Variante *Mittelwertbildung der 9 Pixel über der Probefläche* und 18 (60 %) bei der *Zentralpixelvariante* erreicht. Weitere Ergebnisse finden sich im Anhang. Der bei den Landsat-Daten beschriebene Fall der Unterschätzung des Totholzanteils ist bei den Hyperspektraldaten nicht zu beobachten.

Tabelle 6-9 *Totholzfehlerwerte für die MNF-Transformierte-Hyperspektralszene unter Verwendung aller Probepunkte der Feldaufnahmen und allen 20 Kanälen mit verschiedenen k-nächsten Nachbarn Einstellungen ($r=2$, $t=2$).*

Hyperspektral-Szene	MNF, Zentralp.	MNF, Zentralp.	MNF, 9 Pixel
Parameter k	1	15	1
Übereinstimmungen (max. 30 möglich)	18	18	19
Übereinstimmungen in Prozent	60,0	60,0	63,3
Berechnung = ja Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	33,3 (10)	23,3 (7)	30,0 (9)
Berechnung = nein Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	26,7 (8)	36,7 (11)	33,3 (10)
Berechnung = ja Feldaufnahme = nein in Prozent (Anzahl)	23,3 (7)	13,3 (4)	16,7 (5)
Berechnung = nein Feldaufnahme = ja in Prozent (Anzahl)	16,7 (5)	26,7 (8)	20,0 (6)

6.3 Bootstrapping

Die Bootstrap-Methode wird für die Prüfung der Robustheit der kNN-Methode gegenüber variierenden terrestrischen Datenquellen verwendet (vgl. Kapitel 5.2.5). Für diese Arbeit wurde die Bootstrap-Methode – Bootstrapping with Replacement – angewandt (SACHS 1997, EFRON 1983, EFRON & TIBSHIRANI 1993, 1997). Aus der Gesamtheit m der terrestrisch erhobenen Probepunkte werden Zufallsstichproben vom Umfang n gezogen. Die Zufallsziehung der Stichproben $y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$ wird nB mal wiederholt. So erhält man nB Gruppen mit n Probepunkten und nB Gruppen mit $m - n$ Probepunkten. Dabei ist zu beachten, dass die kNN-Rechnungen nicht mit der Stichprobe sondern mit der Gruppe, aus der die Stichprobe gezogen wurde, erfolgten. Mit jeder der nB Gruppen wird die kNN-Methode durchgeführt und für jedes Pixel ein Schätzer je Gruppe für das gewählte Merkmal (z.B. *Grundfläche*) berechnet.

Tabelle 6-10 Parameter der sechs durchgeführten Bootstrap-Durchläufe

Bootstrapp-Durchlauf	Landsat-7-Szene	Parameter k	Probepunkte gesamt (m)	Stichprobenumfang (n)	Wiederholungen (nB)
1	2000	5	354	1	354
2	2000	5	354	10	36
3	2000	5	354	30	12
4	99/00	15	354	1	354
5	99/00	15	354	10	354
6	99/00	15	354	30	354

Zur Ermittlung der Robustheit der kNN-Methode wurden sechs Bootstrap-Durchläufe mit den Stichprobenumfängen $n = 1; 10$ und 30 gerechnet (vgl. Tabelle 6-10). Am Ende der kNN-Berechnungen sind jedem Pixel entsprechend der Anzahl Wiederholungen Merkmalswerte zugeordnet.

Hier wurden die Bootstrap-Durchläufe am Beispiel des Merkmals *Grundfläche* durchgeführt und für jedes Pixel mit Hilfe der Grundflächenwerte (Anzahl gleich Wiederholungen) ein Maximal-, Minimal- und Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Als Datengrundlage kam für die Durchläufe 1 bis 3 die Landsat-Szene vom August 2000 und für die Durchläufe 4 bis 6 die multitemporale Landsat-Szene von 1999/2000 zum Einsatz. Der Aufnahmezeitpunkt der Szene vom August 2000 korreliert sehr gut mit den Feldaufnahmezeitpunkten (vgl. Kapitel 3.4) und mit Hilfe der multitemporalen Szene von 1999/2000 wurde bei der vorangegangenen Fehleranalyse sehr genaue Ergebnisse erzielt. Für die drei Durchläufe der Szene vom August 2000 sind die

Ergebnisse des Bootstrapping in Abbildung 6-23 zusammengefasst. Im linken Teil der Abbildung befindet sich für jeden Durchlauf (Stichprobenumfang 1, 10 oder 30) ein Diagramm, das für jedes Pixel den Minimal-, Maximal- und Mittelwert der *Grundfläche* abbildet. Trotz unterschiedlicher Anzahl Berechnungen und gezogener Proben pro Durchlauf unterscheidet sich die grundsätzliche Grundflächenspannweite der Pixel nicht. Die minimalen und maximalen Grundflächenwerte schwanken im Durchschnitt $10 \text{ m}^2/\text{ha}$ um den Mittelwert.

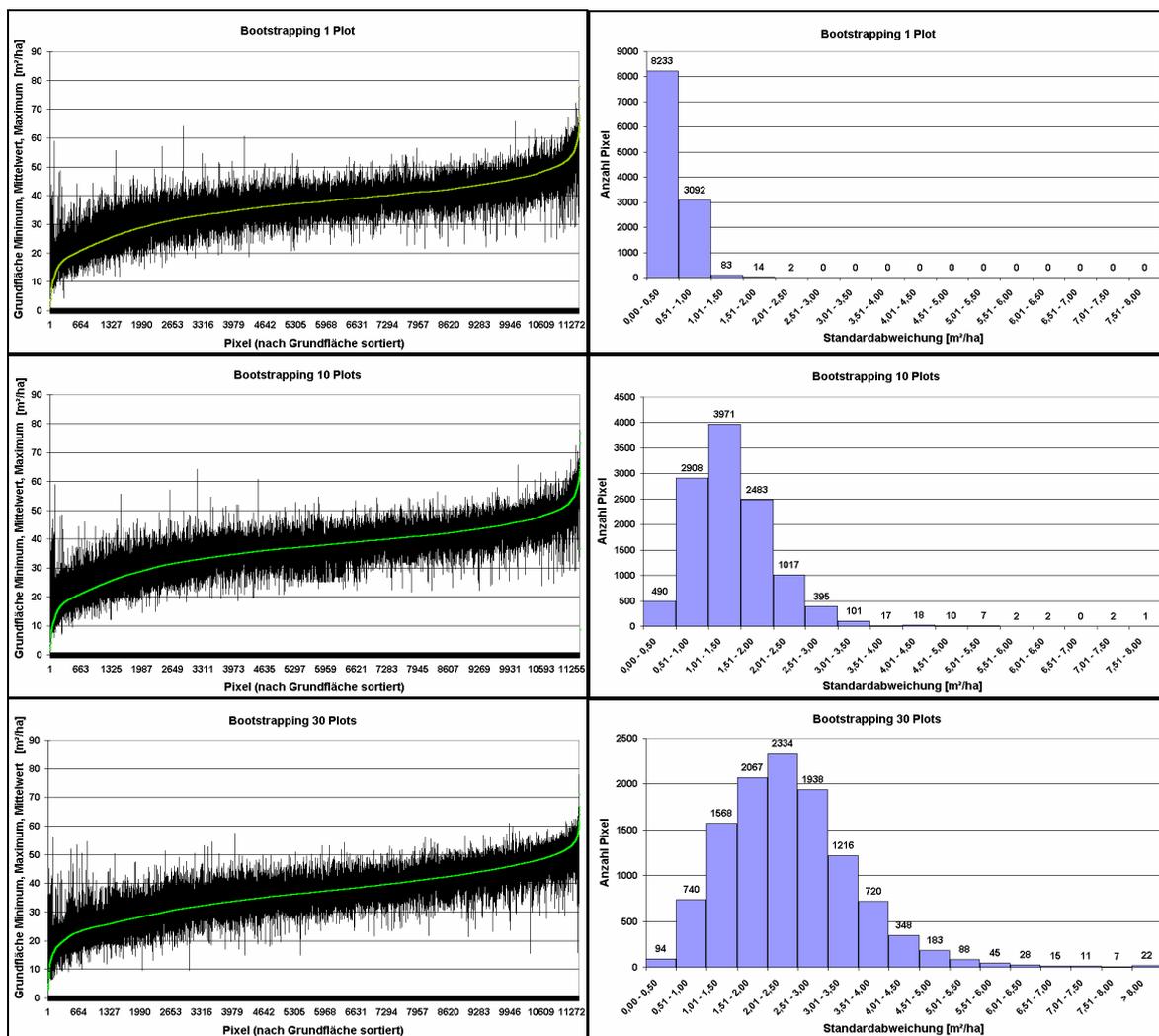


Abbildung 6-23 Links sind für jedes Pixel der Grundflächenminimalwert, -mittelwert (grüne Linie) und -maximalwert für die drei Bootstrap-Durchläufe der Szene vom August 2000 dargestellt. Rechts die dazugehörige Standardabweichung, indem die Pixel in Standardabweichungsklassen gruppiert wurden.

Die Standardabweichung, die im rechten Teil der Abbildung 6-23 zusammengefasst ist, zeigt deutliche Unterschiede zwischen den drei Varianten. Mit zunehmender Anzahl von Proben in den gezogenen Gruppen und der damit abnehmenden Anzahl von Durchläufen nimmt die Standardabweichung zu. Weisen die meisten Pixel beim 1-Plot-Bootstrapping eine Standardabweichung von 0 bis 0,5 m²/ha auf, nimmt beim 30-Plot-Bootstrapping die Klasse 2,01 bis 2,00 m²/ha die größte Anzahl auf. Der Bootstrap-Durchlauf mit 10 gezogenen Plots pro Durchlauf nimmt mit einer Standardabweichung von 1,01 bis 1,50 m²/ha eine Mittelstellung ein. Es konnte nicht geklärt werden, ob die unterschiedlichen Standardabweichungen der Durchläufe auf die Anzahl unterschiedlicher Wiederholungen oder auf den Einfluss der Anzahl gezogener Proben zurückzuführen ist. Deshalb wurden bei den Bootstrap-Durchläufen der multitemporalen Szene für alle drei Durchläufe 354 Wiederholungen gerechnet (vgl. Kapitel 5.2.5). Die Ergebnisse in Abbildung 6-24 zeigen deutliche Unterschiede bei den Minimal- und Maximalwerten der Durchläufe. Mit zunehmender Anzahl gezogener Stichproben nimmt auch die Grundflächenspannweite zu. Dies steht auch im Einklang mit den Standardabweichungsdiagrammen, in denen es ebenfalls zu einer Erhöhung der Standardabweichung bei Zunahme des Stichprobenumfangs kommt. Der Tabelle 6-11 können für alle Durchläufe die mittlere Standardabweichung und andere statistische Kennwerte entnommen werden. Die Größenordnung der mittleren Standardabweichung der einzelnen Durchläufe (Maximalwert von 2,38 m²/ha bei Durchlauf 3) ist ein Indikator für die Robustheit der kNN-Methode gegenüber einer sich variierenden terrestrischen Datengrundlage. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass das Ausschließen von 1; 10 bzw. 30 Proben bei einer terrestrischen Grundgesamtheit von 354 Probepunkten zu unterschiedlichen kNN-Ergebnissen der einzelnen Durchläufe führt. Es ist anzunehmen, dass mit einer größeren Grundgesamtheit dieser Effekt verloren geht, da der Wegfall von Proben besser kompensiert werden kann.

Tabelle 6-11 Statistische Kennwerte für die Bootstrap-Durchläufe

Durchlauf	Mittelwert [m ² /ha]	Mittlere Standardabweichung [m ² /ha]	Mittlerer Standardfehler	Mittlerer Variations- koeffizient
1	36,66	0,42	0,0225	1,16
2	36,66	1,38	0,2294	3,76
3	36,47	2,38	0,6878	6,53
4	36,63	0,26	0,0137	0,70
5	36,64	0,90	0,0480	2,47
6	36,66	1,61	0,0855	4,39

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Szenen sind auf die unterschiedliche Anzahl k -nächster Nachbarn zurückzuführen (vgl. Tabelle 6-10). Je geringer k gewählt wird, umso mehr Einfluss haben einzelne Proben auf das Ergebnis. Dies führt bei den Ergebnissen der August 2000-Szene zu größeren Grundflächenspannweiten und zu einer Angleichung der Grundflächenminimal- und Grundflächenmaximalwerte der einzelnen Durchläufe.

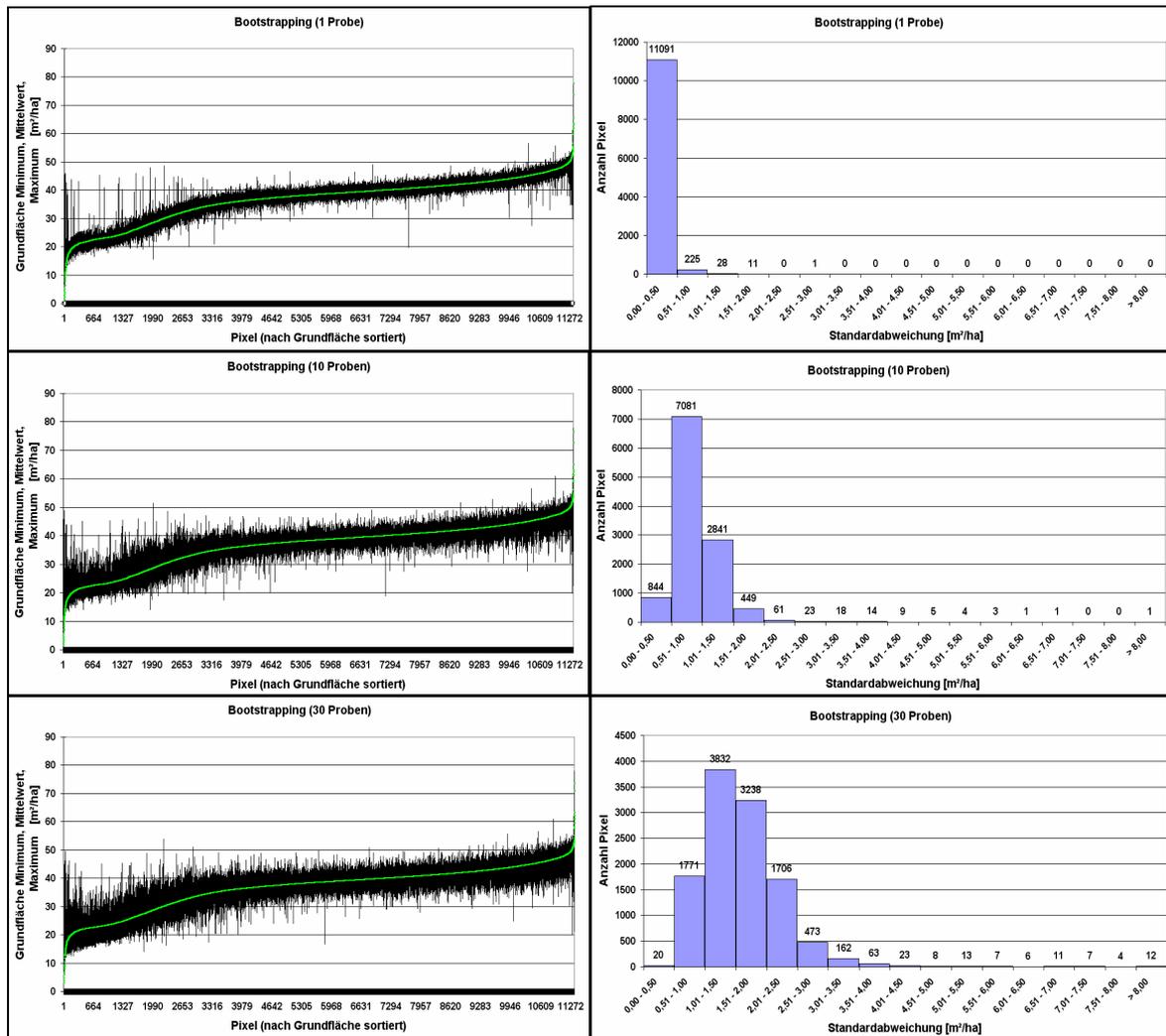


Abbildung 6-24 Links sind für jedes Pixel der Grundflächenminimalwert, -mittelwert (grüne Linie) und -maximalwert für die drei Bootstrap-Durchläufe der multitemporalen Szene von 1999/2000 dargestellt. Rechts die dazugehörige Standardabweichung, indem die Pixel in Standardabweichungsklassen gruppiert wurden.

7 Bewertung der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war es, eine umfangreiche Analyse der kNN-Methode in Hinblick auf die Eignung und Genauigkeitsaussage zur Herstellung von Bestandeskarten vorzunehmen. Zu berücksichtigen waren sowohl metrische wie kategoriale Daten, weshalb die zwei Merkmale *Grundfläche* und *Totholz* ausgewählt wurden. Bei den umfangreichen Berechnungen konnten verschiedene Feldaufnahmen, Fernerkundungsdaten und die kNN-Parameter k , r und t berücksichtigt werden. Nach den kNN-Berechnungen wurden mit Hilfe von Fehleranalysen Genauigkeitsaussagen getroffen. Sind bei metrischen Daten Genauigkeitsaussagen mit Hilfe des RMSE möglich, ist dies bei kategorialen Daten nicht durchführbar. Die kNN-Schätzer für das *Totholz* wurden mit Hilfe von Referenzproben verglichen und eine Aussage zur Genauigkeit über die Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung getroffen.

Als terrestrische Datengrundlage kamen drei Datenquellen zum Einsatz, die sich durch ihr Aufnahmedesign unterscheiden. Die MNTFR und kNN-Aufnahmen verwenden ein einphasiges Stichprobenverfahren. Im Rahmen des ProSmart-Projektes wurde ein zweiphasiges Stichprobenverfahren realisiert. Insgesamt wurden 542 Proben im Tharandter Wald, der einer Fläche von ca. 6000 ha aufweist, aufgenommen, was einer Auswahlintensität von ca. 0,1 Proben pro Hektar entspricht. Diese Probendichte kann als ausreichend für aussagekräftige kNN-Ergebnisse betrachtet werden (vgl. FRANCO-LOPEZ et al. 2001, NILSSON 1997). Bei einer separaten Betrachtung beispielsweise der MNTFR-Aufnahmen, stehen 260 Proben für die kNN-Berechnungen zur Verfügung. Dies entspricht einem Durchschnitt von 0,04 Proben pro Hektar. Auch diese Anzahl an Proben kann als ausreichend für die kNN-Methode betrachtet werden. Voraussetzung dafür wäre allerdings die Verteilung der Proben über den gesamten Merkmalsraum, wie beispielsweise die Gleichverteilung der Proben in jeder Grundflächenklasse. Dies ist aber nicht gegeben, da nur sehr wenige MNTFR-Proben in Jungbeständen bzw. in Beständen mit geringen Grundflächenwerten und eine überproportionale Anzahl in Altbeständen bzw. in Beständen mit hohen Grundflächenwerten liegen. Der hohe Grundflächenmittelwert von 44,9 m²/ha der MNTFR-Stichproben bestätigt diese Verteilung. Proben mit einem Grundflächenwert kleiner 15 m²/ha sind nur begrenzt vorhanden. Diese Konstellation führt bei den kNN-Berechnungen zur Überschätzung der Grundflächenwerte, da für die k -nächsten Nachbarn Proben mit großen Grundflächenwerten herangezogen werden. Dies lässt den Schluss zu,

dass für die Erstellung von kNN-Karten eines Gebietes ohne Über- bzw. Unterschätzung des Merkmals die repräsentative Stichprobenerhebung über den gesamten Merkmalsraum mit der an den k -nächsten Nachbarn angepassten Anzahl eine entscheidende Rolle spielt. Dieses Problem könnte mit einer sehr hohen Anzahl von Stichproben, beispielsweise einer Probe pro Hektar, begegnet werden. Zu beachten ist aber, dass eine hohe Anzahl nicht gleichzusetzen ist mit einer gleichmäßigen Verteilung über den gesamten Merkmalsraum. Mit Hilfe eines zweiphasigen Stichprobenverfahrens, wie bei den ProSmart-Aufnahmen bewerkstelligt, kann eine Optimierung hinsichtlich der Gleichverteilung der terrestrischen Datengrundlage für die kNN-Methode und die damit verbundene Senkung der Aufnahmekosten erfolgen. Allerdings sind die ProSmart-Proben durch den geringen Stichprobenumfang und der sehr kleinen Fläche (2 x 2 km), die für die Stratifizierung und Festlegung der Proben herangezogen wurde, nicht als alleinige terrestrische Datengrundlage für die kNN-Berechnungen verwendbar.

Für eine optimale terrestrische Datengrundlage der kNN-Methode ist nicht die Anzahl von Proben ausschlaggebend, sondern die repräsentative Verteilung über den Merkmalsraum. Zu berücksichtigen ist, dass entsprechend der gewählten k -nächsten Nachbarn genügend Proben in den einzelnen Klassen vorhanden sind. Mit der Auswahl aller Proben der drei verfügbaren terrestrischen Aufnahmen wurde eine fast ausgewogene Verteilung erreicht, die aber immer noch zu einer leichten Überschätzung der kNN-Schätzer führt. Die hohe Anzahl der Proben hätte durch eine Optimierung der Feldaufnahmedesigns noch reduziert und dadurch Kosten gespart werden können.

Bei einer Überschätzung der *Grundfläche* bei den kNN-Berechnungen liegen die kNN-Schätzer über den realen Werten. Dies wird bei der Fehleranalyse durch den Vergleich der Schätzer mit den Referenzproben geprüft. Mit Hilfe des Bias, der die Treffgenauigkeit wiedergibt, steht ein Maß für die systematische Abweichung zwischen den Schätzern und den Referenzwerten zur Verfügung. Bei den MNTFR-Fehlerberechnungen liegt der Bias zwischen -7 und -12 m²/ha und auch bei Verwendung aller Proben erreicht er noch Werte zwischen -2 und -5 m²/ha. Somit steht mit dem Bias ein Maß zur Kontrolle der Verteilung der Proben über den Merkmalsraum zur Verfügung. Bei einer optimalen Verteilung sollte der Bias bei Null liegen.

Neben operativ im Einsatz befindlichen Scannern und den daraus gewonnenen Daten, wie die in der Untersuchung verwendeten Landsat-Daten mit einer Auflösung von 30 x 30 m,

wurden Hyperspektraldaten mit einer Auflösung von 6 x 6 m verwendet. Letztere wurden mit Hilfe eines flugzeugtragenden Systems aufgenommen. Werden die Ergebnisse der kNN-Berechnungen für beide Datenquellen gegenübergestellt, zeigt sich ein differenziertes Bild. Die mit Hilfe der Hyperspektraldaten erstellten kNN-Karten zeigen gegenüber den Karten der Landsat-Daten einen deutlich höheren Detaillierungsgrad des Bestandes. Die Richtigkeit der zu erkennenden Bestandesstrukturen wurde mit Hilfe von HRSC-A-Daten überprüft und eine sehr gute Übereinstimmung gefunden. Die mit den hyperspektralen Daten gewonnenen Karten zeigen eine hohe Wirklichkeitstreue, die bis zum Erkennen von Straßen, Blößen und einzelnen Laubbäumen reicht. Die kNN-Karten stellen somit eine gute Arbeitsgrundlage für die forstliche Praxis dar.

