

Kostengünstiges Alternativkonzept für eine Flächenschätzung mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen im Rahmen der Bundeswaldinventur

STEFAN DAHM, JOACHIM SABOROWSKI und ALPARSLAN AKÇA, Göttingen

Zusammenfassung

In den Ergebnissen der Bundeswaldinventur (BWI) zeigt sich, daß die Flächenschätzungen mit einem erheblichen Stichprobenfehler behaftet sind. In diesem Artikel wird ein zweiphasiges Stichprobenverfahren erläutert, welches unter Einbeziehung von Satellitenaufzeichnungen genauere Flächenschätzungen bei nur wenig erhöhtem Aufwand erwarten läßt. In der ersten Phase wird das Inventurgebiet mit Hilfe von Landsat-5TM-Aufzeichnungen nach Wald und Nichtwald stratifiziert. Die Auswertung der Satellitenbilddaten erfolgt an Stichprobenpunkten, deren Verteilung ein 1 km x 1 km-Gitternetz zugrunde liegt. Das Gitternetz ist so in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem eingepaßt, daß die südwestlichen Traktecken der BWI in der neuen Stichprobe enthalten sind und somit die Vorratsveränderungen gegenüber der Erstinventur genauer geschätzt werden können. Der Rechner ordnet die Stichprobenpunkte automatisch einem der drei Teilgebiete „sicherer“ Wald, „sicherer“ Nichtwald oder Überlappungsbereich zu.

In der zweiten Phase wird in jedem der drei Teilgebiete eine Unterstichprobe aus der Menge der Stichprobenpunkte der ersten Phase gezogen. Auch hier handelt es sich wieder um systematische Stichproben, in denen die südwestlichen Traktecken enthalten sind. Jeder dieser zum zweiten Mal ausgewählten Stichprobenpunkte wird aufgrund der Walddefinition der BWI mit Hilfe von geeignetem Kartenmaterial oder im Zweifelsfalle durch eine Entscheidung vor Ort entweder Wald oder Nichtwald zugeordnet. An Stichprobenpunkten, die tatsächlich im Wald liegen, werden weitere bestandesrelevante Merkmale wie Bestandestyp, Eigentumsart, Altersklasse und Wuchsgebiet erhoben. Bei den vorgesehenen Stichprobenumfängen in der ersten und zweiten Phase liegt der erwartete Stichprobenfehler bei der Herleitung der Waldfläche bei $\pm 0,7\%$. Damit wird die in den Inventurzielen genannte Fehlerschranke von 1% für die Schätzung dieser Fläche deutlich unterschritten. Durch die systematische Verteilung der Stichprobenpunkte kann auch für kleinere Befundeinheiten ein den Inventurzielen entsprechender Stichprobenfehler gewährleistet werden. Gleichzeitig erlaubt die Vorstratifizierung mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen in der ersten Phase eine Halbierung des Stichprobenumfangs in der zweiten Phase gegenüber einer einfachen Zufallsstichprobe.

Abstract: An alternative concept for area estimates by use of satellite imagery in the frame of a country wide forest inventory

The results of the Federal Forest Inventory reveal that the area estimates are accompanied by a serious standard error. In the following, a two-phase sampling plan is presented, in which the integration of satellite data will supply better estimates without increased expenditure. In the first phase, the whole area of the Federal Republic of Germany is stratified by satellite data from Landsat-5 TM into forest cover and non-forest cover. The evaluation of the satellite data takes place at sample points, which are distributed according to a 1 km x 1 km grid net. This grid is adapted to the Gauß-Krüger system in such a manner that the southwest edges of the sampling clusters of the Federal Forest Inventory 1986–1990 are included in the new sample. Thus the change in volume can be estimated more correctly in comparison with the first inventory. The computer classifies sample points into one of the three area classes "definite forest", "definite non-forest" or "overlapping sphere" automatically.

In the second phase, in each of the area classes a subsample is selected from the quantity of sample points of the first phase. This systematic sample also includes the southwestern edges of the sampling clusters. Each of these sample points selected a second time, will be classified into "forest" or "non-forest" by using suitable maps or, in cases of doubt, by an on-the-spot investigation according to the definition of forest used in the Federal Forest Inventory. At the sample points, which are situated definitely in forest areas, further stand characteristics, such as stand type, kind of ownership, age class and growth area, are assessed. Through the suggested sample size of the first and the second phase, the expected standard error of the estimated forest area is about 0,7%, which remains clearly under the error limit of 1% for the forest area estimate quoted in the inventory objectives. Because of the systematic distribution of the sample points, a respective standard error is ensured also for smaller analysis units. Concurrently, in contrast to a simple random sample the prestratification by means of satellite data in the first phase renders possible a halving of the sample size in the second phase.

1. Einleitung

Ein Hauptziel der Bundeswaldinventur war und ist die Bereitstellung einer Informationsbasis zur Beurteilung des Holzvorrats im Bundesgebiet bzw. in

untergeordneten Wirtschaftsräumen. Um den Holzvorrat in den Wäldern zu quantifizieren, sind neben Angaben über den Vorrat je Hektar auch Daten über die Waldfläche erforderlich. In den Ergebnis-

sen zeigt sich allerdings, daß die Flächenschätzungen über die verwendete Traktstichprobe mit einem relativ großen Stichprobenfehler behaftet sind. Bei vielen Befundeinheiten ist der Flächenfehler doppelt so hoch wie der entsprechende Stichprobenfehler bei der Schätzung des Hektarvorrats. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Waldfläche überträgt sich auch auf die Genauigkeit der Angaben über den Gesamtvorrat, da sich dort der Stichprobenfehler mit den Fehlern der Schätzungen von Fläche und Vorrat je Hektar fortpflanzt. Unter Beibehaltung der Traktstichprobe kann der Stichprobenfehler bei der Flächenschätzung nur dann verringert werden, wenn der Stichprobenumfang erhöht und damit die Inventur teurer wird. Gleichzeitig bleibt die Diskrepanz zwischen den Stichprobenfehlern bei den Schätzungen von Hektarvorrat und Waldfläche bestehen, so daß dann für die Ermittlung des Hektarvorrats möglicherweise ein zu großer Aufwand betrieben wird.