Demgegenüber stehen die Ergebnisse der Fehleranalyse, die keine Genauigkeitsvorteile bei der Verwendung von Hyperspektraldaten gegenüber Landsat-Daten nachweisen kann. Ob die geringe Anzahl der Referenzproben Ursache dafür ist oder andere Gründe eine Rolle spielen, konnte nicht geklärt werden. Auf dem Gebiet der Hyperspektraldaten mit einer hohen geometrischen Auflösung besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Qualität der Hyperspektraldaten durch die schwierigen Aufnahmebedingungen eingeschränkt war. Die zum Aufnahmezeitpunkt vorhandene diffuse Beleuchtung der Erdoberfläche und die unkontrollierbaren lokalen Unterschiede in der Beleuchtung, die durch die unterschiedlich stark ausgeprägte Bewölkung entstanden, sind hier als Problemfelder zu nennen. Diese Nachteile treten sowohl bei der Erstellung der Karten wie bei der Fehlerrechnung auf.

Die in der Untersuchung erzielten Genauigkeiten für die *Grundfläche* liegen zwischen 35 % und 67 % bei Verwendung der Landsat-Daten und zwischen 65 % und 67 % bei Hyperspektraldaten. Vergleicht man die mit den beiden gewählten Auflösungen erreichten Ergebnissen dieser Untersuchung mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen, ist eine differenzierte Betrachtungsweise nötig. Die Einschätzung der Eignung von Landsat-TM-Daten zur Erkundung des Waldes und der dabei erzielbaren Genauigkeiten schwankt stark. Beispielsweise gibt SCHARDT (1998) in einer Abhandlung über die Eignung von Landsat-TM-Daten für die Erfassung forstlicher Merkmale in Anhängigkeit vom Untersuchungsgebiet für bestimmte Klassenschemata der Artenzusammensetzung und der natürlichen Altersklasse eine Genauigkeit von ca. 85 % an. Dagegen findet sich in der umfassenden Rückschau von HOLMGREN und THURESSON (1998) eine weitaus

pessimistischere Einschätzung der Nutzbarkeit multispektraler Satellitendaten für die forstliche Planung. HOLMGREN und THURESSON stellen unter anderem fest, dass die erreichbaren Genauigkeiten für verschiedene Merkmale im Allgemeinen zwischen 65 % und 85 % liegen. Die Genauigkeiten im Rahmen dieser Untersuchung liegen in diesem Bereich. Es ist davon auszugehen, dass mit einer Optimierung der terrestrischen Aufnahmen und einer optimalen radiometrischen und geometrischen Korrektur der Fernerkundungsdaten eine höhere Genauigkeit möglich ist.

Für das Merkmal *Totholz* liegen bei der Fehlerrechnung die Übereinstimmungen zwischen den kNN-Schätzern und den Referenzwerten zwischen 60,0 % und 73,3 % (Landsat) bzw. zwischen 60,0 % und 63,3 % (HyMapTM). Eine optische Kontrolle mit Hilfe der HRSC-A-Daten ist nur bedingt möglich, da *Totholz* nur eingeschränkt auf den HRSC-A-Daten erkennbar ist. Bei einer Kontrollbegehung des Testgebietes wurden Übereinstimmungen mit den *Totholz*-Karten gefunden. Auf dieser Genauigkeitsbasis stellen die mit der kNN-Methode erstellten *Totholz*-Karten eine gute Arbeitsgrundlage dar.

Bei der Anzahl der k -nächsten Nachbarn wurde für das Merkmal *Grundfläche* bei Verwendung der Landsat-Daten und Auswahl des kleinsten prozentualen RMSE ($37,07\%$; $r = 2$; $t = 2$) ein k -Wert von 15 ermittelt. Dies steht im Einklang mit anderen Untersuchungen, die 10 bis 15 nächste Nachbarn als Optimalwert herausfanden (FRANCO-LOPEZ et al. 2001, NILSSON 1997, TOKOLA et al. 1996, TOMPPU 1996). Bei Verwendung der HyMapTM-Daten und einem kleinsten erreichten %RMSE von $36,05\%$ ($r = 2$; $t = 2$) sind 5-nächste Nachbarn ausreichend. Die durch die spektrale wie räumliche höhere Auflösung vorhandene differenziertere und genauere Informationsdichte scheint es zu ermöglichen, in der spektralen Information fast identische Nachbarn zu finden und somit mit wenigen Nachbarn auszukommen. Bei Betrachtung des Merkmals *Totholz* liegen sowohl für die Landsat-Daten wie für die Hyperspektraldaten die meisten Übereinstimmungen zwischen den kNN-Schätzern und den Referenzproben bei k -Werten zwischen 1 und 7. Dies lässt den Schluss zu, dass durch eine höhere Übereinstimmung der spektralen Reflexion einzelner Nachbarn bei den kNN-Berechnungen mit wenigen k -nächsten Nachbarn genauere Ergebnisse erzielbar sind.

Bei der Distanzfunktion, die bei der kNN-Methode die spektrale Differenz zwischen zwei Pixel bestimmt, kann durch den Parameter r eine unterschiedliche Wichtung einzelner Kanäle erfolgen. Umfangreiche r -Wertreihen kamen bei den kNN-Berechnungen zum

Einsatz. Die erzielten Ergebnisse und die damit verbundene Gesamtdistanz bewegen sich in sehr engem Rahmen. Die maximale Differenz des minimalen und maximalen %RMSE für Landsat- wie Hyperspektraldaten beträgt 4,06 % (Grundfläche). Trotz des geringen Einflusses wird bei $r = 10$ eine Minimierung des Fehlers auf 36,63 % (Landsat; $k = 10$; $t = 2$) bzw. bei $r = 4$ auf 36,01 % (HyMapTM; $k = 5$; $r = 2$) erreicht. Mit einer Anhebung des r -Wertes fließen hohe spektrale Differenzen einzelner Kanäle mit einer größeren Wichtung in der Gesamtdistanz ein und dies führt zu einer Verschlechterung der Gesamtdistanz. Umgekehrt bedeutet dies, dass Pixel mit relativ homogenen spektralen Differenzen der einzelnen Kanäle bevorzugt werden. Dies führt bei der Gesamtbetrachtung der kNN-Methode zu genaueren Ergebnissen.

Mit der Einführung des Parameters t ist eine Einflussnahme auf die Gewichtung der als k -nächsten Nachbarn ausgewählten Pixel und ihrem zugeordneten Merkmalswert über die Distanz möglich. Je größer t gewählt wird, umso größer ist das Gewicht der Pixel mit geringer spektraler Distanz. Für die Landsat-Daten wurde ein Optimum des t -Wertes von 0,6 gefunden. Die den als k -nächsten Nachbarn ermittelten Pixeln zugeordneten Merkmalswerte fließen mit nur geringem Unterschied, abhängig von der spektralen Distanz, in den Merkmalsschätzer ein. Eine Heraushebung einzelner Pixel der k -nächsten Nachbarn wegen ihrer geringen spektralen Distanz führt zu einer Verschlechterung der kNN-Ergebnisse.

Die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse können als Richtwerte für den Einsatz der kNN-Methode gelten. Bei Einsatz der kNN-Methode in anderen Untersuchungsgebieten und bei Ermittlung anderer Merkmalswerte sollten Proberechnungen durchgeführt werden, um für die jeweils gegebenen Bedingungen die Optimalwerte zu erreichen.

8 Ausblick

Die internationale Staatengemeinschaft wird sich zunehmend bewusst, dass dem Schutz unserer natürlichen Lebensgrundlagen im komplizierten Ökosystem Erde eine besondere Rolle zukommt. Wichtigste Grundlage für alle diesbezüglichen Anstrengungen ist ein möglichst umfassendes Verständnis der Fülle von ineinander verzahnten Prozessen, aus denen dieses System zusammengesetzt ist. Dazu ist es wichtig, den aktuellen Zustand und die Entwicklung der Bedingungen auf der Erdoberfläche festzustellen und zu überwachen. Für alle diese Ziele stellt die Fernerkundung ein wichtiges Hilfsmittel dar, mit dem sich flächendeckende Datengrundlagen erstellen lassen. Durch multitemporale Auswertungen können regelmäßige Aktualisierungen der Daten erfolgen und somit Überwachungsaufgaben erfüllt werden. Aus diesen Gründen wird zurzeit verstärkt an der Entwicklung und der operationalen Umsetzung neuer Fernerkundungssysteme und –techniken gearbeitet.

Die kNN-Methode kann in diesem Rahmen Aufgaben zur Überwachung der Erdoberfläche übernehmen. Durch den pixelweisen Informationsgehalt sind für verschiedenste Merkmale flächendeckende Karten möglich. Dabei ist die Auswahl nicht nur auf produktionsspezifische Merkmale, wie *Stammzahl*, *Grundfläche* oder *Volumen*, festgelegt, sondern auch ökologische Merkmale, wie *Totholz* oder *Bestockungsdichte*, können in Karten dargestellt werden. Durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten eines Gebietes von verschiedenen Zeitpunkten können Veränderungen kartiert und so für Überwachungsaufgaben sichtbar gemacht werden

Die kNN-Methode wurde in dieser Untersuchung zur Klassifizierung von Waldbeständen eingesetzt, was nur einen kleinen Teil der Landnutzungsformen ausmacht. Eine Anwendung der Methode auf landwirtschaftliche Flächen ist ohne weitere Entwicklungsarbeit möglich. Voraussetzung dafür ist die Erhebung von terrestrischen Proben auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Gerade durch die klar getrennten Pflanzenverbände sind wesentlich genauere Klassifizierungsergebnisse zu erwarten. Auch eine Ausdehnung der kNN-Methode auf urbane Gebiete ist denkbar, beispielsweise zur Trennung von bebauten und unbebauten Flächen.

Der technische Fortschritt in der satellitengestützten Fernerkundung beschränkt sich nicht nur auf die spektrale Auflösung, sondern betrifft auch verstärkt die geometrische

Auflösung der Sensoren. Mit dem bereits operational verfügbaren Satellitensystem QuickBird, der neben einem multispektralen Aufnahmesystem auch über einen panchromatischen Scanner mit einer geometrischen Auflösung von 0,61 m verfügt, hat die weltraumgebundene, hochauflösende Fernerkundung eine neue Dimension erreicht. Eine große Anzahl von Anwendungen gerade im Bereich des Umweltmonitoring und der Landnutzungskartierung (CSAPLOVICS 1998), sowie im Bereich der Forstwirtschaft (vgl. Kapitel 2) profitieren von der sehr hohen geometrischen Auflösung.

Auch die mit der kNN-Methode berechneten Grundflächenkarten zeigen bei der Verwendung von Hyperspektraldaten, die eine Auflösung von 6 m x 6 m aufweisen, einen viel größeren Detailreichtum (es sind beispielsweise Wege, Blößen und Wiesen zu erkennen) als bei Verwendung der multispektralen Landsat-Daten (30 m x m Auflösung). Dieser auf den Karten sichtbare Informationsgewinn konnte in der Fehleranalyse aber nicht nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen unter Verwendung von hochauflösenden Multispektraldaten und einer ausführlichen Fehleranalyse sind notwendig.

Auch die Planung und Überwachung von Waldumbaumaßnahmen lässt sich durch die Auswertung von kNN-Karten unterstützen. Dazu kann beispielsweise die räumliche Verbreitung und der flächenmäßige Anteil von Laubholz zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst und mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen dann der zu erwartende Verjüngungsfortschritt über Raum und Zeit simuliert werden. Im Rahmen der Planung von Waldumbaumaßnahmen kann dann zwischen Beständen unterschieden werden, die durch Naturverjüngung oder durch Pflanzung zu einem höheren Laubholzanteil überführt werden sollen (KÖHL & HUSSENDÖRFER 2000).

Neben der mit Hilfe der kNN-Methode durchführbaren direkten Klassifizierung von Beständen bietet sich auch die Möglichkeit, sie in Klassifizierungsabläufe zu integrieren. Dies bietet die Möglichkeit im Prozessablauf zusätzliche Methoden zu integrieren. Denkbar wären eine Stratifizierung von Beständen mit Hilfe der kNN-Methode und eine weitergehende Klassifizierung mit anderen Verfahren wie beispielsweise mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren.

Dabei sollte jedoch immer beachtet werden, dass das vorrangige Ziel der Fernerkundung nicht die vollständige Ersetzung terrestrischer Erhebungen sein sollte. Viele wichtige forstliche Merkmale sind mit fernerkundlichen Methoden gar nicht oder nicht genau genug

zu erheben. Der größte Nutzen wird meistens dann erzielt, wenn fernerkundliche und terrestrische Methoden ineinander greifen, wobei statistische Methoden ein geeignetes Mittel zur Definition der Schnittstellen darstellen. Für zukünftige Inventuren, wie beispielsweise die Bundeswaldinventur, bietet sich mit Hilfe von Fernerkundungsdaten, vor allem auch unter waldökologischen Gesichtspunkten, die Möglichkeit, diese effizienter und genauer durchzuführen.

9 Literaturverzeichnis

- Albertz, J., 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 93-153
- Bähr, H.P., T. Vögtle, 1991: Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. 2. Auflage, Wichmann, Karlsruhe
- Ball, D. W., 1995: Defining terms, Spectroscopy. 10, 16-18
- Blaschke, T. (Hrsg.), 1999: Umweltmonitoring und Umweltmodellierung – GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Wichmann Verlag, Heidelberg
- Bodmer, H.-C., 1993: Untersuchung zur forstlichen Bestandskartierung mit Hilfe von Satellitenbildern. Dissertation, Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum, ETH-Zürich
- Bowden, D. C., G. E. Dixon, W. E. Frayer, F. A. Graybill, S. Jeyaratnam, D. C. Johnston, B. M. Kent, V. J. Labau, E. Roberts, 1979: Multi-level sampling designs for resource inventories. Dept. of Forest and Wood Sciences, Colorado State University, Rocky Mountain Forest and Range Exp. Station, USDA Forest Service, Ft. Collins, CO
- Bortz, J., 1993: Statistik für Sozialwissenschaftler. Berlin: Springer
- Bowles, J., M. Kappus, J. Skibo, J. Antoniadis, C. Davis, 1998: Hyperspectral data compression and science for the NEMO satellite. In: Proceeding of the 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich, 183-190
- Brassel, P., M. Köhl, H.J. Schnellbacher, U.B. Brändli, 1999: Das Landesforstinventar. In: WSL (Hrsg.): Schweizerisches Landesforstinventar, Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995, Haupt Verlag, Bern: 15-25.
- Carmen, S., N. Speziale, 2003: Hyperion Instrument Home, Internet: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/Hyperion.html>
- Csaplovics, E., 1998: High resolution space imagery for regional environmental monitoring – status quo and future trends. Proc. ISPRS Comm. VII Symp. Resource and Environmental Monitoring, Budapest, Hungary, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32 (7), 211-216.
- Cochran, W. G., 1977: Sampling Techniques. third edition, John Wiley & Sons New York, 428 S.
- Cocks, T. D., R. Jensen, A. Stewart, L. Wilson, T. Shields, 1998: The HyMap Airborne Hyperspectral Sensor: The system, calibration and performance, in Proceedings of the 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich
- Cuisenaire, O.; Macq, B., 2000: Fast k-NN Classification with an Optimal k-Distance Transformation Algorithm. Proc. 10th European Signal Processing Conf., Tampere, Finland, Sept. 5-8, 2000, pp. 1365-1368. (<http://ltswww.epfl.ch/~cuisenai/papers/>)
- Dahm, S., A. Akca, J. Saborowski, 1997: Ein dreiphasiges Stichprobenverfahren für die Bundeswaldinventur, Allgemeine-Forst-und-Jagdzeitung. 1997, 168: 5, 77-82

- Dees, M., D.R. Pelz, B. Koch, 1998: Integrating satellite based forest mapping with Landsat TM in a concept of a large scale forest information system. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 1998, No. 4, 209-220; 17 ref.
- Downs, G. M., J. M. Barnard, 2002: Clustering of very large datasets. Sheffield, UK BCI Barnard Chemical Information Ltd.
- Drews, D., H. Schwab, 2000: Workshop Visual Basic 6. Addison-Wesley Verlag München, 350 S.
- Duch, W., K. Grudzinski, 1999: The Weighted k-NN with Selection of Features and its Neural Realization. (<http://www.phys.uni.torun.pl/publications/kmk/99scal-knn.pdf>)
- Efron, B. 1983: Estimating the error of a prediction rule: improvement on cross-validation. *Journal of the American Statistical Association*, 78 (382), 316-331
- Efron, B., R. J. Tibshirani 1993: An Introduction to the bootstrap. New York, USA: Chapman & Hall (436 pp.)
- Efron, B., R. J. Tibshirani 1997: Improvements on cross-validation – the 0,632+ bootstrap method. *Journal of the American Statistical Association*, 92 (438), 548-560
- ERDAS IMAGINE V8.3 Tour Guides. 1997 ERDAS, Inc. ,Atlanta, Georgia, 454 S.
- ERDAS IMAGINE V8.3 Field Guide. Fourth Edition, 1997 ERDAS, Inc. Atlanta, Georgia, 656S.
- ERSC, 2003: Earth observation satellites. Past – Current – Future, Environmental Remote Sensing Center of the University of Wisconsin, Internet: <http://www.ersc.wisc.edu/>
- Fazakas, Z., M. Nilsson, 1996: Volume and forest cover estimation over southern Sweden using AVHRR data calibrated with TM data. *Remote Sensing Environment* 17 (1996), 1701-1709.
- Fortune, S., 1987: A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams. *Algorithmica*, 2:153-174,
- Franco-Lopez, H., A. R. Ek, M. E. Bauer, 2001: Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77 (2001): 251-274.
- Gangkofner, U., 1996: Methodische Untersuchungen zur Vor- und Nachbereitung der Maximum Likelihood Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten. *Münchner Universitätsschriften, Band B24, Institut für Geographie der Universität München*, 190 S.
- Clark, R. N., 1999: Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In: A. N. Rencz (ed), *Remote sensing for the earth sciences, Manual of Remote Sensing*. 3rd Edition, Volume 3, New York, 3-58
- Goetz, A. F. H., G. V. Solomon, B. N. Rock, 1985: Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science* 228, 1147-1153
- Goetz, A. F. H., 1992: Imaging spectrometry for earth remote sensing. In: F. Toselli und j. Bodechtel (eds), *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, 1-20

- Haapanen, R., R. Ek, 2001: Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation. Staff paper series number 152, Department of Forest Resources, University of Minnesota
- Haara, A., M. Maltamo, T. Tokola, 1997: The k.nearest neighbour method for estimating basal-area distribution. *Scand. J. For. Res.* 12, p. 200-208
- Häussler, T., M. Köhl, M. Lautner, M. Scheuber, W. Stümer, H. Ziese, 2000: Teilvorhaben HEZEW, in: ProSmart Endbericht, Daimler Chrysler Aerospace, Dornier Satellitensysteme, Friedrichshafen: 9/1 – 9/119
- Hehmke, M., 2001: Untersuchung von Landschaftsveränderungen an der ehemaligen innerdeutschen Grenze mit Hilfe von Landsat TM-Daten, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik TU Dresden, 62 S.
- Hessenmöller, D., 2002: Modelle zur Wachstums- und Durchforstungssimulation im Göttinger Kalkbuchenwald. Dissertation, Forstwissenschaftlicher Fachbereich der Georg-August-Universität Göttingen
- Hessenmöller, D., A. S. Elsenhans, 2002: Zur Schätzung des Zuwachses bei Rotbuche *Fagus sylvatica* L. – Ein Vergleich parametrischer Verfahren mit der k-nearest neighbour Methode. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 173. Jg., 11-12
- Heuveldop, J., T.W. Schneider, S. Honerla, 1996: Nachhaltige Waldentwicklung – internationale Forstpolitische Aktivitäten nach UNCED und Beiträge der Forstwissenschaft zur Umsetzung. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg* Nr. 185. 37 S.
- Hildebrandt, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann Verlag, Heidelberg
- Holmgren, J., S. Joyce, M. Nilsson, H. Olsson, 2000: Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Scandinavian Journal Forest Research* 15, 103-111
- Holmgren, P., T. Thuresson, 1998: Satellite Remote Sensing for Forestry Planning – A Review. *Scandinavian Journal Forest Research* 13, 90-110
- Holmström, H., M. Nilsson, G. Stahl, 2001: Simultaneous Estimations of Forest Parameters using Aerial Photograph Interpreted Data and the k Nearest Neighbour Method. *Scandinavian Journal Forest Research* 16, 67-78
- Itten, K. I., 1980: Großräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn-Bad Godesberg, 87 S.
- Katila, M., Tomppo, E., 2001: Selecting estimation parameters for the Finnish multisource National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment* 76, 16-32
- Kellenberger, T. W., 1996: Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten – Grundlagen, Methodenentwicklung und Anwendung. *Remote Sensing Series*, Universität Zürich.
- Kilkki, P., R. Päivinen, 1986: Weibull function in the estimation of the basal-area DBH-distribution. *Silva Fennica* 20, 149-156

- Klenke, M., 1999: GIS-gestützte Landnutzungsklassifikationen auf Grundlage von Daten passiver und aktiver Fernerkundungssensoren zur distributiven Flusseinzugsgebietsmodellierung. Jenaer Geogr. Schriften, Band 8, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, 159 S.
- Köhl, M., 1994: Statistisches Design für das zweite Schweizerische Landesforstinventar: Ein Folgeinventurkonzept unter Verwendung von Luftbildern und terrestrischen Aufnahmen, Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Band 69, Heft 1, 141 S.
- Köhl, M., R. Päivinen, 1996: Definition of a system of nomenclature for mapping European forests and for compiling a Pan-European forest information system (FIRS). Final report of the project, Brussels, European Commission, Joint research centre, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL/FNP), Joensuu, European Forest Institute, 233 S.
- Köhl, M., E. Hussendörfer, 2000: Waldumbau – Ansätze zur Bestimmung des potenziellen Verjüngungsfortschritts mit Hilfe von Fernerkundungsdaten und GIS. Allg. Forst- und Jagdzeitung, 171 (5-6), 102-109
- Köhl, M., W. Stümer, M. Scheuber, H. Ziese, T. Häussler, M. Lautner, 2000: Combining hyperspectral data and ground surveys for the assessment of non-wood goods and services of forests. In: A Decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation (Buchroithner, M. F.), Proceedings of the 20th EARSeI Symposium, Balkema Publishers, Lisse Abingdon Exton Tokyo
- Köhl, M., M. Lautner, 2001: Erfassung von Waldökosystemen durch Hyperspektraldaten. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 2/2001, 107-117
- Köhl, M., W. Stümer, M. Lautner, M. Scheuber, 2002: Hyperspectral Remote Sensing Data – A Information Source for Improved Forest Planning. (submitted for publication)
- Kraus, K., W. Schneider, 1988: Fernerkundung. Band 1. Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken, Bonn
- Kraus, K., J. Jansa, W. Schneider, 1990: Fernerkundung. Band 2. Auswertung photographischer und digitaler Bilder, Bonn
- Kuhn, G., 1998: Erprobung von Fernerkundungsmethoden für das vegetations-ökologische Monitoring am Beispiel des Wurzacher Riedes. Diss., Technische Universität München, Lehrstuhl für Vegetationsökologie, 96 S.
- Lautner, M., 2001: Hyperspektrale Fernerkundungsdaten zur Charakterisierung von Waldbeständen. Diss., Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik, 116 S.
- Lehmann, F., R. Pischel, F. Wewel, 1999: Teilvorhaben HRSC-A, in: ProSmart Endbericht, Daimler Chrysler Aerospace, Dornier Satellitensysteme, Friedrichshafen: 5/1 – 5/33
- Löffler, E., 1994: Geographie und Fernerkundung, Stuttgart
- Lund, H.G., M. Boley, 1995: National resource inventories and monitoring needs: The said and unsaid form UNCED. Schweizer Zeitschrift für Forstwesen 146(12): 953-964

- Maltamo, M., A. Kangas, 1998: Methods based on k-nearest neighbor regression in the prediction of basal area diameter distribution. *Canadian Journal Forest Research* 28, 1107-1115
- McRoberts, R. E., H. Franco-Lopez, A.R. Ek, M.E. Bauer,,: Using Remotely Sensed Imagery to Extend Forest Inventory Field Plot Data to Large Areas.
- Mitchell, T., 1997: *Machine Learning*. McGraw Hill
- MSDN Library Visual Studio 6.0-Release, 1998: Programm-Dokumentation für Visual Basic
- Muionen, E., T. Tokkola, 1990: An application of remote sensing for communal forest inventory. In: *The usability of Remote Sensing for Forest Inventory and Planning, Proceedings from the SNS/ IUFRO workshop in Umea, 26-28 February, 1990*, pp. 35-42
- Müller, A., R. Richter, A. Hausold, 1999: Teilvorhaben HyMap, in: *ProSmart Endbericht, Daimler Chrysler Aerospace, Dornier Satellitensysteme, Friedrichshafen: 3/1 – 3/32*
- Niemann, H., 1983: *Klassifikation von Mustern*. Springer-Verlag, Berlin
- Nilsson, M. 1997: Estimation of forest variables using satellite image data and airborne lidar. *Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea*
- Oesten, G., 1991: *Fernerkundung in der Forstwirtschaft: Stand und Entwicklungen*. Wichmann, Karlsruhe, 277 S.
- Qi, H., 2002: *Feature Selection and kNN Fusion in Molecular Classification of Multiple Tumor Types*. Electrical and Computer Engineering Department, University of Tennessee, 2002.
- Quiel, F., 1986: *Landnutzungskartierung mit Landsat-Daten*. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn, 85 S.
- Ranneby, B., T. Cruse, B. Häglund, H. Jonasson, J. Swärd, 1987: *Designing a new national forest survey for Sweden*. *Studia Forestalia Suecia* 177, 29 pp
- Rast, M., 1991: *Imaging spectroscopy and its application in space borne systems*. ESA SP-1144, Noordwijk
- Reuther, M., T. Häusler, E. Akgöz, K. Hoffmann, R. Stätter, 1996: *Waldzustandserfassung im Fichtelgebirge und Erzgebirge mit Hilfe der Fernerkundung*, *Forstliche Forschungsberichte München*, Nr. 160, München
- Richards, J. A., J. Xiuping, 1999: *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, Third Edition*, Springer Verlag Berlin, 363 S.
- Richter, R., W. Lüdeker, 1998: Retrieval of atmospheric water vapour from MOS-B imagery. In: *Proceedings of the 1st EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, 201-206
- Ricken, H., 2000: *ProSmart Endbericht, Daimler Chrysler Aerospace, Dornier Satellitensysteme, Friedrichshafen*
- Römisch, K., 2002: *The kNN-method and ist use for mapping forest attributes from aerial and satellite images and terrestrial data – a survey from the literature*. Dresden University of Technology, Chair of Biometrics and Computer Science (Druck in Vorbereitung)

- Sachs, L., 1997: *Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden*. 8. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York
- Schardt, M., 1998: Erfassung forstlicher Parameter mittels Ladsat TM-Daten. *AFZ – Der Wald*, 24, 1461-1463
- Schardt, M., 1990: Verwendbarkeit von Thematic Mapper-Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. DLR-FB-90-44, 200 Seiten, DLR Oberpfaffenhofen
- Scheuber, M., M. Köhl, W. Stümer, 2001: Erfassung von Nicht-Holz-Produkten und – Leistungen des Waldes. *AFZ-DerWald* 21/2001
- Sironen, S., A. Kangas, M. Maltamo, J. Kangas, 2001: Estimating individual tree growth with the k-nearest neighbour and k-Most Similar Neighbour methods. *Silva Fennica* 35(4), 453-467
- Staenz, K., 1998: The use of imaging spectrometry in Canada. In: *Proceedings of the 1st EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, 3-10
- Stümer, W., 2002: Erfassung des Zustandes und der Entwicklung von Waldökosystemen mit Hilfe der kNN-Methode. In: *Die Grüne Reihe*, M. Köhl und H.-D. Quednau (Hrsg.), Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, 14. Tagung, Tharandt 2002, 140-150
- Thomas, R. W., 1990: Issues and recommendations regarding the implementation of remote sensing in the Swedish National Forest Inventory. SUAS, Department of Forest Survey, Report 49, 112 pp.
- Thompson, S. K., 1992: *Sampling*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 343 S.
- Tokola, T., J. Pitkänen, S. Partinen, E. Muinonen 1996: Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (12), 2333-2351
- Tommola, M., M. Tynkkynen, J. Lemmetty, P. Harstela, L. Sikanen, 1999: Estimating the characteristics of a marked stand using k-nearest neighbour regression. *Journal of Forest Engineering* 10, 75-81
- Tomppo, E., 1991: Satellite image-based national forest inventory of Finland. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 28 (7-1), 419-424
- Tomppo, E., 1993: Multi-source national forest inventory of Finland. In *proceedings of Ilvessalo symposium on National Forest Inventories*, The Finnish Forest Research Institute, Research papers 444, 52-59
- Tomppo, E. 1997a: Application of remote sensing in Finnish national forest inventory. In: *Application of remote sensing in European forest monitoring. International workshop proceedings* (pp. 375-388), Vienna, Austria: European Commission, CL-NA-17685-EN-C (14-16 October 1996)
- Tomppo, E. 1997b: Recent status and further development of the Finnish multi-source forest inventory. In: *Managing the resources of the world's forests, Lectures given at the 1997 Marcus Wallenberg Prize Symposium*, pp. 53-69, The Marcus Wallenberg Foundation Symposia Proceedings, p. 11 Falun, Sweden: The Marcus Wallenberg Foundation

- Tomppo, E., A. Pekkarinen, 1997: Methodenerprobung der Finnischen Nationalen Multiquellen-Waldinventur in Nordrhein-Westfalen. In: Landeswaldinventur – Konzeption, Verfahrenstest, Ergebnisse, Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen Heft 5, 52-67
- Tuncel, E., K. Rose, 2002: Towards Optimal Data Clustering for Approximate Similarity Searching. In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Lausanne, Switzerland, August 2002
- Vries, A. P. de, N. Mamoulis, N. Nes, M. Kersten, 2002: Efficient k-NN Search on Vertically Decomposed Data. ACM SIGMOD 2002, Madison, Wisconsin, USA
- Warfield, S., 1996: Fast k-NN Classification for Multichannel Image Data. Pattern Recognition Letters, 17: 713-721.
- Young, J., 2003: Earth Observing-1 Home, Internet: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/>
- Zar, J. H., 1996: Biostatistical Analysis. Prentice Hall, New Jersey, 1996

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Bei Auswahl der 3-nächsten Nachbarn in Bezug auf die räumliche Distanz wird der neue Datensatz der Klasse A zugeordnet (Quelle: HINKELMANN 2001).	17
Abbildung 3-1	Lage des Tharandter Waldes	22
Abbildung 3-2	Niederschlagswerte und Temperatur von der Klimastadion „Wildacker“ im Tharandter Wald (Quelle: EICHELMANN 2002)	23
Abbildung 3-3	Die Baumartenverteilung im Tharandter Wald (Quelle: MNTFR-Endbericht 2002)	23
Abbildung 3-4	Landsat-7-Szene vom September 2000 (Kanäle rot: 5, grün: 4, blau: 3) mit der Lage der Testgebiete I (blau) und II (rot) im Tharandter Wald	25
Abbildung 3-5	Ausschnitt aus einer digitalen Karte mit Tharandter Wald und Grillenburg.	26
Abbildung 3-6	Probepunkte im Tharandter Wald dargestellt auf der Landsat-7-Szene vom September 2000: kNN-Punkte (rot), ProSmart-Punkte (grün) und MNTFR-Punkte (orange).	27
Abbildung 3-7	Probepunkte (rot) der zweiten terrestrischen Aufnahme dargestellt auf der Hyperspektralszene.	29
Abbildung 3-8	MNTFR-Aufnahmedesign (Quelle: MNTFR field work report)	31
Abbildung 3-9	kNN-Aufnahmedesign	32
Abbildung 3-10	Probepunkte (rot) des 100 m x 100 m Stichprobengitters der kNN-Aufnahme, wovon 110 Probepunkte erhoben wurden, verschnitten mit einem Ausschnitt der Hyperspektralszene.	32
Abbildung 4-1	HRSC-A- (links), Hyperspektral- (mitte) und Landsat-7-Daten (rechts)	33
Abbildung 4-2	Reflexion ausgewählter Pflanzen und Bäume im Verhältnis zur Wellenlänge. Der gelbe Bereich signalisiert die Abdeckung des Landsat-Sensors. (Quelle: nach MÜLLER et al. 1999)	34
Abbildung 4-3	Ausschnitt aus der Landsat-7-Szene (September 2000) mit dem Tharandter Wald (hellgrün: Grillenburg) und der 2,0 x 2,5 km Testfläche (orange Rahmen).	36
Abbildung 4-4	Lage der Passpunkte auf der Landsat-5-Szene im Untersuchungsgebiet Tharandter Wald	38
Abbildung 4-5	Erste Hauptkomponente der PCA aus der Landsat-7-Szene vom September 2000	39
Abbildung 4-6	Vegetationsindex NDVI vom Tharandter Wald berechnet aus der Landsat-5-Szene	40
Abbildung 4-7	Der australische HyMap TM -Sensor	41
Abbildung 4-8	Lage des Flugstreifens über dem Untersuchungsgebiet Tharandter Wald für die Erhebung der HRSC-A (blau)- und HyMap TM -Daten (rot)	42
Abbildung 4-9	Cessna 208 CARAVAN (links) und HyMap TM - und HRSC-A eingebaut in der Cessna (rechts) (Quelle: LEHMANN et al. 2000).	43
Abbildung 4-10	Ausschnitt aus der Hyperspektralszene (20 MNF- Kanäle) mit dem Tharandter Wald (hellgrün: Grillenburg) und der 2,0 x 2,5 km Testfläche (schwarzer Rahmen).	44
Abbildung 4-11	HRSC-A mit aufmontiertem Kreiselblock (Quelle: LEHMANN et al. 2000)	45

Abbildung 4-12	Aufnahmeprinzip des HRSC-A multispektralen Stereo-Zeilenscanners, die Abkürzungen für die einzelnen Kanäle bedeuten (Quelle: LEHMANN et al. 2000): SA - Stereo rückwärts, panchromatisch IR - Infrarot PA - Photometrie rückwärts, panchromatisch. Gr - Grün Nd - Nadir, panchromatisch. Bl - Blau PF - Photometrie vorwärts, panchromatisch. Rd - Rot SF - Stereo vorwärts, panchromatisch.....	46
Abbildung 4-13	Gegenüberstellung von HRSC-A-Bild (links) und klassischer Luftbildfotografie (rechts) (Quelle: LEHMANN et al. 2000).	48
Abbildung 4-14	Ausschnitt der HRSC-A-Szene vom Tharandter Wald (unten links: Grillenburg).	49
Abbildung 5-1	kNN-Methode - Über bekannte Merkmale von Pixels (x_1 bis x_6) wird über einen Schätzer das unbekannte Pixel (?) klassifiziert.	50
Abbildung 5-2	Treffgenauigkeit (accuracy) und Wiederholungsgenauigkeit (precision) (Quelle: HÄUSSLER et al. 2000).....	58
Abbildung 5-3	Pixelüberdeckung der terrestrischen Probe ($r = 15$ m).....	62
Abbildung 5-4	Verwendung eines zentralen Pixels für die kNN-Methode.....	62
Abbildung 5-5	Mittelwertbildung für 9 Pixel zur Verwendung für die kNN-Methode.....	63
Abbildung 5-6	Mittelwertbildung für 21 Pixel zur Verwendung für die kNN-Methode.....	63
Abbildung 5-7	Struktogramm des Visual-Basic-Programms für die kNN-Methode (nominal)	66
Abbildung 5-8	Die Programmoberfläche des kNN-Programms, alle Einstellmöglichkeiten sind auf ihr integriert.	68
Abbildung 6-1	Vergleich von HRSC-A-Daten (links), HyMap TM -Daten (mitte) und kNN-Grundflächen-Karte (rechts).....	70
Abbildung 6-2	HyMap TM -Szene und kNN-Grundflächen-Karten der Landsat-7-Szene (September 2000) vom Testgebiet I. Gegenüberstellung der für die Berechnungen verwendeten Kanäle.....	72
Abbildung 6-3	HyMap TM -Szene und kNN-Grundflächen-Karten vom Testgebiet I. Gegenüberstellung der mono- und multitemporalen Landsat-Szenen.....	73
Abbildung 6-4	kNN-Karte für die Grundfläche vom Tharandter Wald (Ausgangsdaten Landsat-7-Szene von 1999/2000 alle Kanäle).....	74
Abbildung 6-5	kNN-Totholz-Karten für zwei Kanalauswahlvarianten der Landsat-Szenen von 1989, 1999, 2000 und 1999/2000 (Testgebiet I).....	76
Abbildung 6-6	kNN-Totholzkarte mit der Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 90 % und 100 %.	76
Abbildung 6-7	kNN-Totholzkarte für den Tharandter Wald (Ausgangsdaten Landsat-7-Szene von 1999/2000).....	77
Abbildung 6-8	Vergleich einer kNN-Grundflächen-Karte (HyMap TM , links) mit den HRSC-A-Daten.....	78
Abbildung 6-9	Vergleich der aus den Hyperspektralszenen mit 128(rechts) bzw. 20 MNF-Kanälen (links) berechneten kNN-Grundflächenkarten (Testgebiet I, Tharandter Wald, Zentralpixel).....	79
Abbildung 6-10	Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit von der Anwendung der MNF-Transformation: ohne (128 Kanäle, grün); mit (20 Kanäle, rot).	79

Abbildung 6-11	kNN-Karten basierend auf dem Zentralpixel (links) und dem Mittelwert der 9 Pixel (rechts) über der Stichprobenfläche für die Grundfläche (Testgebiet I, Tharandter Wald).....	80
Abbildung 6-12	Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit der über der Stichprobe verwendeten Pixel: Zentralpixel (rot); 9 Pixel (grün).....	81
Abbildung 6-13	kNN-Grundflächen-Karten (Zentralpixel); verwendete terrestrische Aufnahmen: ProSmart (links oben), MNTFR (rechts oben), kNN (links unten) und alle (rechts unten).....	83
Abbildung 6-14	Grundflächenverteilung der Pixel in Abhängigkeit der verwendeten Stichproben.	84
Abbildung 6-15	kNN-Grundflächen- und Totholz-Karte für den Teil des Tharandter Waldes, der von der Hyperspektralszene (20 MNF-Kanäle; Zentralpixel) abgedeckt wird.	85
Abbildung 6-16	kNN-Totholz-Karten (Zentralpixel) mit Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit des Totholzes. Die Ausgangsdaten für die linke Karte ist die transformierte HyMap TM -Szene mit 20 und für die rechte Karte die HyMap TM -Szene mit 128 Kanälen.	86
Abbildung 6-17	kNN-Totholz-Karten mit Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit von Totholz berechnet aus dem Zentralpixel (oben) und dem Mittelwert von 9 Pixel (unten). Die rechten Karten zeigen das Totholz welches mit mind. 90 % Wahrscheinlichkeit auftritt.....	87
Abbildung 6-18	%RMSE der Grundfläche von vier Landsat-Szenen und zwei Kanalkombinationen (links die vom Sensor bereitgestellten Kanäle und rechts alle Kanäle inkl. PCA und NDVI) für verschiedene k-Werte (alle Stichproben; r = 2, t = 2).	90
Abbildung 6-19	%RMSE der Grundfläche der transformierten Hyperspektralszene (20 MNF-Kanäle) für die Variante „Zentralpixel“ (vier Feldaufnahmevarianten) und „9 Pixel“.....	91
Abbildung 6-20	%RMSE der Grundfläche für die 1999/2000-Landsat-Szene (links) und der Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen (rechts) für den Parameter r (alle terrestrischen Proben).	93
Abbildung 6-21	%RMSE der Grundfläche für die 1999/2000-Landsat-Szene für den Parameter t geordnet nach den terrestrischen Aufnahmen: ProSmart –oben, MNTFR –Mitte oben, kNN – Mitte unten, alle Aufnahmen –unten.	95
Abbildung 6-22	%RMSE der Grundfläche für die transformierte Hyperspektralszene mit 20 MNF-Kanälen für den Parameter t.....	96
Abbildung 6-23	Links sind für jedes Pixel der Grundflächenminimalwert, -mittelwert (grüne Linie) und –maximalwert für die drei Bootstrap-Durchläufe der Szene vom August 2000 dargestellt. Rechts die dazugehörige Standardabweichung, indem die Pixel in Standardabweichungsklassen gruppiert wurden.	102
Abbildung 6-24	Links sind für jedes Pixel der Grundflächenminimalwert, -mittelwert (grüne Linie) und –maximalwert für die drei Bootstrap-Durchläufe der multitemporalen Szene von 1999/2000 dargestellt. Rechts die dazugehörige Standardabweichung, indem die Pixel in Standardabweichungsklassen gruppiert wurden.	104

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Übersicht über die operational verfügbaren Satelliten, die für die Erkundung der Erdoberfläche eingesetzt werden (Quelle: nach Enviromental Remote Sensing Center 2003)	10
Tabelle 2-2	Übersicht über geplante Satelliten für die Erderkundung (Quelle: nach Enviromental Remote Sensing Center 2003)	13
Tabelle 2-3	Übereinstimmung zwischen Forstlichen Merkmalen und der gemessenen spektralen Reflexion auf Pixelebene. Bestimmtheitsmaß der Regression in Gruppen eingeteilt: 0,00-0,05=[-]; 0,05-0,20=[0]; 0,20-1,00=[+].....	20
Tabelle 3-1	Gauß-Krüger-Koordinaten der Eckpunkte der Testgebiete I und II im Tharandter Wald	25
Tabelle 3-2	Angaben zu den verwendeten digitalen topographischen Karten des Landesvermessungsamts Sachsen.	26
Tabelle 3-3	Gegenüberstellung der aufgenommenen terrestrischen Probepunkte mit den verwendeten.....	28
Tabelle 3-4	Mittelwert, Minimum und Maximum für die Grundfläche	28
Tabelle 3-5	Anzahl der Proben mit oder ohne Totholz.....	29
Tabelle 3-6	Übersicht der erhobenen Cluster und Probepunkte.	30
Tabelle 4-1	Übersicht der Landsat-Satelliten (Quelle: nach EURIMAGE)	35
Tabelle 4-2	Die drei Generationen der Sensoren in den Landsat-Systemen mit den Frequenzbereichen der einzelnen Kanäle (Quelle: Eurimage).....	35
Tabelle 4-3	Übersicht über die verwendeten Landsat-Szenen.....	36
Tabelle 4-4	Technische Parameter des HRSC-A-Scanners (Quelle: LEHMANN et al. 2000).....	47
Tabelle 5-1	Parameter der sechs durchgeführten Bootstrap-Durchläufe.....	61
Tabelle 6-1	Kleinste beobachtete RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene Kanal- und k-nächste-Nachbarn- Auswahl für Landsat-Daten (alle Feldaufnahmepunkte; t = 2; r = 2; k-Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).	89
Tabelle 6-2	Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k-nächste-Nachbarn- und terrestrische Aufnahmen für HyMap TM -Daten (t = 2; r = 2; k-Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).	91
Tabelle 6-3	Kleinster beobachteter %RMSE der multitemporalen Landsat-Szene von 1999/2000 aufgelistet nach den verwendeten Proben der terrestrischen Aufnahmen (alle Kanäle; t = 2; r = 2; k-Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).....	92
Tabelle 6-4	Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k-, r- und t-Werte der Landsat-Szene 1999/2000 (alle terrestrischen Proben, alle Kanäle).....	96
Tabelle 6-5	Kleinste beobachtete %RMSE der Grundflächenschätzung für verschiedene k- und t-Werte der MNF-Transformierten Hyperspektralszene (alle terrestrischen Proben, alle Kanäle, r = 2, t-Auswahl entspricht kleinster %RMSE-Wert).....	97
Tabelle 6-6	Zusammenfassung der bei den Totholzberechnungen angegebenen Fehlerwerte.	98
Tabelle 6-7	Totholzfehlerwerte für verschiedene Landsat-Szenen unter Verwendung aller Probepunkte der Feldaufnahmen mit verschiedenen	

	Kanalkombinationen und Parametereinstellungen für k, r und t ($p^2 = 50\%$).	99
Tabelle 6-8	Totholzfehlerwerte für verschiedene Landsat-Szenen unter Verwendung aller Probepunkte und Kanäle (inkl. PCA und NDVI) mit verschiedenen Parametereinstellungen für k, r und t ($p^2 = 50\%$).	100
Tabelle 6-9	Totholzfehlerwerte für die MNF-Transformierte-Hyperspektralszene unter Verwendung aller Probepunkte der Feldaufnahmen und allen 20 Kanälen mit verschiedenen k-nächsten Nachbarn Einstellungen ($r=2$, $t=2$).	100
Tabelle 6-10	Parameter der sechs durchgeführten Bootstrap-Durchläufe.....	101
Tabelle 6-11	Statistische Kennwerte für die Bootstrap-Durchläufe.....	103
Tabelle 12-1	kNN-Ergebnisse für das Merkmal Grundfläche (Landsat-Daten)	125
Tabelle 12-2	kNN-Ergebnisse für das Merkmal Grundfläche (HyMap TM).....	143
Tabelle 12-3	kNN-Ergebnisse für das Merkmal Totholz (Landsat-Daten, Verwendung aller terrestrischen Aufnahmen)	148
Tabelle 12-4	kNN-Ergebnisse für das Merkmal Totholz (HyMap TM , Verwendung aller terrestrischen Aufnahmen)	152

12 Anhang

12.1 kNN-Ergebnisse des Merkmals Grundfläche

12.1.1 Landsat

Tabelle 12-1 kNN-Ergebnisse für das Merkmal Grundfläche (Landsat-Daten)