Im folgenden Beitrag soll eine effizientere Methode zur Flächenschätzung erörtert werden, die auf einer zweiphasigen Stichprobe zur Stratifizierung basiert. Der Stichprobentyp erlaubt es, Satellitenaufzeichnungen, die eine große Datenmenge zu vergleichbar geringen Kosten zur Verfügung stellen, zur Vorstratifizierung in der ersten Phase zu verwenden. In der zweiten Phase reichen dann verhältnismäßig wenig Stichprobenpunkte aus, um die Waldfläche mit ausreichender Genauigkeit zu schätzen. Der Stichprobenplan ist auf eine Wiederholung der BWI orientiert, so daß ein Teil der Stichprobenorte der Erstinventur erneut aufgenommen werden soll und somit die Vorratsveränderungen genauer hergeleitet werden können. Weiter läßt das Konzept die Möglichkeit offen, regional erhebliche höhere Genauigkeitsansprüche zu erfüllen und kann dadurch den unterschiedlichen Informationsansprüchen der Bundesländer gerecht werden. Die angestrebte Schätzgenauigkeit bei den Flächenschätzungen richtet sich nach den Fehlerschranken, die für die BWI festgelegt worden sind [SCHWENKE 1986, ZÖHRER u. a. 1983]. Die Datenaufnahme zur Ermittlung der Bestockungsmerkmale ist aus der Untersuchung ausgeklammert. Jedoch sollten die hierzu notwendigen Arbeiten auf Probeflächen durchgeführt werden, deren räumliche Verteilung durch eine Untermenge der Stichprobenpunkte der zweiten Phase definiert wird.

2. Datenbasis für die erste Phase

Die Datenbasis für die erste Phase der Erhebung können Satellitenaufzeichnungen bilden, die durch Thematic Mappers (TM) auf den amerikanischen

Landsat-5-Plattformen erstellt werden. Die Satelliten, die auf einer fast polaren sonnensynchronen Umlaufbahn kreisen, nehmen bei einer Flughöhe von 702 km alle 16 Tage ein und dieselbe Szene im Inventurgebiet um etwa 9.30 Uhr Ortszeit auf. Da für die Unterscheidung von Wald und Nichtwald wolken- und schneefreie Bilddaten notwendig sind, ist bei der temporalen Auflösung von Landsat-5 mit einem Zeitraum von zwei bis drei Jahren zu rechnen, bis für das gesamte Bundesgebiet Daten mit der gewünschten Qualität zur Verfügung stehen [SCHARDT 1990]. Die für eine flächendeckende Aufnahme des Bundesgebietes notwendigen 35 Szenen liegen zur Zeit bei der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt rückwirkend für die letzten drei Jahre vor. Wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben [BODMER 1993; KEIL u. a. 1990; SCHARDT 1990], eignen sich die Landsat-5-TM-Daten aufgrund ihrer hohen spektralen Auflösung für die Unterscheidung von Wald und Nichtwald. Von den insgesamt sieben Spektralkanälen haben die Kanäle 1 bis 5 (Spektralbereich blau bis mittleres Infrarot) die besten Eigenschaften für die geplante Erhebung. Die geometrische Auflösung mit einer Pixelgröße von 30 m x 30 m wird in den genannten Arbeiten als ausreichend erachtet, wobei es bei sehr kleinflächigen Waldgebieten sicherlich zu Interpretationsschwierigkeiten kommen wird.

Zur Verbesserung der geometrischen Auflösung ist es denkbar, die französischen SPOT-1-HRV-Satellitenbilder mit den Landsat-5-TM-Daten zu verknüpfen. Mit einer Pixelgröße von 10 x 10 m könnten die panchromatischen SPOT-Daten die geometrische Genauigkeit wesentlich erhöhen [BODMER 1993]. Wenn jedoch neben den Landsat-Daten die SPOT-Aufnahmen gekauft werden, erhöhen sich die Beschaffungskosten um ein Vielfaches. Deshalb wird von dieser Möglichkeit abgesehen.

Nach 1995 wird sich voraussichtlich auch das deutsche MOMS-02-Bildaufzeichnungssystem für anderthalb Jahre auf einer Umlaufbahn im Weltraum befinden. Das System erreicht bei den panchromatischen Aufzeichnungen eine geometrische Auflösung von 4,5 m x 4,5 m. Da sich MOMS-02 allerdings noch in der Erprobungsphase befindet und zudem noch keine verlässlichen Angaben über Zeitpunkt und Dauer der geplanten Mission bekannt sind, wird auch diese Alternative zunächst nicht weiter verfolgt. Ein weiterer Nachteil des neuen Aufnahmesystems ist, daß das Bundesgebiet zunächst in der Erprobungsphase nur bis 51,6° nördlicher Breite erfaßt wird [BARWINSKI u. a. 1993]. Es ist allerdings zu erwarten, daß in den nächsten Jahren weitere Sensoren mit besserer Auflösung entwickelt werden.

3. Geometrische und radiometrische Aufbereitung der Satellitenaufzeichnungen

Die Landsat-5-TM-Daten werden in systemkorrigierter Form geliefert. Bei den Korrekturen erfolgt eine radiometrische Entzerrung, indem sensorbedingte Störungen mittels vor dem Start gemessener Referenzen ausgeglichen werden. Eine absolute radiometrische Kalibrierung findet nicht statt. Die geometrischen Systemkorrekturen umfassen einen Ausgleich der durch Erdkrümmung, Erdrotation, Flughöhe und Flugbahn bedingten Einflüsse.

Zur Auswertung müssen die Satellitenaufzeichnungen in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem eingepaßt werden. Die geometrische Entzerrung kann mit Hilfe von Paßpunkten, die auf topographischen Karten im Maßstab 1:50 000 ausgewählt werden, erfolgen. Nach [KEIL u. a. 1990] wird eine ausreichende Anpassung an das Koordinatensystem erreicht, wenn auf jeder topographischen Karte zwei Paßpunkte ausgewählt werden. Mit dieser Anzahl von Paßpunkten konnte eine Lagegenauigkeit der Pixel mit einer Standardabweichung von ca. ± 30 m sichergestellt werden. Diese Genauigkeit der geometrischen Anpassung wird zur Lokalisierung von Waldgebieten als ausreichend erachtet. Zur Unterscheidung von Wald und Nichtwald wird eine Maximum-Likelihood-Klassifizierung [Huss 1984] vorgeschlagen. Zur Vorbereitung werden bei dem Verfahren auf jeder zu klassifizierenden Szene Bildausschnitte abgegrenzt, deren Klassenzugehörigkeit (Wald oder Nichtwald) bekannt ist. Die Lage der entsprechenden Trainingsflächen wird aus aktuellem Luftbildmaterial oder, wenn dieses nicht verfügbar ist, aus Forstkarten oder unter Umständen aus topographischen Karten entnommen. Für jeden Spektralbereich werden aus den multispektralen Intensitätswerten der Pixel in den Bildausschnitten Mittelwerte für Wald bzw. Nichtwald gebildet. Nach der Kalibrierung kann die Maximum-Likelihood-Klassifizierung gestartet werden. Hierbei wird für jedes Bildelement die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der es Wald bzw. Nichtwald zugeordnet werden kann. Der Auswerter bestimmt, mit welcher Irrtumswahrscheinlichkeit ein Pixel einer der beiden Klassen zugeordnet wird. Daher können mit dem Verfahren die zu klassifizierenden Flächen mit vorgegebener Genauigkeit ausgeschieden werden. Jedoch wird bei der Klassifizierung eine Teilmenge der Pixel nicht mit genügender Wahrscheinlichkeit einer der beiden Klassen zugewiesen werden können. Denn insbesondere manche landwirtschaftlich genutzte Flächen wie saftige Wiesen oder Weinberge haben ähnliche reflektorische Eigenschaften wie Blößen oder vergraste Kulturen, so

daß sich das Auswertungsgebiet nach der Datenaufbereitung in drei Teilgebiete gliedert:

- „sicherer“ Wald
- Überlappungsgebiet
- „sicherer“ Nichtwald

Um den Flächenanteil des Überlappungsbereichs zu quantifizieren, wird auf die Untersuchung von [KEIL u. a. 1990] zurückgegriffen, bei der mit Hilfe von Landsat-TM-Aufzeichnungen eine Waldkarte (Maßstab 1:200 000) von der Region um Regensburg erstellt worden ist. Zur Klassifizierung nach Wald und Nichtwald wurden hier Schwellenwertmasken gebildet. Bei dem Klassifizierungsverfahren werden die obersten und untersten Grautöne, die auf Wald verweisen, innerhalb der einzelnen Spektralbänder abgegrenzt. Der darauf folgende Arbeitsschritt verschneidet dann die hieraus entstehenden Masken innerhalb der Spektralbänder zu einer Waldmaske. Mit dem Schwellenwertverfahren, das nicht die Genauigkeit wie die arbeitsaufwendigere Maximum-Likelihood-Klassifizierung erreicht, sind zwei Masken von dem Gebiet um Regensburg erstellt worden. Eine Maske unter Einbeziehung der Grauwerte von Blößen und ähnlicher Flächen und eine unter Ausschluß dieser schwer differenzierbaren Helligkeitsbereiche. Dabei kennzeichnete die Schwellenwertmaske, die Blößen und ähnliche Flächen einbezieht, einen Waldanteil von 48,5% des betreffenden Auswertungsgebietes. Demgegenüber markierte die Schwellenwertmaske, die die in Frage stehenden Grauwertstufen ausschließt, nur einen Waldanteil von 38,8%. Bei dieser Auswertung nimmt der Überlappungsbereich also etwa 10% der Gesamtfläche ein. Allerdings konnten bei der Untersuchung Satellitendaten aus zwei Jahreszeiten verwendet werden, was zu einer Verbesserung der Ergebnisse, also zu einer Verkleinerung des Überlappungsbereiches geführt hat. Bei der vorgesehenen, monotemporalen Auswertung muß daher mit einem etwas größeren Bereich gerechnet werden, der nicht nach Wald und Nichtwald differenziert werden kann. Aus dem Grund unterstellt die Stichprobenplanung einen Überlappungsbereich von 15% der Fläche des Bundesgebietes. Hiermit wird eine obere Abschätzung des Überlappungsbereichs erreicht, da die Maximum-Likelihood-Klassifizierung eine höhere Genauigkeit erzielt als das bei Keil u. a. verwendete Verfahren. Bei einer Fläche des Bundesgebietes von 35 771 600 ha entsprechen die 15% einem Gebiet von 5 365 700 ha. Aufgrund von BWI-Auswertungen läßt sich der Waldanteil im möglichen Überlappungsbereich abschätzen. Hiernach entfallen in den alten Bundesländern zum Stichtag 1. 10. 87 auf:

Blößen	34 400 ha
Kulturen (Alter ≤ 10 Jahre)	383 300 ha
unproduktive Waldfläche	182 300 ha
Nichtholzboden	202 000 ha
Gesamt	802 000 ha

Das sind 3,2 % des damaligen Bundesgebietes. Übertragen auf das jetzige Bundesgebiet entsprechen die 3,2 % einer Fläche von 1 144 700 ha. Hiermit wird der Waldanteil im Überlappungsbereich auf 21 % geschätzt (21 % von 5 365 700 = 1 144 700).

Tab. 1: Erwartete Flächenanteile der drei Teilgebiete an der Fläche des Bundesgebietes

Teilgebiet	proz. Flächenanteil
Überlappungsbereich	15 %
„sicherer“ Wald	27 %
„sicherer“ Nichtwald	58 %

Bei einem prozentualen Waldanteil von etwa 30 % [BICK und DAHM 1992; BML 1994] im jetzigen Bundesgebiet kann daher die in Tab. 1 bezifferte Flächenaufteilung bei der Aufbereitung der Satellitenaufzeichnungen angenommen werden.

4. Auswertung der Satellitenbilder – Datenerhebung der ersten Phase

Zur Schätzung der Waldfläche im Bundesgebiet werden systematisch angeordnete Stichprobenpunkte auf den Satellitenbildern ausgewertet. Der systematischen Verteilung der Stichprobenpunkte liegt ein gleichmäßiges Gitternetz im 1 km x 1 km-Verband zugrunde, das am Gauß-Krüger-Koordinatensystem orientiert ist. Die Wahl des Gitternetzursprungs erfolgt so, daß von jedem Trakt, der bei der BWI 1986–1990 aufgenommen worden ist, die südwestliche Ecke in die neue Erhebung fällt (Fig. 1). Ein Teil der Traktecken kann im weiteren Verlauf der Inventur wieder neu aufgenommen werden und so die Vorratsveränderungen in Form von Zuwachs und Nutzungen genauer geschätzt werden. Insgesamt ist in der ersten Phase ein Stichprobenumfang von 357 716 Stichprobenpunkten zu erwarten, da das der Fläche des Bundesgebietes in Quadratkilometern entspricht. Für jeden so lokalisierten Stichprobenpunkt wird anhand des Satellitenbildes entschieden, ob er im Wald, Nichtwald oder Überlappungsbereich liegt. Die Zuordnung erfolgt automatisch, d. h. durch den Rechner.

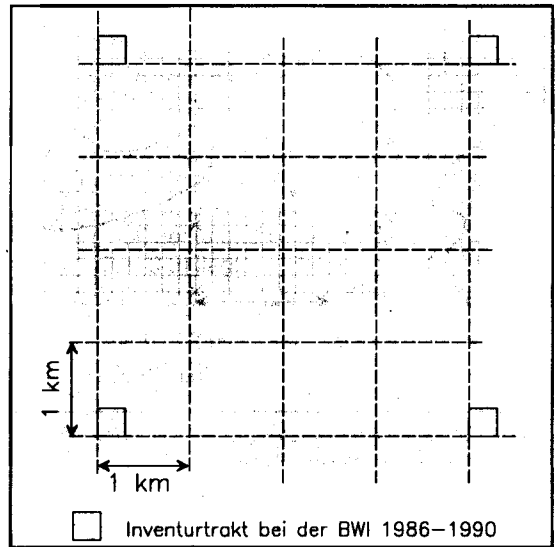


Fig. 1: Verteilung der Stichprobenpunkte in der ersten Phase; die Satellitenbilder werden jeweils an den Gitternetzpunkten ausgewertet.

5. Datenerhebung in der zweiten Phase

In der zweiten Phase werden die Flächenanteile von Wald und den untergeordneten Befundeinheiten innerhalb der in der ersten Phase bestimmten Teilgebiete mit konventionellen Methoden geschätzt. Hierzu zieht der Auswerter in jedem der drei Teilgebiete „sicherer“ Wald, Überlappungsbereich und „sicherer“ Nichtwald eine Unterstichprobe aus der Menge der Stichprobenpunkte der ersten Phase. In den Teilgebieten „sicherer“ Wald und Überlappungsbereich erfolgt eine systematische Auswahl der Stichprobenpunkte gemäß dem 2,83 km x 2,83 km Gitternetz (Diagonalen), wobei auch hier die südwestlichen Traktecken in der Stichprobe enthalten sein müssen. Im „sicheren“ Nichtwald kann eine geringere Stichprobendichte gewählt werden, da hier nur eine geringe Varianz bei der Waldflächenschätzung zu erwarten ist. Es wird eine ebenfalls systematische Verteilung der Stichprobenpunkte im 5,66 km x 5,66 km-Verband empfohlen (Fig. 2). Zur Festlegung der Stichprobenumfänge s. Abschnitt 7. Wenn regional eine höhere Genauigkeit gefordert wird, kann die Stichprobendichte bis zum 1 km x 1 km-Verband erhöht werden. Hiermit wäre es beispielsweise bei entsprechender Absprache und zeitgleichem Ablauf möglich gewesen, die Landesforstinventuren vom Saarland und von Nordrhein-Westfalen [HEUPEL 1994], [SPELSBERG und WESSELS 1994] in die Datenaufnahme der Bundeswaldinventur einzubeziehen.