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
1989	1-5,7	alle	1	2	2	37,21	-5,14	22,42	529,23	23,00	61,82
1989	1-5,7	alle	3	2	2	39,21	-7,14	18,51	393,47	19,84	50,59
1989	1-5,7	alle	5	2	2	38,64	-6,57	17,33	343,46	18,53	47,96
1989	1-5,7	alle	7	2	2	38,35	-6,27	17,05	329,94	18,16	47,37
1989	1-5,7	alle	10	2	2	38,09	-6,02	16,64	313,15	17,70	46,46
1989	1-5,7	alle	15	2	2	37,74	-5,67	15,97	287,03	16,94	44,89
1989	1-5,7	alle	20	2	2	37,76	-5,69	15,39	269,38	16,41	43,46
1989	1-5,7	alle	25	2	2	37,68	-5,61	15,11	259,83	16,12	42,78
1989	1-5,7	alle	30	2	2	37,65	-5,57	14,96	254,86	15,96	42,41
1989	1-5,7	alle	35	2	2	37,69	-5,62	14,92	254,23	15,94	42,31
1989	1-5,7	alle	40	2	2	37,79	-5,72	14,97	257,00	16,03	42,42
1989	1-5,7	alle	45	2	2	37,88	-5,81	14,95	257,42	16,04	42,35
1989	1-5,7	alle	50	2	2	37,92	-5,85	14,90	256,19	16,01	42,21
1989	8-11	alle	1	2	2	39,46	-7,39	21,12	500,46	22,37	56,70
1989	8-11	alle	5	2	2	38,62	-6,55	14,48	252,67	15,90	41,16
1989	8-11	alle	10	2	2	38,58	-6,50	14,34	247,97	15,75	40,82
1989	8-11	alle	15	2	2	38,86	-6,78	14,20	247,53	15,73	40,49
1989	8-11	alle	20	2	2	38,92	-6,84	14,04	244,10	15,62	40,15
1989	8-11	alle	25	2	2	38,82	-6,75	13,98	240,96	15,52	39,99
1989	8-11	alle	30	2	2	38,73	-6,66	14,03	241,32	15,53	40,11
1989	8-11	alle	35	2	2	38,75	-6,68	14,01	240,78	15,52	40,04
1989	8-11	alle	40	2	2	38,75	-6,68	14,09	243,18	15,59	40,25
1989	8-11	alle	45	2	2	38,66	-6,59	14,05	240,76	15,52	40,14
1989	8-11	alle	50	2	2	38,67	-6,60	14,02	240,17	15,50	40,07
1989	alle	alle	1	2	2	37,41	-5,34	17,63	339,43	18,42	49,24
1989	alle	alle	3	2	2	36,30	-4,23	15,49	257,69	16,05	44,22
1989	alle	alle	5	2	2	37,19	-5,12	14,81	245,42	15,67	42,13
1989	alle	alle	7	2	2	36,97	-4,90	14,79	242,73	15,58	42,14
1989	alle	alle	10	2	2	37,30	-5,23	14,16	227,78	15,09	40,46
1989	alle	alle	15	2	2	37,47	-5,40	14,67	244,33	15,63	41,72
1989	alle	alle	20	2	2	37,75	-5,68	14,63	246,38	15,70	41,58
1989	alle	alle	25	2	2	37,86	-5,78	14,75	251,11	15,85	41,86
1989	alle	alle	30	2	2	38,07	-5,99	14,73	252,88	15,90	41,78
1989	alle	alle	35	2	2	38,06	-5,99	14,49	245,91	15,68	41,20
1989	alle	alle	40	2	2	38,17	-6,09	14,55	248,84	15,77	41,33
1989	alle	alle	45	2	2	38,26	-6,19	14,66	253,31	15,92	41,60
1989	alle	alle	50	2	2	38,18	-6,11	14,59	250,14	15,82	41,43

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
1989	alle	kNN	1	2	2	34,97	-2,90	18,23	340,69	18,46	52,78
1989	alle	kNN	5	2	2	33,90	-1,83	16,89	288,47	16,98	50,10
1989	alle	kNN	10	2	2	33,90	-1,83	15,96	258,18	16,07	47,39
1989	alle	kNN	15	2	2	33,89	-1,81	15,86	254,88	15,96	47,12
1989	alle	kNN	20	2	2	33,85	-1,78	15,52	244,09	15,62	46,15
1989	alle	kNN	25	2	2	34,07	-2,00	15,63	248,29	15,76	46,25
1989	alle	kNN	30	2	2	34,16	-2,09	15,64	248,83	15,77	46,18
1989	alle	kNN	35	2	2	34,32	-2,25	15,52	245,81	15,68	45,68
1989	alle	kNN	40	2	2	34,34	-2,27	15,41	242,69	15,58	45,36
1989	alle	kNN	45	2	2	34,38	-2,31	15,36	241,11	15,53	45,16
1989	alle	kNN	50	2	2	34,41	-2,34	15,35	240,99	15,52	45,11
1989	alle	MNTFR	1	2	2	43,52	-11,45	20,38	546,30	23,37	53,70
1989	alle	MNTFR	5	2	2	43,52	-11,44	17,80	447,91	21,16	48,64
1989	alle	MNTFR	10	2	2	42,57	-10,50	16,83	393,43	19,84	46,59
1989	alle	MNTFR	15	2	2	42,71	-10,63	17,08	404,72	20,12	47,11
1989	alle	MNTFR	20	2	2	42,82	-10,75	17,06	406,57	20,16	47,09
1989	alle	MNTFR	25	2	2	42,86	-10,78	16,85	400,21	20,01	46,68
1989	alle	MNTFR	30	2	2	42,87	-10,80	16,97	404,50	20,11	46,91
1989	alle	MNTFR	35	2	2	42,85	-10,77	17,09	408,04	20,20	47,14
1989	alle	MNTFR	40	2	2	42,97	-10,90	17,13	412,30	20,31	47,25
1989	alle	MNTFR	45	2	2	42,91	-10,84	17,04	408,04	20,20	47,07
1989	alle	MNTFR	50	2	2	42,94	-10,87	17,03	408,09	20,20	47,05
1989	alle	ProSmart	1	2	2	22,27	9,81	22,97	623,66	24,97	112,16
1989	alle	ProSmart	5	2	2	24,18	7,89	18,13	391,09	19,78	81,79
1989	alle	ProSmart	10	2	2	24,23	7,84	17,85	380,03	19,49	80,46
1989	alle	ProSmart	15	2	2	24,57	7,51	17,13	349,61	18,70	76,11
1989	alle	ProSmart	20	2	2	24,60	7,47	17,17	350,60	18,72	76,11
1989	alle	ProSmart	25	2	2	24,59	7,48	16,89	341,21	18,47	75,13
1989	alle	ProSmart	30	2	2	24,66	7,42	16,80	337,33	18,37	74,49
1989	alle	ProSmart	35	2	2	24,69	7,38	16,73	334,33	18,28	74,06
1989	alle	ProSmart	40	2	2	24,82	7,26	16,65	329,95	18,16	73,20
1989	alle	ProSmart	45	2	2	24,74	7,33	16,70	332,43	18,23	73,68
1989	alle	ProSmart	50	2	2	24,78	7,29	16,69	331,76	18,21	73,49
1999	1-5,7	alle	1	2	2	34,38	-2,31	17,67	317,42	17,82	51,82
1999	1-5,7	alle	3	2	2	37,42	-5,35	15,18	258,94	16,09	43,01
1999	1-5,7	alle	5	2	2	37,20	-5,13	14,03	223,11	14,94	40,15
1999	1-5,7	alle	7	2	2	38,26	-6,18	14,08	236,54	15,38	40,20
1999	1-5,7	alle	10	2	2	37,80	-5,72	13,73	221,28	14,88	39,36
1999	1-5,7	alle	15	2	2	38,03	-5,95	13,67	222,19	14,91	39,20
1999	1-5,7	alle	20	2	2	38,12	-6,05	13,66	223,23	14,94	39,20
1999	1-5,7	alle	25	2	2	38,03	-5,96	13,40	215,15	14,67	38,56
1999	1-5,7	alle	30	2	2	38,11	-6,04	13,45	217,42	14,75	38,69
1999	1-5,7	alle	35	2	2	38,11	-6,04	13,53	219,63	14,82	38,88
1999	1-5,7	alle	40	2	2	38,21	-6,13	13,59	222,22	14,91	39,02
1999	1-5,7	alle	45	2	2	38,28	-6,21	13,56	222,54	14,92	38,97
1999	1-5,7	alle	50	2	2	38,33	-6,26	13,58	223,63	14,95	39,01

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
1999	9-13	alle	10	2	2	39,25	-7,17	15,07	278,49	16,69	42,52
1999	9-12	alle	1	2	2	37,95	-5,88	19,99	434,20	20,84	54,91
1999	9-12	alle	5	2	2	37,88	-5,81	15,79	283,00	16,82	44,41
1999	9-12	alle	10	2	2	38,43	-6,35	14,71	256,79	16,02	41,70
1999	9-12	alle	15	2	2	38,73	-6,66	14,74	261,71	16,18	41,76
1999	9-12	alle	20	2	2	38,56	-6,49	14,60	255,23	15,98	41,43
1999	9-12	alle	25	2	2	38,60	-6,53	14,33	248,11	15,75	40,80
1999	9-12	alle	30	2	2	38,64	-6,57	14,32	248,13	15,75	40,77
1999	9-12	alle	35	2	2	38,67	-6,60	14,23	246,11	15,69	40,56
1999	9-12	alle	40	2	2	38,80	-6,73	14,24	248,21	15,75	40,60
1999	9-12	alle	45	2	2	38,79	-6,72	14,22	247,42	15,73	40,55
1999	9-12	alle	50	2	2	38,86	-6,79	14,21	247,98	15,75	40,53
1999	alle	alle	1	2	2	39,50	-7,43	19,67	441,97	21,02	53,23
1999	alle	alle	3	2	2	39,38	-7,31	16,75	333,82	18,27	46,40
1999	alle	alle	5	2	2	39,77	-7,70	15,71	306,16	17,50	44,00
1999	alle	alle	7	2	2	39,66	-7,59	15,26	290,42	17,04	42,97
1999	alle	alle	10	2	2	39,08	-7,00	14,32	253,97	15,94	40,78
1999	alle	alle	15	2	2	38,46	-6,38	13,69	228,11	15,10	39,27
1999	alle	alle	20	2	2	38,39	-6,32	13,60	224,95	15,00	39,06
1999	alle	alle	25	2	2	38,29	-6,22	13,56	222,59	14,92	38,97
1999	alle	alle	30	2	2	38,36	-6,29	13,45	220,33	14,84	38,70
1999	alle	alle	35	2	2	38,55	-6,47	13,51	224,39	14,98	38,86
1999	alle	alle	40	2	2	38,66	-6,59	13,69	230,84	15,19	39,30
1999	alle	alle	45	2	2	38,69	-6,62	13,65	230,03	15,17	39,20
1999	alle	alle	50	2	2	38,74	-6,67	13,74	233,19	15,27	39,41
1999	alle	kNN	1	2	2	31,11	0,97	15,61	244,65	15,64	50,29
1999	alle	kNN	5	2	2	31,52	0,55	13,91	193,81	13,92	44,17
1999	alle	kNN	10	2	2	31,90	0,17	13,46	181,33	13,47	42,21
1999	alle	kNN	15	2	2	31,77	0,30	13,83	191,46	13,84	43,55
1999	alle	kNN	20	2	2	31,77	0,30	13,77	189,68	13,77	43,35
1999	alle	kNN	25	2	2	32,12	-0,05	13,80	190,51	13,80	42,97
1999	alle	kNN	30	2	2	32,52	-0,45	13,81	190,84	13,81	42,48
1999	alle	kNN	35	2	2	32,73	-0,66	13,70	188,17	13,72	41,91
1999	alle	kNN	40	2	2	32,83	-0,75	13,62	186,00	13,64	41,55
1999	alle	kNN	45	2	2	32,96	-0,89	13,73	189,29	13,76	41,74
1999	alle	kNN	50	2	2	33,14	-1,07	13,80	191,65	13,84	41,77
1999	alle	MNTFR	1	2	2	41,95	-9,88	22,93	623,48	24,97	59,52
1999	alle	MNTFR	5	2	2	43,29	-11,21	17,64	436,99	20,90	48,29
1999	alle	MNTFR	10	2	2	42,58	-10,51	16,35	377,80	19,44	45,64
1999	alle	MNTFR	15	2	2	42,46	-10,38	16,30	373,38	19,32	45,51
1999	alle	MNTFR	20	2	2	42,29	-10,21	15,91	357,55	18,91	44,72
1999	alle	MNTFR	25	2	2	42,47	-10,40	16,11	367,64	19,17	45,15
1999	alle	MNTFR	30	2	2	42,76	-10,68	16,30	379,70	19,49	45,58
1999	alle	MNTFR	35	2	2	42,92	-10,84	16,56	391,75	19,79	46,12
1999	alle	MNTFR	40	2	2	42,99	-10,92	16,67	397,28	19,93	46,36
1999	alle	MNTFR	45	2	2	43,03	-10,95	16,76	400,94	20,02	46,54

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
1999	alle	MNTFR	50	2	2	43,06	-10,99	16,77	401,99	20,05	46,57
1999	alle	ProSmart	1	2	2	26,77	5,31	15,31	262,50	16,20	60,53
1999	alle	ProSmart	5	2	2	25,96	6,11	15,06	264,22	16,25	62,62
1999	alle	ProSmart	10	2	2	25,14	6,93	15,33	283,08	16,82	66,92
1999	alle	ProSmart	15	2	2	25,15	6,92	15,41	285,26	16,89	67,15
1999	alle	ProSmart	20	2	2	25,26	6,81	15,26	279,34	16,71	66,17
1999	alle	ProSmart	25	2	2	25,32	6,76	15,15	275,27	16,59	65,54
1999	alle	ProSmart	30	2	2	25,34	6,73	15,21	276,74	16,64	65,64
1999	alle	ProSmart	35	2	2	25,49	6,58	15,17	273,43	16,54	64,86
1999	alle	ProSmart	40	2	2	25,46	6,61	15,21	275,10	16,59	65,13
1999	alle	ProSmart	45	2	2	25,41	6,67	15,28	277,83	16,67	65,61
1999	alle	ProSmart	50	2	2	25,38	6,69	15,32	279,58	16,72	65,87
2000	1-5,7	alle	1	2	2	37,31	-5,24	19,49	407,50	20,19	54,10
2000	1-5,7	alle	3	2	2	38,49	-6,42	16,84	324,71	18,02	46,81
2000	1-5,7	alle	5	2	2	38,79	-6,72	16,85	329,02	18,14	46,76
2000	1-5,7	alle	7	2	2	38,51	-6,44	16,51	314,12	17,72	46,02
2000	1-5,7	alle	10	2	2	38,03	-5,95	15,65	280,30	16,74	44,03
2000	1-5,7	alle	15	2	2	38,02	-5,95	15,36	271,43	16,48	43,33
2000	1-5,7	alle	20	2	2	38,42	-6,35	15,44	278,81	16,70	43,46
2000	1-5,7	alle	25	2	2	38,40	-6,33	15,41	277,56	16,66	43,39
2000	1-5,7	alle	30	2	2	38,34	-6,27	15,34	274,57	16,57	43,22
2000	1-5,7	alle	35	2	2	38,51	-6,44	15,29	275,41	16,60	43,09
2000	1-5,7	alle	40	2	2	38,54	-6,47	15,18	272,37	16,50	42,82
2000	1-5,7	alle	45	2	2	38,73	-6,66	15,28	277,71	16,66	43,03
2000	1-5,7	alle	50	2	2	38,79	-6,71	15,25	277,72	16,66	42,97
2000	9-12	alle	1	2	2	31,42	0,66	22,96	527,63	22,97	73,12
2000	9-12	alle	5	2	2	34,89	-2,81	17,55	315,76	17,77	50,94
2000	9-12	alle	10	2	2	36,61	-4,54	16,46	291,52	17,07	46,64
2000	9-12	alle	15	2	2	36,99	-4,92	15,55	266,11	16,31	44,10
2000	9-12	alle	20	2	2	37,07	-5,00	15,22	256,58	16,02	43,21
2000	9-12	alle	25	2	2	37,32	-5,25	15,07	254,67	15,96	42,76
2000	9-12	alle	30	2	2	37,42	-5,35	14,95	252,10	15,88	42,43
2000	9-12	alle	35	2	2	37,48	-5,41	14,84	249,47	15,79	42,14
2000	9-12	alle	40	2	2	37,52	-5,45	14,71	246,03	15,69	41,81
2000	9-12	alle	45	2	2	37,62	-5,55	14,73	247,77	15,74	41,84
2000	9-12	alle	50	2	2	37,66	-5,58	14,72	247,79	15,74	41,80
2000	alle	alle	1	2	2	37,02	-4,94	19,80	416,68	20,41	55,15
2000	alle	alle	3	2	2	36,84	-4,77	17,40	325,65	18,05	48,98
2000	alle	alle	5	2	2	37,85	-5,78	16,87	317,91	17,83	47,10
2000	alle	alle	7	2	2	38,03	-5,96	15,90	288,46	16,98	44,66
2000	alle	alle	10	2	2	38,49	-6,41	15,12	269,71	16,42	42,67
2000	alle	alle	15	2	2	38,57	-6,50	14,90	264,39	16,26	42,15
2000	alle	alle	20	2	2	38,87	-6,79	14,73	263,05	16,22	41,73
2000	alle	alle	25	2	2	38,85	-6,78	14,43	254,28	15,95	41,04
2000	alle	alle	30	2	2	38,91	-6,84	14,52	257,63	16,05	41,25
2000	alle	alle	35	2	2	38,99	-6,92	14,48	257,47	16,05	41,15

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
2000	alle	alle	40	2	2	39,05	-6,97	14,53	259,64	16,11	41,27
2000	alle	alle	45	2	2	39,03	-6,96	14,57	260,60	16,14	41,36
2000	alle	alle	50	2	2	39,14	-7,06	14,59	262,73	16,21	41,42
2000	alle	kNN	1	2	2	31,33	0,74	15,99	256,17	16,01	51,08
2000	alle	kNN	5	2	2	33,28	-1,21	13,87	193,83	13,92	41,83
2000	alle	kNN	10	2	2	32,97	-0,90	13,78	190,77	13,81	41,89
2000	alle	kNN	15	2	2	33,36	-1,29	13,88	194,35	13,94	41,79
2000	alle	kNN	20	2	2	33,38	-1,31	13,69	189,03	13,75	41,18
2000	alle	kNN	25	2	2	33,38	-1,31	13,71	189,56	13,77	41,24
2000	alle	kNN	30	2	2	33,60	-1,53	13,68	189,37	13,76	40,95
2000	alle	kNN	35	2	2	33,76	-1,68	13,73	191,25	13,83	40,97
2000	alle	kNN	40	2	2	33,83	-1,76	13,67	189,98	13,78	40,74
2000	alle	kNN	45	2	2	33,87	-1,80	13,73	191,76	13,85	40,88
2000	alle	kNN	50	2	2	33,97	-1,90	13,82	194,74	13,95	41,08
2000	alle	MNTFR	1	2	2	39,58	-7,50	19,34	430,37	20,75	52,42
2000	alle	MNTFR	5	2	2	42,51	-10,44	18,68	457,95	21,40	50,34
2000	alle	MNTFR	10	2	2	43,34	-11,27	18,15	456,36	21,36	49,29
2000	alle	MNTFR	15	2	2	43,53	-11,46	17,76	446,82	21,14	48,56
2000	alle	MNTFR	20	2	2	43,74	-11,67	17,66	448,23	21,17	48,40
2000	alle	MNTFR	25	2	2	43,67	-11,60	17,53	441,89	21,02	48,13
2000	alle	MNTFR	30	2	2	43,68	-11,61	17,61	444,92	21,09	48,29
2000	alle	MNTFR	35	2	2	43,83	-11,75	17,76	453,54	21,30	48,59
2000	alle	MNTFR	40	2	2	43,78	-11,71	17,63	447,88	21,16	48,34
2000	alle	MNTFR	45	2	2	43,87	-11,80	17,68	451,79	21,26	48,45
2000	alle	MNTFR	50	2	2	43,92	-11,85	17,58	449,26	21,20	48,26
2000	alle	ProSmart	1	2	2	24,50	7,57	18,92	415,29	20,38	83,18
2000	alle	ProSmart	5	2	2	24,25	7,83	16,18	323,08	17,97	74,13
2000	alle	ProSmart	10	2	2	24,67	7,40	15,81	304,74	17,46	70,75
2000	alle	ProSmart	15	2	2	24,61	7,46	15,68	301,65	17,37	70,58
2000	alle	ProSmart	20	2	2	24,53	7,54	15,67	302,30	17,39	70,89
2000	alle	ProSmart	25	2	2	24,62	7,45	15,53	296,80	17,23	69,97
2000	alle	ProSmart	30	2	2	24,61	7,47	15,51	296,29	17,21	69,96
2000	alle	ProSmart	35	2	2	24,64	7,43	15,50	295,36	17,19	69,75
2000	alle	ProSmart	40	2	2	24,76	7,32	15,44	291,91	17,09	69,02
2000	alle	ProSmart	45	2	2	24,81	7,26	15,48	292,25	17,10	68,91
2000	alle	ProSmart	50	2	2	24,77	7,30	15,56	295,27	17,18	69,37
89/99	alle	alle	5	2	2	38,62	-6,55	16,36	310,69	17,63	45,64
89/99	alle	alle	15	2	2	36,83	-4,76	14,58	235,33	15,34	41,65
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	1	2	2	32,53	-0,46	16,93	286,99	16,94	52,08
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	3	2	2	33,52	-1,45	16,32	268,32	16,38	48,87
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	5	2	2	35,06	-2,99	14,70	225,10	15,00	42,79
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	7	2	2	35,36	-3,29	14,85	231,35	15,21	43,01
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	10	2	2	36,17	-4,10	14,17	217,69	14,75	40,79
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	15	2	2	36,47	-4,40	13,67	206,23	14,36	39,38
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	20	2	2	36,70	-4,63	13,46	202,58	14,23	38,78