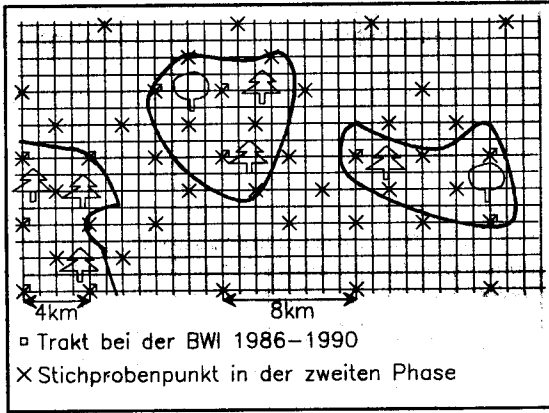


Fig. 2: Schematische Darstellung der Stichprobenverteilung in der zweiten Phase.

Für jeden so ausgewählten Stichprobenpunkt wird zunächst aufgrund der Walddefinition der Bundeswaldinventur [BWI 1986] festgestellt, ob er im Wald oder Nichtwald liegt. Die Zuordnung der Stichprobenpunkte zu einem der beiden Straten kann weitgehend mit Hilfe von topographischen Karten (Maßstab 1:25 000) durchgeführt werden. Wenn jedoch Unklarheit besteht, müssen die betreffenden Punkte im Gelände aufgesucht oder auf aktuellem Luftbildmaterial gesichtet werden. Luftbilder können jedoch aus Kostengründen nur dann eingesetzt werden, wenn sie aus anderen Erhebungen vorliegen.

Für Stichprobenpunkte, die im Wald liegen, werden mit Hilfe von geeignetem Kartenmaterial (topographische Karten oder Forstkarten) sowie durch Befragungen bei örtlichen Forstdienststellen und zuständigen Katasterämtern die Merkmale aus Fig. 3 erhoben. Auch hier müssen in Zweifelsfällen, wenn nicht alle Daten aus den Unterlagen entnommen werden können, die in Frage stehenden Erhebungsmerkmale vor Ort an den Stichprobenpunkten erhoben werden.

Bundesland	
Wuchsgebiet	
Kreis	
Forstamt	
Eigentumsart	
Eigentumsgrößenklasse	
Betriebsart	
Bestandesalter	
Bestandestyp	
Geländeform	
Exposition	
Höhe über NN	

Fig. 3: Merkmale, die an einem Stichprobenpunkt im Wald in der zweiten Phase erhoben werden sollen.

6. Fläche eines Stratums im Inventurgebiet

Aufgrund der zweiphasigen Stichprobe kann die Waldfläche bzw. die Fläche einer untergeordneten Befundeinheit geschätzt werden. Stellvertretend für diese Schätzverfahren wird hier die Herleitung der Fläche des Wirtschaftswaldes geschildert.

Von den insgesamt m Stichprobeneinheiten der ersten Phase seien m_h in das Teilgebiet h ($h = 1, 2, 3$) gefallen. Bei einer Wiederaufnahme von $n_h \leq m_h$ Stichprobeneinheiten im Teilgebiet h werden n_{hw} Wirtschaftswald zugeordnet. Hiermit läßt sich der Flächenanteil p_h des Wirtschaftswaldes in dem Teilgebiet schätzen:

$$\tilde{p}_h = \frac{n_{hw}}{n_h}$$

Die geschätzte Varianz $\text{var}(\tilde{p}_h)$ des Anteils \tilde{p}_h beträgt [COCHRAN 1977, S. 53]:

$$\text{var}(\tilde{p}_h) = \frac{\tilde{p}_h \cdot (1 - \tilde{p}_h)}{n_h} \quad (1)$$

Mit Hilfe der in den Teilgebieten ermittelten Anteile des Wirtschaftswaldes kann nun der Anteil p des Wirtschaftswaldes im Bundesgebiet erwartungsgetreu geschätzt werden:

$$\tilde{p} = \sum_{h=1}^3 \frac{m_h}{m} \cdot \tilde{p}_h = \sum_{h=1}^3 W_h \cdot \tilde{p}$$

mit

$$W_h = \frac{m_h}{m}$$

Die Varianz $\text{Var}(\tilde{p})$ wird durch

$$\text{var}(\tilde{p}) = \sum_{h=1}^3 W_h^2 \text{var}(\tilde{p}_h) + \frac{1}{m} \sum_{h=1}^3 W_h (\tilde{p}_h - \tilde{p})^2$$

nahezu erwartungstreu geschätzt [DE VRIES 1986, S. 132 f.].

Mit der bekannten Landesfläche F kann ein Schätzwert für die Wirtschaftswaldfläche \tilde{F}_w berechnet:

$$\tilde{F}_w = \tilde{p} \cdot F$$

bzw. über

$$\text{var}(\tilde{F}_w) = F^2 \cdot \text{var}(\tilde{p})$$

die Varianz der Flächenschätzung geschätzt werden.

7. Stichprobenumfänge in der zweiten Phase

Die Stichprobenumfänge in der zweiten Phase orientieren sich an den für die BWI formulierten Genauigkeitsansprüchen. Dort wurde für die Gesamt-

waldfläche eine Schätzgenauigkeit von $\pm 1\%$ gefordert. Bei Befundeinheiten um 100 000 ha, die die Untergrenze für Auswertungseinheiten darstellen, liegt der tolerierte Standardfehler zwischen 8% und 9% [SCHWENKE 1986, ZÖHRER u. a. 1983]. Um die Fläche der Waldgebiete innerhalb der drei Straten „sicherer“ Wald, Überlappungsbereich, „sicherer“ Nichtwald zu bestimmen, wird in der zweiten Phase in jedem der Teilgebiete ein Anteil der Stichprobe erneut aufgenommen.

In dem Gebiet „sicherer“ Wald, das nach Abschnitt 3 etwa 27% der Fläche des Bundesgebietes einnimmt, wird eine systematische Stichprobenverteilung im 2,83 km x 2,83 km-Verband empfohlen. Der Anteil v_1 der Stichprobe, der in der zweiten Phase im „sicheren“ Wald wieder aufgenommen werden soll, beträgt also $v_1 = 1/8$. Dies ergibt bei der Fläche des Bundesgebietes von 357 716 km² einen Stichprobenumfang von

$$n_1 = \frac{0.27 \cdot 357\ 716}{8} = 12\ 073$$

Stichprobenpunkten innerhalb des Stratum „sicherer“ Wald. Der Stichprobenumfang ist notwendig, um die Flächen der Straten innerhalb der Waldfläche mit der gewünschten Genauigkeit schätzen zu können. Alternativ steht hier, da die südwestlichen Traktecken in die Erhebung einbezogen werden sollen, nur noch eine Stichprobenverteilung gemäß dem 4 km x 4 km-Gitternetz zur Diskussion. Der hieraus resultierende Stichprobenumfang hat sich aber insbesondere bei kleineren Befundeinheiten als nicht ausreichend erwiesen. Wird in der ersten Phase bei der automatischen Zuordnung der Stichprobenpunkte zu dem Stratum „sicherer“ Wald eine minimale Trefferquote von 90% unterstellt, so kann der tatsächliche Waldanteil p_1 in dem Teilgebiet zwischen 0.9 und 1 variieren.

Auch der Waldanteil im Überlappungsbereich kann mit einer Stichprobe, deren Stichprobenpunkte systematisch gemäß dem 2,83 km x 2,83 km-Gitternetz (d. h. $v_2 = 1/8$) verteilt sind, geschätzt werden. Der durch diese Stichprobenverteilung bedingte Stichprobenumfang wird gewählt, da in diesem Stratum die größte Varianz bei der Schätzung der Waldfläche innerhalb der drei in der ersten Phase bestimmten Teilgebiete zu erwarten ist. Unter der Vorgabe ergibt sich bei einem prozentualen Flächenanteil des Überlappungsbereichs

von 15% des Bundesgebietes folgender Stichprobenumfang:

$$n_2 = \frac{0.15 \cdot 357\ 716}{8} = 6\ 707.$$

Der voraussichtliche Waldanteil im Überlappungsbereich wird ebenfalls nach Abschnitt 3 bei 0.2 liegen. Deshalb wird zur Varianzabschätzung angenommen, daß der tatsächliche Waldanteil p_2 in dem Intervall [0.1, 0.3] liegt.

Im Teilgebiet „sicherer“ Nichtwald, das nach Abschnitt 3 auf einen prozentualen Flächenanteil von 58% des Bundesgebietes geschätzt wird, kann die Stichprobendichte in der zweiten Phase wesentlich verringert werden. Da in dem Stratum mit einem geringen Waldanteil und daher mit einer geringen Varianz bei der Waldflächenschätzung zu rechnen ist, wird hier eine Stichprobenverteilung gemäß dem 5,66 km x 5,66 km-Gitternetz vorgeschlagen ($v_3 = 1/32$). Das entspricht einem Stichprobenumfang von

$$n_3 = \frac{0.58 \cdot 357\ 716}{32} = 6\ 484.$$

Der voraussichtliche Waldanteil p_3 wird in diesem Teilgebiet im Intervall [0, 0.1] liegen (s. Abschnitt 3). Insgesamt ist somit die Wertetabelle (Tab. 2) ermittelt worden.

Zur Abschätzung des prozentualen Standardfehlers $S_{\bar{p}\%}$ des mittleren Waldanteils p , der im Bundesgebiet den Wert $p = 0.3$ besitzt [BICK und DAHM 1992, BML 1994] wird

$$\text{Var}(\bar{p}) \approx \sum_{h=1}^3 W_h \frac{n_h \text{Var}(\bar{p}_h)}{m v_h} + \frac{1}{m} \sum_{h=1}^3 W_h (p_h - p)^2 \quad (2)$$

verwendet [COCHRAN 1977, S. 330, Gleichung 12.14, ohne Endlichkeitskorrektur]. Hierbei ist

$$\text{Var}(\bar{p}_h) = \frac{p_h(1-p_h)}{n_h}$$

die Varianz des geschätzten Waldanteils \bar{p}_h im Teil-

Tab. 2: Eingangsgrößen zur Varianzabschätzung des Waldanteils p im Inventurgebiet; zur Herleitung der W_h s. Abschnitt 3.