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	25	2	2	37,07	-5,00	13,53	208,10	14,43	38,91
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	30	2	2	37,10	-5,03	13,50	207,56	14,41	38,83
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	35	2	2	37,23	-5,16	13,60	211,49	14,54	39,06
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	40	2	2	37,62	-5,55	13,56	214,58	14,65	38,94
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	45	2	2	37,83	-5,76	13,58	217,51	14,75	38,99
99/00	1-5,7,14-18,20	alle	50	2	2	37,85	-5,78	13,60	218,34	14,78	39,04
99/00	9-12,22-25	alle	1	2	2	37,01	-4,94	16,89	309,78	17,60	47,56
99/00	9-12,22-25	alle	5	2	2	38,70	-6,63	15,70	290,51	17,04	44,04
99/00	9-12,22-25	alle	10	2	2	38,89	-6,82	14,52	257,35	16,04	41,25
99/00	9-12,22-25	alle	15	2	2	39,17	-7,10	14,64	264,77	16,27	41,54
99/00	9-12,22-25	alle	20	2	2	39,43	-7,36	14,55	266,03	16,31	41,36
99/00	9-12,22-25	alle	25	2	2	39,57	-7,49	14,47	265,63	16,30	41,19
99/00	9-12,22-25	alle	30	2	2	39,40	-7,33	14,31	258,48	16,08	40,81
99/00	9-12,22-25	alle	35	2	2	39,30	-7,23	14,19	253,50	15,92	40,51
99/00	9-12,22-25	alle	40	2	2	39,35	-7,28	14,21	254,95	15,97	40,58
99/00	9-12,22-25	alle	45	2	2	39,29	-7,22	14,22	254,24	15,94	40,58
99/00	9-12,22-25	alle	50	2	2	39,39	-7,32	14,30	258,08	16,06	40,78
99/00	alle	alle	1	2	2	31,42	0,65	16,04	257,61	16,05	51,08
99/00	alle	alle	3	2	2	33,87	-1,79	14,08	201,48	14,19	41,91
99/00	alle	alle	5	2	2	34,33	-2,25	13,49	187,03	13,68	39,84
99/00	alle	alle	7	2	2	35,21	-3,14	13,78	199,81	14,14	40,14
99/00	alle	alle	10	2	2	35,86	-3,78	13,17	187,84	13,71	38,22
99/00	alle	alle	14	2	2	36,66	-4,59	12,90	187,38	13,69	37,34
99/00	alle	alle	15	2	2	36,58	-4,51	12,79	183,95	13,56	37,07
99/00	alle	alle	16	2	2	36,76	-4,69	12,88	187,82	13,70	37,28
99/00	alle	alle	17	2	2	36,82	-4,75	13,11	194,50	13,95	37,88
99/00	alle	alle	20	2	2	37,09	-5,01	13,20	199,50	14,12	38,09
99/00	alle	alle	25	2	2	37,50	-5,43	13,16	202,54	14,23	37,95
99/00	alle	alle	30	2	2	37,61	-5,54	13,17	204,05	14,28	37,98
99/00	alle	alle	35	2	2	37,73	-5,66	13,31	209,27	14,47	38,34
99/00	alle	alle	40	2	2	38,06	-5,99	13,32	213,40	14,61	38,38
99/00	alle	alle	45	2	2	38,06	-5,98	13,44	216,43	14,71	38,66
99/00	alle	alle	50	2	2	38,14	-6,07	13,36	215,35	14,67	38,47
99/00	alle	kNN	1	2	2	32,55	-0,48	14,98	224,56	14,99	46,03
99/00	alle	kNN	5	2	2	31,75	0,32	14,23	202,51	14,23	44,82
99/00	alle	kNN	10	2	2	32,13	-0,06	13,62	185,48	13,62	42,38
99/00	alle	kNN	15	2	2	32,26	-0,18	13,43	180,39	13,43	41,64
99/00	alle	kNN	20	2	2	32,57	-0,50	13,52	182,94	13,53	41,52
99/00	alle	kNN	25	2	2	32,98	-0,91	13,59	185,59	13,62	41,31
99/00	alle	kNN	30	2	2	33,19	-1,12	13,73	189,69	13,77	41,50
99/00	alle	kNN	35	2	2	33,31	-1,24	13,78	191,29	13,83	41,52
99/00	alle	kNN	40	2	2	33,31	-1,23	13,80	191,96	13,85	41,60
99/00	alle	kNN	45	2	2	33,45	-1,38	13,85	193,82	13,92	41,62
99/00	alle	kNN	50	2	2	33,54	-1,46	13,89	195,18	13,97	41,66
99/00	alle	MNTFR	1	2	2	33,06	-0,98	16,77	282,10	16,80	50,81
99/00	alle	MNTFR	5	2	2	39,40	-7,33	14,75	271,18	16,47	41,80

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	MNTFR	10	2	2	40,57	-8,50	14,87	293,32	17,13	42,21
99/00	alle	MNTFR	15	2	2	41,27	-9,19	15,36	320,59	17,90	43,39
99/00	alle	MNTFR	20	2	2	41,86	-9,79	15,62	339,88	18,44	44,04
99/00	alle	MNTFR	25	2	2	42,04	-9,96	15,67	344,81	18,57	44,17
99/00	alle	MNTFR	30	2	2	42,02	-9,95	15,79	348,38	18,67	44,41
99/00	alle	MNTFR	35	2	2	42,31	-10,24	16,10	363,86	19,08	45,09
99/00	alle	MNTFR	40	2	2	42,45	-10,38	16,33	374,50	19,35	45,58
99/00	alle	MNTFR	45	2	2	42,57	-10,49	16,34	377,07	19,42	45,62
99/00	alle	MNTFR	50	2	2	42,71	-10,64	16,42	382,62	19,56	45,80
99/00	alle	ProSmart	1	2	2	23,60	8,47	17,81	389,10	19,73	83,58
99/00	alle	ProSmart	5	2	2	25,02	7,05	15,15	279,29	16,71	66,80
99/00	alle	ProSmart	10	2	2	25,06	7,01	15,04	275,26	16,59	66,20
99/00	alle	ProSmart	15	2	2	25,03	7,04	15,26	282,42	16,81	67,13
99/00	alle	ProSmart	20	2	2	25,19	6,89	15,09	275,09	16,59	65,86
99/00	alle	ProSmart	25	2	2	25,22	6,85	15,04	273,06	16,52	65,51
99/00	alle	ProSmart	30	2	2	25,19	6,88	14,94	270,63	16,45	65,31
99/00	alle	ProSmart	35	2	2	25,18	6,89	14,97	271,61	16,48	65,44
99/00	alle	ProSmart	40	2	2	25,28	6,88	14,94	270,63	16,45	65,31
99/00	alle	ProSmart	45	2	2	25,11	6,96	15,27	281,52	16,78	66,82
99/00	alle	ProSmart	50	2	2	25,11	6,96	15,27	281,52	16,78	66,82
89/99/00	alle	alle	1	2	2	37,79	-5,72	22,61	543,86	23,32	61,71
89/99/00	alle	alle	5	2	2	37,76	-5,69	15,46	271,24	16,47	43,62
89/99/00	alle	alle	10	2	2	37,09	-5,02	13,80	215,59	14,68	39,59
89/99/00	alle	alle	15	2	2	36,91	-4,84	13,43	203,72	14,27	38,67
89/99/00	alle	alle	20	2	2	37,19	-5,11	13,62	211,77	14,55	39,13
89/99/00	alle	alle	25	2	2	37,25	-5,18	13,75	215,81	14,69	39,43
89/99/00	alle	alle	30	2	2	37,19	-5,12	13,74	214,98	14,66	39,42
89/99/00	alle	alle	35	2	2	37,14	-5,07	13,91	219,23	14,81	39,87
89/99/00	alle	alle	40	2	2	37,19	-5,12	14,26	229,60	15,15	40,74
89/99/00	alle	alle	45	2	2	37,21	-5,14	14,30	230,81	15,19	40,83
89/99/00	alle	alle	50	2	2	37,42	-5,35	14,25	231,73	15,22	40,68
99/00	alle	alle	5	1	2	34,81	-2,74	13,07	178,34	13,35	38,36
99/00	alle	alle	5	2	2	34,33	-2,25	13,49	187,03	13,68	39,84
99/00	alle	alle	5	3	2	34,72	-2,65	14,35	212,84	14,59	42,02
99/00	alle	alle	5	4	2	34,48	-2,40	14,23	208,36	14,43	41,87
99/00	alle	alle	5	5	2	34,93	-2,86	14,11	207,21	14,39	41,21
99/00	alle	alle	5	6	2	34,65	-2,57	13,67	193,54	13,91	40,15
99/00	alle	alle	5	7	2	35,03	-2,96	13,74	197,41	14,05	40,11
99/00	alle	alle	5	8	2	35,03	-2,96	13,64	194,89	13,96	39,85
99/00	alle	alle	5	9	2	35,11	-3,04	13,59	194,04	13,93	39,67
99/00	alle	alle	5	10	2	35,09	-3,02	13,60	194,14	13,93	39,71
99/00	alle	alle	5	10	1	35,21	-3,13	13,24	185,24	13,61	38,66
99/00	alle	alle	8	10	1	35,82	-3,75	12,18	162,33	12,74	35,57
99/00	alle	alle	9	10	1	35,93	-3,86	11,94	157,51	12,55	34,93
99/00	alle	alle	10	10	1	36,22	-4,15	12,11	163,75	12,80	35,33
99/00	alle	alle	11	10	1	36,72	-4,65	12,29	172,68	13,14	35,79

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	alle	15	10	1	37,53	-5,46	13,26	205,63	14,34	38,21
99/00	alle	alle	8	10	0,6	35,62	-3,54	11,72	149,82	12,24	34,37
99/00	alle	alle	9	9	0,6	35,72	-3,65	11,58	147,43	12,14	33,99
99/00	alle	alle	9	10	0,6	35,71	-3,63	11,49	145,33	12,06	33,76
99/00	alle	alle	9	11	0,6	35,96	-3,89	11,80	154,33	12,42	34,55
99/00	alle	alle	10	10	0,6	36,02	-3,95	11,71	152,83	12,36	34,32
99/00	alle	alle	10	1	2	35,92	-3,84	13,04	184,76	13,59	37,85
99/00	alle	alle	10	2	2	35,86	-3,78	13,17	187,84	13,71	38,22
99/00	alle	alle	10	3	2	35,82	-3,75	13,10	185,71	13,63	38,04
99/00	alle	alle	10	4	2	35,77	-3,69	13,22	188,35	13,72	38,37
99/00	alle	alle	10	5	2	35,94	-3,86	13,38	193,88	13,92	38,75
99/00	alle	alle	10	6	2	36,30	-4,23	13,04	187,80	13,70	37,75
99/00	alle	alle	10	7	2	36,10	-4,03	12,96	184,17	13,57	37,59
99/00	alle	alle	10	8	2	35,92	-3,85	12,81	179,03	13,38	37,25
99/00	alle	alle	10	9	2	36,03	-3,95	12,71	177,15	13,31	36,95
99/00	alle	alle	10	10	2	36,09	-4,01	12,60	174,76	13,22	36,63
99/00	alle	alle	10	11	2	36,27	-4,20	12,76	180,32	13,43	37,02
99/00	alle	alle	10	12	2	36,51	-4,44	12,96	187,63	13,70	37,52
99/00	alle	alle	10	13	2	36,54	-4,47	12,96	188,07	13,71	37,53
99/00	alle	alle	10	14	2	36,52	-4,44	12,96	187,80	13,70	37,53
99/00	alle	alle	10	15	2	36,39	-4,32	13,07	189,58	13,77	37,84
99/00	alle	alle	10	1	6	35,05	-2,98	13,11	180,84	13,45	38,37
99/00	alle	alle	10	2	6	34,80	-2,73	13,12	179,50	13,40	38,50
99/00	alle	alle	10	3	6	34,88	-2,81	13,42	187,90	13,71	39,30
99/00	alle	alle	10	4	6	34,90	-2,82	13,70	195,69	13,99	40,09
99/00	alle	alle	10	5	6	35,00	-2,93	13,88	201,35	14,19	40,54
99/00	alle	alle	10	6	6	35,23	-3,16	13,79	200,06	14,14	40,14
99/00	alle	alle	10	7	6	35,14	-3,06	13,81	199,99	14,14	40,25
99/00	alle	alle	10	8	6	35,00	-2,93	13,71	196,58	14,02	40,06
99/00	alle	alle	10	9	6	35,08	-3,01	13,66	195,60	13,99	39,87
99/00	alle	alle	10	10	6	35,11	-3,04	13,61	194,53	13,95	39,72
99/00	alle	alle	15	1	2	36,62	-4,55	12,83	185,23	13,61	37,16
99/00	alle	alle	15	2	2	36,58	-4,51	12,79	183,95	13,56	37,07
99/00	alle	alle	15	3	2	36,74	-4,66	12,99	190,60	13,81	37,58
99/00	alle	alle	15	4	2	36,61	-4,54	12,75	183,27	13,54	36,98
99/00	alle	alle	15	5	2	36,73	-4,65	13,09	193,02	13,89	37,83
99/00	alle	alle	15	6	2	36,77	-4,69	13,04	191,96	13,85	37,68
99/00	alle	alle	15	7	2	36,95	-4,88	13,13	196,11	14,00	37,90
99/00	alle	alle	15	8	2	37,28	-5,21	13,32	204,62	14,30	38,37
99/00	alle	alle	15	9	2	37,35	-5,28	13,52	210,53	14,51	38,85
99/00	alle	alle	15	10	2	37,31	-5,23	13,57	211,67	14,55	39,00
99/00	alle	alle	15	1	6	35,54	-3,46	12,88	177,92	13,34	37,54
99/00	alle	alle	15	2	6	35,34	-3,27	12,86	176,06	13,27	37,54
99/00	alle	alle	15	3	6	35,48	-3,41	13,24	186,87	13,67	38,53
99/00	alle	alle	15	4	6	35,42	-3,34	13,29	187,93	13,71	38,71

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	alle	15	5	6	35,48	-3,40	13,51	194,19	13,94	39,28
99/00	alle	alle	15	6	6	35,52	-3,45	13,54	195,34	13,98	39,35
99/00	alle	alle	15	7	6	35,64	-3,56	13,62	198,27	14,08	39,51
99/00	alle	alle	15	8	6	35,82	-3,75	13,75	203,02	14,25	39,77
99/00	alle	alle	15	9	6	35,86	-3,79	13,87	206,78	14,38	40,10
99/00	alle	alle	15	10	6	35,83	-3,76	13,90	207,20	14,39	40,18
99/00	alle	kNN	15	1	2	31,88	0,19	13,64	186,17	13,64	42,80
99/00	alle	kNN	15	2	2	32,26	-0,18	13,43	180,39	13,43	41,64
99/00	alle	kNN	15	3	2	32,72	-0,65	13,63	186,12	13,64	41,69
99/00	alle	kNN	15	4	2	32,98	-0,91	13,70	188,61	13,73	41,64
99/00	alle	kNN	15	5	2	33,28	-1,21	13,70	189,20	13,76	41,33
99/00	alle	kNN	15	6	2	33,36	-1,29	13,60	186,75	13,67	40,96
99/00	alle	kNN	15	7	2	33,49	-1,42	13,68	189,26	13,76	41,08
99/00	alle	kNN	15	8	2	33,62	-1,55	13,82	193,37	13,91	41,36
99/00	alle	kNN	15	9	2	33,57	-1,49	13,86	194,44	13,94	41,54
99/00	alle	kNN	15	10	2	33,71	-1,64	14,07	200,68	14,17	42,02
99/00	alle	kNN	15	1	1	32,01	0,06	13,57	184,03	13,57	42,38
99/00	alle	kNN	15	2	1	32,38	-0,30	13,36	178,50	13,36	41,27
99/00	alle	kNN	15	3	1	32,85	-0,78	13,60	185,66	13,63	41,48
99/00	alle	kNN	15	4	1	33,11	-1,03	13,68	188,27	13,72	41,45
99/00	alle	kNN	15	5	1	33,40	-1,33	13,66	188,39	13,73	41,09
99/00	alle	kNN	15	6	1	33,47	-1,40	13,54	185,18	13,61	40,66
99/00	alle	kNN	15	7	1	33,59	-1,52	13,61	187,55	13,69	40,77
99/00	alle	kNN	15	8	1	33,72	-1,65	13,75	191,66	13,84	41,05
99/00	alle	kNN	15	9	1	33,64	-1,57	13,80	192,81	13,89	41,28
99/00	alle	kNN	15	10	1	33,80	-1,73	14,03	199,97	14,14	41,84
99/00	alle	alle	5	2	0,1	33,50	-1,43	13,28	178,27	13,35	39,86
99/00	alle	alle	5	2	0,2	33,67	-1,59	13,06	173,05	13,15	39,07
99/00	alle	alle	5	2	0,3	33,84	-1,77	12,93	170,35	13,05	38,57
99/00	alle	alle	5	2	0,4	34,01	-1,93	12,92	170,73	13,07	38,42
99/00	alle	alle	5	2	0,5	34,14	-2,07	13,01	173,47	13,17	38,57
99/00	alle	alle	5	2	0,6	34,25	-2,17	13,13	177,20	13,31	38,87
99/00	alle	alle	5	2	0,7	34,32	-2,24	13,26	180,76	13,44	39,18
99/00	alle	alle	5	2	0,8	34,36	-2,29	13,36	183,59	13,55	39,43
99/00	alle	alle	5	2	0,9	34,38	-2,31	13,43	185,58	13,62	39,62
99/00	alle	alle	5	2	1	34,40	-2,32	13,47	186,85	13,67	39,74
99/00	alle	alle	5	2	1,5	34,38	-2,30	13,52	188,02	13,71	39,89
99/00	alle	alle	5	2	2	34,33	-2,25	13,49	187,03	13,68	39,84
99/00	alle	alle	5	2	2,5	34,27	-2,20	13,46	185,99	13,64	39,79
99/00	alle	alle	5	2	3	34,22	-2,15	13,44	185,13	13,61	39,76
99/00	alle	alle	5	2	3,5	34,16	-2,09	13,42	184,48	13,58	39,76
99/00	alle	alle	5	2	4	34,11	-2,04	13,41	184,06	13,57	39,77
99/00	alle	alle	5	2	4,5	34,05	-1,98	13,42	183,89	13,56	39,82
99/00	alle	alle	5	2	5	33,99	-1,92	13,43	183,96	13,56	39,90
99/00	alle	alle	5	2	5,5	33,94	-1,86	13,45	184,25	13,57	40,00
99/00	alle	alle	5	2	6	33,87	-1,80	13,47	184,75	13,59	40,13
99/00	alle	alle	5	2	6,5	33,81	-1,74	13,51	185,44	13,62	40,28

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	alle	5	2	7	33,75	-1,67	13,55	186,27	13,65	40,44
99/00	alle	alle	5	2	7,5	33,68	-1,61	13,59	187,23	13,68	40,63
99/00	alle	alle	5	2	8	33,61	-1,54	13,64	188,29	13,72	40,82
99/00	alle	alle	5	2	8,5	33,54	-1,47	13,68	189,41	13,76	41,03
99/00	alle	alle	5	2	9	33,48	-1,40	13,73	190,58	13,80	41,24
99/00	alle	alle	5	2	9,5	33,41	-1,33	13,78	191,77	13,85	41,45
99/00	alle	alle	5	2	10	33,34	-1,27	13,83	192,97	13,89	41,67
99/00	alle	alle	10	2	0,1	35,16	-3,09	12,95	177,14	13,31	37,85
99/00	alle	alle	10	2	0,2	35,27	-3,19	12,77	173,23	13,16	37,32
99/00	alle	alle	10	2	0,3	35,40	-3,33	12,60	169,86	13,03	36,81
99/00	alle	alle	10	2	0,4	35,56	-3,49	12,49	168,23	12,97	36,47
99/00	alle	alle	10	2	0,5	35,72	-3,65	12,48	169,12	13,00	36,41
99/00	alle	alle	10	2	0,6	35,86	-3,79	12,57	172,29	13,13	36,61
99/00	alle	alle	10	2	0,7	35,96	-3,89	12,71	176,61	13,29	36,95
99/00	alle	alle	10	2	0,8	36,03	-3,96	12,85	180,85	13,45	37,32
99/00	alle	alle	10	2	0,9	36,07	-4,00	12,97	184,29	13,58	37,64
99/00	alle	alle	10	2	1	36,08	-4,01	13,06	186,73	13,66	37,87
99/00	alle	alle	10	2	1,5	36,00	-3,93	13,19	189,51	13,77	38,24
99/00	alle	alle	10	2	2	35,86	-3,78	13,17	187,84	13,71	38,22
99/00	alle	alle	10	2	2,5	35,71	-3,64	13,14	185,91	13,63	38,18
99/00	alle	alle	10	2	3	35,56	-3,49	13,11	184,16	13,57	38,16
99/00	alle	alle	10	2	3,5	35,42	-3,35	13,09	182,67	13,52	38,16
99/00	alle	alle	10	2	4	35,29	-3,22	13,08	181,44	13,47	38,17
99/00	alle	alle	10	2	4,5	35,16	-3,09	13,08	180,50	13,43	38,21
99/00	alle	alle	10	2	5	35,03	-2,96	13,08	179,85	13,41	38,28
99/00	alle	alle	10	2	5,5	34,91	-2,84	13,09	179,52	13,40	38,38
99/00	alle	alle	10	2	6	34,80	-2,73	13,12	179,50	13,40	38,50
99/00	alle	alle	10	2	6,5	34,68	-2,61	13,15	179,76	13,41	38,66
99/00	alle	alle	10	2	7	34,57	-2,50	13,19	180,30	13,43	38,84
99/00	alle	alle	10	2	7,5	34,46	-2,39	13,24	181,08	13,46	39,05
99/00	alle	alle	10	2	8	34,35	-2,28	13,30	182,07	13,49	39,28
99/00	alle	alle	10	2	8,5	34,24	-2,17	13,36	183,22	13,54	39,53
99/00	alle	alle	10	2	9	34,14	-2,07	13,43	184,51	13,58	39,79
99/00	alle	alle	10	2	9,5	34,03	-1,96	13,49	185,89	13,63	40,06
99/00	alle	alle	10	2	10	33,93	-1,86	13,56	187,34	13,69	40,34
99/00	alle	alle	15	2	0,1	35,87	-3,80	12,88	180,34	13,43	37,44
99/00	alle	alle	15	2	0,2	35,94	-3,87	12,68	175,83	13,26	36,89
99/00	alle	alle	15	2	0,3	36,04	-3,97	12,45	170,84	13,07	36,26
99/00	alle	alle	15	2	0,4	36,18	-4,10	12,23	166,47	12,90	35,67
99/00	alle	alle	15	2	0,5	36,33	-4,26	12,08	164,15	12,81	35,27
99/00	alle	alle	15	2	0,6	36,48	-4,41	12,06	164,75	12,84	35,19
99/00	alle	alle	15	2	0,7	36,61	-4,53	12,14	167,90	12,96	35,40
99/00	alle	alle	15	2	0,8	36,70	-4,63	12,28	172,27	13,13	35,76
99/00	alle	alle	15	2	0,9	36,76	-4,69	12,43	176,54	13,29	36,15
99/00	alle	alle	15	2	1	36,79	-4,72	12,56	179,97	13,42	36,47
99/00	alle	alle	15	2	1,5	36,73	-4,66	12,79	185,25	13,61	37,05
99/00	alle	alle	15	2	2	36,58	-4,51	12,79	183,95	13,56	37,07
99/00	alle	alle	15	2	2,5	36,42	-4,35	12,77	182,12	13,50	37,05