Teilgebiet	Flächenanteil W_h	Waldanteil p_h	Stichprobenumfang in der 2. Phase n_h	Aufnahmeanteil in der 2. Phase v_h
„sicherer“ Wald	0.27	[0.9, 1]	12073	1/8
Überlappungsbereich	0.15	[0.9, 0.3]	6707	1/8
„sicherer“ Nichtwald	0.58	[0, 0.1]	6484	1/32

gebiet h (s. Formel 1). Eine obere Abschätzung für $S_{p\%}$ kann numerisch ermittelt werden. Hierzu hat der Rechner die Wertebereiche der p_h (s. Tab. 2) mit einer Schrittweite von $S = 0.001$ durchlaufen und hat an den Punkten, an denen

$$W_1 p_1 + W_2 p_2 + W_3 p_3 = 0.3$$

gilt, den Wert von

$$|S_{p\%}| = \frac{\sqrt{\text{Var}(\hat{p})} \cdot 100}{p}$$

ermittelt. Das Maximum, das bei dieser Auswertung auftritt, beträgt $|S_{p\%}| = 0.71$ und liegt an der Stelle $p_1^* = 0.904$, $p_2^* = 0.106$ und $p_3^* = 0.069$. Daraus folgt für den erwarteten Standardfehler $S_{p\%}$:

$$|S_{p\%}| \leq 0,71\% \text{ von } p = 0.3.$$

Hiermit liegt bei insgesamt 25 264 Stichprobenpunkten in der zweiten Phase die Obergrenze des zu erwartenden Standardfehlers bei der Schätzung der Waldfläche deutlich unter der in den Inventurzielen genannten Ein-Prozent-Marke. Eine weitere Absenkung des Stichprobenumfangs ist hier aber nicht möglich, da sonst die geforderten Schätzgenauigkeiten für Untergliederungen des Waldes nicht immer eingehalten werden können.

Auf eine ähnliche Weise wie für den Gesamtwald läßt sich auch zeigen [DAHM 1995], daß der Stichprobenfehler in untergeordneten Befundeinheiten den für die BWI 1986–1990 formulierten Inventurzielen entspricht. So wird für die Fläche des Staatswaldes (Bundes- und Landeswald), der mit einem Flächenanteil von 34 % am Gesamtwald die Obergrenze für Auswertungseinheiten innerhalb der Waldfläche darstellt, ein Stichprobenfehler von maximal 1,6 % erwartet. Für die Waldfläche des Saarlandes, die mit etwa 80 000 ha die kleinste Auswertungseinheit darstellt, für die auf Bundesebene Auswertungsergebnisse hergeleitet werden sollen, wird der Standardfehler voraussichtlich höchstens 7,9 % betragen. Den Erwartungen zufolge unterschreiten diese Stichprobenfehler die bei BWI erreichte Genauigkeit um etwa 30 % [BICK und DAHM 1992].

8. Kostenabschätzung

In der ersten Phase, in der eine Stratifizierung nach Wald und Nichtwald vorgesehen ist, sollen Daten mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen erhoben werden. Für den hierbei entstehenden Arbeitsaufwand ist ein Kostenvoranschlag bei einer Privatfirma, die auf derartige Auswertungen spezialisiert sind, eingeholt worden. Bei der Preiskalkulation

wurde von insgesamt 35 Landsat-5-TM-Szenen ausgegangen, die benötigt werden, um das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland flächendeckend zu erfassen. Für den Ankauf einer Szene wird zur Zeit von einem Preis in Höhe von 7730,- DM ausgegangen (ungünstigster Fall). Somit entstehen bei der Datenbeschaffung, wenn alle Szenen vollständig gekauft werden müssen, Kosten in Höhe von 270 550,- DM. Weiterhin werden für das Einlesen der digitalen Daten, die geometrische Einpassung in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem sowie für radiometrische Korrekturen der 35 Szenen 140 000,- DM veranschlagt. Die Maximum-Likelihood-Klassifizierung zur Unterscheidung von Wald und Nichtwald verursacht voraussichtlich Kosten von 203 000,- DM. Für die automatische Auswertung der Satellitenaufzeichnungen an den Schnittpunkten des 1 km x 1 km-Gitternetzes ist zur Zeit keine Software vorhanden. Die Entwicklung entsprechender Module wird in der Kostenplanung mit 25 000,- DM berücksichtigt. Die Kosten für die Auswertung aller 35 Szenen belaufen sich dann auf 70 000,- DM. Zusammenfassend ergeben sich für die Datenerhebung in der ersten Phase nachstehende Nettokosten (Stand von 1994):

Ankauf von 35 Landsat-5-TM-Szenen:	270 550,- DM
Einlesen, geometrische und radiometrische Aufbereitung:	140 000,- DM
Maximum-Likelihood-Klassifizierung:	203 000,- DM
Entwicklung spezieller Auswertungs-Software:	25 000,- DM
Auswertung an Gitternetzpunkten:	70 000,- DM
Gesamt:	688 550,- DM

Die Kosten der Datenerhebung in der zweiten Phase entsprechen im wesentlichen der Traktivklärung bei der BWI 1986–1990.

9. Diskussion

Der Stichprobenumfang bei der rechnergestützten Auswertung der Satellitenaufzeichnungen kann nahezu ohne Mehrkosten erhöht, beispielsweise verdoppelt werden. In dem Zusammenhang muß untersucht werden, inwieweit sich durch einen höheren Stichprobenumfang in der ersten Phase die Genauigkeit bei den Flächenschätzungen steigert.

Der Varianzanteil

$$\sum_{h=1}^3 W_h \frac{n_h \text{Var}(\hat{p}_h)}{m v_h}$$

aus Gleichung (2) hat an der Stelle (p_1^* , p_2^* , p_3^*), an der der prozentuale Stichprobenfehler sein Maximum annimmt, den Wert

$$\sum_{h=1}^3 W_h \frac{n_h \text{Var}(\hat{p}_h^*)}{m v_h} = 4.17 \cdot 10^{-6}.$$

Er ist damit elfmal größer, als die zweite Varianzkomponente in Gleichung (2), die an dieser Stelle den Wert

$$\frac{1}{n} \sum_{h=1}^3 W_h (p_h^* - p)^2 = 0.38 \cdot 10^{-6}$$

besitzt. Da aber nur der letztere Anteil, der von Streuung der Waldanteile zwischen den Teilgebieten verursacht wird, durch den Stichprobenumfang m in der ersten Phase beeinflusst werden kann, steigert eine höhere Anzahl von Stichprobenpunkten auf den Satellitenbildern die Schätzgenauigkeit nur unwesentlich. Zudem begrenzt die Lagegenauigkeit der Bildpixel gegenüber dem Gauß-Krüger-Koordinatensystem die Erhöhung des Stichprobenumfangs. Mit einer mittleren Abweichung von ± 30 m [KEIL u. a. 1990] ist bei Stichprobenpunkten, deren Abstand weit unter 1000 m liegt, die eindeutige Identifizierung im Gelände nicht mehr sichergestellt. Wenn in Zukunft Fernerkundungsdaten besserer Qualität zu vergleichbaren Kosten vorliegen, muß der Stichprobenumfang in der ersten Phase überdacht werden. Denn mit einer höheren Trefferquote bei der Wald-/Nichtwaldzuordnung verringert sich auch die Varianz innerhalb der Teilgebiete, der Einfluß des Stichprobenumfangs in der ersten Phase an der Gesamtvarianz der Flächenschätzung steigt wieder.

Weiterhin soll erörtert werden, welcher Vorteil durch die Vorstratifizierung mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen gegenüber einer einphasigen Erhebung entsteht. Um Klarheit zu gewinnen, wird untersucht, welcher Stichprobenumfang bei der einphasigen Erhebung benötigt wird, um die gleiche Genauigkeit wie bei dem zweiphasigen System zu erzielen. Bei der einphasigen Erhebung ergibt sich der notwendige Stichprobenumfang $n(V^*)$ bei vorgegebener Varianz V^* nach Gleichung 1 aus

$$n(V^*) = \frac{p(p-1)}{V^*}$$

Das heißt, bei einem Waldanteil im Bundesgebiet von 0.3 und einem geforderten Standardfehler von $S_{p\%} = 0,71\%$ bzw. $V^* = S_p^2 = 4.55 \cdot 10^{-6}$ gilt

$$n(4,55 \cdot 10^{-6}) = 46 \cdot 123.$$

Dies sind über 20 000 Stichprobenpunkte mehr, als bei einer Vorstratifizierung mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen anfallen würden (s. Abschnitt 7). Diese Mehrarbeit, die in den Bereich der Landesforstverwaltungen fällt, würde zu keiner Steigerung der Genauigkeit gegenüber dem vorgeschlagenen zweiphasigen Stichprobenplan führen.

Referenzen:

- BARWINSKI, K.; KICKBUSCH, W. u. STEINBORN W.: Konzept für eine operationelle Nutzung der MOMS-02-Daten bei einem Langzeit-Wiederflug nach 1994. Geo-Informationssysteme, 6 (1993), 1, S. 23–28.
- BICK, U. u. DAHM, S.: Bundeswaldinventur 1986–1990. Inventurbericht und Übersichtstabellen für das Bundesgebiet. Band I, Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1992, 118 S.
- BODMER, H.-C.: Untersuchung zur forstlichen Bestandskartierung mit Hilfe von Satellitenbildern. Diss. Nr. 10 080, Zürich: Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum der ETH Zürich, 1993, 160 S.
- BWI-Instruktion zur Trakttaufnahme. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1996, 58 S.
- COCHRAN, W. G.: Sampling techniques. New York: John Wiley & Sons, 1977, 428 S.
- DAHM, S.: Bundeswaldinventur – Auswertungsmodelle und Vorschläge zur Effektivitätssteigerung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft, Hamburg, 180, (1995), S. 1–142.
- HEUPEL, G. M.: Zur Entwicklung einer Forstinventur auf Landesebene auf der Basis von permanenten Probekreisen am Beispiel der Landesforstinventur des Saarlandes. Diss. Universität Göttingen, 1994, 307 S.
- HUSS, J. (Hrsg.): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Karlsruhe. Herbert Wichmann Verlag, 1984, 406 S.
- KEIL, M.; SCHARDT, M.; SCHUREK, A. u. WINTER, R.: Auswertung von Satellitenbildern. In: Abschlußbericht zur Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung. Hrsg.: M. Keil u. H.-H. Voß, DLR-Oberpfaffenhofen, 1990, S. 71–141.
- SCHARDT, M.: Verwendbarkeit von Thematic Mapper Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. DLR-B-90-4, Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft, Oberpfaffenhofen (1990), S. 1–200.
- SCHWENKE, T.-K.: Rechtsgrundlagen für die Bundeswaldinventur. Allgemeine Forstzeitschrift, München 41 (1986), 32, S. 785–787.
- SPELSBERG, G. u. WESSELS, W.: Landeswaldinventur Nordrhein-Westfalen. Allgemeine Forstzeitschrift München 49 (1994), 23, S. 1292–1293.
- DE VRIES, P. G.: Sampling theory for forest inventory. Berlin: Springer Verlag, 1986, 398 S.
- ZÖHRER, F., SCHADE, J. u. LENNERTZ, R.: Die Genauigkeit der im Rahmen der Bundeswaldinventur auf Stichprobenbasis zu ermittelnden Aussagen in einzelnen Wirtschaftsregionen und je Bundesland. BWI-Bericht Feldkirchen 3 (1983), S. 1–91.