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	alle	15	2	3	36,26	-4,19	12,76	180,44	13,43	37,04
99/00	alle	alle	15	2	3,5	36,10	-4,03	12,76	179,01	13,38	37,06
99/00	alle	alle	15	2	4	35,94	-3,87	12,76	177,85	13,34	37,11
99/00	alle	alle	15	2	4,5	35,79	-3,71	12,77	176,98	13,30	37,18
99/00	alle	alle	15	2	5	35,63	-3,56	12,79	176,39	13,28	37,27
99/00	alle	alle	15	2	5,5	35,49	-3,42	12,82	176,09	13,27	37,39
99/00	alle	alle	15	2	6	35,34	-3,27	12,86	176,06	13,27	37,54
99/00	alle	alle	15	2	6,5	35,20	-3,13	12,90	176,31	13,28	37,72
99/00	alle	alle	15	2	7	35,06	-2,99	12,96	176,81	13,30	37,92
99/00	alle	alle	15	2	7,5	34,93	-2,86	13,01	177,54	13,32	38,15
99/00	alle	alle	15	2	8	34,79	-2,72	13,08	178,47	13,36	38,40
99/00	alle	alle	15	2	8,5	34,66	-2,59	13,15	179,59	13,40	38,66
99/00	alle	alle	15	2	9	34,53	-2,46	13,22	180,85	13,45	38,95
99/00	alle	alle	15	2	9,5	34,40	-2,33	13,30	182,24	13,50	39,24
99/00	alle	alle	15	2	10	34,27	-2,20	13,37	183,71	13,55	39,55
99/00	alle	alle	20	2	0,1	36,30	-4,23	13,67	204,87	14,31	39,43
99/00	alle	alle	20	2	0,2	36,35	-4,28	13,49	200,36	14,15	38,94
99/00	alle	alle	20	2	0,3	36,44	-4,37	13,26	194,93	13,96	38,32
99/00	alle	alle	20	2	0,4	36,56	-4,49	13,01	189,31	13,76	37,64
99/00	alle	alle	20	2	0,5	36,71	-4,64	12,78	184,87	13,60	37,04
99/00	alle	alle	20	2	0,6	36,87	-4,80	12,65	183,05	13,53	36,70
99/00	alle	alle	20	2	0,7	37,02	-4,95	12,64	184,28	13,57	36,67
99/00	alle	alle	20	2	0,8	37,14	-5,07	12,73	187,70	13,70	36,89
99/00	alle	alle	20	2	0,9	37,22	-5,15	12,86	191,86	13,85	37,21
99/00	alle	alle	20	2	1	37,27	-5,20	12,98	195,58	13,99	37,52
99/00	alle	alle	20	2	1,5	37,24	-5,17	13,23	201,65	14,20	38,13
99/00	alle	alle	20	2	2	37,09	-5,01	13,20	199,50	14,12	38,09
99/00	alle	alle	20	2	2,5	36,91	-4,84	13,16	196,56	14,02	37,99
99/00	alle	alle	20	2	3	36,73	-4,66	13,12	193,73	13,92	37,90
99/00	alle	alle	20	2	3,5	36,54	-4,47	13,08	191,13	13,83	37,83
99/00	alle	alle	20	2	4	36,36	-4,29	13,05	188,81	13,74	37,79
99/00	alle	alle	20	2	4,5	36,18	-4,11	13,03	186,79	13,67	37,77
99/00	alle	alle	20	2	5	36,01	-3,94	13,02	185,08	13,60	37,78
99/00	alle	alle	20	2	5,5	35,84	-3,77	13,02	183,69	13,55	37,82
99/00	alle	alle	20	2	6	35,67	-3,60	13,03	182,64	13,51	37,88
99/00	alle	alle	20	2	6,5	35,51	-3,44	13,04	181,91	13,49	37,98
99/00	alle	alle	20	2	7	35,35	-3,28	13,07	181,52	13,47	38,11
99/00	alle	alle	20	2	7,5	35,19	-3,12	13,10	181,44	13,47	38,27
99/00	alle	alle	20	2	8	35,04	-2,97	13,15	181,66	13,48	38,47
99/00	alle	alle	20	2	8,5	34,89	-2,82	13,20	182,15	13,50	38,69
99/00	alle	alle	20	2	9	34,74	-2,66	13,26	182,88	13,52	38,93
99/00	alle	alle	20	2	9,5	34,59	-2,52	13,32	183,81	13,56	39,20
99/00	alle	alle	20	2	10	34,45	-2,37	13,39	184,92	13,60	39,48
99/00	alle	kNN	5	2	0,1	31,73	0,34	14,30	204,63	14,30	45,08
99/00	alle	kNN	5	2	0,2	31,73	0,34	14,29	204,46	14,30	45,06
99/00	alle	kNN	5	2	0,3	31,73	0,34	14,29	204,30	14,29	45,05
99/00	alle	kNN	5	2	0,4	31,73	0,34	14,28	204,14	14,29	45,03
99/00	alle	kNN	5	2	0,5	31,73	0,34	14,28	203,99	14,28	45,01

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	kNN	5	2	0,6	31,73	0,34	14,27	203,84	14,28	45,00
99/00	alle	kNN	5	2	0,7	31,73	0,34	14,27	203,70	14,27	44,98
99/00	alle	kNN	5	2	0,8	31,73	0,34	14,26	203,56	14,27	44,96
99/00	alle	kNN	5	2	0,9	31,73	0,34	14,26	203,43	14,26	44,95
99/00	alle	kNN	5	2	1	31,73	0,34	14,25	203,31	14,26	44,93
99/00	alle	kNN	5	2	1,5	31,74	0,33	14,24	202,80	14,24	44,87
99/00	alle	kNN	5	2	2	31,75	0,32	14,23	202,51	14,23	44,82
99/00	alle	kNN	5	2	2,5	31,76	0,31	14,23	202,48	14,23	44,80
99/00	alle	kNN	5	2	3	31,78	0,29	14,24	202,74	14,24	44,80
99/00	alle	kNN	5	2	3,5	31,80	0,27	14,26	203,30	14,26	44,83
99/00	alle	kNN	5	2	4	31,83	0,24	14,29	204,14	14,29	44,89
99/00	alle	kNN	5	2	4,5	31,86	0,21	14,32	205,23	14,33	44,97
99/00	alle	kNN	5	2	5	31,89	0,18	14,37	206,51	14,37	45,06
99/00	alle	kNN	5	2	5,5	31,92	0,15	14,42	207,94	14,42	45,17
99/00	alle	kNN	5	2	6	31,96	0,11	14,47	209,45	14,47	45,28
99/00	alle	kNN	5	2	6,5	32,00	0,08	14,53	210,99	14,53	45,40
99/00	alle	kNN	5	2	7	32,03	0,04	14,58	212,50	14,58	45,51
99/00	alle	kNN	5	2	7,5	32,07	0,00	14,63	213,95	14,63	45,61
99/00	alle	kNN	5	2	8	32,11	-0,03	14,67	215,32	14,67	45,70
99/00	alle	kNN	5	2	8,5	32,14	-0,07	14,72	216,58	14,72	45,79
99/00	alle	kNN	5	2	9	32,18	-0,10	14,76	217,72	14,76	45,86
99/00	alle	kNN	5	2	9,5	32,21	-0,14	14,79	218,74	14,79	45,92
99/00	alle	kNN	5	2	10	32,24	-0,17	14,82	219,65	14,82	45,96
99/00	alle	kNN	10	2	0,1	32,29	-0,22	13,52	182,80	13,52	41,87
99/00	alle	kNN	10	2	0,2	32,28	-0,21	13,52	182,90	13,52	41,89
99/00	alle	kNN	10	2	0,3	32,27	-0,20	13,53	183,00	13,53	41,91
99/00	alle	kNN	10	2	0,4	32,27	-0,19	13,53	183,10	13,53	41,94
99/00	alle	kNN	10	2	0,5	32,26	-0,19	13,53	183,20	13,54	41,96
99/00	alle	kNN	10	2	0,6	32,25	-0,18	13,54	183,31	13,54	41,98
99/00	alle	kNN	10	2	0,7	32,24	-0,17	13,54	183,43	13,54	42,00
99/00	alle	kNN	10	2	0,8	32,24	-0,16	13,55	183,55	13,55	42,03
99/00	alle	kNN	10	2	0,9	32,23	-0,16	13,55	183,67	13,55	42,05
99/00	alle	kNN	10	2	1	32,22	-0,15	13,56	183,80	13,56	42,08
99/00	alle	kNN	10	2	1,5	32,18	-0,11	13,58	184,55	13,58	42,22
99/00	alle	kNN	10	2	2	32,13	-0,06	13,62	185,48	13,62	42,38
99/00	alle	kNN	10	2	2,5	32,09	-0,02	13,66	186,64	13,66	42,57
99/00	alle	kNN	10	2	3	32,05	0,02	13,71	188,06	13,71	42,79
99/00	alle	kNN	10	2	3,5	32,01	0,06	13,77	189,72	13,77	43,03
99/00	alle	kNN	10	2	4	31,98	0,09	13,84	191,63	13,84	43,28
99/00	alle	kNN	10	2	4,5	31,96	0,11	13,92	193,74	13,92	43,55
99/00	alle	kNN	10	2	5	31,95	0,12	14,00	196,01	14,00	43,82
99/00	alle	kNN	10	2	5,5	31,95	0,12	14,08	198,37	14,08	44,08
99/00	alle	kNN	10	2	6	31,96	0,11	14,17	200,76	14,17	44,33
99/00	alle	kNN	10	2	6,5	31,98	0,09	14,25	203,14	14,25	44,57
99/00	alle	kNN	10	2	7	32,00	0,07	14,33	205,44	14,33	44,79
99/00	alle	kNN	10	2	7,5	32,03	0,04	14,41	207,65	14,41	44,98
99/00	alle	kNN	10	2	8	32,07	0,00	14,48	209,71	14,48	45,16
99/00	alle	kNN	10	2	8,5	32,10	-0,03	14,55	211,63	14,55	45,31
99/00	alle	kNN	10	2	9	32,14	-0,07	14,61	213,37	14,61	45,45

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	kNN	10	2	9,5	32,18	-0,11	14,66	214,95	14,66	45,56
99/00	alle	kNN	10	2	10	32,22	-0,15	14,71	216,36	14,71	45,66
99/00	alle	kNN	15	2	0,1	32,47	-0,40	13,31	177,27	13,31	41,00
99/00	alle	kNN	15	2	0,2	32,46	-0,39	13,31	177,39	13,32	41,03
99/00	alle	kNN	15	2	0,3	32,45	-0,38	13,32	177,52	13,32	41,06
99/00	alle	kNN	15	2	0,4	32,44	-0,37	13,32	177,65	13,33	41,09
99/00	alle	kNN	15	2	0,5	32,43	-0,36	13,33	177,78	13,33	41,11
99/00	alle	kNN	15	2	0,6	32,42	-0,35	13,33	177,91	13,34	41,14
99/00	alle	kNN	15	2	0,7	32,41	-0,34	13,34	178,05	13,34	41,17
99/00	alle	kNN	15	2	0,8	32,40	-0,33	13,35	178,20	13,35	41,20
99/00	alle	kNN	15	2	0,9	32,39	-0,32	13,35	178,34	13,35	41,23
99/00	alle	kNN	15	2	1	32,38	-0,30	13,36	178,50	13,36	41,27
99/00	alle	kNN	15	2	1,5	32,32	-0,25	13,39	179,35	13,39	41,44
99/00	alle	kNN	15	2	2	32,26	-0,18	13,43	180,39	13,43	41,64
99/00	alle	kNN	15	2	2,5	32,19	-0,12	13,48	181,69	13,48	41,87
99/00	alle	kNN	15	2	3	32,13	-0,06	13,54	183,26	13,54	42,13
99/00	alle	kNN	15	2	3,5	32,07	0,00	13,61	185,13	13,61	42,42
99/00	alle	kNN	15	2	4	32,02	0,05	13,68	187,28	13,68	42,74
99/00	alle	kNN	15	2	4,5	31,98	0,09	13,77	189,65	13,77	43,06
99/00	alle	kNN	15	2	5	31,95	0,12	13,86	192,20	13,86	43,39
99/00	alle	kNN	15	2	5,5	31,94	0,13	13,96	194,85	13,96	43,70
99/00	alle	kNN	15	2	6	31,94	0,13	14,05	197,54	14,05	44,01
99/00	alle	kNN	15	2	6,5	31,95	0,12	14,15	200,21	14,15	44,29
99/00	alle	kNN	15	2	7	31,97	0,11	14,24	202,81	14,24	44,55
99/00	alle	kNN	15	2	7,5	31,99	0,08	14,33	205,31	14,33	44,79
99/00	alle	kNN	15	2	8	32,03	0,04	14,41	207,66	14,41	44,99
99/00	alle	kNN	15	2	8,5	32,06	0,01	14,49	209,84	14,49	45,18
99/00	alle	kNN	15	2	9	32,10	-0,03	14,55	211,85	14,55	45,34
99/00	alle	kNN	15	2	9,5	32,15	-0,07	14,62	213,66	14,62	45,47
99/00	alle	kNN	15	2	10	32,19	-0,11	14,67	215,30	14,67	45,59
99/00	alle	kNN	20	2	0,1	32,86	-0,79	13,47	182,12	13,50	41,07
99/00	alle	kNN	20	2	0,2	32,85	-0,77	13,47	182,12	13,50	41,09
99/00	alle	kNN	20	2	0,3	32,83	-0,76	13,47	182,12	13,50	41,10
99/00	alle	kNN	20	2	0,4	32,82	-0,75	13,47	182,12	13,50	41,12
99/00	alle	kNN	20	2	0,5	32,81	-0,73	13,48	182,12	13,50	41,14
99/00	alle	kNN	20	2	0,6	32,79	-0,72	13,48	182,13	13,50	41,15
99/00	alle	kNN	20	2	0,7	32,78	-0,71	13,48	182,15	13,50	41,17
99/00	alle	kNN	20	2	0,8	32,76	-0,69	13,48	182,17	13,50	41,19
99/00	alle	kNN	20	2	0,9	32,75	-0,68	13,48	182,19	13,50	41,21
99/00	alle	kNN	20	2	1	32,74	-0,66	13,48	182,22	13,50	41,24
99/00	alle	kNN	20	2	1,5	32,66	-0,59	13,50	182,47	13,51	41,36
99/00	alle	kNN	20	2	2	32,57	-0,50	13,52	182,94	13,53	41,52
99/00	alle	kNN	20	2	2,5	32,49	-0,41	13,55	183,70	13,55	41,72
99/00	alle	kNN	20	2	3	32,40	-0,32	13,59	184,80	13,59	41,96
99/00	alle	kNN	20	2	3,5	32,31	-0,24	13,65	186,27	13,65	42,24
99/00	alle	kNN	20	2	4	32,23	-0,16	13,71	188,10	13,72	42,55
99/00	alle	kNN	20	2	4,5	32,17	-0,09	13,79	190,24	13,79	42,88
99/00	alle	kNN	20	2	5	32,11	-0,04	13,88	192,62	13,88	43,22

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	kNN	20	2	5,5	32,07	0,00	13,97	195,15	13,97	43,55
99/00	alle	kNN	20	2	6	32,05	0,02	14,06	197,76	14,06	43,88
99/00	alle	kNN	20	2	6,5	32,04	0,03	14,16	200,39	14,16	44,18
99/00	alle	kNN	20	2	7	32,05	0,02	14,25	202,98	14,25	44,45
99/00	alle	kNN	20	2	7,5	32,06	0,01	14,33	205,48	14,33	44,71
99/00	alle	kNN	20	2	8	32,09	-0,02	14,42	207,86	14,42	44,93
99/00	alle	kNN	20	2	8,5	32,12	-0,05	14,49	210,07	14,49	45,13
99/00	alle	kNN	20	2	9	32,15	-0,08	14,56	212,11	14,56	45,30
99/00	alle	kNN	20	2	9,5	32,19	-0,11	14,63	213,97	14,63	45,45
99/00	alle	kNN	20	2	10	32,22	-0,15	14,68	215,64	14,68	45,57
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,1	39,73	-7,65	15,07	285,76	16,90	42,55
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,2	39,79	-7,72	14,87	280,74	16,76	42,11
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,3	39,85	-7,78	14,74	277,91	16,67	41,83
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,4	39,90	-7,83	14,71	277,65	16,66	41,76
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,5	39,94	-7,86	14,74	279,23	16,71	41,84
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,6	39,94	-7,87	14,82	281,48	16,78	42,00
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,7	39,93	-7,86	14,89	283,41	16,83	42,16
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,8	39,91	-7,84	14,94	284,60	16,87	42,27
99/00	alle	MNTFR	5	2	0,9	39,88	-7,81	14,97	284,99	16,88	42,33
99/00	alle	MNTFR	5	2	1	39,84	-7,77	14,98	284,72	16,87	42,35
99/00	alle	MNTFR	5	2	1,5	39,63	-7,55	14,89	278,76	16,70	42,13
99/00	alle	MNTFR	5	2	2	39,40	-7,33	14,75	271,18	16,47	41,80
99/00	alle	MNTFR	5	2	2,5	39,16	-7,09	14,62	263,94	16,25	41,48
99/00	alle	MNTFR	5	2	3	38,93	-6,86	14,50	257,32	16,04	41,21
99/00	alle	MNTFR	5	2	3,5	38,69	-6,62	14,41	251,39	15,86	40,98
99/00	alle	MNTFR	5	2	4	38,46	-6,39	14,33	246,18	15,69	40,80
99/00	alle	MNTFR	5	2	4,5	38,23	-6,16	14,28	241,71	15,55	40,67
99/00	alle	MNTFR	5	2	5	38,00	-5,93	14,24	237,94	15,43	40,59
99/00	alle	MNTFR	5	2	5,5	37,78	-5,70	14,22	234,84	15,32	40,57
99/00	alle	MNTFR	5	2	6	37,56	-5,48	14,22	232,36	15,24	40,59
99/00	alle	MNTFR	5	2	6,5	37,34	-5,27	14,23	230,42	15,18	40,65
99/00	alle	MNTFR	5	2	7	37,14	-5,07	14,26	228,98	15,13	40,74
99/00	alle	MNTFR	5	2	7,5	36,94	-4,87	14,29	227,95	15,10	40,87
99/00	alle	MNTFR	5	2	8	36,75	-4,68	14,33	227,29	15,08	41,02
99/00	alle	MNTFR	5	2	8,5	36,57	-4,50	14,38	226,94	15,06	41,19
99/00	alle	MNTFR	5	2	9	36,40	-4,33	14,43	226,85	15,06	41,38
99/00	alle	MNTFR	5	2	9,5	36,23	-4,16	14,48	226,97	15,07	41,58
99/00	alle	MNTFR	5	2	10	36,08	-4,00	14,53	227,27	15,08	41,79
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,1	40,85	-8,78	15,52	318,05	17,83	43,65
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,2	40,87	-8,80	15,31	311,97	17,66	43,21
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,3	40,91	-8,83	15,10	306,05	17,49	42,77
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,4	40,94	-8,87	14,93	301,55	17,37	42,41
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,5	40,98	-8,91	14,84	299,43	17,30	42,23
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,6	41,00	-8,93	14,83	299,62	17,31	42,22
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,7	41,01	-8,93	14,88	301,18	17,35	42,32
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,8	41,00	-8,93	14,94	303,00	17,41	42,46
99/00	alle	MNTFR	10	2	0,9	40,98	-8,91	15,00	304,35	17,45	42,57
99/00	alle	MNTFR	10	2	1	40,95	-8,88	15,04	304,99	17,46	42,65

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	MNTFR	10	2	1,5	40,77	-8,70	15,01	300,98	17,35	42,55
99/00	alle	MNTFR	10	2	2	40,57	-8,50	14,87	293,32	17,13	42,21
99/00	alle	MNTFR	10	2	2,5	40,35	-8,28	14,72	285,28	16,89	41,86
99/00	alle	MNTFR	10	2	3	40,12	-8,05	14,58	277,33	16,65	41,51
99/00	alle	MNTFR	10	2	3,5	39,88	-7,80	14,45	269,65	16,42	41,18
99/00	alle	MNTFR	10	2	4	39,63	-7,55	14,33	262,38	16,20	40,88
99/00	alle	MNTFR	10	2	4,5	39,37	-7,30	14,23	255,64	15,99	40,61
99/00	alle	MNTFR	10	2	5	39,11	-7,04	14,14	249,49	15,80	40,38
99/00	alle	MNTFR	10	2	5,5	38,86	-6,78	14,07	244,01	15,62	40,20
99/00	alle	MNTFR	10	2	6	38,60	-6,53	14,02	239,23	15,47	40,07
99/00	alle	MNTFR	10	2	6,5	38,35	-6,28	13,99	235,14	15,33	39,98
99/00	alle	MNTFR	10	2	7	38,11	-6,04	13,97	231,75	15,22	39,94
99/00	alle	MNTFR	10	2	7,5	37,88	-5,80	13,98	229,00	15,13	39,95
99/00	alle	MNTFR	10	2	8	37,65	-5,58	13,99	226,87	15,06	40,01
99/00	alle	MNTFR	10	2	8,5	37,43	-5,36	14,02	225,27	15,01	40,10
99/00	alle	MNTFR	10	2	9	37,22	-5,15	14,06	224,16	14,97	40,22
99/00	alle	MNTFR	10	2	9,5	37,02	-4,95	14,11	223,46	14,95	40,38
99/00	alle	MNTFR	10	2	10	36,83	-4,76	14,16	223,12	14,94	40,55
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,1	41,57	-9,49	16,27	354,74	18,83	45,31
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,2	41,58	-9,50	16,08	348,82	18,68	44,92
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,3	41,60	-9,53	15,86	342,23	18,50	44,47
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,4	41,63	-9,56	15,64	335,97	18,33	44,03
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,5	41,67	-9,60	15,47	331,39	18,20	43,69
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,6	41,70	-9,63	15,38	329,36	18,15	43,52
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,7	41,71	-9,64	15,38	329,64	18,16	43,52
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,8	41,71	-9,64	15,43	331,12	18,20	43,62
99/00	alle	MNTFR	15	2	0,9	41,70	-9,62	15,49	332,67	18,24	43,74
99/00	alle	MNTFR	15	2	1	41,67	-9,60	15,54	333,65	18,27	43,84
99/00	alle	MNTFR	15	2	1,5	41,48	-9,41	15,53	329,70	18,16	43,77
99/00	alle	MNTFR	15	2	2	41,27	-9,19	15,36	320,59	17,90	43,39
99/00	alle	MNTFR	15	2	2,5	41,03	-8,96	15,18	310,78	17,63	42,97
99/00	alle	MNTFR	15	2	3	40,78	-8,70	15,01	300,95	17,35	42,54
99/00	alle	MNTFR	15	2	3,5	40,51	-8,43	14,84	291,33	17,07	42,14
99/00	alle	MNTFR	15	2	4	40,22	-8,15	14,68	282,10	16,80	41,75
99/00	alle	MNTFR	15	2	4,5	39,94	-7,86	14,54	273,37	16,53	41,40
99/00	alle	MNTFR	15	2	5	39,65	-7,57	14,42	265,23	16,29	41,08
99/00	alle	MNTFR	15	2	5,5	39,35	-7,28	14,31	257,75	16,05	40,80
99/00	alle	MNTFR	15	2	6	39,06	-6,99	14,22	251,01	15,84	40,56
99/00	alle	MNTFR	15	2	6,5	38,78	-6,71	14,14	245,04	15,65	40,37
99/00	alle	MNTFR	15	2	7	38,50	-6,43	14,09	239,88	15,49	40,23
99/00	alle	MNTFR	15	2	7,5	38,23	-6,16	14,06	235,53	15,35	40,15
99/00	alle	MNTFR	15	2	8	37,97	-5,90	14,04	231,97	15,23	40,11
99/00	alle	MNTFR	15	2	8,5	37,72	-5,65	14,05	229,15	15,14	40,13
99/00	alle	MNTFR	15	2	9	37,48	-5,41	14,06	227,00	15,07	40,20
99/00	alle	MNTFR	15	2	9,5	37,25	-5,18	14,09	225,46	15,02	40,30
99/00	alle	MNTFR	15	2	10	37,04	-4,97	14,13	224,43	14,98	40,44
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,1	42,30	-10,23	16,63	381,06	19,52	46,15
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,2	42,29	-10,22	16,47	375,63	19,38	45,83

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,3	42,29	-10,22	16,27	369,15	19,21	45,43
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,4	42,30	-10,23	16,05	362,23	19,03	44,99
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,5	42,32	-10,25	15,84	356,06	18,87	44,59
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,6	42,34	-10,26	15,70	351,93	18,76	44,31
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,7	42,34	-10,27	15,65	350,32	18,72	44,21
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,8	42,33	-10,26	15,67	350,64	18,73	44,24
99/00	alle	MNTFR	20	2	0,9	42,30	-10,23	15,72	351,74	18,75	44,33
99/00	alle	MNTFR	20	2	1	42,27	-10,20	15,77	352,69	18,78	44,43
99/00	alle	MNTFR	20	2	1,5	42,08	-10,00	15,79	349,26	18,69	44,42
99/00	alle	MNTFR	20	2	2	41,86	-9,79	15,62	339,88	18,44	44,04
99/00	alle	MNTFR	20	2	2,5	41,62	-9,55	15,43	329,36	18,15	43,60
99/00	alle	MNTFR	20	2	3	41,36	-9,29	15,24	318,49	17,85	43,15
99/00	alle	MNTFR	20	2	3,5	41,08	-9,00	15,05	307,59	17,54	42,70
99/00	alle	MNTFR	20	2	4	40,78	-8,71	14,87	296,91	17,23	42,26
99/00	alle	MNTFR	20	2	4,5	40,47	-8,40	14,70	286,64	16,93	41,83
99/00	alle	MNTFR	20	2	5	40,15	-8,08	14,55	276,91	16,64	41,44
99/00	alle	MNTFR	20	2	5,5	39,84	-7,77	14,41	267,83	16,37	41,08
99/00	alle	MNTFR	20	2	6	39,52	-7,45	14,28	259,49	16,11	40,76
99/00	alle	MNTFR	20	2	6,5	39,21	-7,14	14,18	252,00	15,87	40,49
99/00	alle	MNTFR	20	2	7	38,90	-6,83	14,10	245,41	15,67	40,27
99/00	alle	MNTFR	20	2	7,5	38,60	-6,53	14,04	239,76	15,48	40,11
99/00	alle	MNTFR	20	2	8	38,31	-6,24	14,00	235,05	15,33	40,02
99/00	alle	MNTFR	20	2	8,5	38,03	-5,96	13,99	231,25	15,21	39,98
99/00	alle	MNTFR	20	2	9	37,77	-5,70	13,99	228,30	15,11	40,01
99/00	alle	MNTFR	20	2	9,5	37,52	-5,45	14,02	226,11	15,04	40,08
99/00	alle	MNTFR	20	2	10	37,28	-5,21	14,05	224,59	14,99	40,20
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,1	24,84	7,23	15,15	281,83	16,79	67,58
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,2	24,85	7,22	15,15	281,60	16,78	67,53
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,3	24,86	7,21	15,14	281,38	16,77	67,48
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,4	24,87	7,20	15,14	281,16	16,77	67,43
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,5	24,88	7,19	15,14	280,96	16,76	67,38
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,6	24,89	7,18	15,14	280,77	16,76	67,33
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,7	24,90	7,18	15,14	280,58	16,75	67,28
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,8	24,91	7,17	15,13	280,41	16,75	67,23
99/00	alle	ProSmart	5	2	0,9	24,92	7,16	15,13	280,25	16,74	67,19
99/00	alle	ProSmart	5	2	1	24,92	7,15	15,13	280,10	16,74	67,15
99/00	alle	ProSmart	5	2	1,5	24,97	7,10	15,14	279,53	16,72	66,95
99/00	alle	ProSmart	5	2	2	25,02	7,05	15,15	279,29	16,71	66,80
99/00	alle	ProSmart	5	2	2,5	25,06	7,01	15,18	279,42	16,72	66,70
99/00	alle	ProSmart	5	2	3	25,10	6,97	15,21	279,93	16,73	66,65
99/00	alle	ProSmart	5	2	3,5	25,14	6,94	15,26	280,83	16,76	66,67
99/00	alle	ProSmart	5	2	4	25,16	6,91	15,31	282,09	16,80	66,74
99/00	alle	ProSmart	5	2	4,5	25,18	6,89	15,37	283,68	16,84	66,88
99/00	alle	ProSmart	5	2	5	25,19	6,88	15,44	285,56	16,90	67,07
99/00	alle	ProSmart	5	2	5,5	25,20	6,87	15,51	287,68	16,96	67,31
99/00	alle	ProSmart	5	2	6	25,19	6,88	15,58	290,00	17,03	67,59
99/00	alle	ProSmart	5	2	6,5	25,18	6,89	15,65	292,47	17,10	67,91
99/00	alle	ProSmart	5	2	7	25,17	6,91	15,73	295,04	17,18	68,26
99/00	alle	ProSmart	5	2	7,5	25,14	6,93	15,80	297,68	17,25	68,62

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	ProSmart	5	2	8	25,12	6,96	15,87	300,36	17,33	69,00
99/00	alle	ProSmart	5	2	8,5	25,09	6,99	15,94	303,04	17,41	69,39
99/00	alle	ProSmart	5	2	9	25,05	7,02	16,01	305,70	17,48	69,79
99/00	alle	ProSmart	5	2	9,5	25,02	7,05	16,08	308,32	17,56	70,19
99/00	alle	ProSmart	5	2	10	24,98	7,09	16,14	310,89	17,63	70,58
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,1	24,88	7,19	15,17	281,89	16,79	67,48
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,2	24,89	7,18	15,16	281,50	16,78	67,41
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,3	24,90	7,18	15,15	281,12	16,77	67,35
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,4	24,90	7,17	15,14	280,73	16,76	67,28
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,5	24,91	7,16	15,14	280,35	16,74	67,21
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,6	24,92	7,15	15,13	279,97	16,73	67,14
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,7	24,93	7,14	15,12	279,59	16,72	67,07
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,8	24,94	7,13	15,11	279,22	16,71	67,00
99/00	alle	ProSmart	10	2	0,9	24,95	7,12	15,10	278,85	16,70	66,94
99/00	alle	ProSmart	10	2	1	24,96	7,12	15,09	278,48	16,69	66,87
99/00	alle	ProSmart	10	2	1,5	25,01	7,07	15,06	276,75	16,64	66,53
99/00	alle	ProSmart	10	2	2	25,06	7,01	15,04	275,26	16,59	66,20
99/00	alle	ProSmart	10	2	2,5	25,12	6,95	15,02	274,11	16,56	65,91
99/00	alle	ProSmart	10	2	3	25,17	6,90	15,03	273,39	16,53	65,68
99/00	alle	ProSmart	10	2	3,5	25,23	6,85	15,04	273,16	16,53	65,52
99/00	alle	ProSmart	10	2	4	25,27	6,80	15,07	273,47	16,54	65,43
99/00	alle	ProSmart	10	2	4,5	25,31	6,76	15,12	274,29	16,56	65,43
99/00	alle	ProSmart	10	2	5	25,34	6,73	15,17	275,59	16,60	65,51
99/00	alle	ProSmart	10	2	5,5	25,36	6,71	15,24	277,32	16,65	65,67
99/00	alle	ProSmart	10	2	6	25,36	6,71	15,31	279,41	16,72	65,90
99/00	alle	ProSmart	10	2	6,5	25,36	6,71	15,39	281,79	16,79	66,19
99/00	alle	ProSmart	10	2	7	25,35	6,72	15,47	284,40	16,86	66,53
99/00	alle	ProSmart	10	2	7,5	25,33	6,74	15,55	287,19	16,95	66,91
99/00	alle	ProSmart	10	2	8	25,30	6,77	15,63	290,09	17,03	67,32
99/00	alle	ProSmart	10	2	8,5	25,27	6,80	15,71	293,07	17,12	67,75
99/00	alle	ProSmart	10	2	9	25,23	6,84	15,79	296,08	17,21	68,20
99/00	alle	ProSmart	10	2	9,5	25,19	6,88	15,87	299,10	17,29	68,66
99/00	alle	ProSmart	10	2	10	25,14	6,93	15,94	302,10	17,38	69,13
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,1	24,80	7,27	15,48	292,36	17,10	68,94
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,2	24,81	7,26	15,46	291,83	17,08	68,85
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,3	24,82	7,25	15,45	291,31	17,07	68,76
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,4	24,83	7,24	15,44	290,77	17,05	68,66
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,5	24,84	7,23	15,43	290,24	17,04	68,57
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,6	24,86	7,22	15,42	289,71	17,02	68,48
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,7	24,87	7,21	15,40	289,17	17,00	68,38
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,8	24,88	7,19	15,39	288,63	16,99	68,29
99/00	alle	ProSmart	15	2	0,9	24,89	7,18	15,38	288,09	16,97	68,19
99/00	alle	ProSmart	15	2	1	24,90	7,17	15,37	287,56	16,96	68,10
99/00	alle	ProSmart	15	2	1,5	24,96	7,11	15,31	284,91	16,88	67,61
99/00	alle	ProSmart	15	2	2	25,03	7,04	15,26	282,42	16,81	67,13
99/00	alle	ProSmart	15	2	2,5	25,10	6,97	15,22	280,20	16,74	66,68
99/00	alle	ProSmart	15	2	3	25,17	6,90	15,19	278,41	16,69	66,28
99/00	alle	ProSmart	15	2	3,5	25,24	6,83	15,18	277,13	16,65	65,95

Landsat-Szene	Kanäle	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%-RMSE [%]
99/00	alle	ProSmart	15	2	4	25,30	6,77	15,19	276,46	16,63	65,71
99/00	alle	ProSmart	15	2	4,5	25,35	6,72	15,21	276,40	16,63	65,57
99/00	alle	ProSmart	15	2	5	25,39	6,68	15,24	276,93	16,64	65,53
99/00	alle	ProSmart	15	2	5,5	25,42	6,65	15,29	278,00	16,67	65,59
99/00	alle	ProSmart	15	2	6	25,44	6,64	15,35	279,55	16,72	65,73
99/00	alle	ProSmart	15	2	6,5	25,44	6,63	15,41	281,49	16,78	65,96
99/00	alle	ProSmart	15	2	7	25,43	6,64	15,48	283,76	16,85	66,25
99/00	alle	ProSmart	15	2	7,5	25,41	6,66	15,55	286,28	16,92	66,59
99/00	alle	ProSmart	15	2	8	25,38	6,69	15,63	288,98	17,00	66,98
99/00	alle	ProSmart	15	2	8,5	25,34	6,73	15,70	291,83	17,08	67,41
99/00	alle	ProSmart	15	2	9	25,30	6,77	15,78	294,75	17,17	67,85
99/00	alle	ProSmart	15	2	9,5	25,26	6,81	15,85	297,72	17,25	68,32
99/00	alle	ProSmart	15	2	10	25,21	6,86	15,92	300,70	17,34	68,79
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,1	25,01	7,06	15,23	281,77	16,79	67,11
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,2	25,02	7,05	15,22	281,42	16,78	67,05
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,3	25,03	7,05	15,21	281,08	16,77	66,99
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,4	25,03	7,04	15,21	280,73	16,75	66,93
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,5	25,04	7,03	15,20	280,37	16,74	66,87
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,6	25,05	7,02	15,19	280,02	16,73	66,80
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,7	25,06	7,01	15,18	279,66	16,72	66,74
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,8	25,07	7,01	15,17	279,30	16,71	66,67
99/00	alle	ProSmart	20	2	0,9	25,08	7,00	15,17	278,94	16,70	66,61
99/00	alle	ProSmart	20	2	1	25,08	6,99	15,16	278,58	16,69	66,54
99/00	alle	ProSmart	20	2	1,5	25,13	6,94	15,12	276,78	16,64	66,20
99/00	alle	ProSmart	20	2	2	25,19	6,89	15,09	275,09	16,59	65,86
99/00	alle	ProSmart	20	2	2,5	25,24	6,83	15,07	273,61	16,54	65,53
99/00	alle	ProSmart	20	2	3	25,30	6,77	15,05	272,48	16,51	65,24
99/00	alle	ProSmart	20	2	3,5	25,36	6,72	15,06	271,81	16,49	65,02
99/00	alle	ProSmart	20	2	4	25,41	6,66	15,07	271,67	16,48	64,87
99/00	alle	ProSmart	20	2	4,5	25,45	6,62	15,11	272,09	16,50	64,82
99/00	alle	ProSmart	20	2	5	25,48	6,59	15,15	273,05	16,52	64,85
99/00	alle	ProSmart	20	2	5,5	25,50	6,57	15,21	274,50	16,57	64,98
99/00	alle	ProSmart	20	2	6	25,50	6,57	15,27	276,38	16,62	65,18
99/00	alle	ProSmart	20	2	6,5	25,50	6,57	15,34	278,63	16,69	65,46
99/00	alle	ProSmart	20	2	7	25,48	6,59	15,42	281,16	16,77	65,80
99/00	alle	ProSmart	20	2	7,5	25,46	6,61	15,50	283,92	16,85	66,19
99/00	alle	ProSmart	20	2	8	25,42	6,65	15,58	286,85	16,94	66,62
99/00	alle	ProSmart	20	2	8,5	25,38	6,69	15,66	289,89	17,03	67,08
99/00	alle	ProSmart	20	2	9	25,34	6,73	15,74	292,99	17,12	67,56
99/00	alle	ProSmart	20	2	9,5	25,29	6,78	15,81	296,13	17,21	68,05
99/00	alle	ProSmart	20	2	10	25,24	6,84	15,89	299,26	17,30	68,55

12.1.2 HyMap™

Tabelle 12-2 kNN-Ergebnisse für das Merkmal Grundfläche (HyMap™)

Kanäle	Shift-Algorithmus	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%RMSE [%]
20 MNF	Zentralp.	alle	1	2	2	33,69	-1,61	17,81	319,88	17,89	53,09
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	2	34,65	-2,58	12,62	165,87	12,88	37,17
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	2	34,57	-2,50	12,21	155,30	12,46	36,05
20 MNF	Zentralp.	alle	7	2	2	34,41	-2,33	12,81	169,54	13,02	37,84
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	2	34,42	-2,35	13,20	179,88	13,41	38,96
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	2	33,93	-1,85	12,84	168,25	12,97	38,23
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	2	34,13	-2,06	13,43	184,58	13,59	39,81
20 MNF	Zentralp.	alle	25	2	2	34,19	-2,12	13,45	185,32	13,61	39,82
20 MNF	Zentralp.	alle	50	2	2	34,68	-2,61	13,99	202,46	14,23	41,02
20 MNF	Zentralp.	kNN	1	2	2	33,29	-1,22	15,73	248,88	15,78	47,39
20 MNF	Zentralp.	kNN	3	2	2	31,51	0,56	14,03	197,09	14,04	44,55
20 MNF	Zentralp.	kNN	5	2	2	31,01	1,06	13,96	195,99	14,00	45,15
20 MNF	Zentralp.	kNN	7	2	2	31,74	0,34	14,16	200,61	14,16	44,63
20 MNF	Zentralp.	kNN	10	2	2	32,00	0,08	14,41	207,62	14,41	45,03
20 MNF	Zentralp.	kNN	15	2	2	32,30	-0,22	14,45	208,86	14,45	44,75
20 MNF	Zentralp.	kNN	20	2	2	32,58	-0,50	14,50	210,54	14,51	44,54
20 MNF	Zentralp.	kNN	25	2	2	33,07	-0,99	14,47	210,48	14,51	43,88
20 MNF	Zentralp.	kNN	50	2	2	33,97	-1,90	14,34	209,13	14,46	42,57
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	1	2	2	44,66	-12,59	20,55	580,79	24,10	53,96
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	3	2	2	44,10	-12,03	16,82	427,58	20,68	46,88
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	5	2	2	42,90	-10,82	16,56	391,23	19,78	46,11
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	7	2	2	42,18	-10,11	16,38	370,62	19,25	45,64
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	10	2	2	41,90	-10,11	16,38	370,62	19,25	45,64
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	15	2	2	41,88	-9,81	16,76	377,23	19,42	46,37
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	20	2	2	41,59	-9,52	16,62	366,81	19,15	46,05
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	25	2	2	41,74	-9,67	16,83	376,57	19,41	46,49
20 MNF	Zentralp.	MNTFR	50	2	2	42,40	-10,33	16,79	388,62	19,71	46,49
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	1	2	2	26,33	5,74	16,71	312,30	17,67	67,11
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	3	2	2	28,17	3,90	14,83	235,14	15,33	54,44
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	5	2	2	27,81	4,26	14,52	229,01	15,13	54,42
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	7	2	2	27,82	4,25	14,44	226,55	15,05	54,10
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	10	2	2	27,99	4,08	14,90	238,64	15,45	55,20
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	15	2	2	28,07	4,00	14,78	234,61	15,32	54,57
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	20	2	2	28,21	3,86	14,52	225,63	15,02	53,25
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	25	2	2	27,94	4,13	14,48	226,69	15,06	53,88
20 MNF	Zentralp.	ProSmart	50	2	2	27,11	4,97	14,73	241,54	15,54	57,33
20 MNF	9 Pixel	alle	1	2	2	36,06	-3,99	16,60	291,33	17,07	47,33
20 MNF	9 Pixel	alle	3	2	2	33,72	-1,64	15,30	236,81	15,39	45,64
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	2	33,81	-1,74	15,69	249,22	15,79	46,69
20 MNF	9 Pixel	alle	7	2	2	33,78	-1,71	15,60	246,40	15,70	46,46
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	2	33,78	-1,71	15,04	229,02	15,13	44,80

Kanäle	Shift-Algorithmus	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%RMSE [%]
20 MNF	9 Pixel	alle	15	2	2	33,27	-1,20	14,62	215,16	14,67	44,09
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	2	33,07	-1,00	14,38	207,70	14,41	43,58
20 MNF	9 Pixel	alle	25	2	2	33,14	-1,07	14,50	211,50	14,54	43,88
20 MNF	9 Pixel	alle	50	2	2	33,57	-1,50	14,20	203,99	14,28	42,54
20 MNF	9 Pixel	alle	100	2	2	35,28	-3,20	14,16	210,66	14,51	41,15
128 (alle)	Zentralp.	alle	1	2	2	33,75	-1,68	16,68	281,06	16,76	49,68
128 (alle)	Zentralp.	alle	3	2	2	36,10	-4,03	15,46	255,29	15,98	44,26
128 (alle)	Zentralp.	alle	5	2	2	35,32	-3,25	14,97	234,63	15,32	43,36
128 (alle)	Zentralp.	alle	7	2	2	35,30	-3,23	15,00	235,46	15,34	43,47
128 (alle)	Zentralp.	alle	10	2	2	34,96	-2,89	14,58	220,82	14,86	42,51
128 (alle)	Zentralp.	alle	15	2	2	34,45	-2,38	14,60	218,70	14,79	42,93
128 (alle)	Zentralp.	alle	25	2	2	34,47	-2,40	14,59	218,73	14,79	42,91
128 (alle)	Zentralp.	alle	50	2	2	34,79	-2,72	14,39	214,43	14,64	42,09
128 (alle)	Zentralp.	alle	75	2	2	35,39	-3,32	14,41	218,78	14,79	41,79
128 (alle)	Zentralp.	alle	100	2	2	35,87	-3,80	14,52	225,27	15,01	41,84
20 MNF	Zentralp.	alle	4	1	0,1	35,13	-3,06	13,31	186,49	13,66	38,87
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,1	35,02	-2,95	12,00	152,81	12,36	35,29
20 MNF	Zentralp.	alle	4	4	0,1	34,04	-1,97	12,78	167,18	12,93	37,99
20 MNF	Zentralp.	alle	4	6	0,1	33,83	-1,76	12,79	166,80	12,91	38,18
20 MNF	Zentralp.	alle	5	1	2	34,37	-2,29	13,43	185,64	13,62	39,65
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	2	34,57	-2,50	12,21	155,30	12,46	36,05
20 MNF	Zentralp.	alle	5	4	2	34,33	-2,26	12,15	152,79	12,36	36,01
20 MNF	Zentralp.	alle	5	6	2	33,89	-1,82	12,68	163,99	12,81	37,79
20 MNF	Zentralp.	alle	5	8	2	33,51	-1,44	12,72	163,87	12,80	38,20
20 MNF	Zentralp.	alle	10	1	2	34,23	-2,16	13,36	183,22	13,54	39,54
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	2	34,42	-2,35	13,20	179,88	13,41	38,96
20 MNF	Zentralp.	alle	10	4	2	33,99	-1,92	12,75	166,13	12,89	37,92
20 MNF	Zentralp.	alle	10	6	2	33,51	-1,44	12,91	168,70	12,99	38,76
20 MNF	Zentralp.	alle	10	8	2	33,83	-1,76	12,89	169,25	13,01	38,45
20 MNF	Zentralp.	alle	15	1	2	34,45	-2,38	13,60	190,57	13,80	40,07
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	2	33,93	-1,85	12,84	168,25	12,97	38,23
20 MNF	Zentralp.	alle	15	4	2	33,97	-1,90	13,19	177,59	13,33	39,23
20 MNF	Zentralp.	alle	15	6	2	34,18	-2,10	13,22	179,22	13,39	39,17
20 MNF	Zentralp.	alle	15	8	2	34,26	-2,19	13,37	183,44	13,54	39,53
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	2	33,81	-1,74	15,69	249,22	15,79	46,69
20 MNF	9 Pixel	alle	5	4	2	33,32	-1,25	16,03	258,50	16,08	48,25
20 MNF	9 Pixel	alle	5	6	2	33,67	-1,60	17,16	297,15	17,24	51,20
20 MNF	9 Pixel	alle	5	8	2	34,18	-2,11	16,49	276,28	16,62	48,63
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	2	33,78	-1,71	15,04	229,02	15,13	44,80
20 MNF	9 Pixel	alle	10	4	2	33,56	-1,48	15,70	248,72	15,77	47,00
20 MNF	9 Pixel	alle	10	6	2	33,67	-1,60	15,81	252,46	15,89	47,19
20 MNF	9 Pixel	alle	10	8	2	33,62	-1,55	15,85	253,65	15,93	47,37

Kanäle	Shift-Algorithmus	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%RMSE [%]
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	2	33,07	-1,00	14,38	207,70	14,41	43,58
20 MNF	9 Pixel	alle	20	4	2	33,45	-1,38	15,04	227,97	15,10	45,13
20 MNF	9 Pixel	alle	20	6	2	33,55	-1,48	15,21	233,63	15,28	45,56
20 MNF	9 Pixel	alle	20	8	2	33,51	-1,44	15,21	233,55	15,28	45,60
20 MNF	Zentralp.	alle	5	1	1	34,51	-2,44	13,50	188,25	13,72	39,76
20 MNF	Zentralp.	alle	1	2	0,1	33,69	-1,61	17,81	319,88	17,89	53,09
20 MNF	Zentralp.	alle	1	2	1	33,69	-1,61	17,81	319,88	17,89	53,09
20 MNF	Zentralp.	alle	2	2	1	35,22	-3,15	14,21	211,94	14,56	41,33
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,1	34,84	-2,76	12,42	161,82	12,72	36,52
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,2	34,83	-2,75	12,43	162,00	12,73	36,55
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,3	34,82	-2,75	12,44	162,18	12,74	36,58
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,4	34,81	-2,74	12,45	162,37	12,74	36,61
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,5	34,80	-2,73	12,45	162,56	12,75	36,64
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,6	34,79	-2,72	12,46	162,75	12,76	36,67
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,7	34,78	-2,71	12,47	162,94	12,76	36,70
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,8	34,77	-2,70	12,48	163,14	12,77	36,73
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	0,9	34,76	-2,69	12,49	163,35	12,78	36,77
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	1	34,75	-2,68	12,51	163,56	12,79	36,80
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	2	34,65	-2,58	12,62	165,87	12,88	37,17
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	3	34,56	-2,48	12,75	168,65	12,99	37,58
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	4	34,46	-2,39	12,89	171,89	13,11	38,05
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	5	34,37	-2,30	13,05	175,53	13,25	38,55
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	6	34,28	-2,21	13,21	179,48	13,40	39,08
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	7	34,20	-2,13	13,38	183,65	13,55	39,62
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	8	34,13	-2,06	13,55	187,96	13,71	40,17
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	9	34,06	-1,99	13,72	192,32	13,87	40,71
20 MNF	Zentralp.	alle	3	2	10	34,00	-1,93	13,89	196,67	14,02	41,25
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,1	35,02	-2,95	12,00	152,81	12,36	35,29
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,2	35,02	-2,94	12,01	152,87	12,36	35,31
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,3	35,01	-2,93	12,01	152,94	12,37	35,33
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,4	35,00	-2,92	12,02	153,01	12,37	35,35
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,5	34,99	-2,91	12,02	153,08	12,37	35,36
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,6	34,98	-2,90	12,03	153,15	12,38	35,38
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,7	34,97	-2,89	12,04	153,23	12,38	35,40
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,8	34,96	-2,88	12,04	153,31	12,38	35,42
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	0,9	34,95	-2,87	12,05	153,39	12,38	35,44
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	1	34,94	-2,86	12,05	153,47	12,39	35,46
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	2	34,83	-2,75	12,12	154,53	12,43	35,69
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	3	34,71	-2,64	12,21	156,12	12,49	35,99
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	4	34,60	-2,53	12,33	158,35	12,58	36,37
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	5	34,50	-2,42	12,46	161,24	12,70	36,81
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	6	34,39	-2,32	12,62	164,72	12,83	37,32
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	7	34,30	-2,23	12,80	168,69	12,99	37,87
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	8	34,21	-2,14	12,98	173,03	13,15	38,45
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	9	34,13	-2,06	13,17	177,61	13,33	39,05

Kanäle	Shift-Algorithmus	Terrestr. Aufnah.	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%RMSE [%]
20 MNF	Zentralp.	alle	4	2	10	34,06	-1,98	13,36	182,33	13,50	39,65
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,1	34,60	-2,53	12,22	155,75	12,48	36,07
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,2	34,60	-2,53	12,22	155,70	12,48	36,06
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,3	34,60	-2,53	12,22	155,65	12,48	36,06
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,4	34,60	-2,53	12,22	155,60	12,47	36,05
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,5	34,60	-2,53	12,21	155,56	12,47	36,05
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,6	34,60	-2,53	12,21	155,52	12,47	36,04
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,7	34,60	-2,53	12,21	155,48	12,47	36,04
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,8	34,60	-2,53	12,21	155,44	12,47	36,04
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	0,9	34,60	-2,52	12,21	155,41	12,47	36,03
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	1	34,59	-2,52	12,21	155,38	12,47	36,03
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	2	34,57	-2,50	12,21	155,30	12,46	36,05
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	3	34,52	-2,45	12,23	155,68	12,48	36,14
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	4	34,47	-2,39	12,29	156,66	12,52	36,32
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	5	34,40	-2,32	12,37	158,33	12,58	36,58
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	6	34,32	-2,25	12,48	160,69	12,68	36,94
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	7	34,24	-2,17	12,61	163,73	12,80	37,37
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	8	34,16	-2,09	12,77	167,34	12,94	37,87
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	9	34,09	-2,01	12,94	171,44	13,09	38,41
20 MNF	Zentralp.	alle	5	2	10	34,01	-1,94	13,12	175,89	13,26	38,99
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,1	34,59	-2,52	13,50	188,50	13,73	39,69
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,2	34,58	-2,51	13,48	188,02	13,71	39,65
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,3	34,57	-2,50	13,46	187,54	13,69	39,61
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,4	34,57	-2,49	13,45	187,06	13,68	39,57
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,5	34,56	-2,49	13,43	186,59	13,66	39,53
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,6	34,55	-2,48	13,42	186,12	13,64	39,49
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,7	34,54	-2,47	13,40	185,65	13,63	39,45
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,8	34,53	-2,46	13,38	185,18	13,61	39,40
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	0,9	34,53	-2,45	13,37	184,72	13,59	39,37
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	1	34,52	-2,45	13,35	184,26	13,57	39,33
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	2	34,42	-2,35	13,20	179,88	13,41	38,96
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	3	34,33	-2,25	13,08	176,05	13,27	38,65
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	4	34,23	-2,16	12,98	173,03	13,15	38,42
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	5	34,15	-2,08	12,91	170,98	13,08	38,29
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	6	34,08	-2,01	12,88	169,95	13,04	38,26
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	7	34,01	-1,93	12,89	169,93	13,04	38,33
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	8	33,94	-1,87	12,94	170,87	13,07	38,52
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	9	33,92	-1,85	13,07	174,14	13,20	38,90
20 MNF	Zentralp.	alle	10	2	10	33,80	-1,73	13,13	175,28	13,24	39,17
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,1	34,01	-1,94	13,14	176,31	13,28	39,04
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,2	34,01	-1,94	13,12	175,87	13,26	38,99
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,3	34,01	-1,93	13,10	175,42	13,24	38,95
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,4	34,00	-1,93	13,09	174,98	13,23	38,90
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,5	34,00	-1,93	13,07	174,54	13,21	38,86
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,6	33,99	-1,92	13,05	174,10	13,19	38,81
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,7	33,99	-1,92	13,04	173,67	13,18	38,77
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,8	33,99	-1,91	13,02	173,23	13,16	38,73

Kanäle	Shift-Algorithmus	Terrestr. Aufnahme	k	r	t	Grundfl. (Schätzer) [m ² /ha]	Bias [m ² /ha]	Standardfehler [m ² /ha]	MSE [m ² /ha]	RMSE [m ² /ha]	%RMSE [%]
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	0,9	33,98	-1,91	13,01	172,80	13,15	38,68
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	1	33,98	-1,90	12,99	172,37	13,13	38,64
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	2	33,93	-1,85	12,84	168,25	12,97	38,23
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	3	33,87	-1,80	12,70	164,64	12,83	37,88
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	4	33,82	-1,75	12,60	161,81	12,72	37,61
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	5	33,79	-1,72	12,53	159,96	12,65	37,43
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	6	33,76	-1,69	12,50	159,18	12,62	37,37
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	7	33,73	-1,66	12,52	159,42	12,63	37,43
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	8	33,70	-1,63	12,57	160,65	12,67	37,61
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	9	33,67	-1,60	12,66	162,80	12,76	37,90
20 MNF	Zentralp.	alle	15	2	10	33,63	-1,56	12,78	165,76	12,87	38,28
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,1	34,31	-2,24	13,94	199,26	14,12	41,14
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,2	34,30	-2,23	13,91	198,45	14,09	41,07
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,3	34,30	-2,22	13,88	197,65	14,06	40,99
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,4	34,29	-2,22	13,85	196,85	14,03	40,92
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,5	34,28	-2,21	13,83	196,04	14,00	40,85
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,6	34,27	-2,20	13,80	195,24	13,97	40,77
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,7	34,26	-2,19	13,77	194,44	13,94	40,70
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,8	34,25	-2,18	13,74	193,65	13,92	40,63
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	0,9	34,24	-2,17	13,72	192,86	13,89	40,56
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	1	34,23	-2,16	13,69	192,07	13,86	40,48
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	2	34,13	-2,06	13,43	184,58	13,59	39,81
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	3	34,02	-1,95	13,20	178,05	13,34	39,22
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	4	33,93	-1,86	13,01	172,70	13,14	38,73
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	5	33,87	-1,79	12,86	168,68	12,99	38,35
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	6	33,82	-1,75	12,77	166,03	12,89	38,10
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	7	33,78	-1,71	12,72	164,70	12,83	37,99
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	8	33,74	-1,67	12,72	164,61	12,83	38,03
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	9	33,69	-1,62	12,77	165,68	12,87	38,20
20 MNF	Zentralp.	alle	20	2	10	33,65	-1,58	12,86	167,80	12,95	38,50
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	2	33,81	-1,74	15,69	249,22	15,79	46,69
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	4	34,05	-1,98	15,54	245,39	15,66	46,01
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	6	34,27	-2,20	15,44	243,18	15,59	45,50
20 MNF	9 Pixel	alle	5	2	8	34,47	-2,40	15,40	242,86	15,58	45,21
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	2	33,78	-1,71	15,04	229,02	15,13	44,80
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	4	33,88	-1,81	15,01	228,61	15,12	44,62
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	6	34,07	-2,00	14,99	228,62	15,12	44,38
20 MNF	9 Pixel	alle	10	2	8	34,28	-2,21	14,99	229,54	15,15	44,20
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	2	33,07	-1,00	14,38	207,70	14,41	43,58
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	4	33,20	-1,13	14,38	208,00	14,42	43,44
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	6	33,45	-1,38	14,46	211,11	14,53	43,43
20 MNF	9 Pixel	alle	20	2	8	33,75	-1,68	14,57	215,16	14,67	43,46

12.2 kNN-Ergebnisse des Merkmals Totholz

12.2.1 Landsat

Tabelle 12-3 kNN-Ergebnisse für das Merkmal Totholz (Landsat-Daten, Verwendung aller terrestrischen Aufnahmen)

Landsat-Szene	Kanäle	k	r	t	Übereinstimmungen		Totholz kNN=ja Aufnah.=ja		Totholz kNN=nein Aufnah.=nein		Totholz kNN=ja Aufnah.=nein		Totholz kNN=nein Aufnah.=ja	
					Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
1989	1-5,7	1	2	2	15	50,0	8	26,7	7	23,3	8	26,7	7	23,3
1989	1-5,7	3	2	2	16	53,3	7	23,3	9	30,0	6	20,0	8	26,7
1989	1-5,7	5	2	2	16	53,3	8	26,7	8	26,7	7	23,3	7	23,3
1989	1-5,7	7	2	2	15	50,0	7	23,3	8	26,7	7	23,3	8	26,7
1989	1-5,7	10	2	2	14	46,7	6	20,0	8	26,7	7	23,3	9	30,0
1989	1-5,7	15	2	2	14	46,7	7	23,3	7	23,3	8	26,7	8	26,7
1989	1-5,7	20	2	2	15	50,0	6	20,0	9	30,0	6	20,0	9	30,0
1989	1-5,7	25	2	2	15	50,0	6	20,0	9	30,0	6	20,0	9	30,0
1989	1-5,7	30	2	2	14	46,7	5	16,7	9	30,0	6	20,0	10	33,3
1989	1-5,7	35	2	2	16	53,3	7	23,3	9	30,0	6	20,0	8	26,7
1989	1-5,7	40	2	2	17	56,7	7	23,3	10	33,3	5	16,7	8	26,7
1989	1-5,7	45	2	2	20	66,7	7	23,3	13	43,3	2	6,7	8	26,7
1989	1-5,7	50	2	2	21	70,0	8	26,7	13	43,3	2	6,7	7	23,3
1989	alle	1	2	2	16	53,3	6	20,0	10	33,3	5	16,7	9	30,0
1989	alle	3	2	2	18	60,0	8	26,7	10	33,3	5	16,7	7	23,3
1989	alle	5	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1989	alle	7	2	2	17	56,7	7	23,3	10	33,3	5	16,7	8	26,7
1989	alle	10	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1989	alle	15	2	2	13	43,3	4	13,3	9	30,0	6	20,0	11	36,7
1989	alle	20	2	2	14	46,7	5	16,7	9	30,0	6	20,0	10	33,3
1989	alle	25	2	2	16	53,3	6	20,0	10	33,3	5	16,7	9	30,0
1989	alle	30	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1989	alle	35	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1989	alle	40	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
1989	alle	45	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1989	alle	50	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
1999	1-5,7	1	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1999	1-5,7	3	2	2	20	66,7	8	26,7	12	40,0	3	10,0	7	23,3
1999	1-5,7	5	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1999	1-5,7	7	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1999	1-5,7	10	2	2	19	63,3	7	23,3	12	40,0	3	10,0	8	26,7
1999	1-5,7	15	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
1999	1-5,7	20	2	2	15	50,0	4	13,3	11	36,7	4	13,3	11	36,7
1999	1-5,7	25	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
1999	1-5,7	30	2	2	14	46,7	3	10,0	11	36,7	4	13,3	12	40,0
1999	1-5,7	35	2	2	14	46,7	3	10,0	11	36,7	4	13,3	12	40,0

Landsat-Szene	Kanäle	k	r	t	Übereinstimmungen		Totholz kNN=ja Aufnah.=ja		Totholz kNN=nein Aufnah.=nein		Totholz kNN=ja Aufnah.=nein		Totholz kNN=nein Aufnah.=ja	
					Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
1999	1-5,7	40	2	2	14	46,7	3	10,0	11	36,7	4	13,3	12	40,0
1999	1-5,7	45	2	2	15	50,0	3	10,0	12	40,0	3	10,0	12	40,0
1999	1-5,7	50	2	2	15	50,0	3	10,0	12	40,0	3	10,0	12	40,0
1999	alle	1	2	2	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
1999	alle	3	2	2	16	53,3	2	6,7	14	46,7	1	3,3	13	43,3
1999	alle	5	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
1999	alle	7	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
1999	alle	10	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
1999	alle	15	2	2	17	56,7	3	10,0	14	46,7	1	3,3	12	40,0
1999	alle	20	2	2	15	50,0	2	6,7	13	43,3	2	6,7	13	43,3
1999	alle	25	2	2	15	50,0	2	6,7	13	43,3	2	6,7	13	43,3
1999	alle	30	2	2	14	46,7	1	3,3	13	43,3	2	6,7	14	46,7
1999	alle	35	2	2	14	46,7	1	3,3	13	43,3	2	6,7	14	46,7
1999	alle	40	2	2	14	46,7	1	3,3	13	43,3	2	6,7	14	46,7
1999	alle	45	2	2	14	46,7	1	3,3	13	43,3	2	6,7	14	46,7
1999	alle	50	2	2	15	50,0	2	6,7	13	43,3	2	6,7	13	43,3
2000	1-5,7	1	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
2000	1-5,7	3	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
2000	1-5,7	5	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1-5,7	7	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
2000	1-5,7	10	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1-5,7	15	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1-5,7	20	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
2000	1-5,7	25	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
2000	1-5,7	30	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
2000	1-5,7	35	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1-5,7	40	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1-5,7	45	2	2	15	50,0	2	6,7	13	43,3	2	6,7	13	43,3
2000	1-5,7	50	2	2	15	50,0	2	6,7	13	43,3	2	6,7	13	43,3
2000	alle	1	2	2	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	2	2	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	3	2	2	20	66,7	8	26,7	12	40,0	3	10,0	7	23,3
2000	alle	5	2	2	18	60,0	8	26,7	10	33,3	5	16,7	7	23,3
2000	alle	7	2	2	19	63,3	7	23,3	12	40,0	3	10,0	8	26,7
2000	alle	10	2	2	19	63,3	7	23,3	12	40,0	3	10,0	8	26,7
2000	alle	15	2	2	15	50,0	6	20,0	9	30,0	6	20,0	9	30,0
2000	alle	20	2	2	16	53,3	6	20,0	10	33,3	5	16,7	9	30,0
2000	alle	25	2	2	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
2000	alle	30	2	2	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
2000	alle	35	2	2	20	66,7	6	20,0	14	46,7	1	3,3	9	30,0
2000	alle	40	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
2000	alle	45	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
2000	alle	50	2	2	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7

Landsat-Szene	Kanäle	k	r	t	Übereinstimmungen		Totholz kNN=ja Aufnah.=ja		Totholz kNN=nein Aufnah.=nein		Totholz kNN=ja Aufnah.=nein		Totholz kNN=nein Aufnah.=ja	
					Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
99/00	1-5,7,14-18,20	1	2	2	18	60,0	8	26,7	10	33,3	5	16,7	7	23,3
99/00	1-5,7,14-18,20	3	2	2	20	66,7	8	26,7	12	40,0	3	10,0	7	23,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	2	20	66,7	7	23,3	13	43,3	2	6,7	8	26,7
99/00	1-5,7,14-18,20	7	2	2	19	63,3	6	20,0	13	43,3	2	6,7	9	30,0
99/00	1-5,7,14-18,20	10	2	2	19	63,3	6	20,0	13	43,3	2	6,7	9	30,0
99/00	1-5,7,14-18,20	15	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0
99/00	1-5,7,14-18,20	20	2	2	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	25	2	2	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	30	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	35	2	2	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	40	2	2	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	45	2	2	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	50	2	2	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
99/00	alle	1	2	2	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	3	2	2	14	46,7	4	13,3	10	33,3	5	16,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	2	14	46,7	4	13,3	10	33,3	5	16,7	11	36,7
99/00	alle	7	2	2	16	53,3	5	16,7	11	36,7	4	13,3	10	33,3
99/00	alle	10	2	2	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
99/00	alle	15	2	2	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
99/00	alle	20	2	2	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
99/00	alle	25	2	2	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	30	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
99/00	alle	35	2	2	15	50,0	3	10,0	12	40,0	3	10,0	12	40,0
99/00	alle	40	2	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
99/00	alle	45	2	2	14	46,7	3	10,0	11	36,7	4	13,3	12	40,0
99/00	alle	50	2	2	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
2000	1,2,3,4,5,7	20	2	1	19	63,3	6	20,0	13	43,3	2	6,7	9	30,0
2000	1,2,3,4,5,7	20	2	3	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
2000	1,2,3,4,5,7	20	2	5	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
2000	1,2,3,4,5,7	20	2	7	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
2000	1,2,3,4,5,7	20	2	9	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
2000	alle	2	2	1	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	2	3	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	2	5	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	2	7	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	2	9	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
99/00	alle	1	2	1	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	1,5	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	2	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	2,5	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	4	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3

Landsat-Szene	Kanäle	k	r	t	Übereinstimmungen		Totholz kNN=ja Aufnah.=ja		Totholz kNN=nein Aufnah.=nein		Totholz kNN=ja Aufnah.=nein		Totholz kNN=nein Aufnah.=ja	
					Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
99/00	alle	1	2	6	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	8	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	1	2	10	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	5	2	1	14	46,7	4	13,3	10	33,3	5	16,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	1,5	14	46,7	4	13,3	10	33,3	5	16,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	2	14	46,7	4	13,3	10	33,3	5	16,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	2,5	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
99/00	alle	5	2	3	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	3,5	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	4	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
99/00	alle	5	2	6	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
99/00	alle	5	2	8	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
99/00	alle	5	2	10	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	alle	10	2	1	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
99/00	alle	10	2	3	18	60,0	4	13,3	14	46,7	1	3,3	11	36,7
99/00	alle	10	2	5	17	56,7	4	13,3	13	43,3	2	6,7	11	36,7
99/00	alle	10	2	7	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
99/00	alle	10	2	9	19	63,3	5	16,7	14	46,7	1	3,3	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	1	19	63,3	6	20,0	13	43,3	2	6,7	9	30,0
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	3	20	66,7	7	23,3	13	43,3	2	6,7	8	26,7
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	5	20	66,7	7	23,3	13	43,3	2	6,7	8	26,7
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	7	21	70,0	8	26,7	13	43,3	2	6,7	7	23,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	2	9	20	66,7	8	26,7	12	40,0	3	10,0	7	23,3
2000	1,2,3,4,5,7	20	1	2	17	56,7	3	10,0	14	46,7	1	3,3	12	40,0
2000	1,2,3,4,5,7	20	3	2	18	60,0	5	16,7	13	43,3	2	6,7	10	33,3
2000	1,2,3,4,5,7	20	5	2	16	53,3	3	10,0	13	43,3	2	6,7	12	40,0
2000	1,2,3,4,5,7	20	7	2	17	56,7	3	10,0	14	46,7	1	3,3	12	40,0
2000	1,2,3,4,5,7	20	9	2	17	56,7	3	10,0	14	46,7	1	3,3	12	40,0
2000	alle	2	1	2	21	70,0	10	33,3	11	36,7	4	13,3	5	16,7
2000	alle	2	3	2	22	73,3	10	33,3	12	40,0	3	10,0	5	16,7
2000	alle	2	5	2	21	70,0	9	30,0	12	40,0	3	10,0	6	20,0
2000	alle	2	7	2	19	63,3	9	30,0	10	33,3	5	16,7	6	20,0
2000	alle	2	9	2	20	66,7	10	33,3	10	33,3	5	16,7	5	16,7
99/00	1-5,7,14-18,20	5	1	2	17	56,7	5	16,7	12	40,0	3	10,0	10	33,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	3	2	20	66,7	7	23,3	13	43,3	2	6,7	8	26,7
99/00	1-5,7,14-18,20	5	5	2	21	70,0	8	26,7	13	43,3	2	6,7	7	23,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	7	2	21	70,0	8	26,7	13	43,3	2	6,7	7	23,3
99/00	1-5,7,14-18,20	5	9	2	21	70,0	8	26,7	13	43,3	2	6,7	7	23,3

12.2.2 HyMap™

Tabelle 12-4 *kNN-Ergebnisse für das Merkmal Totholz (HyMap™, Verwendung aller terrestrischen Aufnahmen)*

Szene	Shift-Algorithmus	k	r	t	Übereinstimmungen		Totholz kNN=ja Aufnah.=ja		Totholz kNN=nein Aufnah.=nein		Totholz kNN=ja Aufnah.=nein		Totholz kNN=nein Aufnah.=ja	
					Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
20 MNF	Zentralp.	1	2	2	18	60,0	10	33,3	8	26,7	7	23,3	5	16,7
20 MNF	Zentralp.	5	2	2	17	56,7	8	26,7	9	30,0	6	20,0	7	23,3
20 MNF	Zentralp.	10	2	2	16	53,3	4	13,3	12	40,0	3	10,0	11	36,7
20 MNF	Zentralp.	15	2	2	18	60,0	7	23,3	11	36,7	4	13,3	8	26,7
20 MNF	Zentralp.	20	2	2	14	46,7	5	16,7	9	30,0	6	20,0	10	33,3
20 MNF	Zentralp.	25	2	2	15	50,0	4	13,3	11	36,7	4	13,3	11	36,7
20 MNF	9 Pixel	1	2	2	19	63,3	9	30,0	10	33,3	5	16,7	6	20,0
20 MNF	9 Pixel	5	2	2	17	56,7	9	30,0	8	26,7	7	23,3	6	20,0
20 MNF	9 Pixel	10	2	2	15	50,0	7	23,3	8	26,7	7	23,3	8	26,7
20 MNF	9 Pixel	15	2	2	14	46,7	6	20,0	8	26,7	7	23,3	9	30,0
20 MNF	9 Pixel	20	2	2	15	50,0	6	20,0	9	30,0	6	20,0	9	30,0
20 MNF	9 Pixel	25	2	2	17	56,7	6	20,0	11	36,7	4	13,3	9	30,0

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässiger Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als diese kenntlich gemacht worden. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen von anderen Personen erhalten.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für die Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationen stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke der Promotion vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden anerkenne.

Tharandt, 30.08.2002

W. 